



دانشکده مهندسی مکانیک

رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید

بررسی میزان برگشت فنری در شکل‌دهی مقاطع ناودانی شکل از ورق‌های فیبر فلزی

نگارنده: سهیل کی پور

استاد راهنما

دکتر مهدی گردویی

شهریور ۱۳۹۵

تعهد نامه

اینجانب **سهیل کی پور** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی میزان برگشت فتری در شکل دهی مقاطع ناودانی شکل از ورق های فیبر فلزی تحت راهنمایی دکتر مهدی گردویی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

ورق‌های فیبر فلزی یکی از پرکاربردترین کامپوزیتها می‌باشد که شامل چند لایه فلز و فیبر تقویت‌شده است. این لایه‌ها توسط یک لایه واسط رزین (اپوکسی یا پلی‌یورتان) به هم متصل می‌شود. در این پژوهش، مطالعه تجربی و عددی برگشت‌فتری ورق فیبر فلزی در خم‌کاری کانال ناودانی شکل مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا، دو نوع ورق FML با رویه فلزی از جنس AA2024-T3 و AA1050-O و فیبر شیشه تک‌جهته و رزین پلی‌یورتان توسط قالب پرس گرم در دمای 170°C و فشار 10 bar ساخته شد. نمونه‌ها بر اساس لایه‌چینی متفاوت رویه فلز و فیبر تقویت‌کننده در دو جهت 0 و 90 درجه ساخته و فرآیند خم‌کاری کانال اجرا شد. اثر پارامترهایی از قبیل لایه‌چینی ورق‌ها، عمق کانال و ضخامت هسته بر زاویه برگشت‌فتری محصول در ناحیه افقی و عمودی محصول مورد مطالعه قرار گرفت. در بخش عددی، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس به بررسی پارامترهایی مانند توزیع ضخامت در FML و کرنش مومسان موثر در رویه فلزی AA2024-T3 و همچنین میزان برگشت‌فتری FML با رویه فلزی AA2024-T3 بر اساس لایه‌چینی پرداخته شد. در این بخش رویه فلزی از نوع کشسان-مومسان با مدل ناهمسانگردی هیل درجه دو و هسته مرکزی نیز به صورت ماده الاستیک خطی با ناهمسانگردی اورتوتروپیک مدل شد. نتایج خم‌کاری FML با فیبر در راستای طولی نشان داد چرخش 90 درجه‌ای ورق بالا و پایین بر برگشت‌فتری تاثیرگذار است، در حالی که در خم‌کاری FML با فیبر عرضی این چرخش تاثیر چندانی ندارد. همچنین اندازه برگشت‌فتری برای ورق FML با رویه AA1050-O به مقدار قابل توجهی کمتر از AA2024-T3 شده است. میزان برگشت‌فتری در ناحیه عمودی با افزایش ضخامت نهایی، با یک شیب ملایم کاهش یافته و در ناحیه افقی در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. مقایسه هندسه ورق FML بعد از باربرداری در دو حالت عددی و تجربی حاکی از دقت مطلوب شبیه‌سازی فرآیند می‌باشد.

واژگان کلیدی: ورق فیبر فلزی، برگشت‌فتری، خم ناودانی شکل، ناهمسانگردی مومسان، ورق اورتوتروپیک.

مقاله مستخرج از پایان نامه

Keipour S., Gerdooei M., Mazinanian H., Saadatfard A., “**Investigation of Anisotropy Effect on Springback of Fiber Metal Laminate in Hat-shaped Bendin**”, X-Mech 2016, Tehran, Iran.

تقدیم‌نامه

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می نمایم به:
محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم به خاطر همه ی تلاشهای محبت آمیز ی که در دوران مختلف زندگی ام
انجام داده اند و بامهربانی چگونه زیستن را به من آموخته اند. به استادان فرزانه و فرهیخته ای که در راه کسب
علم و معرفت مرا یاری نمودند . به آنان که در راه کسب دانش راهنمایم بودند و به آنان که نفس خیرشان و
دعای روح پرورشان بدرقه ی راهم بود.
باشد که این پایان نامه قدمی کوچک برای اعتلای ایران عزیزم بردارد.

سپاس‌گزاری

از پدر و مادر عزیزم...این دو معلم بزرگوالم... که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند و در تمام عرصه‌های زندگی یار و یآوری بی‌چشم‌داشت برای من بوده‌اند؛
از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر مهدی گردویی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی،
از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده گرفتند؛
و از دوستان عزیزم که همواره پشتیبان من بوده و هستند؛
باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید .

فهرست عنوان‌ها

ت	چکیده
ج	تقدیم‌نامه
ح	سپاس‌گزاری
خ	فهرست عنوان‌ها
ر	فهرست شکل‌ها
ش	فهرست جدول‌ها
ص	فهرست نشانه‌ها
۱	فصل ۱ مقدمه
۲	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- تاریخچه
۴	۳-۱- معرفی پایان‌نامه
۵	فصل ۲ ورق فیبر فلزی
۶	۱-۲- کامپوزیت
۷	۲-۲- انواع کامپوزیت
۷	۱-۲-۲ کامپوزیت فلزی
۸	۲-۲-۲ کامپوزیت سرامیکی
۸	۳-۲-۲ کامپوزیت پلیمری
۸	۳-۲- طبقه‌بندی کامپوزیت‌ها بر اساس فاز تقویت‌کننده
۹	۱-۳-۲ تقویت‌کننده لایه‌ای
۹	۲-۳-۲ تقویت‌کننده ذره‌ای
۱۰	۳-۳-۲ تقویت‌کننده الیافی
۱۰	۴-۳-۲ تقویت‌کننده ورقه‌ای
۱۰	۵-۳-۲ تقویت‌کننده حجمی
۱۱	۴-۲- عوامل مؤثر بر خواص مکانیکی کامپوزیت
۱۲	۵-۲- روش ساخت کامپوزیت
۱۲	۱-۵-۲ روش لایه‌چینی دستی
۱۳	۲-۵-۲ روش رشته‌پیچی

۶-۲- ورق فیبر فلزی	۱۴
۷-۲- طبقه‌بندی ورق فیبر فلزی	۱۵
۱-۷-۲ ورق‌های فیبر فلزی با رویه‌ی آلومینیوم	۱۷
۲-۷-۲ ورق‌های فیبر فلزی با رویه‌ی آلیاژ غیرآلومینیومی	۱۸
۸-۲- شکل‌پذیری ورق فیبر فلزی	۱۸
۹-۲- خاصیت پل‌زنی ورق فیبر فلزی	۱۹
۱۰-۲- ناهمسانگردی الاستیک در ورق‌های تقویت‌شده با الیاف [۱۱]	۲۰
۱۱-۲- پیشینه تحقیق	۲۳

فصل ۳ مواد و روش تحقیق: تجربی و عددی ۲۷

۱-۳- معرفی مواد لازم در ساخت ورق فیبر فلزی	۲۸
۱-۱-۳ ورق فلزی	۲۸
۲-۱-۳ هسته کامپوزیتی	۲۹
۲-۳- روش ساخت ورق فیبر فلزی	۳۰
۱-۲-۳ مواد	۳۱
۲-۲-۳ آماده‌سازی سطح آلومینیوم	۳۲
۳-۲-۳ قالب پرس گرم هیدرولیکی ۱۰ تن	۳۳
۴-۲-۳ ساخت ورق پلی‌یورتان	۳۴
۵-۲-۳ ساخت ورق فیبر فلزی	۳۵
۳-۳- خم‌کاری ورق فیبر فلزی	۳۵
۱-۳-۳ قالب خم با مقطع ناودانی شکل	۳۶
۲-۳-۳ برگشت‌فتری	۳۷
۴-۳- طراحی آزمون‌های تجربی	۳۸
۱-۴-۳ سنجش عمق بیشینه کانال	۳۸
۲-۴-۳ سعی و خطای تجربی برای دستیابی به شرایط مطلوب ساخت FML	۳۸
۵-۳- شبیه‌سازی المان محدود فرآیند خم‌کاری	۳۹
۱-۵-۳ هندسه فرآیند	۳۹
۲-۵-۳ مراحل شبیه‌سازی و مدل‌سازی فرآیند	۴۱
۳-۵-۳ شبکه‌بندی	۴۲
۴-۵-۳ مراحل شکل‌دهی	۴۲

فصل ۴ نتایج و بحث ۴۳

۱-۴- نتایج تجربی	۴۴
۱-۱-۴ نتایج آزمون کشش تک محوره	۴۴

۴۷	۲-۱-۴ سعی و خطای تجربی برای دستیابی به محصول سالم
۵۲	۳-۱-۴ اثر لایه چینی بر برگشت فبری در ورق فیبر فلزی با رویه AA2024-T3
۵۴	۴-۱-۴ اثر لایه چینی بر برگشت فبری در ورق فیبر فلزی با رویه آلومینیوم AA1050-O
۵۶	۵-۱-۴ اثر عمق کانال بر برگشت فبری در ورق فیبر فلزی با رویه AA1050-O
۵۸	۶-۱-۴ اثر ضخامت هسته بر برگشت فبری در ورق فیبر فلزی با رویه AA2024-T3
۶۱	۲-۲-۴ نتایج تحلیل المان محدود
۶۱	۱-۲-۴ ارائه هندسه خم و برگشت فبری FML با رویه AA2024-T3 در چندین مرحله
۶۲	۲-۲-۴ توزیع ضخامت
۶۳	۳-۲-۴ توزیع کرنش موثر پلاستیک در شکل دهی و برگشت فبری
۶۵	فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادها
۶۶	۱-۵-۱ نتیجه گیری
۶۷	۲-۵-۲ پیشنهادها
۶۹	منبع ها

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: ورق فیبر فلزی در گذر زمان ۳
- شکل ۱-۲: تقسیم‌بندی مواد کامپوزیت ۷
- شکل ۲-۲: طبقه‌بندی کامپوزیت‌ها بر اساس فاز تقویت‌کننده ۹
- شکل ۳-۲: انواع جهت‌های فیبر تجاری ۱۱
- شکل ۴-۲: روش لایه‌چینی برای ساخت FML ۱۳
- شکل ۵-۲: روش رشته‌پیچی ۱۴
- شکل ۶-۲: نمونه ورق فیبر فلزی ۱۵
- شکل ۷-۲: طبقه‌بندی ورق‌های فیبر فلزی ۱۵
- شکل ۸-۲: پل‌زنی بر سر راه ترک در FML [۱۶] ۲۰
- شکل ۹-۲: بارگذاری کششی و برشی یک کامپوزیت الیافی تک‌جهته ۲۱
- شکل ۱-۳: نمونه‌های ورق آلومینیومی برای آزمون کشش ۲۹
- شکل ۲-۳: نمونه‌های هسته شامل پلی‌یورتان تقویت‌شده با فیبر شیشه‌گرید E برای آزمون کشش ۳۰
- شکل ۳-۳: فیبر شیشه تک‌جهته با گرید E ۳۱
- شکل ۴-۳: گرانول پلی‌یورتان با سختی ۶۵ شور آ ۳۲
- شکل ۵-۳: قالب پرس گرم هیدرولیکی ۳۳
- شکل ۶-۳: اجزاء قالب پرس گرم ۳۴
- شکل ۷-۳: لایه پلی‌یورتان ساخته شده با ضخامت ۰/۶ mm ۳۵
- شکل ۸-۳: ورق FML ۲×۱ ساخته شده در این پژوهش ۳۵
- شکل ۹-۳: طرحواره قالب خم با مقطع ناودانی شکل ۳۶
- شکل ۱۰-۳: قالب خم با مقطع ناودانی شکل ۳۷
- شکل ۱۱-۳: جهت مثبت قراردادی زوایای برگشت‌فتری افقی و عمودی در خم ناودانی شکل به‌صورت شماتیک ۳۷

- شکل ۳-۱۲: قیدها و شرایط مرزی اعمال شده برای شبیه‌سازی (ابعاد به میلیمتر است)، ۴۰
- شکل ۳-۱۳: ورق فیبر فلزی شبیه‌سازی شده ۴۱
- شکل ۳-۱۴: اندازه جابجایی سنبه با اعمال دامنه گام هموار در بارگذاری ۴۲
- شکل ۴-۱: نمودار تنش-کرنش مهندسی ورق AA2024-T3 ۴۴
- شکل ۴-۲: نمودار تنش-کرنش مهندسی ورق AA1050-O [۲۸] ۴۵
- شکل ۴-۳: نمودار تنش-کرنش مهندسی هسته کامپوزیتی ۴۶
- شکل ۴-۴: لایه پلی‌یورتان تهیه شده با ضخامت ۰/۶ mm در دماهای مختلف ۴۷
- شکل ۴-۵: ناحیه‌های تقسیم‌بندی شده برای بررسی جدایش ۴۸
- شکل ۴-۶: نمونه‌های خم شده FML در عمق‌های مختلف با رویه (الف) AA1050-O، (ب) AA2024-T3 ۴۸
- شکل ۴-۷: نمونه‌های خم شده FML با شرایط ساخت مختلف، (الف) با رویه AA1050-O، (ب) با رویه AA2024-T3 ۵۰
- شکل ۴-۸: نمونه‌های خم شده FML با رویه AA2024-T3 بر اساس لایه‌چینی ۵۳
- شکل ۴-۹: نمودار میله‌ای اندازه‌ی برگشت‌فتری در FML با رویه AA2024-T3 بر حسب لایه‌چینی ۵۴
- شکل ۴-۱۰: نمونه‌های خم شده FML با رویه AA1050-O بر اساس لایه‌چینی مختلف ۵۵
- شکل ۴-۱۱: نمودار میله‌ای میزان برگشت‌فتری در FML با رویه AA1050-O بر حسب لایه‌چینی ۵۶
- شکل ۴-۱۲: نمونه خم شده FML با رویه AA1050-O با عمق کانال ۲۰ mm با لایه‌چینی مختلف ۵۷
- شکل ۴-۱۳: نمودار میله‌ای میزان برگشت‌فتری FML با رویه AA1050-O با عمق کانال ۲۰ mm ۵۸
- (نمونه‌های C) و ۲۵ mm (نمونه‌های B) ۵۸
- شکل ۴-۱۴: نمونه خم شده FML با رویه آلومینیوم AA2024-T3 با ضخامت هسته متفاوت و ضخامت ورق ثابت، $tf1=1/5$ mm، $tf2=1/6$ mm، $tf3=1/8$ mm، $tf4=2/1$ mm ۵۹
- شکل ۴-۱۵: نمودار اندازه برگشت‌فتری در FML با رویه آلومینیوم AA2024-T3 بر اساس ضخامت نهایی ۶۰
- شکل ۴-۱۶: مراحل بارگذاری و باربرداری FML با رویه AA2024-T3 و با $tc=0/48$ mm، $tm=0/66$ mm ۶۱
- لایه‌چینی ۰/۰/۰ ۶۱

- شکل ۴-۱۷: مقایسه برگشت‌فتری ورق FML با خم ناودانی شکل در حالت عددی و تجربی با لایه‌چینی
۰/۰/۰ ۶۱
- شکل ۴-۱۸: مقایسه برگشت‌فتری ورق FML با خم ناودانی شکل در حالت عددی و تجربی با لایه‌چینی
۰/۹۰/۰ ۶۲
- شکل ۴-۱۹: توزیع ضخامت لایه AA2024-T3 و هسته کامپوزیتی با $tc0=0/48$ mm, $tm0=0/66$ mm و
لایه‌چینی ۰/۰/۰ ۶۲
- شکل ۴-۲۰: توزیع ضخامت نهایی FML در حالت تجربی و عددی با $tf0=1/8$ mm ۶۳
- شکل ۴-۲۱: توزیع کرنش موثر رویه AA2024-T3 در مدل‌سازی شکل‌دهی و برگشت‌فتری نمونه با ضخامت
۱/۸ mm و لایه‌چینی ۰/۰/۰ ۶۴

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۲: فیبرهای تجاری موجود در بازار [۱۱].....	۱۶
جدول ۲-۲: انواع گرید آرال‌های موجود.....	۱۷
جدول ۳-۲: انواع گریدهای گلاره [۱۵].....	۱۸
جدول ۱-۳: خواص عمومی گرانول پلی‌یورتان [۳۲].....	۳۰
جدول ۲-۳: شرایط سعی و خطای تجربی ساخت FML.....	۳۸
جدول ۱-۴: خواص مکانیکی آلومینیوم AA2024-T3.....	۴۵
جدول ۲-۴: ثوابت ناهمسانگردی برای آلومینیوم AA2024-T3.....	۴۶
جدول ۳-۴: خواص مکانیکی هسته کامپوزیتی.....	۴۶
جدول ۴-۴: نتایج خم‌کاری FML در عمق‌های مختلف کانال.....	۴۹
جدول ۵-۴: سعی و خطای تجربی ساخت FML با رویه AA2024-T3.....	۵۱
جدول ۶-۴: سعی و خطای تجربی ساخت FML با رویه AA1050-O.....	۵۲
جدول ۷-۴: نحوه لایه‌چینی و میزان برگشت‌فتری در FML با رویه AA2024-T3.....	۵۳
جدول ۸-۴: نحوه لایه‌چینی و میزان برگشت‌فتری در FML با رویه AA1050-O.....	۵۵
جدول ۹-۴: میزان برگشت‌فتری FML با رویه AA1050-O برای عمق کانال ۲۰ mm و ۲۵ mm و لایه‌چینی مختلف.....	۵۷
جدول ۱۰-۴: نمونه‌های خم شده FML با رویه AA2024-T3 بر اساس ضخامت نهایی.....	۵۹

فهرست نشانه‌ها

σ_y	استحکام تسلیم	V_m	درصد حجمی ماتریس
σ_u	استحکام کششی	V_f	درصد حجمی فیبر
ρ	چگالی	t_f	ضخامت نهایی
R_{ii}	ضریب ناهمسانگردی	t_m	ضخامت رویه فلزی
K	ضریب استحکام	t_c	ضخامت هسته کامپوزیتی
n	توان کرنش سختی	L_0	طول اولیه
D_d	نصف دهانه ماتریس	L_L	طول نهایی در بارگذاری
W_p	نصف عرض سنبه	L_U	طول نهایی در باربرداری
R_d	شعاع ماتریس	H_U	ارتفاع نهایی کانال در باربرداری
R_p	شعاع سنبه	H_L	ارتفاع نهایی کانال در بارگذاری
θ_H	زاویه افقی	E	مدول ینگ
θ_V	زاویه عمودی	G	مدول برشی
		v	ضریب پواسون

فصل ۱ مقدمه

امروزه صنایع هوافضا، نظامی و خودروسازی تمایل به استفاده از مواد جدید و پیشرفته‌ای دارد که علاوه بر وزن سبک و مقاومت بالا، دارای ویژگی‌های خاصی باشد. در سازه‌های هوافضایی مواد کامپوزیتی بعلت برتری‌های مقاومت، سفتی ویژه و عمر خستگی بالا نسبت به مواد معمولی (سنتی) ترجیح داده می‌شود. ورق‌هایی با ویژگی‌های دوگانه از فلز و فیبر توانسته تحولی شگرف در این صنایع به وجود آورد. این نوع مواد با وزن مخصوص پایین، مواد کامپوزیتی با ترکیب خواص برتر فیزیکی و مکانیکی مواد مختلف مورد توجه قرار گرفته است. امروزه تولید و شکل‌دهی ورق‌های چند لایه با توجه به گستردگی استفاده در جهان، در کشورمان احساس می‌شود.

۱-۲- تاریخچه

در طول سه دهه گذشته، تحقیقاتی در مورد مواد سبک وزن انجام شده است که می‌تواند جایگزین آلیاژهای آلومینیوم در سازه‌های هوافضا شود [۱]. برای طراحی یک سازه بهینه، یک ماده جدید که استحکام بالا، چگالی کم و مدول الاستیک بالا با بهبود چقرمگی، مقاومت خوردگی و خواص شکست را ترکیب کند، نیاز است. مواد کامپوزیت تقویت‌شده با فیبر تقریباً تمام این شرایط را به جزء چقرمگی شکست پوشش می‌دهد. در سال ۱۹۷۸، محققان دانشگاه دلف^۱ و آزمایشگاه ملی هوافضا در هلند بر روی بهبود عملکرد خستگی آلیاژهای آلومینیوم کار کردند. بهبود رفتار خستگی در لایه مواد به وسیله معرفی فیبر آرامید^۲ استحکام بالا در داخل لایه‌های چسب به‌دست آمد. نتایج تمام این مطالعات، معرفی آرال^۳ به عنوان اولین ورق فیبر فلزی^۴ در دانشکده مهندسی هوافضا دلف می‌باشد [۲]. در سال ۱۹۸۴، دو اختراع بین‌المللی مورد پذیرش قرار گرفت و تولید آزمایشی چهار نمونه مختلف استاندارد آرال به وسیله شرکت الکوا^۵ بعد از اعتماد به استفاده از این ماده آغاز شد [۳]. بعدها، یک آرال مستحکم‌تر که شامل فیبر کربن به جای فیبر آرامید بود، ورق‌های کارال^۶، در دانشگاه دلف مورد بررسی قرار گرفت [۴]. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که در ورق‌های کارال، شکست فیبر در طول زمان تست خستگی شبیه‌سازی پرواز در سطوح تنش محاسبه شده اتفاق می‌افتد که

1 Delf university

2 Aramid fiber

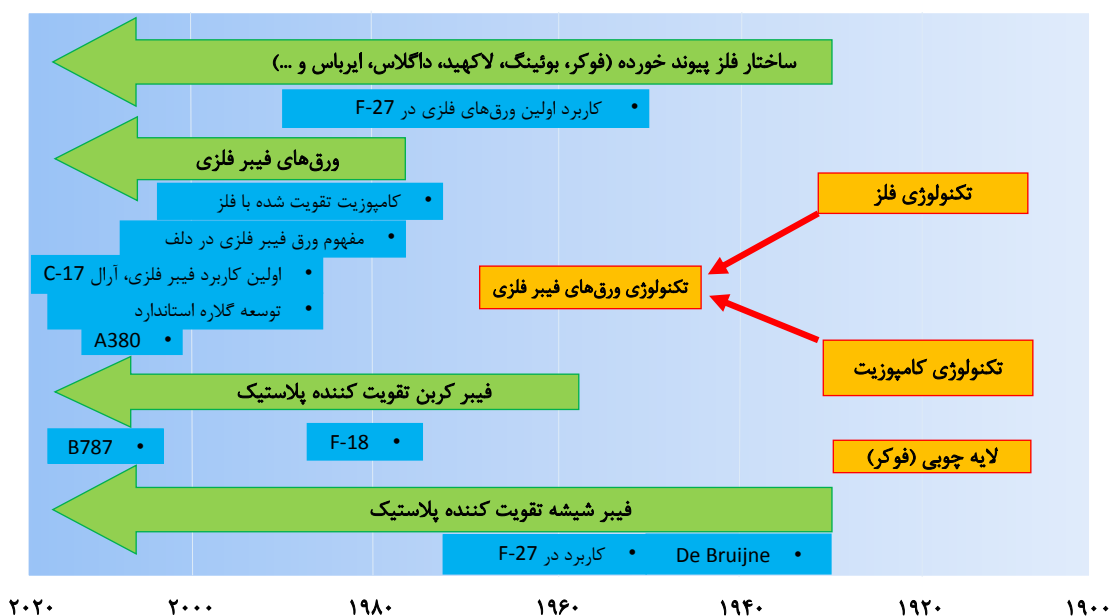
3 ARALL (Aramid Reinforced Aluminum Laminate)

4 Fiber Metal Laminate (FML)

5 Alcoa company

6 CARALL (Carbon Reinforced Aluminum Laminate)

نتیجه عملکرد ضعیف خستگی می‌باشد. کرنش شکست محدود فیبرهای کربن (در حدود ۲٪-۵٪) از ضعف‌های آن می‌باشد. به علت مشکل خوردگی بین فیبرهای کربن و ورق آلومینیوم در محیط مرطوب، تحقیقات بیشتری انجام شد. در سال ۱۹۹۰، تلاش‌هایی برای بهبود ورق‌های آرال انجام شد که فیبر شیشه استحکام بالا را جایگزین فیبر آرامید کرد، گلاره^۱ (شیشه تقویت‌کننده و یا آرال با فیبر شیشه) به صورت موافقی توسعه یافت [۳]. آلومینیوم تقویت شده با شیشه (گلاره) نمونه موفق ورق آلومینیوم آرامید (آرال) است [۴]. شراکت بین آکزو^۲ و الکوآ برای تولید و تجارت گلاره در سال ۱۹۹۰ آغاز شد [۵]. در نهایت، یک مفهوم جدید برای ورق‌های فیبر فلزی به نام ورق‌های به هم متصل‌شده^۳ به وسیله شرکت ورق‌های ساختمانی^۴ در سال ۱۹۹۲ راه اندازی شد. این ورق‌ها به عنوان ورق فیبر فلزی تعریف می‌شوند که در لایه‌های آلومینیوم جدا شده هستند. اندازه ورق‌های به هم متصل‌شده تنها به اندازه کوره بستگی دارد [۳]. در شکل ۱-۱ زمان پیدایش، توسعه و پیشرفت ورق‌های فیبر فلزی مشاهده می‌شود.



شکل ۱-۱: ورق فیبر فلزی در گذر زمان

1 GLARE (Glass Reinforced Aluminum Laminate)

2 AKZO

3 Spliced laminate

4 Structural Laminates Company (SLC)

۱-۳- معرفی پایان نامه

در این پژوهش نحوه تولید ورق‌های FML با شرایط مناسب (دما، فشار و زمان)، طراحی و ساخت قالب پرس گرم هیدرولیکی به منظور ساخت FML و شکل‌دهی آن در قالب خم ناودانی شکل ارائه می‌شود. برای ساخت ورق فیبر فلزی از ورق‌های آلومینیوم AA2024-T3 و AA1050-O، فیبر شیشه تک‌جهته و گرانول پلی‌یورتان استفاده خواهد شد. در این تحقیق، با استفاده از سعی و خطای تجربی، به بهترین شرایط برای ساخت FML سالم دست‌یافته می‌شود. پس از شکل‌دهی ورق FML در قالب خم، ضمن اندازه‌گیری کانتور محصول و مقایسه آن با کانتور هدف، میزان برگشت‌فتری اندازه‌گیری و اثر پارامترهای دخیل در ساخت ورق FML مانند دمای پرسکاری، ضخامت نهایی، عمق کانال و جهت قرارگیری لایه‌ها بر آن مورد سنجش قرار می‌گیرد.

در بخش عددی، تحلیل المان محدود فرآیند خم‌کاری ورق فیبر فلزی با استفاده از روش لایه مجزا و حلگر صریح انجام می‌پذیرد. در این قسمت، هندسه خم، کرنش موثر مومسان و جهت چیدمان لایه‌ها بر برگشت‌فتری نشان داده می‌شود. در نهایت برای یک حالت بهینه، مقایسه بین نتایج عددی و تحلیلی با هدف صحت‌سنجی نتایج عددی صورت خواهد گرفت.

این پایان‌نامه در پنج فصل تدوین شده است که در فصل دوم، به معرفی کامپوزیت‌ها، ورق‌های فیبر فلزی و همچنین پیشینه تحقیق پرداخته خواهد شد. فصل سوم به بررسی تجربی و نحوه ساخت ورق‌های FML، نحوه مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی FML می‌پردازد. مشخصات تجهیزات طراحی‌شده برای آزمایش‌ها، ساخت قالب پرس گرم برای تولید FML، ویژگی‌های مواد و مراحل و شرایط شبیه‌سازی در این فصل شرح داده می‌شود. در ادامه، نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی و تجربی مختلف در فصل چهارم ارائه خواهد شد. همچنین نتیجه‌گیری و پیشنهاد‌های مناسب برای ادامه تحقیق در فصل پنجم ارائه می‌شود.

فصل ۲ ورق فیبر فلزی

امروزه ورق‌های فیبر فلزی به‌طور گسترده در صنایع دفاعی، هوافضا، صنایع دریایی و خودروسازی کاربرد دارد. این مواد به واسطه سفتی و مقاومت ویژه زیاد، عایق نسبی در برابر گرما و صدا، قابلیت ساخت و پایداری مناسب مقبولیت ویژه‌ای پیدا کرده است. از مسائل مهم در این نوع ورق‌ها انتخاب مناسب جنس هسته و رویه‌هاست. جنس هسته می‌تواند از مواد مختلفی مانند لانه زنبوری^۱ آلومینیومی یا کاغذی، انواع اسفنج‌ها^۲، چوب بالسا^۳ یا ورق‌های کرکره‌ای^۴ یا چین‌دار^۵ باشد. رویه‌ها معمولاً از صفحات فلزی نازک یا کامپوزیت‌های الیافی ساخته می‌شوند. رویه‌های^۶ کامپوزیتی موجب افزایش سفتی خمشی در واحد وزن می‌شود و می‌تواند تعداد قطعات را نیز در ساخت کاهش دهد. اما، در استفاده از کامپوزیت‌ها، عوامل محدودکننده‌ای مانند کاهش مقاومت ورق در برابر بارهای عرضی و عوامل محیطی مطرح است. رویه‌های فلزی نیز مقاومت در برابر بارهای عرضی را افزایش می‌دهد، ولی موجب افزایش قابل توجه وزن ورق می‌شود. اما، چند لایه‌های فیبر فلزی با داشتن خواص مکانیکی مناسب که تلفیقی از خواص فلز و کامپوزیت الیافی است، می‌تواند جایگزینی مناسب برای رویه‌های فلزی یا کامپوزیتی باشد.

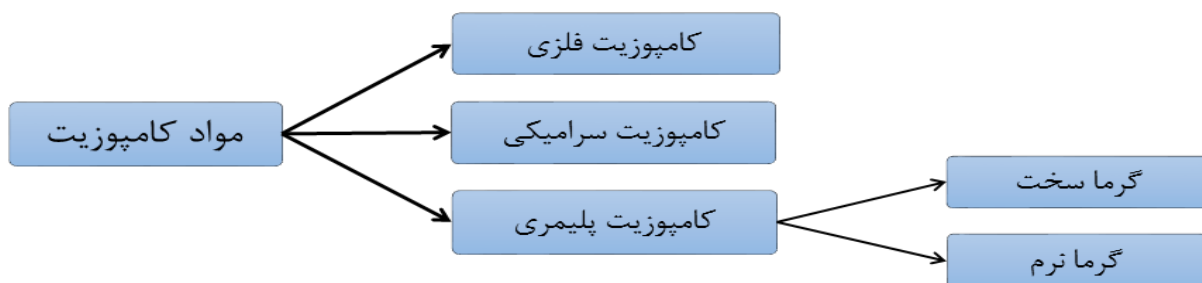
۲-۱- کامپوزیت^۷

کامپوزیت‌ها ترکیب دو یا چند ماده با خواص و فازهای متفاوت است. این مواد دارای یک فاز پایه که تقریباً نرم‌تر و انعطاف‌پذیرتر و یک فاز سخت‌تر است. از ویژگی‌های این نوع مواد می‌توان به انعطاف‌پذیری، مقاومت به خوردگی، استحکام بالا و چگالی کم اشاره کرد. کامپوزیت‌ها در صنایع هوافضا، خودرو، نظامی و ساختمانی کاربرد دارند.

1 Honeycomb
2 Sponge
3 Balsa
4 Roller sheet
5 Corrugated sheet
6 Coat, Top
7 Composite

۲-۲- انواع کامپوزیت

کامپوزیت‌ها را می‌توان بر مبنای نوع مواد زمینه^۱ به سه گروه فلزی^۲، سرامیکی^۳ و پلیمری^۴ تقسیم کرد. که زمینه‌های پلیمری خود به دو دسته گرما نرم^۵ و گرما سخت^۶ تقسیم می‌شوند. در شکل ۱-۲ نحوه تقسیم‌بندی زمینه‌های تشکیل‌دهنده کامپوزیت‌ها آمده است. پلاستیک‌های گرما نرم، مواد پلاستیکی هستند که توسط حرارت به مایع تبدیل می‌شوند، پس از شکل‌گیری و حذف گرما شکل نهایی خود را می‌یابند و هر بار می‌توان آن را ذوب کرده و تغییر شکل داد. پلاستیک‌های گرما سخت، پلاستیک‌هایی هستند که پس از پخت و شکل‌گیری، دیگر نمی‌توان با استفاده از حرارت شکل آنها را تغییر داد. ترموست‌ها دارای سختی بالا، سفتی، مقاومت در برابر حرارت و حلال‌های شیمیایی و مقاومت الکتریکی بالایی هستند [۶، ۷].



شکل ۱-۲: تقسیم‌بندی مواد کامپوزیت

۲-۲-۱ کامپوزیت فلزی

استحکام بالا، چقرمگی شکست و سفتی از جمله خواصی است که موجب گسترش مصارف کامپوزیت‌های زمینه فلزی در مقایسه با کامپوزیت‌های زمینه پلیمری شده است. این مواد نسبت به پلیمرها مقاومت بیشتری در محیط‌های خورنده و درجه حرارت‌های بالا دارند. بیشتر فلزات و آلیاژها می‌توانند به عنوان فاز زمینه در کامپوزیت‌ها استفاده شوند. تیتانیوم، آلومینیوم و منیزیم از جمله فلزات مرسوم است که در کامپوزیت‌های مصرفی در قطعات هواپیما بکار می‌روند. چنانچه کامپوزیت زمینه فلزی با استحکام بالا مورد نیاز باشد، لازم

1 Matrix

2 Metal Matrix Composites (MMC)

3 Ceramic Matrix Composites (CMC)

4 Polymer Matrix Composites (PMC)

5 Thermoplastic

6 Thermoset

است که از تقویت‌کننده‌هایی با مدول بالا استفاده شود. نقطه ذوب، خواص فیزیکی و شیمیایی کامپوزیت‌ها در دماهای مختلف، تعیین‌کننده دمای مناسب برای استفاده از آن‌ها می‌باشد [۶-۸].

۲-۲-۲ کامپوزیت سرامیکی

سرامیک‌ها به عنوان مواد جامدی که پیوندهای یونی^۱ بسیار قوی و در برخی موارد پیوندهای کووالانسی^۲ دارند، شناخته می‌شوند. نقطه ذوب بالا، مقاومت در برابر خوردگی مناسب، پایداری در دمای بالا و استحکام فشاری خوب، باعث شده است که کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی در ساختار قطعاتی که در دمای بالاتر از 1500°C کار می‌کنند، مورد استفاده قرار بگیرند. مدول الاستیسیته بالا و کرنش کششی پایین در اکثر مواد سرامیکی منجر به شکست این قطعات می‌شود، لذا استفاده از تقویت‌کننده‌هایی که استحکام را بهبود ببخشد، لازم به نظر می‌رسد. بدین منظور تقویت‌کننده‌هایی با مدول الاستیسیته بالا توصیه می‌شود. چنانچه سرامیک زمینه، ضریب انبساط حرارتی بالاتری از مواد تقویت‌کننده داشته باشد، این امر منجر به عدم بالا رفتن استحکام در کامپوزیت تولیدی می‌گردد. بنابراین در انتخاب مواد تقویت‌کننده در تولید این نوع کامپوزیت‌ها، علاوه بر مدول الاستیسیته می‌بایست به ضریب انبساط حرارتی نیز توجه شود [۶-۸].

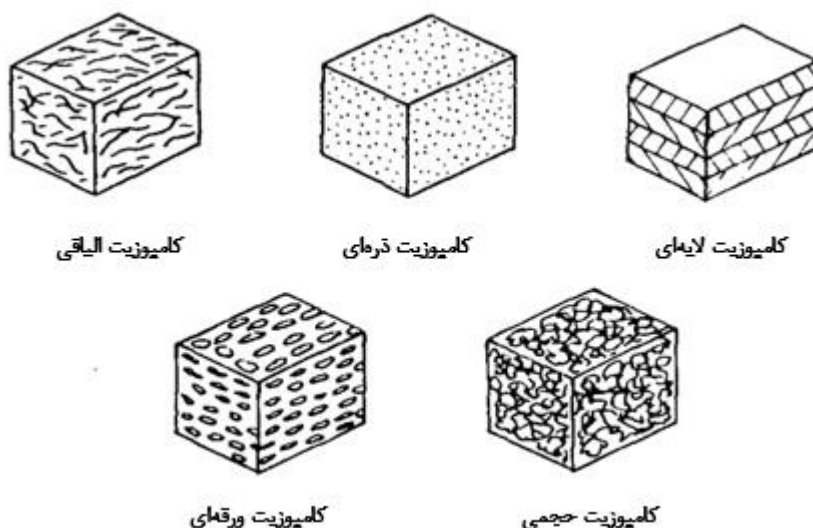
۲-۲-۳ کامپوزیت پلیمری

به دلیل قابلیت شکل‌پذیری آسان، وزن کم و خواص مکانیکی مطلوب، پلیمر به عنوان یک ماده ایده‌آل در زمینه کامپوزیت‌ها به شمار می‌رود. رایج‌ترین زمینه‌های پلیمری، رزین‌های اپوکسی و رزین‌های پلی‌استر می‌باشد. از این رو رزین‌هایی که توانایی کار در دمای بالا را دارند به طور گسترده مورد توجه قرار دارند. چنانچه مواد زمینه از جنس پلاستیک باشد، به این کامپوزیت‌ها، پلاستیک‌های مقاوم شده^۳ نیز گفته می‌شود [۶-۸].

۲-۳- طبقه‌بندی کامپوزیت‌ها بر اساس فاز تقویت‌کننده

کامپوزیت‌ها بر اساس فاز تقویت‌کننده به لایه‌ای، ذره‌ای، الیافی، حجمی و ورقه‌ای تقسیم می‌شود. طبقه‌بندی کامپوزیت‌ها بر اساس فاز تقویت‌کننده در شکل ۲-۲ مشاهده می‌شود.

1 Ionic bonding
2 Covalent bond
3 Plastic reinforced



شکل ۲-۲: طبقه‌بندی کامپوزیت‌ها بر اساس فاز تقویت کننده

۱-۳-۲ تقویت کننده لایه‌ای^۱

تقویت کننده لایه‌ای از لایه‌های مختلف مواد در کنار یکدیگر ساخته شده است. این لایه‌ها معمولاً فلزی، سرامیکی و یا از پلیمرهای تقویت شده هستند که به صورت متناوب در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. سازه لایه‌ای را می‌توان بدون نیاز به فرایندهای ساخت پیچیده تهیه و خواص جالبی از آن‌ها به دست آورد. به عنوان مثال برای ساخت تانک‌ها از سازه‌های لایه‌ای استفاده می‌شود [۷، ۸].

۲-۳-۲ تقویت کننده ذره‌ای^۲

در این نوع کامپوزیت، فاز پراکنده شده از ذرات ریز تشکیل می‌شود. طیف وسیعی از ذرات برای استفاده در کامپوزیت‌ها کاربرد دارد ولی عمده ذرات مورد استفاده در کامپوزیت‌ها، ذرات اکسیدی به خصوص Al_2O_3 و ذرات غیراکسیدی مانند SiC ، TiC ، C ، B و WC است. این ذرات بسیار ارزان‌تر از رشته‌ها هستند و سبب افزایش صلیبیت یا مدول الاستیک ساختار می‌شوند. استفاده از آن‌ها در کامپوزیت‌های فلزی و پلیمری سبب بالا رفتن استحکام و کاهش چقرمگی می‌شود. همچنین ماسه و پودرهای رزینی در دسته تقویت کننده‌های ذره‌ای قرار می‌گیرند [۷، ۸].

1 Laminar reinforced
2 Particle reinforced

۳-۳-۲ تقویت کننده الیافی^۱

فاز تقویت کننده در این مواد رشته‌ای شکل هستند. این دسته از تقویت کننده‌ها بسیار گسترده‌اند و صنعت کامپوزیت‌های پیشرفته بر اساس این تقویت کننده‌های مصنوعی الیافی است. این تقویت کننده‌ها به دو بخش سیم و یا رشته-لیف تقسیم می‌شوند؛ چنانچه این الیاف فلزی باشند به آن سیم و چنانچه سرامیکی یا پلیمری باشند به آن رشته-لیف گفته می‌شود. کاربرد سیم‌ها به علت داشتن چگالی زیاد محدود است. به طور کلی دو نوع سیم در صنعت بیشترین استفاده را دارد که یکی تنگستن و دیگری الیاف کوتاه فولادی‌اند. تنگستن استحکام و مدول الاستیک بالایی داشته و در حجم بالا در صنایع لامپ‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. الیاف فولادی بسیار ارزان و استحکام و مدول الاستیک آن در حد متوسط بوده و در لنت‌های ترمز با توجه به محدود شدن مصرف آزیست، استفاده می‌شود [۷، ۸].

۴-۳-۲ تقویت کننده ورقه‌ای^۲

در این کامپوزیت، فاز پراکنده شده در زمینه از ورقه‌های مسطح ساخته می‌شود. ورقه‌های فلزی در زمینه پلیمری می‌توانند هادی جریان الکتریسیته و حرارت باشند در حالیکه ورقه‌های میکا و شیشه در زمینه پلیمری مقاوم در برابر حرارت و نارسا می‌باشند [۷، ۸].

۵-۳-۲ تقویت کننده حجمی^۳

در این نوع از کامپوزیت‌ها، زمینه یک فاز پیوسته است و فاز تقویت کننده به صورت یک ماده ثانویه درون آن قرار دارد. کامپوزیت‌های سرمته‌ای^۴ جزء این دسته محسوب می‌شوند که دارای ساختار متخلخل و اسفنجی سرامیکی بوده و فلز تقویت کننده درون تخلخل‌های آن وارد شده است. با این کار همان خصوصیات سرامیک‌ها با چقرمگی بیشتر به دست می‌آید. نمونه‌ای دیگر از کامپوزیت‌های حجمی در روتور موتورهای الکتریکی قابل مشاهده است. این روتور می‌بایست مغناطیس شود؛ جنس روتور از گرافیت بوده که ضریب اصطکاک کمی داشته و حین چرخش جریان را منتقل می‌کند. هدایت الکتریکی گرافیت خیلی بالا نبوده پس آن را با تخلخل درست می‌کنند و در آن مقداری مس یا نقره می‌ریزند [۷، ۸].

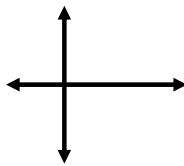
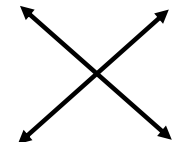
1 Fiber reinforced
2 Flake reinforced
3 Filled reinforced
4 Cermet composite

۴-۲- عوامل مؤثر بر خواص مکانیکی کامپوزیت

(۱) جهت‌گیری الیاف^۱: عامل اصلی در تعیین خواص است. هنگامی که الیاف در امتداد بار قرار داشته باشد تحمل بار بیشتر است. سه نوع تقویت وجود دارد:

- تقویت یک بعدی^۲: تمامی الیاف‌ها در یک راستا قرار گرفته و فضای بین الیاف‌ها کمتر بوده و بیشترین استحکام در راستای الیاف می‌باشد.
- تقویت دو بعدی: این الیاف‌ها در دو جهت معین قرار گرفته و خواص مکانیکی در دو جهت یکسان است.
- تقویت سه بعدی: الیاف کوتاه و منقطع در همه جهات توزیع می‌شود.

شکل ۲-۳ انواع تقویت‌ها را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

نوع استحکام: لایه رشته پیوسته		فیبر تک جهته (یک بعدی)
نوع استحکام: لایه رشته پیوسته، فیبر بافته، رشته بافته		فیبر دو جهته (دو بعدی)
نوع استحکام: لایه قطعه قطعه شده، فیبر سه بعدی، پیوسته		فیبر چند جهته (سه بعدی)

شکل ۲-۳: انواع جهت‌های فیبر تجاری

(۲) طول الیاف: الیاف می‌تواند ممتد یا کوتاه باشد. الیاف بلند خواص بهتر و راندمان بیشتری دارد اما به دلیل دو عامل زیر ممکن است راندمان بهتری نداشته باشد.

- متغیرهای ساخت: تولید الیاف بلند با قطر یکنواخت مشکل است. تغییر یکنواختی باعث ایجاد تمرکز تنش می‌شود.

1 Fiber orientation

2 Unidirectional reinforcement

- تنش‌های حبس شده: در پیچاندن الیاف در قرقره، تنش‌های پسماند در الیاف باقی می‌ماند که در موقع استفاده باعث ایجاد خواص مکانیکی نامطلوب می‌شود.
- ۳) شکل مقطع الیاف: رایج‌ترین مقطع، دایروی است و برای مصارف خاص، دیگر مقاطع نیز کاربرد دارد. اگر از مقطع چند ضلعی استفاده شود، درصد رزین استفاده شده کمتر است.
- ۴) منشاء ساختمانی الیاف: از این منظر الیاف به دو دسته آلی و غیرآلی تقسیم‌بندی می‌شود. الیاف آلی سبک و انرژی را به خوبی جذب می‌کند. از مواد آلی می‌توان سلولز، پلی‌استر و گرافیت را نام برد. الیاف غیرآلی استحکام، صلبیت و مقاومت حرارتی بالایی دارند و از مواد غیرآلی می‌توان به شیشه و سرامیک اشاره کرد.
- ۵) زمینه: در تحمل بار به صورت غیرمستقیم مشارکت دارد. این غیرمستقیم بودن به معنای در جای خود نگه داشتن الیاف، جلوگیری از شکست زودرس و همچنین انعطاف لازم برای انتقال بار به الیاف می‌باشد. ضمن این‌که زمینه خواص غیرمکانیکی مثل خواص خوردگی، حرارتی و یا محیطی را بر عهده دارد. الیاف و زمینه باید به خوبی به هم متصل شوند، به همین دلیل اغلب به یک عامل واسطه نیاز است.

۲-۵- روش ساخت کامپوزیت

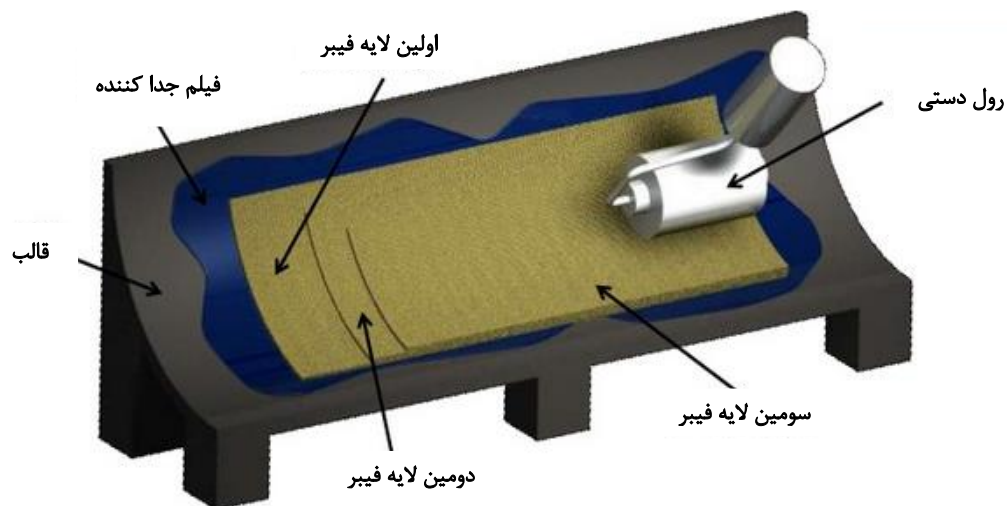
۲-۵-۱ روش لایه‌چینی دستی^۱

برای تولید ورق‌های فیبر فلزی و کامپوزیت از تکنیک روی هم‌چینی^۲ استفاده می‌شود. FML ها دارای ساختار چند لایه می‌باشند که هر لایه کامپوزیت نیز دارای ۲ تا ۴ لایه پیش‌آغشته^۳ است. جهت الیاف نسبت به راستای طولی می‌تواند ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه باشد. در این روش در ابتدا لایه‌ها بر روی هم قرار گرفته و سپس در کوره و در یک دمای مشخص و فشار بالا پخته می‌شوند. برای ساخت کامپوزیت نیز ابتدا قالب ساخته شده و سپس لایه زمینه قرار داده می‌شود. به همین صورت لایه‌های رزین و لایه‌های فیبر بر روی هم قرار می‌گیرد. در ادامه در زیر پرس قرار گرفته تا رزین اضافه خارج شود. سپس با توجه به نوع رزین، در فشار زمان و دمای مناسب در کوره پخته می‌شود. در شکل ۲-۴ چگونگی ساخت یک کامپوزیت FML ارائه شده است.

1 Hand lay-up

2 Lay-up

3 Prepreg

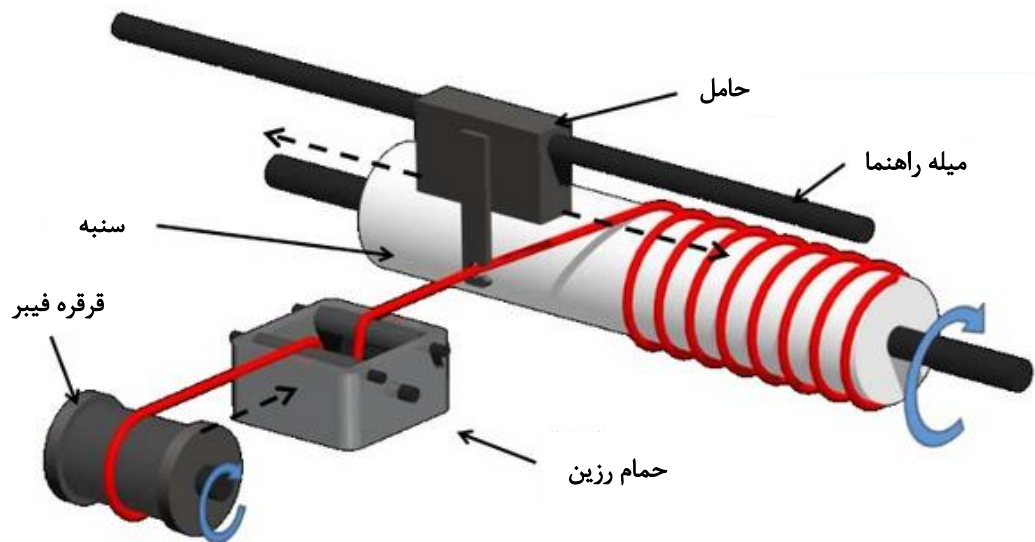


شکل ۲-۴: روش لایه‌چینی برای ساخت FGM

یکی از مشکلات این روش حبس حباب در بین لایه‌ها می‌باشد که هر کدام از این حفره‌ها عامل شروع شکست است. دو روش خلاء و لایه‌چینی با کیسه خلاء برای حل این مشکل مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مزایای این روش این است که اندازه صفحه مستقل از اندازه مواد اصلی، تنها به اندازه محفظه پخت بستگی دارد [۹].

۲-۵-۲ روش رشته‌پیچی^۱

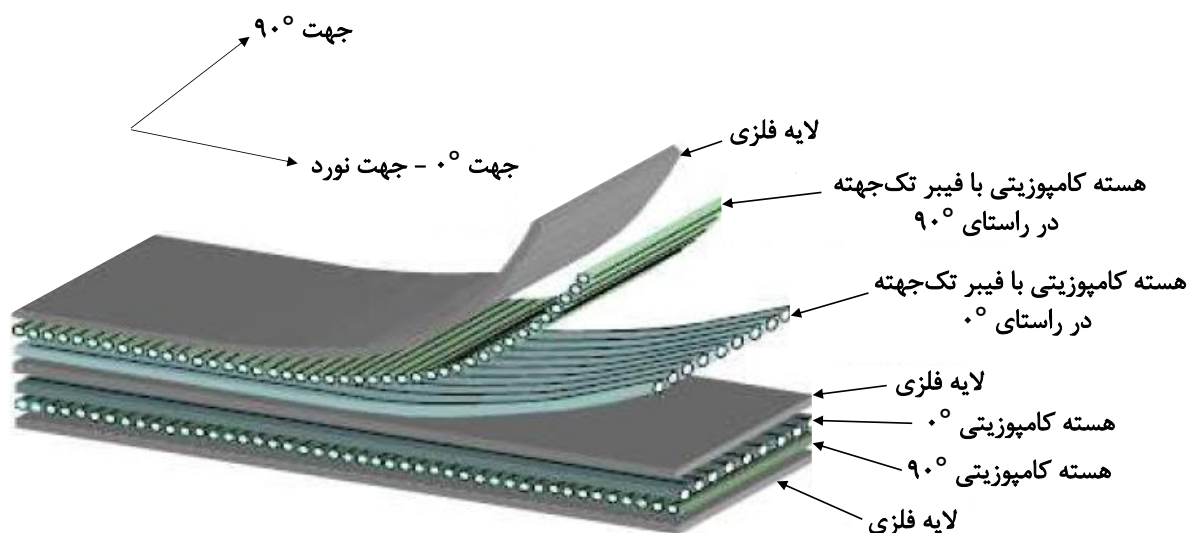
از این روش برای سطوح بسته و در فشار و مقاومت بالا استفاده می‌شود. رشته‌های الیاف از روی قرقره باز شده و بر روی قالبی که به شکل سازه اصلی است بسته می‌شود. خواص مکانیکی در این حالت به زاویه‌ی الیاف بستگی دارد [۹]. شماتیک این روش در شکل ۲-۵ نشان داده شده است.



شکل ۲-۵: روش رشته پیچی

۲-۶- ورق فیبر فلزی

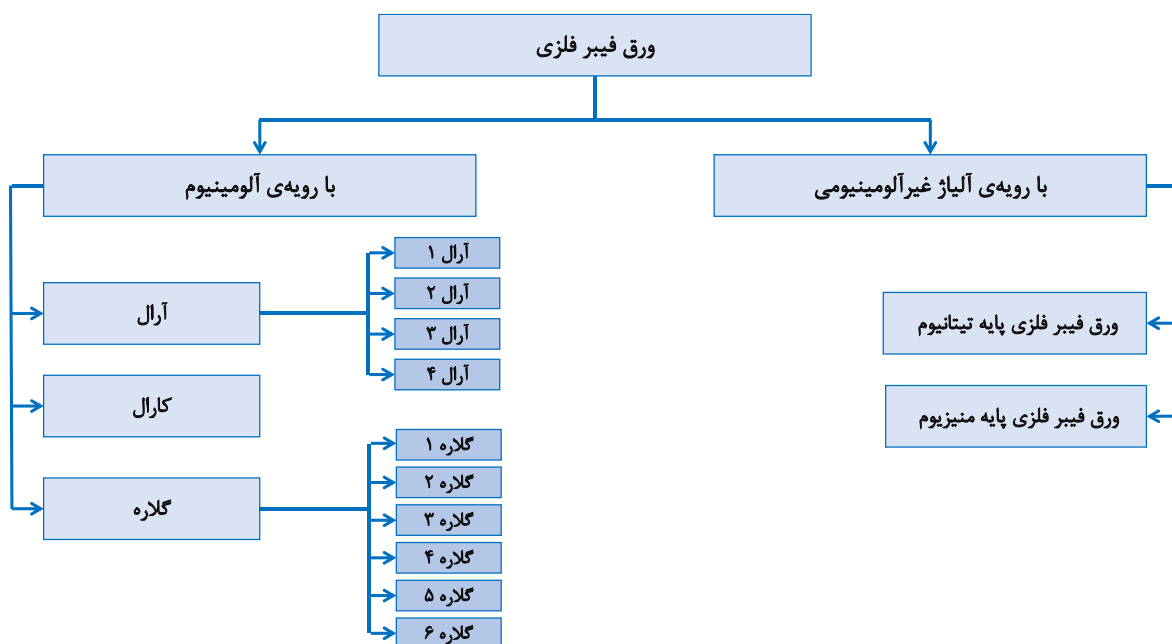
ورق‌های فیبر فلزی از ترکیب یک فلز اصلی و فیبرهای تقویت شده با پلیمر به وجود می‌آیند. این نوع ورق‌ها تقریباً طی ۲۰ تا ۳۰ سال اخیر توسعه یافتند. به علت ویژگی‌های این ورق‌ها، در تولید آنها باید به ویژگی‌های هر دو گروه ماده به کار رفته در آن توجه کرد. وجود فلز در این ورق‌ها باعث بهبود تغییر شکل مومسان آن می‌شود. ورق‌های فیبر فلزی از نظر مکانیکی، شکل‌دهی و ماشینکاری مشابه فلز اصلی بوده در حالی که چگالی کمتری نسبت به آن دارند. در مورد این ورق‌ها دو نکته قابل توجه وجود دارد که یکی تغییر شکل آن بوده و دیگری ساختار لایه‌لایه این ورق‌ها می‌باشد [۱۰]. شکل ۲-۶ نحوه قرارگیری لایه‌ها در یک نمونه FML را نشان می‌دهد. در چیدمان لایه‌ها، لایه فلزی در سه جهت ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای نورد و هسته کامپوزیتی نیز در جهات ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه بر اساس الیاف تک‌جهته قرار می‌گیرند.



شکل ۶-۲: نمونه ورق فیبر فلزی

۷-۲- طبقه‌بندی ورق فیبر فلزی

ورق‌های فیبر فلزی با توجه به فلز پایه به کار رفته به دو دسته مطابق شکل ۷-۲ تقسیم می‌شوند.



شکل ۷-۲: طبقه‌بندی ورق‌های فیبر فلزی

جدول ۱-۲ انواع فیبرهای تجاری موجود در بازار را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۲: فیبرهای تجاری موجود در بازار [۱۱]

Fiber	Density (g/cm ³)	Tensile Modulus (GPa)	Tensile Strenght (MPa)	Strain to Failure (%)	Poisson's Ratio
Glass					
E-glass	2.54	72.4	3.45	4.8	0.2
S-glass	2.49	86.9	4.30	5	0.22
PAN Carbon					
T-300	1.76	231	3.65	1.4	0.2
AS-1	1.80	228	3.10	1.32	
AS-4	1.80	248	4.07	1.65	
T-40	1.81	290	5.65	1.8	
IM-7	1.78	301	5.31	1.81	
HMS-4	1.80	345	2.48	0.7	
GY-70	1.96	483	1.52	0.38	
Pitch Carbon					
P-55	2	380	1.90	0.5	
P-100	2.15	758	2.41	0.32	
Aramid					
Kevlar 49	1.45	131	3.62	2.8	0.35
Kevlar 149	1.47	179	3.45	1.9	
Technora	1.39	70	3	4.6	
Extended chain					
Spectra 900	0.97	117	2.59	3.5	
Spectra 1000	0.97	172	3	2.7	
Boron	2.7	393	3.1	0.79	0.2
SiC					
Monofilament	3.08	400	3.44	0.86	
Nicalon	2.55	196	2.75	1.4	
Al₂O₃					
Nextel 610	3.9	380	3.1		
Nextel 720	3.4	260	2.1		
Al₂O₃-SiO₂					
Fiberfrax	2.73	103	1.03-1.72		

۱-۷-۲ ورق‌های فیبر فلزی با رویه‌ی آلومینیوم

این دسته شامل ورق‌هایی می‌باشد که با فلز پایه آلومینیوم ساخته شده است. با توجه به فیبر مورد استفاده در این نوع ورق‌ها به سه بخش اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند.

- آرال: ورق‌های آلومینیوم تقویت شده با فیبر آرمید می‌باشد. گریدهای آرال موجود در بازار را در جدول ۲-۲ آمده است [۱۲-۱۴].

جدول ۲-۲: انواع گرید آرال‌های موجود

Grade	Alloy	Metal thickness (mm)	Orientation (°)	Characteristics
Arall 1	Al 7075-T6	0.3	0/0	Fatigue, strength
Arall 2	Al AA2024-T3	0.3	0/0	Fatigue, damage tolerant
Arall 3	Al 7475-T761	0.3	0/0	Fatigue, toughness
Arall 4	Al 2024-T8	0.3	0/0	Fatigue, elevated temp. properties

- کارال: ورق‌های آلومینیوم تقویت شده با فیبر کربن.
- گلاره: ورق‌های آلومینیوم تقویت شده با فیبر شیشه می‌باشد. فیبر شیشه مورد استفاده دارای انواع مختلفی است. دو نوع E-glass و S-glass به طور گسترده در صنعت پلاستیک‌های تقویت شده با فیبر مورد استفاده قرار می‌گیرد. S-glass همچنین در اجزاء هواپیماها و پوسته موشک‌ها نیز به کار می‌رود. نوع دیگر آن C-glass در کارهای شیمیایی که مقاومت به خوردگی بالایی در برابر اسیدها لازم است، استفاده می‌شود [۱۱].

جدول ۳-۲ گریدهای مختلف گلاره را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۲: انواع گریدهای گلاره [۱۵]

Grade	sub	Alloy	Metal thickness (mm)	orientation (°)	Characteristics
Glare 1	-	AA7475-T761	0.3-0.4	0/0	Fatigue, strength, yield stress
Glare 2	Glare 2A	AA2024-T3	0.2-0.5	0/0	Fatigue, strength
	Glare 2B	AA2024-T3	0.2-0.5	90/90	Fatigue, strength
Glare 3	-	AA2024-T3	0.2-0.5	0/90	Fatigue, impact
Glare 4	Glare 4A	AA2024-T3	0.2-0.5	0/90/0	Fatigue, strength in 0° direction
	Glare 4B	AA2024-T3	0.2-0.5	90/0/90	Fatigue, strength in 90° direction
Glare 5	-	AA2024-T3	0.2-0.5	0/90/90/0	Impact
Glare 6	Glare 6A	AA2024-T3	0.2-0.5	+45/-45	Shear, off-axis properties
	Glare 6B	AA2024-T3	0.2-0.5	-45/+45	Shear, off-axis properties

۲-۷-۲ ورق‌های فیبر فلزی با رویه‌ی آلیاژ غیرآلومینیومی

این دسته از ورق‌های فلزی شامل فلز پایه منیزیم و یا فلز پایه تیتانیوم می‌باشد که کاربردهای خاص به کار دارد.

۲-۸- شکل‌پذیری ورق فیبر فلزی

ورق‌های فیبر فلزی می‌توانند به طور دائم تغییر شکل پلاستیک دهند و به صورت خم‌های ساده یا دابل درآیند. البته آن‌چه باید در نظر داشته باشید این است که میزان این تغییر شکل پلاستیک وابسته به آلیاژ فلزی رویه می‌باشد. بنابراین رفتار پلاستیکی محدود به فلز اصلی است و فیبرها تغییر شکل مومسان نمی‌دهند. تغییر شکل پلاستیک این ورق‌ها در دو حالت زیر انجام می‌شود:

- در جهت الیاف فیبر: ایجاد تغییر شکل پلاستیک در جهت الیاف فیبر به خاطر کرنش شکست فیبرها محدود است. به طور مثال برای فیبرهای شیشه تقریباً $4-4/5\%$ می باشد. وقتی کرنش در جهت الیاف فیبر اتفاق می افتد، تنش های الاستیک در ورق ها قابل توجه است در نتیجه ورق برگشت فوری و تنش های داخلی بالایی خواهد داشت.

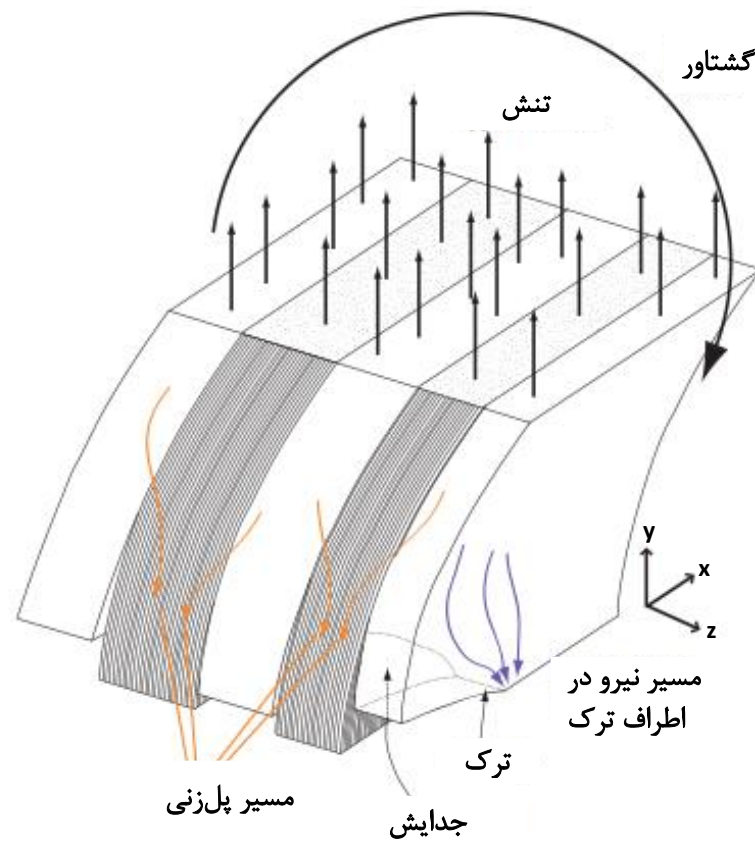
- در جهت عمود بر الیاف فیبر: در این حالت تغییر شکل پلاستیک به وسیله کرنش شکست آلیاژ فلزی محدود خواهد بود. در جهت معکوس، کرنش صفحه ای شکست (به علت چسب موجود در این نوع ورق ها) در مورد خم کاری، $6-8\%$ محدود شده است.

به علت شکل پذیری محدود این ورق ها، از المان های ساختاری خاصی استفاده می شود. یکی از این المان ها، پروفیل می باشد. این پروفیل شامل خطوط خم موازی جداگانه و متعدد می باشد. در این حالت هنگام تغییر شکل در جهت عمود بر فیبرها یک شعاع خم کوچکی به دست می آید. با این کار پروفیل های ساده مثل $2/1$ (دو لایه فلز و یک لایه کامپوزیت) و $3/2$ (سه لایه فلز و ۲ لایه هسته کامپوزیتی) به راحتی شکل دهی می شود اما هرچه ورق ها ضخیم تر شود خم کاری مشکل خواهد شد. مقدار برگشت فوری و شعاع کمینه تقریباً مشابه با مقدار آلیاژ فلز اصلی با ضخامت یکسان خواهد بود. به طور کلی فیبرها و ساختار لایه ای باعث محدودیت شکل دهی و صلبیت ورق های فلزی نیز باعث محدودیت تکنیک لایه چینی می شود [۱۰].

۹-۲- خاصیت پل زنی^۱ ورق فیبر فلزی

ورق های فیبر فلزی مقاوم در برابر حرارت و خوردگی بوده و دارای خاصیت میرایی^۲ و عایق بندی مناسب می باشند. نرخ رشد ترک در ورق FML بسیار پایین است و با سرعت نسبتاً پایینی رشد می کند. از دیگر ویژگی های ورق های فیبر فلزی این است که با وجود امکان ترک های خستگی در لایه های فلزی، لایه های فیبر بی عیب می مانند و مانعی برای ترک محسوب می شوند. این مکانیزم را خاصیت پل زنی بر سر راه ترک ورق های فیبر فلزی می نامند. شکل ۸-۲ پل زنی ورق FML را نشان می دهد. در FML، محدوده کشسان در منطقه فیبر و محدوده پلاستیک در منطقه فلزی می باشد. بنابراین محدوده کشسان یک برگشت فوری بیش از حد نسبت به حالت یک پارچه فلزی پس از شکل دهی در این مواد ایجاد خواهد نمود [۱۶-۱۸].

1 Bridging
2 Damping



شکل ۲-۸: پل زنی بر سر راه ترک در FML [۱۶]

۲-۱۰- ناهمسانگردی الاستیک در ورق‌های تقویت‌شده با الیاف [۱۱]

تفاوت خواص در مواد همسانگرد^۱، اورتوتروپیک^۲ و ناهمسانگرد عمومی^۳ در مکانیک رفتاری مواد است. ویژگی‌های تنش-کرنش الاستیک ماده همسانگرد توسط سه ثابت الاستیک مدول یانگ (E)، ضریب پواسون (ν) و مدول برشی (G) توصیف می‌شود. تنها دو ثابت از این سه ثابت الاستیک مستقل بوده و به وسیله رابطه (۲-۱) به هم مرتبط هستند.

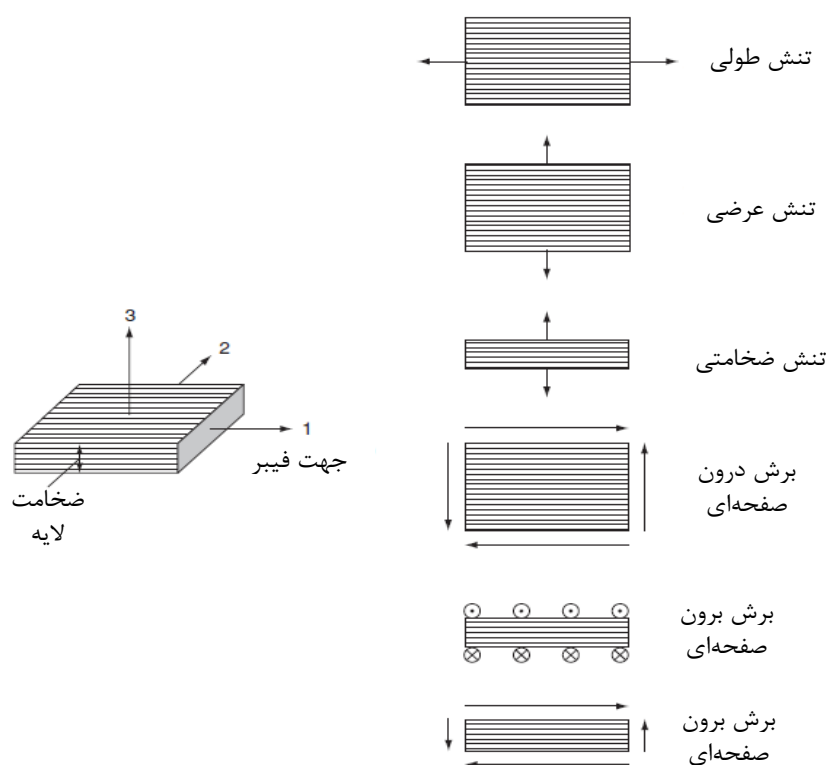
1 Isotropic
2 Orthotropic
3 General anisotropic

(۱-۲)

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

تعداد ثوابت مستقل برای بیان رفتار الاستیک مواد ناهمسانگرد و اورتوتروپیک به ترتیب برابر ۲۱ و ۹ ثابت است. برای ماده اورتوتروپیک، ۹ ثابت الاستیک مستقل $E_{11}, E_{22}, E_{33}, G_{12}, G_{13}, G_{23}, \nu_{12}, \nu_{21}, \nu_{23}$ می باشد.

کامپوزیت های الیافی تک جهته، یک کلاس خاص از ماده اورتوتروپیک می باشد. در شکل ۹-۲ یک کامپوزیت با فیبرهایی درون صفحه ای ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۹-۲: بارگذاری کششی و برشی یک کامپوزیت الیافی تک جهته

فرضیات مورد قبول در روابط یک ماده کامپوزیت الیافی تک جهته به این شرح است:

۱. فیبر و زمینه مواد همسانگرد الاستیک خطی هستند.
۲. فیبرها به طور یکسان در زمینه توزیع شدند.
۳. فیبرها کاملاً در جهت ۱ قرار دارند.
۴. بین فیبر و زمینه اتصال خوبی برقرار است.

۵. لایه کامپوزیت عاری از فضای خالی است.

خواص الاستیک در جهت ۲ و ۳ برابر، بنابراین $E_{22} = E_{33}$ ، $v_{12} = v_{13}$ و $G_{12} = G_{13}$ است. مدول یانگ طولی (جهت ۱) برابر است با:

$$E_{11} = E_f v_f + E_m v_m \quad (2-2)$$

در رابطه (۲-۲)، v_f و v_m به ترتیب کسر حجمی^۱ فیبر و ماتریس است. که می توان نوشت:

$$v_f + v_m = 1 \quad (3-2)$$

ضریب پواسون v_{12} از رابطه زیر به دست می آید:

$$v_{12} = v_f v_f + v_m v_m \quad (4-2)$$

مدول یانگ عرضی (جهت ۲) را نیز به صورت رابطه ی (۵-۲) نوشت:

$$E_{22} = \frac{E_f E_m}{E_f v_m + E_m v_f} \quad (5-2)$$

باید توجه داشت که $v_{12} \neq v_{21}$ و $v_{13} \neq v_{31}$ اما $v_{31} = v_{21}$ است. با این حال، v_{21} از رابطه (۶-۲) به دست می آید.

$$v_{21} = \left(\frac{E_{22}}{E_{11}} \right) v_{12} \quad (6-2)$$

کریستنسن^۲ [۱۹] نشان داد که در کامپوزیت های تقویت شده با فیبرهای تک جهته با جهت قرارگیری فیبر در جهت ۱، v_{23} می تواند با توجه به رابطه (۷-۲) به v_{12} و v_{21} مرتبط باشد.

$$v_{23} = v_{32} = \frac{(1 - v_{21})}{(1 - v_{12})} v_{12} \quad (7-2)$$

رابطه (۷-۲)، در محدوده ی داده های تجربی اغلب مواد از دقت مناسبی برخوردار است. همچنین مطابق با رابطه (۸-۲) می توان G_{12} را محاسبه کرد.

1 Volume fraction
2 Christensen

(۸-۲)

$$G_{12} = G_{21} = \frac{G_f G_m}{G_f v_m + G_m v_f}$$

همچنین G_{23} توسط ترم‌های E_{22} و v_{23} مشابه رابطه (۱-۲) به صورت زیر بیان می‌شود:

(۹-۲)

$$G_{23} = G_{32} = \frac{E_{22}}{2(1 + v_{23})}$$

با استفاده از روابط (۲-۲) تا (۹-۲)، ثوابت لازم برای شبیه‌سازی هسته کامپوزیتی محاسبه خواهد شد.

۲-۱۱- پیشینه تحقیق

در سال ۲۰۰۰ وگل‌سانگ^۱ و همکاران در تحقیق جامعی به کاربرد پنل‌های FML در سازه‌های مدرن هوافضا پرداختند. گلاره از هسته کامپوزیتی اپوکسی/شیشه و لایه‌های خارجی آلومینیومی تشکیل شده و در بدنه هواپیماهای مدرن به کار می‌رود. آرال از هسته کامپوزیتی اپوکسی/آرامید و لایه‌های خارجی آلومینیوم تشکیل شده است و در بال‌های هواپیماهای مدرن استفاده می‌شود [۱۳]. در سال ۲۰۰۶ عبدالله^۲ و همکاران مقاومت در مقابل ضربه پنل‌های چند لایه فلزی-رشته‌ای را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که این پنل‌ها برای بکارگیری در سازه‌هایی که نیاز به جذب انرژی بالا و کاهش وزن محسوس دارند بسیار مناسب است. همچنین آن‌ها با تغییر ضخامت هسته کامپوزیتی و رویه فلزی از جنس آلومینیوم دریافتند که بیشترین انرژی مورد نیاز برای ایجاد فرورفتگی و شکست در پنل‌هایی به وجود می‌آید که ضخامت لایه فلزی پنل کمینه و ضخامت هسته کامپوزیتی بیشینه باشد [۲۰]. در سال ۲۰۰۶ گرشام^۳ و همکاران رفتار کششی ساختار ساندویچی فلز-کامپوزیت را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که افزایش دمای پیش گرم باعث کاهش شکست در هسته کامپوزیت می‌شود اگرچه باعث افزایش شدت چین خوردگی در فلنج و دیواره‌های کناری خواهد شد [۲۱]. در سال ۲۰۱۳ کالیانسوندارام^۴ و همکاران اثر عواملی چون دما، نیروی ورق گیر و رزین (چسب) را بر مولفه‌های محصول شکل‌دهی ورق‌های چندلایه فلزی ارزیابی نمودند [۲۲]. موس^۵ و همکاران به بررسی اثر دما و نیروی ورق گیر بر شکل‌دهی ورق‌های چند لایه پرداختند که توانستند به یک شکل‌پذیری بهتری دست یابند [۲۳]. در سال ۲۰۱۳ کدخدایان^۶ و همکاران به بررسی نیروی ورق گیر، قطر و

1 Vogelesang

2 Abdullah

3 Gresham

4 Kalyanasundaram

5 Mosse

6 Kadkhodayan

ضخامت بلانک و دما پرداختند و نشان دادند که تاثیر نیروی ورق گیر بر شکست FML و اثر ضخامت و قطر بلانک در کشش عمیق این نوع ورق ها شبیه فلزات معمول است [۱۸]. در سال ۲۰۱۴ راجکومار^۱ و همکاران به بررسی رفتار کشش و خمش ورق های چند لایه پرداختند و نتایج حاصل نشان می دهد که با افزایش نرخ کرنش میزان استحکام کششی افزایش و استحکام نرم کاهش می یابد. همچنین استحکام خمشی و استحکام کششی برای ورق های چند لایه با ساختار کربن ماکزیمم و برای شیشه و هیبرید کمینه می باشد [۲۴]. در سال ۲۰۰۵ لانگ^۲ و همکارانش اثر عواملی چون پیش بالچ و فشار محفظه ای و حرکت پانچ را بر توزیع ضخامت ورق و حد شکل دهی در ورق های چند لایه به صورت عددی و تجربی به کمک روش هیدروفرمینگ بررسی کردند [۲۵]. وانگ^۳ و همکارانش در سال ۲۰۱۳ اثر عواملی چون کشش چسب را بر حد شکل دهی در ورق های تک لایه و چند لایه به صورت تجربی و عددی با کمک روش هیدرومکانیک مورد بررسی و مطالعه قرار دادند [۲۶]. باقرزاده^۴ و همکارانش در سال ۲۰۱۲ اثر پارامترهای چینش ورق ها و ضخامت را بر روی فشار بحرانی بهینه و نسبت کشش را در ورق های دولایه فلزی بصورت تجربی و عددی بررسی کردند و دریافتند که افزایش ضخامت جنس با ضخامت بیشتر فشار بحرانی افزایش می یابد و با افزایش نسبت کشش فشار بحرانی کاهش می یابد و همچنین نسبت فشار بحرانی به استحکام کرنش سختی ورق کامپوزیتی برای چینش های مختلف ضخامتی در ورق دولایه به هم نزدیک است [۲۷]. سعادت فرد^۵ و همکارانش فرآیند کشش هیدرومکانیکی ورق های چند لایه الیاف- فلزی را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که کشش هیدرومکانیکی با فشار پیش بالچ ۳۵ بار منجر به تولید عمیق ترین قطعات سالم می شود. همچنین با افزایش نسبت کشش تا ۲/۲۵، محدوده ی فشار محفظه ای مطلوب برای تولید یک قطعه سالم محدودتر خواهد شد [۲۸].

در سال ۲۰۰۷ کیم^۶ و همکاران برگشت فنی گلاسه در فرآیند شکل دهی ترمزی^۷ را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که طراحی ابزار و پارامترهای فرآیند از قبیل شعاع سنبه، سرعت سنبه، نیرو و دمای شکل دهی می تواند به طور قابل توجهی بر روی برگشت فنی ورق اثر بگذارند [۲۹]. در سال ۲۰۱۰ پارسا^۸ و همکاران برگشت فنی ورق های ساندویچی پلیمر و آلومینیوم در خم کاری دوپل را مورد مطالعه قرار داده و

1 Rajkumar

2 Lang

3 Wang

4 Bagherzadeh

5 Saadatfard

6 Kim

7 Brake Forming

8 Parsa

اثر برخی پارامترهای هندسی مثل ضخامت لایه ساندویچی و منحنی شعاع ابزار را بر روی برگشت‌فتری مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت ورق ساندویچی و کاهش شعاع منحنی ابزار مقدار برگشت‌فتری افزایش می‌یابد [۳۰]. در سال ۲۰۱۴ پارسا و همکاران برگشت‌فتری ورق ساندویچی AAl3105/PP/AAl3105 را در قالب V شکل و اثر شعاع سنبه را بر برگشت‌فتری آن به صورت تجربی و عددی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش ضخامت ورق ساندویچی برای هر شعاع سنبه میزان برگشت‌فتری کاهش می‌یابد [۳۱]. در سال ۱۳۸۹ کدخدایان و همکاران به بررسی تجربی و شبیه‌سازی برگشت‌فتری در فرآیند خم‌کاری V شکل برای ورق‌های فیبر فلزی پرداختند و اثر پارامترهایی همچون شعاع قالب، نیروی بارگذاری و تغییر نسبی ضخامت لایه‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل بدین صورت است که با افزایش نیروی سنبه و افزایش ضخامت لایه آلومینیومی برگشت‌فتری کاهش می‌یابد و افزایش شعاع سنبه باعث افزایش برگشت‌فتری خواهد شد. همچنین برگشت‌فتری در ورق‌های فیبر فلزی به علت بزرگ بودن ناحیه الاستیک، بیشتر از ورق یک‌پارچه فلزی است [۱۸].

فصل ۳ مواد و روش تحقیق: تجربی و عددی

در این فصل، به معرفی مواد و آزمون‌های طراحی شده پرداخته می‌شود. هدف از انجام آزمون‌های تجربی، بررسی و مقایسه نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی با نتایج عددی است. بنابراین طراحی و ساخت تجهیزات لازم برای استفاده در این آزمون‌ها و همچنین ساخت ورق فیبر فلزی مورد بررسی قرار گرفت. برای تولید ورق فیبر فلزی، قالب پرس گرم هیدرولیکی ۱۰ تن طراحی و ساخته شد. از جمله آزمون‌های طراحی شده عبارتند از:

۱. آزمون سعی و خطای ساخت لایه پلی‌یورتان و ورق فیبر فلزی
 ۲. آزمون عمق بیشینه و شکل‌دهی در قالب ناودانی شکل
 ۳. آزمون اثر عمق کشش، ضخامت نهایی و لایه‌چینی بر ورق فیبر فلزی
- در ادامه فصل، آزمایش‌ها و مشخصات قالب شرح داده می‌شود. در انتهای فصل نیز روش مدل‌سازی عددی ارائه شده است.

۳-۱- معرفی مواد لازم در ساخت ورق فیبر فلزی

۳-۱-۱ ورق فلزی

با توجه به ساختار لایه‌ای ورق‌های فیبر فلزی، می‌توان انتخاب‌های متنوعی از فلز، فیبر و رزین تشکیل‌دهنده آن داشت که با تغییر هر یک این لایه‌ها خواص مکانیکی و فیزیکی متفاوتی به‌دست آورد. در این پژوهش، با توجه به کاربرد فراوان آلومینیوم در صنایع مختلف و ورق‌های کامپوزیتی و نیز سهولت دسترسی، همچنین نسبت استحکام به وزن مناسب از آن به‌عنوان لایه فلزی در ورق FML مورد استفاده قرار گرفت. با مطالعه و بررسی انجام شده بر روی انواع گریدهای آلومینیوم موجود در بازار، ورق آلومینیوم AA2024-T3 شرکت الکوا و ورق آلومینیوم AA1050-O برای لایه فلزی در ورق FML انتخاب شدند.

با توجه به پایین بودن درصد ازدیاد طول ورق آلومینیوم AA1050-O نورد شده، عملیات حرارتی آنیل کامل^۱ مطابق با استاندارد ASM بر روی آلومینیوم AA1050-O به شرح زیر انجام شد:

۱. قرار دادن نمونه آلومینیومی در کوره خشک با دمای 345°C به مدت ۳۰ دقیقه

۲. سرد شدن آلومینیوم در کوره تا دمای 100°C در زمان تقریبی ۲ ساعت

1 Full annealing

۳. سرد شدن آلومینیوم از دمای °C ۱۰۰ تا دمای محیط در بیرون از کوره در زمان تقریبی ۱ ساعت

برای تعیین خواص مکانیکی و رفتار آلومینیوم‌های AA2024-T3 و AA1050-O، آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8M از دستگاه اینسترون^۱ ۸۸۰۲ با ظرفیت نامی ۲۵۰ kN استفاده شد. نمونه‌های آزمون کشش در شکل ۱-۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۱-۳: نمونه‌های ورق آلومینیومی برای آزمون کشش

۲-۱-۳ هسته کامپوزیتی

در بسیاری از ورق‌های فیبر فلزی از اپوکسی^۲ و فیبر به عنوان هسته استفاده می‌شود. فیبر استفاده شده در هسته از نوع فیبر شیشه تک‌جهته 400 gr/m^2 از گرید E-glass می‌باشد. اپوکسی دارای خواص مکانیکی مناسبی از جمله استحکام مناسب با چگالی پایین است. اما استفاده از این ماده در هسته در فرآیندهایی که با تغییر شکل زیاد همراه است با توجه به مقاومت به شکست پایین آن مناسب نیست. بنابراین برای رفع این محدودیت، از گرانول پلی‌یورتان^۳ با درجه سختی ۶۵ شور^۴ ساخت کشور ایتالیا استفاده گردید. از جمله مزایای پلی‌یورتان مورد استفاده در هسته نسبت به اپوکسی می‌توان به ازدیاد طول بالا و عدم شکست هسته

1 Instron
2 Epoxy
3 Polyurethane
4 Shore A

ورق FML در حین فرآیند شکل‌دهی، چگالی پایین و عدم نیاز به اتصال چسبی اشاره نمود. جدول ۱-۳ خواص گرانول پلی‌یورتان مورد استفاده را نمایش می‌دهد.

جدول ۱-۳: خواص عمومی گرانول پلی‌یورتان [۳۲]

استحکام کششی (MPa)	چگالی (gr/cc)	ازدیاد طول (%)	سختی شور-آ
۵/۱۹	۱/۰۱	۲۰۰	۶۵±۵

جهت تعیین خواص مکانیکی هسته کامپوزیتی از آزمون کششی تک‌محوره بهره گرفته شد. نمونه آزمون هسته کامپوزیتی شامل پلی‌یورتان تقویت‌شده با الیاف شیشه تک‌جهته طبق استاندارد ASTM D3039 در دو جهت 0° و 90° تهیه و از دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ برای انجام آزمون کشش استفاده گردید. شکل ۲-۳ نمونه‌های تهیه شده در دو جهت 0° و 90° برای آزمون کشش را نشان می‌دهد.



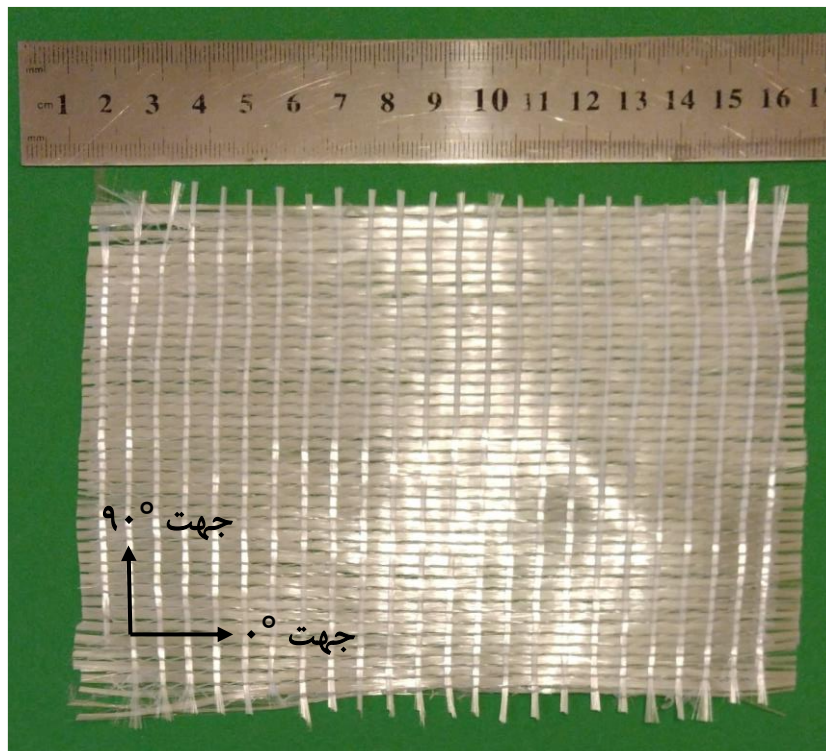
شکل ۲-۳: نمونه‌های هسته شامل پلی‌یورتان تقویت‌شده با فیبر شیشه گرید E برای آزمون کشش

۲-۳- روش ساخت ورق فیبر فلزی

ورق‌های فیبر فلزی ساخته‌شده به صورت آلومینیوم/کامپوزیت/آلومینیوم (ورق فیبر فلزی ۲/۱) می‌باشد. در این بخش مراحل ساخت ورق فیبر فلزی شرح داده شد و به معرفی قالب پرس گرم ساخته شده برای تولید این نوع ورق پرداخته می‌شود.

۱-۲-۳ مواد

در ساخت ورق فیبر فلزی، از ورق آلومینیوم AA2024-T3 با ضخامت ۰/۶۶ mm و آلومینیوم آنیل شده AA1050-O با ضخامت ۰/۵ mm استفاده شده است. همچنین برای ساخت هسته کامپوزیتی از فیبر شیشه تک جهته گرید E (400 gr/m^2) با ضخامت ۰/۴ mm (شکل ۳-۳) و گرانول پلی یورتان (شکل ۴-۳) استفاده شد.



شکل ۳-۳: فیبر شیشه تک جهته با گرید E



شکل ۳-۴: گرانول پلی یورتان با سختی ۶۵ شور آ

۳-۲-۲ آماده سازی سطح آلومینیوم

به منظور اتصال مناسب بین ورق آلومینیوم و لایه پلی یورتان و جلوگیری از پدیده جدایش^۱، سطوح تماسی ورق آلومینیوم می بایست از هرگونه روغن و چربی پاک شود. بنابراین برای آماده سازی سطوح آلومینیوم از روش استاندارد ASTM D2651 استفاده گردید. مراحل آماده سازی به شرح زیر می باشد:

(۱) تمیز کردن سطح با پارچه تمیز

(۲) پاک سازی سطح با محلول استون با خلوص ۹۸ درصد

(۳) شستشو سطح با آب گرم 40°C یا بخار آب داغ

(۴) اچ^۲ کردن در محلول هیدروکسید سدیم با غلظت ۲ درصد و دمای 70°C

(۵) شستشو سطح کامل سطح با آب گرم 40°C

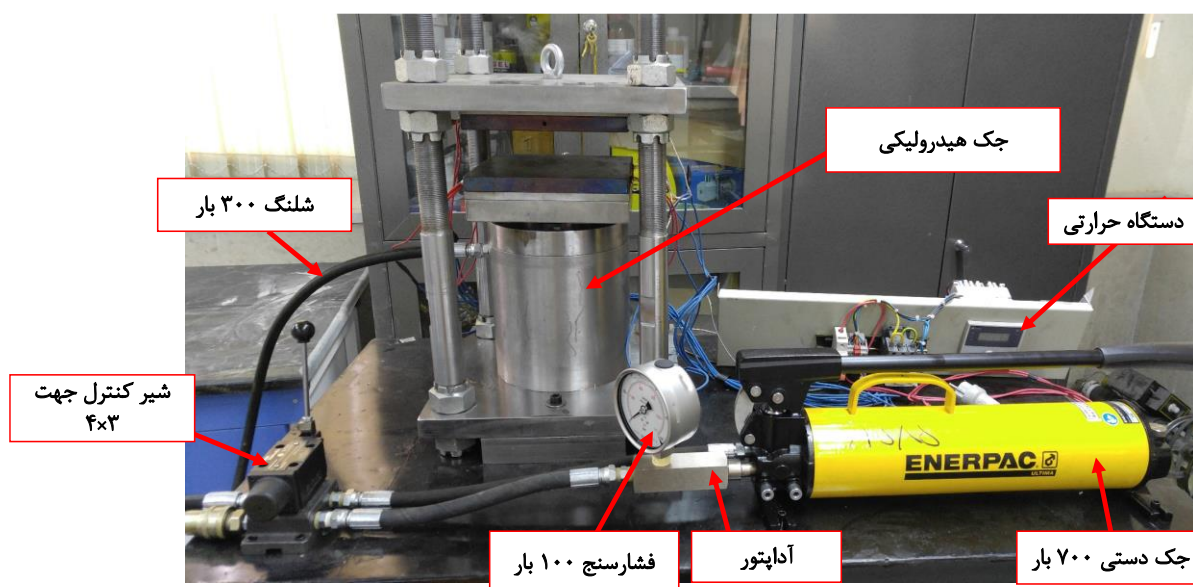
(۶) خشک کردن سطوح با پارچه تمیز

همچنین برای اتصال بهتر می توان سطوح تماسی را قبل از اچ کردن با ورق سنباده P80 سنباده زنی کرد.

1 Delamination
2 Etching

۳-۲-۳ قالب پرس گرم هیدرولیکی ۱۰ تن

برای ساخت کامپوزیت‌های چند لایه، پس از لایه‌چینی اولیه، ورق‌ها را در دما، فشار و زمان مناسب تحت پرس قرار می‌دهند. در این تحقیق، یک پرس گرم هیدرولیکی با نیروی نامی ۱۰ تن ساخته شد. از یک جک هیدرولیک دستی با ظرفیت ۷۰۰ bar و سیستم حرارت‌دهی الکتریکی با ۸ المنت فشنگی در صفحات قالب بالا و پایین که از جنس فولاد گرمکار MO40 می‌باشد استفاده شد. برای عایق‌بندی صفحات پرس، از دو تسمه عایق میکا مورد استفاده قرار گرفت. ترموکوپل مورد استفاده قادر به اندازه‌گیری در محدوده 25°C تا 300°C می‌باشد. جزئیات بیشتر در خصوص طراحی و ساخت این پرس در گزارش طرح پژوهشی دانشجویی انجام شده توسط نویسنده [۳۳] قابل ملاحظه می‌باشد. قالب پرس گرم و اجزاء قالب پرس گرم را به ترتیب در **شکل ۳-۵** و **شکل ۳-۶** معرفی شده است.



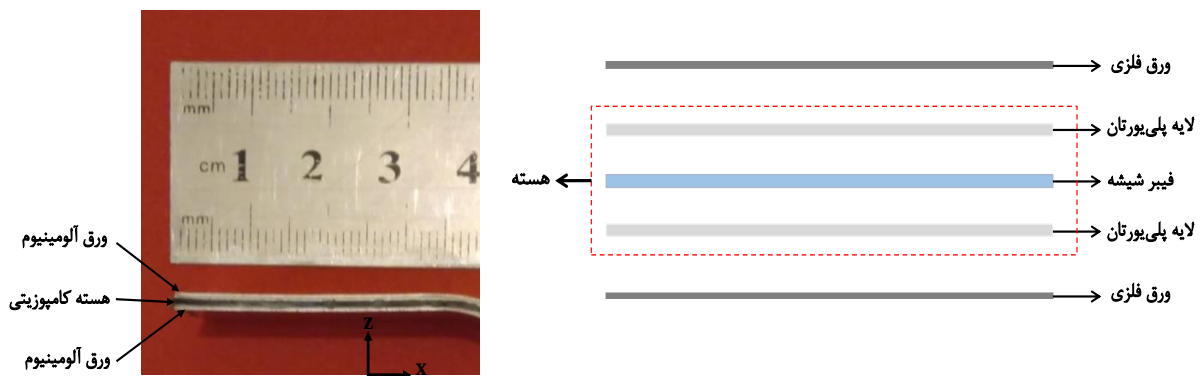
شکل ۳-۵: قالب پرس گرم هیدرولیکی



شکل ۳-۷: لایه پلی یورتان ساخته شده با ضخامت ۰/۶ mm

۳-۲-۵ ساخت ورق فیبر فلزی

ورق FML از روی هم قرار گرفتن آلومینیوم و لایه پلی یورتان در دو طرف فیبر شیشه و فشردن مجموعه توسط قالب پرس گرم تولید می شود. شکل ۳-۸ ورق فیبر فلزی تولید شده را نشان می دهد.



شکل ۳-۸: ورق FML ۱×۲ ساخته شده در این پژوهش

۳-۳ خم کاری ورق فیبر فلزی

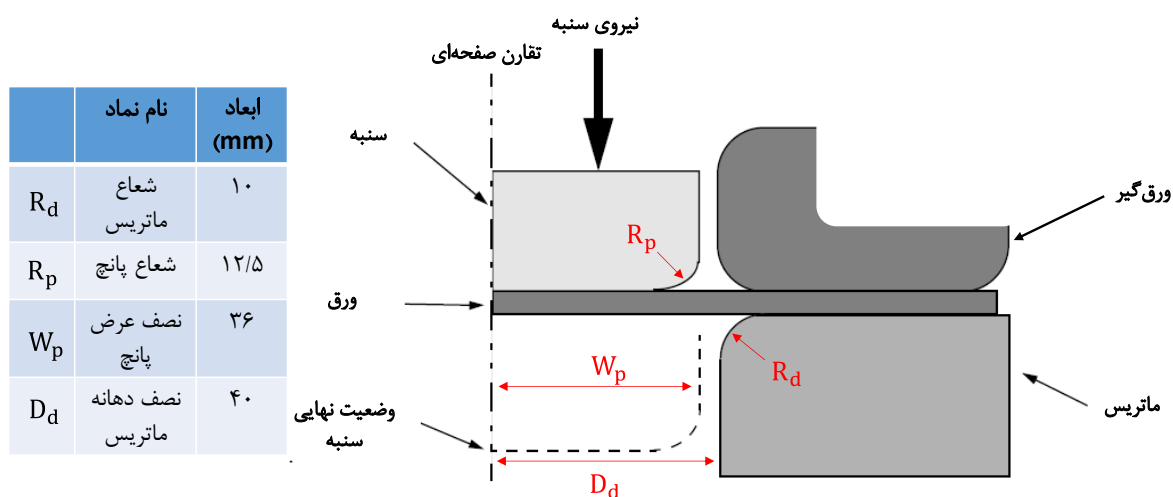
در فرآیند شکل دهی ورق FML پارامترهایی از جمله جنس پلیمر هسته، ضخامت هسته کامپوزیتی، ضخامت نهایی ورق FML و جهت لایه چینی مؤثر است. برای انجام آزمون خم کاری از ورق فیبر فلزی، نمونه ها بر اساس لایه چینی فیبر و ورق در جهات 0° ، 45° و 90° و براساس دما و ضخامت مناسب ساخته می شود. با توجه به

این که خم کاری فرآیندی است که نیاز به نیروی ورق گیر زیادی ندارد، از این نیرو صرف نظر خواهد شد. علاوه بر آن ابعاد قالب، سنبه و سرعت جابجایی سنبه بر شرایط شکل دهی تأثیرگذار خواهد بود. جهت انجام آزمون خم کاری از قالب خم ناودانی شکل استفاده می شود.

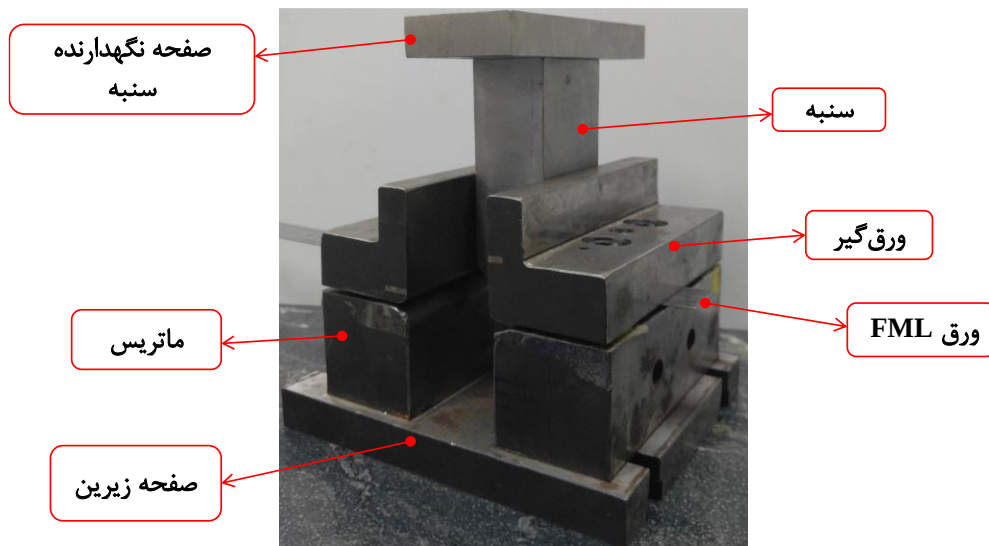
۱-۳-۳ قالب خم با مقطع ناودانی شکل

شکل دهی ورق در صنعت قطعه سازی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. بسیاری از قطعات مصرفی از سینی های غذا خوری تا پنل های جداسازی دیوارهای صنعتی به کمک روش شکل دهی ورق تولید می شوند. در حقیقت شکل دهی ورق روشی برای تبدیل ورق های تخت فلزی به شکل مورد نظر بدون شکست یا نازک شدن موضعی شدید ورق است. از جمله فرآیندهای شکل دهی ورق می توان به خم کاری اشاره کرد. خم کاری فرآیندی است که در اغلب روش های شکل دهی وجود دارد. از جمله کاربردهای این فرآیند، ایجاد انحناء در ورق و یا تبدیل آن به قطعاتی با مقطع ناودانی شکل، V شکل و در مواردی شکل های حلقوی می باشد.

شکل ۹-۳ طرحواره قالب خم مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است. از هر دو طرف خم، نیرویی برابر و در جهت مخالف سنبه وارد می شود. از مزایای این فرآیند می توان به ایجاد هم زمان دو خم ۹۰ درجه ای و دقت مطلوب آن اشاره کرد. از محدودیت های آن باز شدن دهانه ی خم ناشی از برگشت فوری می باشد. قالب خم ناودانی شکل مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱۰-۳ ارائه شده است.



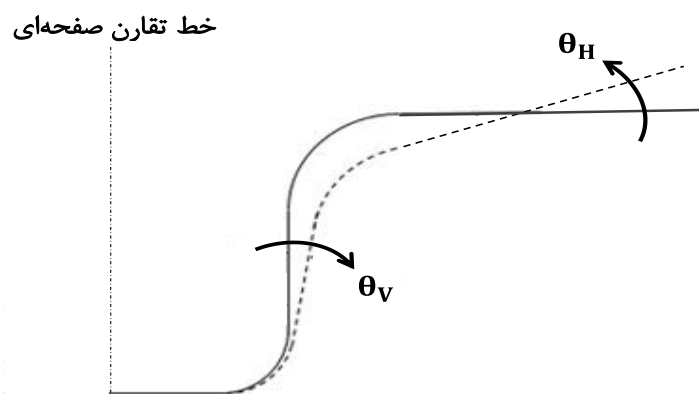
شکل ۹-۳: طرحواره قالب خم با مقطع ناودانی شکل



شکل ۳-۱۰: قالب خم با مقطع ناودانی شکل

۳-۳-۲ برگشت فنری^۱

برگشت فنری یکی از پدیده‌های رایج در فرآیندهای شکل‌دهی محسوب می‌شود. این پدیده در مرحله باربرداری و آزاد شدن بخشی از کرنش‌های الاستیک اتفاق می‌افتد. در شکل ۳-۱۱ زوایای برگشت فنری ورق فیبر فلزی ترسیم شده است. جهت پیکان مشخص شده در شکل جهت مثبت قراردادی زوایا را نشان می‌دهد. زاویه برگشت فنری در ناحیه افقی و عمودی را به ترتیب با θ_H و θ_V نشان داده شده است. شعاع سنبه بر زاویه θ_V اثر دارد در حالی که θ_H علاوه بر شعاع سنبه تحت تأثیر شعاع گوشه ماتریس نیز می‌باشد.



شکل ۳-۱۱: جهت مثبت قراردادی زوایای برگشت فنری افقی و عمودی در خم ناودانی شکل به صورت شماتیک

۳-۴- طراحی آزمون‌های تجربی

در این بخش به طراحی آزمون‌های تجربی و شرح شرایط انجام آن پرداخته می‌شود. در تمامی این آزمون‌ها ابعاد نمونه‌های تهیه شده 20×160 mm می‌باشد. همچنین سرعت جابجایی سنبه 0.2 mm/s بوده و فشار متوسط و زمان در ساخت ورق FML به ترتیب برابر 10 bar و $8-10$ min می‌باشد. آزمون سنجش عمق بیشینه، برای دستیابی به ورق با مقطع ناودانی شکل بدون جدایش انجام می‌شود. شرایط مطلوب ضخامت نهایی و دمای پخت ورق با سعی و خطای تجربی به دست می‌آید. سپس در آزمون خم کاری به بررسی برگشت‌فتری ورق فیبر فلزی پرداخته خواهد شد.

۳-۴-۱ سنجش عمق بیشینه کانال

آزمون‌های انجام شده نشان می‌دهد که با افزایش عمق کشش در فرآیند خم ناودانی شکل ورق FML، احتمال جدایش هسته از فلز افزایش می‌یابد. بر این اساس، به روش سعی و خطای تجربی با کشش ورق تا عمق 20 ، 25 و 30 میلی‌متر مقدار عمق بیشینه برای هر یک از FMLهای ساخته شده با رویه آلومینیوم AA1050-O و AA2024-T3 مورد ارزیابی قرار گرفت. پخت ورق‌های FML در دمای 150°C و فشار 10 bar و مدت زمان 10 min صورت گرفت. جهت لایه‌چینی در این نمونه‌ها به صورت $0/0/0$ در نظر گرفته شده است.

۳-۴-۲ سعی و خطای تجربی برای دستیابی به شرایط مطلوب ساخت FML

به منظور دستیابی به یک حالت بهینه برای ساخت ورق فیبر فلزی با کیفیت بالا، شرایط تولید FML در دما و ضخامت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. ۹ نمونه از هر یک از جنس‌های آلومینیوم برای انجام این آزمون تهیه شد. جدول ۲-۳ شرایط آزمایش را نشان می‌دهد. جهت لایه‌چینی لایه‌های ورق فیبر فلزی در نمونه‌ها به صورت $0/0/0$ در نظر گرفته شده است.

جدول ۲-۳: شرایط سعی و خطای تجربی ساخت FML

ورق فلزی	دما ($^\circ\text{C}$)	ضخامت (mm)
AA2024-T3	130 ، 150 و 170	$1/5$ ، $1/7$ و 2
AA1050-O	130 ، 150 و 170	$1/3$ ، $1/5$ و $1/7$

۳-۵- شبیه‌سازی المان محدود فرآیند خم‌کاری

در این بخش، فرآیند خم‌کاری در دو مرحله بارگذاری (شکل‌دهی) و باربرداری در نرم‌افزار آباکوس^۱ شبیه‌سازی می‌شود. برای مرحله بارگذاری از حلگر دینامیک صریح^۲ و برای مدل‌سازی باربرداری از حلگر استاندارد^۳ استفاده شد. در ادامه، مراحل شبیه‌سازی فرآیند شامل ترسیم مدل ورق و قالب، مش‌بندی ورق و درنهایت، نحوه‌ی بارگذاری و اعمال شرایط مرزی توضیح داده می‌شود.

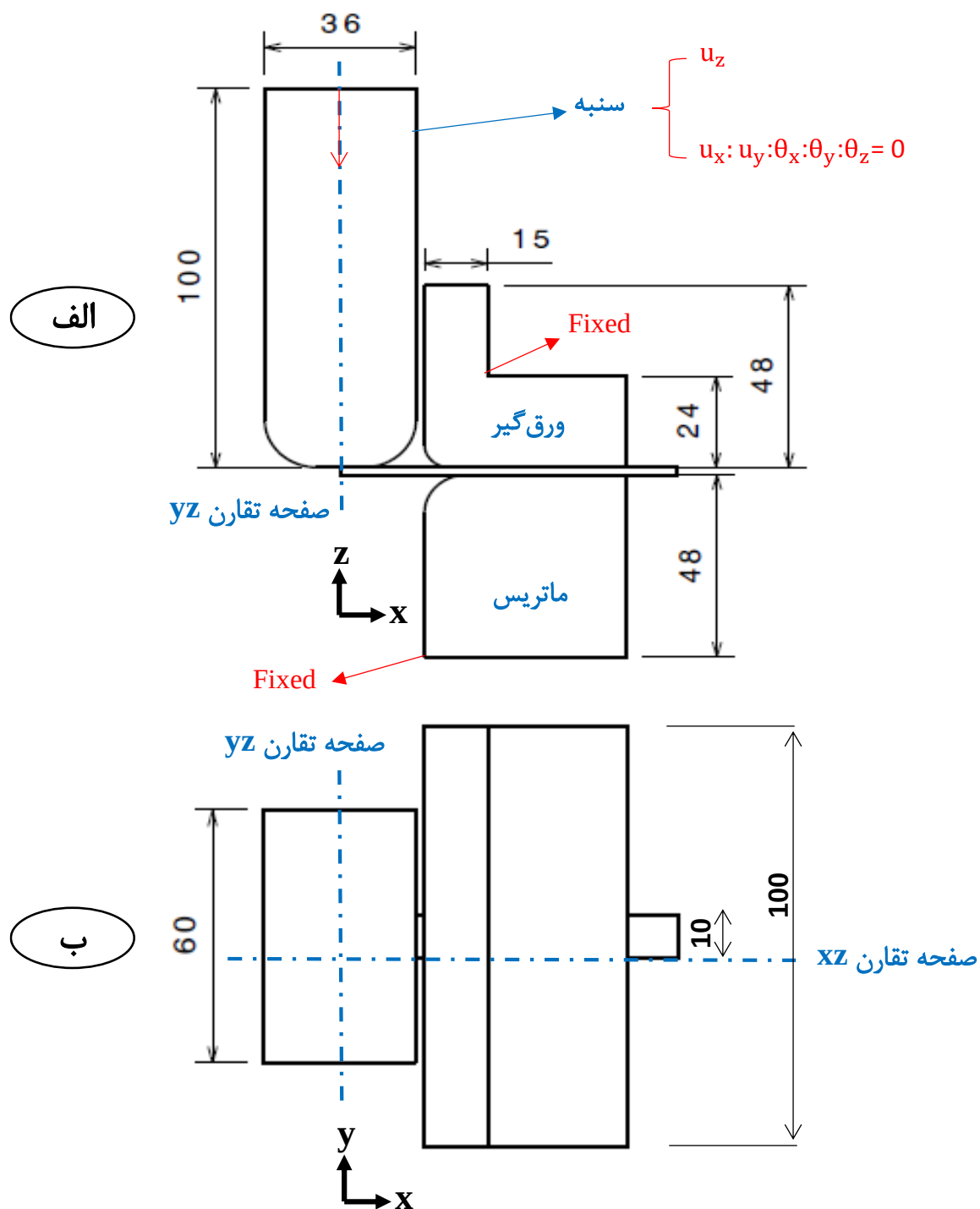
۳-۵-۱ هندسه فرآیند

سنبه، ورق‌گیر و ماتریس به‌صورت **شکل ۳-۱۲** شبیه‌سازی می‌شود. ضخامت ورق FML بر اساس ضخامت نهایی به‌دست آمده از آزمون سعی و خطا بوده و لقی بین سنبه با ماتریس و ورق‌گیر برابر ۴ mm است. نیروی اعمالی به‌صورت گسترده بر روی سطح سنبه اعمال می‌شود.

1 Abaqus

2 Abaqus/explicit

3 Abaqus/standard



شکل ۳-۱۲: قیدها و شرایط مرزی اعمال شده برای شبیه سازی (ابعاد به میلیمتر است)،

الف) نمای روبه رو، ب) نمای بالا

۳-۵-۲ مراحل شبیه‌سازی و مدل‌سازی فرآیند

شبیه‌سازی این فرآیند در نرم‌افزار آباکوس ۶.۱۳.۱ انجام شده است. شبیه‌سازی با توجه به ابعاد سنبه، ماتریس و ورق‌گیر در محیط Abaqus/cae انجام شده است. سپس شرایط مرزی، المان مناسب و همچنین شرایط اولیه ورق و اجزای دیگر قالب اعمال شده است.

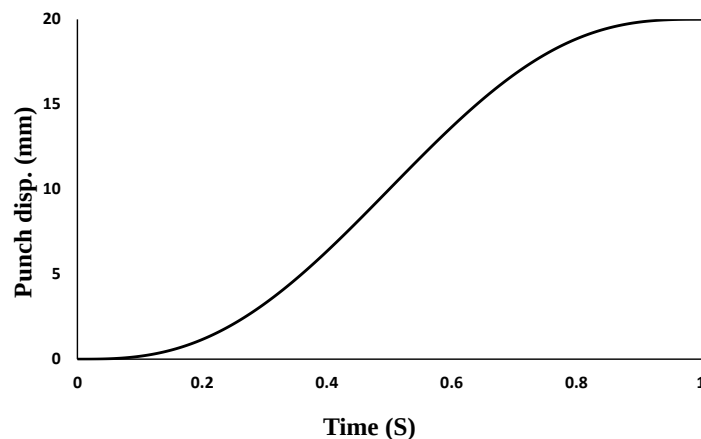
در قسمت مدل‌سازی به دلیل صرف‌نظر کردن از تغییر شکل اجزاء قالب از قبیل سنبه، ماتریس و ورق‌گیر، همگی به صورت پوسته صلب^۱ سه بعدی در نظر گرفته شده است. لایه‌های ورق فیبر فلزی نیز جداگانه و یک چهارم آن شبیه‌سازی شده است. لایه آلومینیوم و هسته کامپوزیتی به صورت پوسته تغییر شکل‌پذیر^۲ مدل‌سازی شد. این سه لایه مجزا توسط دستور Tie به یکدیگر متصل شده‌اند (شکل ۳-۱۳). رویه فلزی دارای رفتار کشسان خطی همسانگرد و همچنین مومسان غیرخطی با ناهمسانگردی هیل درجه‌ی دو می‌باشد. هسته کامپوزیتی دارای رفتار کشسان خطی با ناهمسانگردی اورتوتروپیک از نوع لایه‌ای Lamina است. خواص مکانیکی و ثوابت ناهمسانگردی رویه فلزی و هسته کامپوزیتی در فصل ۴ آورده شده است.



شکل ۳-۱۳: ورق فیبر فلزی شبیه‌سازی شده

از مدل تماسی پنالتی^۳ با ضریب اصطکاک ۰/۱ بین سطوح استفاده شد. با توجه به تقارن صفحه‌ای موجود یک چهارم قطعات تغییر شکل‌پذیر مدل شدند. بارگذاری به صورت جابجایی کنترل در جهت z با اعمال دامنهی گام هموار^۴ انجام گردید (شکل ۳-۱۴). همچنین با توجه به تقارن هندسه ورق از قید X sym. و Y sym. برای ورق فیبر فلزی استفاده شده است.

1 Rigid shell
2 Deformable shell
3 Penalty
4 Smooth step



شکل ۳-۱۴: اندازه جابجایی سنبه با اعمال دامنه گام هموار در بارگذاری

۳-۵-۳ شبکه‌بندی

مهم‌ترین قسمت یک شبیه‌سازی المان محدود، تعیین نوع و اندازه المان است. برای شبکه‌بندی FML از المان S4R برای هسته کامپوزیتی و لایه آلومینیوم استفاده شد. برای دستیابی به اندازه بهینه المان از روش آنالیز حساسیت مش استفاده و در نهایت برای ورق و هسته‌ی کامپوزیتی المان پوسته‌ای ۴ گره‌ای مربعی شکل با اندازه‌ی ۲ mm مورد استفاده قرار گرفت.

۳-۵-۴ مراحل شکل‌دهی

شبیه‌سازی در دو مرحله بارگذاری و باربرداری انجام می‌شود. در بارگذاری از حل صریح با زمان ۱ ثانیه و ضریب بزرگنمایی جرم^۱ ۱۰۰۰۰ استفاده شد. با حرکت سنبه به سمت محفظه ماتریس فرآیند شکل‌دهی انجام می‌شود. برای شبیه‌سازی برگشت‌فتری در آباکوس، مرحله باربرداری با حلگر استاندارد در زمان ۶۰ ثانیه و ضریب میرایی^۲ ۰/۰۰۰۲ استفاده شد. در ابتدا، تمام شرایط مرزی و همچنین تمامی سطوح تماسی، به جز رویه فلزی با هسته کامپوزیتی، حذف شده و از قید نقطه ثابت استفاده می‌شود. سپس یک مرحله جدید از نوع استاندارد استاتیکی^۳ ایجاد می‌گردد. در ادامه، از مقادیر تنش و کرنش آخرین نمو مرحله بارگذاری به‌عنوان شرط اولیه مرحله باربرداری در قسمت predefin field استفاده شده است.

1 Mass scaling
2 Damping factor
3 Static standard

فصل ۴ نتایج و بحث

در این فصل، نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی همراه با تصاویر و نمودارهای مربوطه، ارائه شده است. در ابتدا، نتایج مربوط به آزمون کشش آلومینیوم AA2024-T3، AA1050-O و هسته کامپوزیتی شرح داده می‌شود. سپس نتایج سعی و خطای تجربی عمق کانال و همچنین دما و ضخامت نهایی ارائه می‌گردد. سپس نتایج مربوط به لایه‌چینی ورق FML در جهات مختلف ارائه می‌شود. همچنین مقایسه و بررسی برگشت فنری در ضخامت‌ها و عمق‌های خم مختلف نیز بیان خواهد شد.

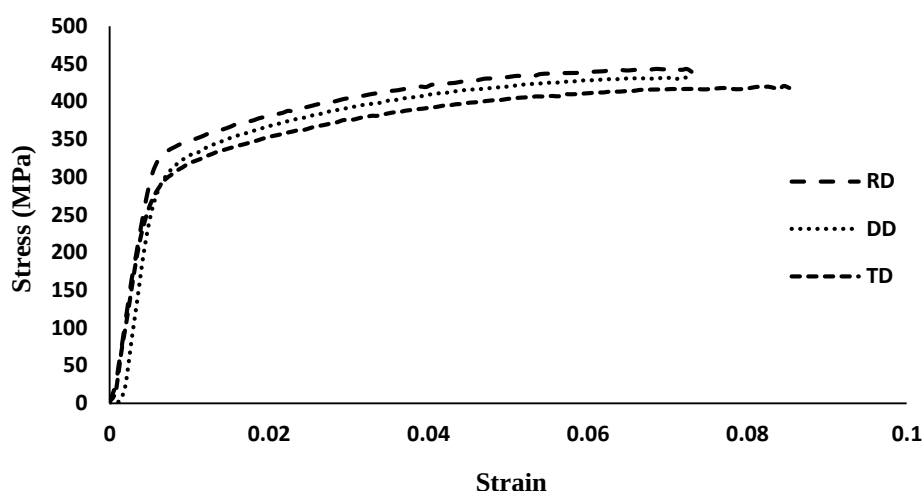
در بخش ارائه‌ی نتایج عددی، هندسه نمونه در حالت بارگذاری و باربرداری، توزیع ضخامت و کرنش موثر پلاستیک آورده می‌شود. همچنین مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمون‌های تجربی ارائه می‌شود.

۱-۴- نتایج تجربی

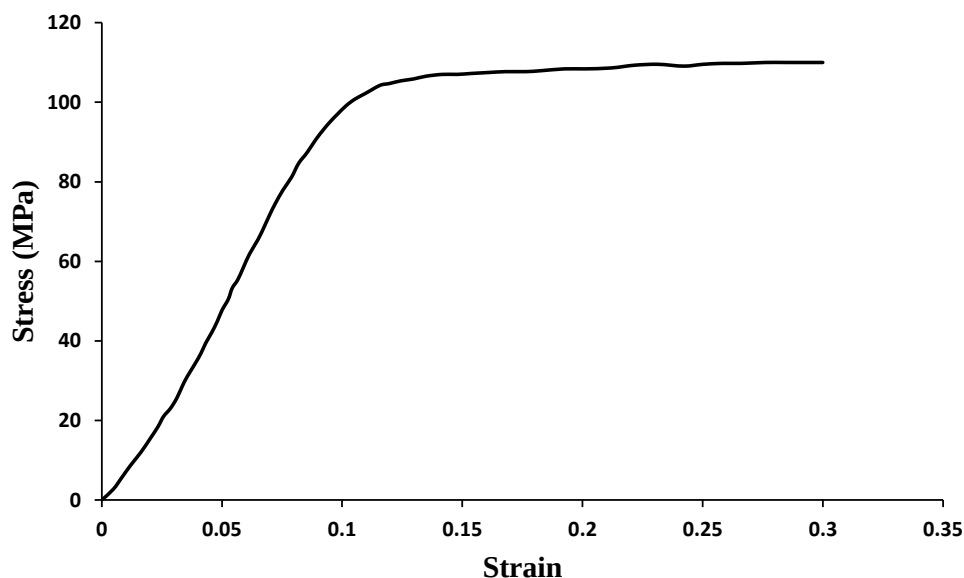
۱-۴-۱ نتایج آزمون کشش تک محوره

الف) ورق آلومینیوم AA2024-T3 و AA1050-O

نمودار تنش-کرنش مهندسی ورق آلومینیوم AA2024-T3 در سه جهت نورد (RD)، عمود بر نورد (TD) و ۴۵ درجه نسبت به نورد (DD) و AA1050-O به ترتیب در شکل ۱-۴ و شکل ۲-۴ نشان داده شده است. چگالی و ضریب پواسون ورق‌های آلومینیوم بر اساس استاندارد ASM به ترتیب برابر 2.71 gr/cm^3 و 0.33 می‌باشد.



شکل ۱-۴: نمودار تنش-کرنش مهندسی ورق AA2024-T3



شکل ۲-۴: نمودار تنش-کرنش مهندسی ورق AA1050-O [۲۸]

خواص مکانیکی آلومینیوم‌های AA1050-O و AA2024-T3 به‌دست آمده از آزمون کشش در جدول ۱-۴ گزارش شده است.

جدول ۱-۴: خواص مکانیکی آلومینیوم AA2024-T3

جنس ورق	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)	ازدیاد طول (%)
AA2024-T3	۳۳۷	۴۴۴/۷	۹/۰۷
AA1050-O	۹۵/۷	۱۰۲	۳۰

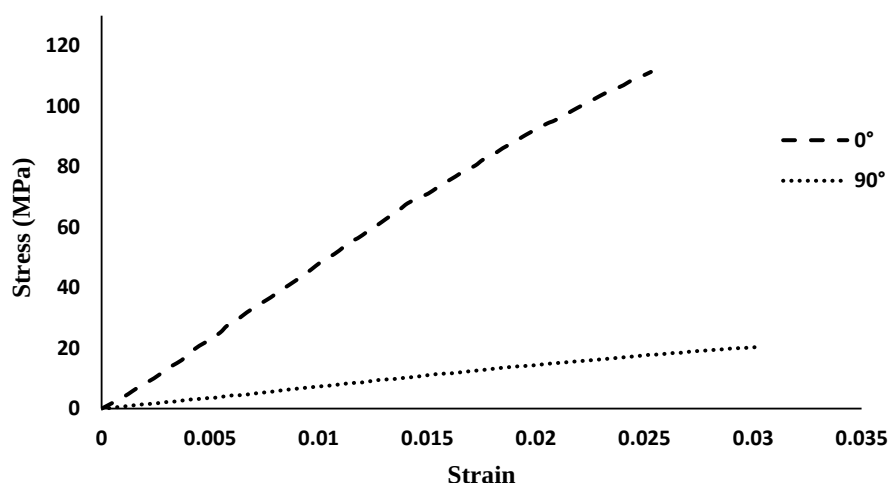
همچنین ثوابت ناهمسانگردی ورق آلومینیوم AA2024-T3 بر اساس معیار هیل ۴۸ در جدول ۲-۴ گزارش شده است.

جدول ۲-۴: ثوابت ناهمسانگردی برای آلومینیوم AA2024-T3

جنس ورق	R _{۱۱}	R _{۲۲}	R _{۳۳}	R _{۱۲}	R _{۲۳}	R _{۳۱}
AA2024-T3	۱	۱	۰/۹۴	۰/۹۶	۱	۱

ب) هسته کامپوزیتی

شکل ۳-۴ نمودار تنش-کرنش مهندسی ماده هسته از جنس پلی یورتان-فیبر شیشه در جهت 0° و 90° نمایش می دهد.



شکل ۳-۴: نمودار تنش-کرنش مهندسی هسته کامپوزیتی

نتایج حاصل از آزمون کشش هسته کامپوزیتی از نمودار تنش-کرنش و استفاده از معادلات (۲-۲) تا (۲-۹) فصل ۲ در جدول ۳-۴ آورده شده است. درصد کسر حجمی برای ماتریس (V_m) و فیبر (V_f) به ترتیب برابر ۹۴٪ و ۶٪ می باشد.

جدول ۳-۴: خواص مکانیکی هسته کامپوزیتی

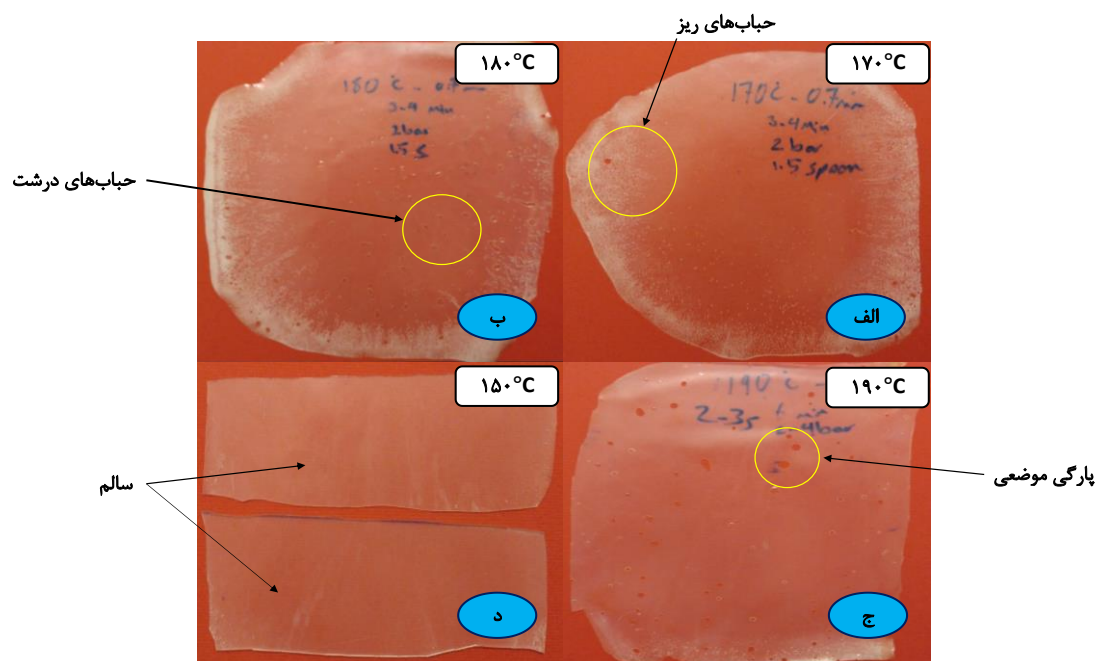
ν_{12}	G_{23} (MPa)	G_{13} (MPa)	G_{12} (MPa)	E_{22} (MPa)	E_{11} (MPa)
۰/۴۷۲۶	۱۸۹/۴	۱/۲۳	۱/۲۳	۶۹۳	۴۵۲۰

۲-۱-۴ سعی و خطای تجربی برای دستیابی به محصول سالم

در این بخش به بررسی شرایط مناسب ساخت و خم کاری ورق فیبر فلزی پرداخته می شود. در ابتدا سعی و خطای لازم برای ساخت لایه پلی یورتان و سپس عمق بیشینه کانال و ساخت FML با رویه AA2024-T3 و AA1050-O انجام می شود.

الف) سعی و خطای تجربی برای ساخت لایه پلی یورتان

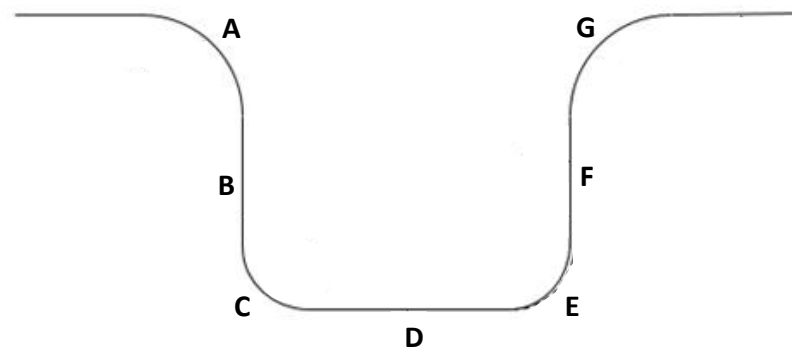
مهمترین عیوب ایجاد شده در ساخت لایه پلی یورتان ایجاد حباب، گیربکناختی ضخامت، اتصال ناقص و پارگی آن می باشد. کنترل دمای مناسب عامل اصلی در تولید یک محصول سالم است. برای ساخت لایه پلی یورتان سالم، دما و فشار و زمان های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۴-۴، نمونه هایی از لایه های پلی یورتان تولید شده در دمای مختلف ارائه شده است. در همه نمونه ها فشار و مدت زمان نگهداری با توجه به سعی و خطاهای مختلف و رسیدن به یک حالت بهینه، به ترتیب برابر ۲-۴ bar و ۴ min می باشد. همانطور که در شکل ۴-۴ مشخص است، نمونه کاملاً سالم در دمای ۱۵۰ °C تولید شده است.



شکل ۴-۴: لایه پلی یورتان تهیه شده با ضخامت ۰/۶ mm در دماهای مختلف

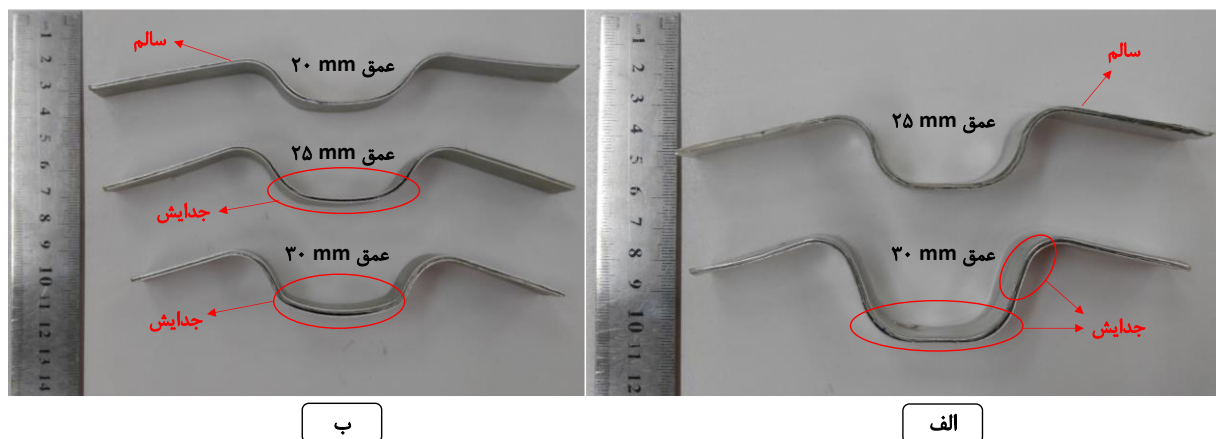
ب) عمق بیشینه کانال

برای بررسی جدایش، نمونه FML به صورت شکل ۴-۵ به ناحیه‌های مختلف تقسیم‌بندی شده است.



شکل ۴-۵: ناحیه‌های تقسیم‌بندی شده برای بررسی جدایش

شکل ۴-۶ خم کاری نمونه‌های ورق فیبر فلزی را برای رویه‌های AA1050-O و AA2024-T3 نشان می‌دهد.



شکل ۴-۶: نمونه‌های خم شده FML در عمق‌های مختلف با رویه ، الف) AA1050-O، ب) AA2024-T3

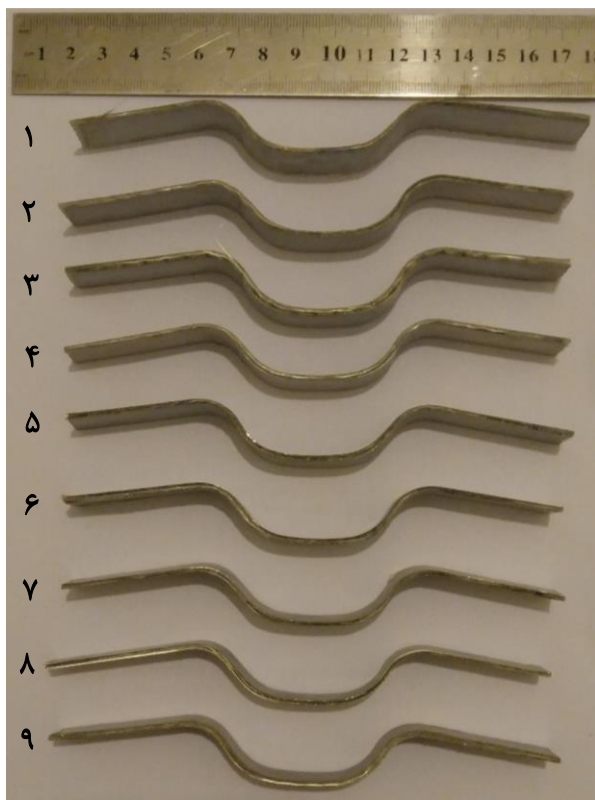
با خم کاری ورق فیبر فلزی نتایج حاصل از این آزمون در جدول ۴-۴ آورده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، عمق کانال مناسب برای ورق فیبر فلزی با رویه AA2024-T3 برابر ۲۰ mm و رویه AA1050-O برابر ۲۵ mm می‌باشد.

جدول ۴-۴: نتایج خم کاری FML در عمق‌های مختلف کانال

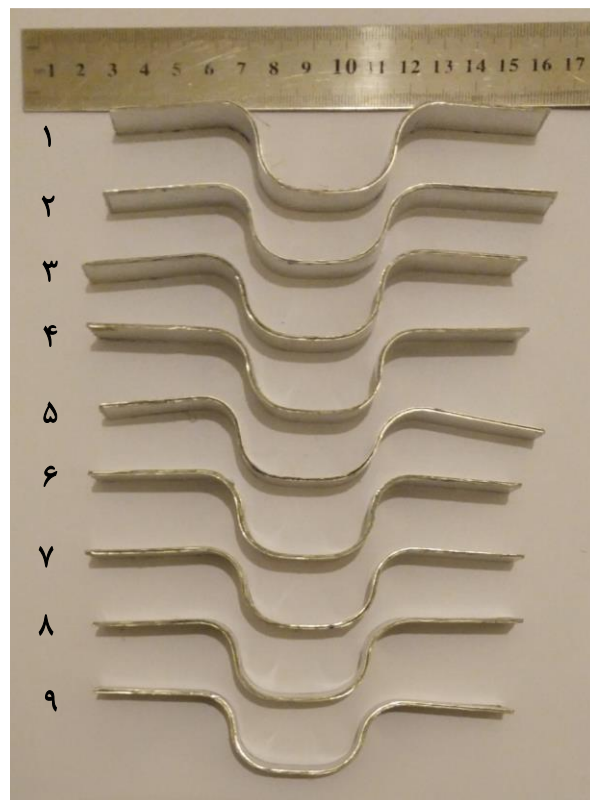
جنس	عمق خم (mm)	جدایش
AA2024-T3	۲۰	سالم
AA2024-T3	۲۵	C-D-E-F
AA2024-T3	۳۰	جدایش کامل
AA1050-O	۲۵	سالم
AA1050-O	۳۰	C-D-F

(ب) سعی و خطای تجربی ساخت ورق فیبر فلزی

ورق FML با ضخامت لایه هسته و دمای پخت متفاوت بر طبق جدول ۲-۳ ساخته و خم کاری آن صورت گرفت. محصول به دست آمده پس از برگشت فوری FML با رویه AA2024-T3 و AA1050-O در شکل ۷-۴ نشان داده شده است.



ب



الف

شکل ۴-۷: نمونه‌های خم شده FML با شرایط ساخت مختلف، الف) با رویه AA1050-O، ب) با رویه AA2024-T3

جدول ۴-۵ و ۴-۶ نتایج حاصل از سعی و خطای شرایط ساخت FML را به ترتیب برای رویه AA2024-T3 و AA1050-O نشان می‌دهد. با توجه به داده‌های به دست آمده، با مقایسه برگشت‌فتری در چهار نمونه سالم FML با رویه AA2024-T3، بهترین شرایط ساخت مربوط به نمونه شماره ۹ در دمای 170°C و ضخامت $1/8\text{ mm}$ بوده زیرا که با توجه به ضخامت فیبر شیشه، ورق FML با ضخامتی کمتر از $1/8\text{ mm}$ نشان از احتمال شکست فیبر و فشرده شدن آن می‌دهد. همچنین برای رویه AA1050-O مربوط به نمونه شماره ۸ در دمای 170°C و ضخامت $1/5\text{ mm}$ می‌باشد.

جدول ۴-۵: سعی و خطای تجربی ساخت FML با رویه AA2024-T3

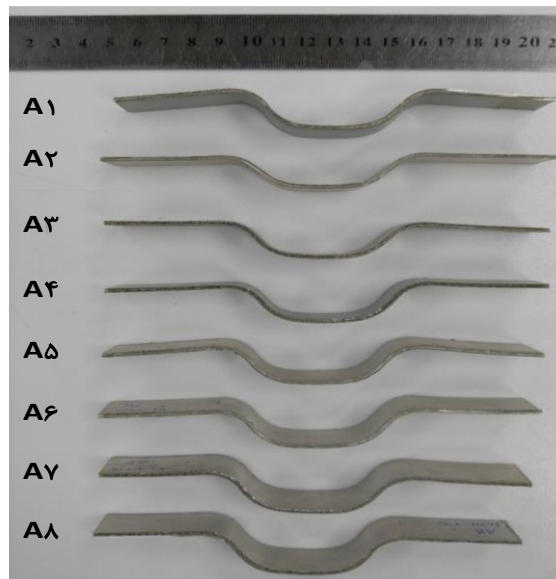
نمونه	دما (°C)	ضخامت (mm)	ناحیه جدایش
۱	۱۳۰	۱/۵	E
۲	۱۳۰	۱/۷	سالم
۳	۱۳۰	۲	سالم
۴	۱۵۰	۱/۵	سالم
۵	۱۵۰	۱/۷	E
۶	۱۵۰	۲	D-E-F
۷	۱۷۰	۱/۵	A-C-E
۸	۱۷۰	۱/۷	C-D
۹	۱۷۰	۲	سالم

جدول ۴-۶: سعی و خطای تجربی ساخت FML با رویه AA1050-O

نمونه	دما (°C)	ضخامت (mm)	ناحیه جدایش
۱	۱۳۰	۱/۳	B-E
۲	۱۳۰	۱/۵	B-C
۳	۱۳۰	۱/۷	A-B
۴	۱۵۰	۱/۳	A
۵	۱۵۰	۱/۵	E
۶	۱۵۰	۱/۷	B
۷	۱۷۰	۱/۳	E-F
۸	۱۷۰	۱/۵	سالم
۹	۱۷۰	۱/۷	A-G

۴-۱-۳ اثر لایه چینی بر برگشت فیزی در ورق فیبر فلزی با رویه AA2024-T3

به منظور بررسی اثر لایه چینی FML بر برگشت فیزی، مطابق جدول ۴-۷، لایه چینی متفاوت فیبر و ورق فلزی AA2024-T3 انجام و نمونه های A1 تا A8 ساخته شد. ضخامت نهایی (t_f) این نمونه ها برابر ۱/۸ mm می باشد. نمونه های فوق پس از خم کاری و باربرداری و برگشت فیزی در شکل ۴-۸ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۸: نمونه‌های خم شده FML با رویه AA2024-T3 بر اساس لایه‌چینی

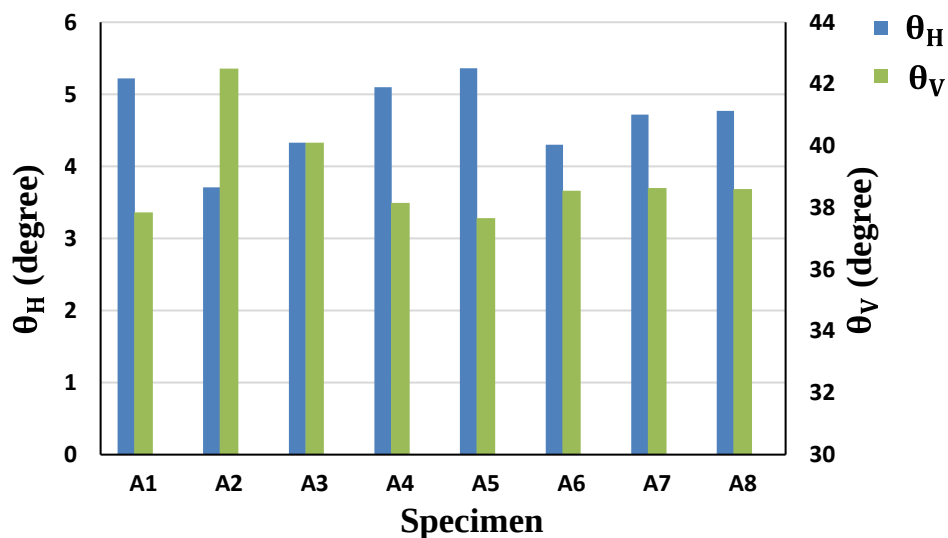
بعد از شکل‌دهی، کانتور نمونه‌ها برای محاسبه میزان برگشت‌فتری ترسیم و زاویه برگشت‌فتری اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از این آزمون در جدول ۴-۷ آمده است.

جدول ۴-۷: نحوه لایه‌چینی و میزان برگشت‌فتری در FML با رویه AA2024-T3

نمونه	لایه‌چینی Al/core/Al (degree)	ضخامت نهایی (mm)	θ_H (degree)	θ_V (degree)
A1	۰/۰/۰	۱/۸	-۵/۲۲	۳۷/۸۴
A2	۰/۰/۹۰	۱/۸	-۳/۷۱	۴۲/۵
A3	۰/۹۰/۰	۱/۸	-۴/۳۳	۴۰/۵۷
A4	۰/۹۰/۹۰	۱/۸	-۵/۱	۳۸/۱۵
A5	۹۰/۰/۰	۱/۸	-۵/۳۶	۳۷/۶۶
A6	۹۰/۰/۹۰	۱/۸	-۴/۳	۳۸/۵۵
A7	۹۰/۹۰/۰	۱/۸	-۴/۷۲	۳۸/۶۳
A8	۹۰/۹۰/۹۰	۱/۸	-۴/۷۷	۳۸/۶

مقایسه حالت A۲ و A۵ نشان می‌دهد در حالتی که فیبر در جهت طولی است و چرخش ۹۰ درجه‌ای ورق بالا و پایین بر برگشت‌فتری تاثیرگذار است. ولی در حالتی که فیبر در جهت عرضی است (مقایسه A۴ و A۷) این چرخش بر برگشت‌فتری تاثیر چندانی ندارد. مقایسه حالت A۱ و A۳ نشان می‌دهد که استفاده از فیبر با جهت طولی ورق خم شده (۰/۰/۰) در مقایسه با فیبر با جهت عرضی (۰/۹۰/۰) منجر به زاویه برگشت‌فتری عمودی (θ_V) کمتری خواهد شد. با توجه به این که در ناحیه افقی (θ_H) زاویه نهایی وابسته به برگشت‌فتری شعاع ماتریس و شعاع سنبه می‌باشد، در ناحیه افقی (θ_H) نتیجه معکوس می‌باشد. مقایسه حالت A۱ و A۶ نشان می‌دهد چرخش ورق تاثیر چندانی بر برگشت‌فتری ورق ندارد. دلیل این موضوع این است که تفاوت ناهمسانگردی درون صفحه‌ای ورق AA2024-T3 در دو جهت ۰ و ۹۰ درجه قابل توجه نمی‌باشد.

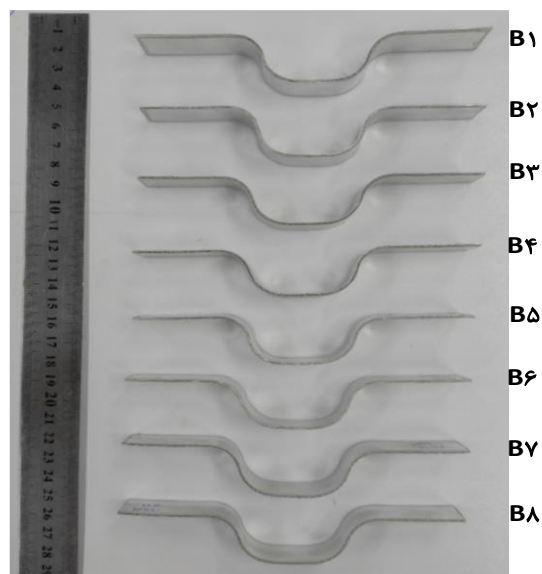
در شکل ۹-۴ نمودار میله‌ای میزان برگشت‌فتری افقی و عمودی نشان داده شده است. با توجه به نمودار، بیشینه و کمینه زاویه برگشت‌فتری برای رویه AA2024-T3 در ناحیه افقی (θ_H) به ترتیب برابر $5/36^\circ$ و $3/71^\circ$ و در ناحیه عمودی (θ_V) به ترتیب برابر $42/5^\circ$ و $37/66^\circ$ است.



شکل ۹-۴: نمودار میله‌ای اندازه‌ی برگشت‌فتری در FML با رویه AA2024-T3 بر حسب لایه‌چینی

۴-۱-۴ اثر لایه‌چینی بر برگشت‌فتری در ورق فیبر فلزی با رویه آلومینیوم AA1050-O

نمونه‌ها بر اساس قرارگیری فیبر و فلز در جهت ۰ و ۹۰ درجه آماده شده است. در شکل ۱۰-۴ نمونه‌های FML با رویه AA1050-O خم شده را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۰: نمونه‌های خم شده FML با رویه AA1050-O بر اساس لایه‌چینی مختلف

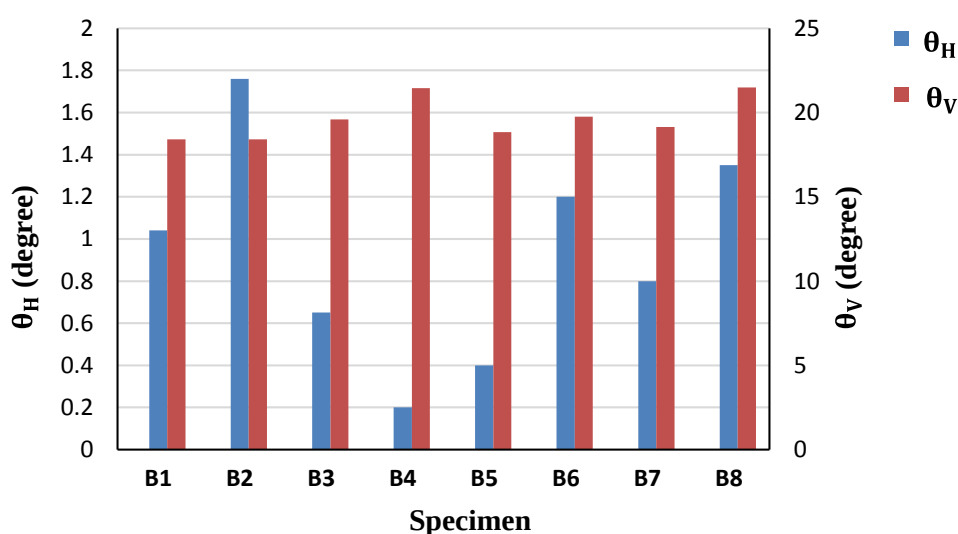
بعد از شکل‌دهی، کانتور نمونه‌ها برای محاسبه میزان برگشت‌فتری کشیده شده و نتایج حاصل از این آزمون در جدول ۴-۸ آمده است.

جدول ۴-۸: نحوه لایه‌چینی و میزان برگشت‌فتری در FML با رویه AA1050-O

نمونه	لایه‌چینی Al/core/Al (degree)	ضخامت نهایی (mm)	θ_H (degree)	θ_V (degree)
B۱	۰/۰/۰	۱/۴	۱/۰۴	۱۸/۴۲
B۲	۰/۰/۹۰	۱/۴	۱/۷۶	۱۸/۴۱
B۳	۰/۹۰/۰	۱/۴	۰/۶۵	۱۹/۶
B۴	۰/۹۰/۹۰	۱/۴	۰/۲	۲۱/۴۵
B۵	۹۰/۰/۰	۱/۴	۰/۴	۱۸/۸۴
B۶	۹۰/۰/۹۰	۱/۴	۱/۲	۱۹/۷۵
B۷	۹۰/۹۰/۰	۱/۴	۰/۸	۱۹/۱۵
B۸	۹۰/۹۰/۹۰	۱/۴	۱/۳۵	۲۱/۵

مقایسه جدول ۴-۸ و جدول ۴-۷ نشان می‌دهد که در مجموع اندازه برگشت‌فتری برای ورق FML با رویه AA1050-O به مقدار قابل توجهی کمتر از AA2024-T3 می‌باشد که این نتیجه را می‌توان به تفاوت در نسبت $\frac{\sigma_y}{E}$ در ورق دانست. تحقیقات انجام شده در برگشت‌فتری ورق‌های فیبر فلزی نشان می‌دهد که هرچه این نسبت افزایش یابد میزان برگشت‌فتری افزایش خواهد یافت [۳۴].

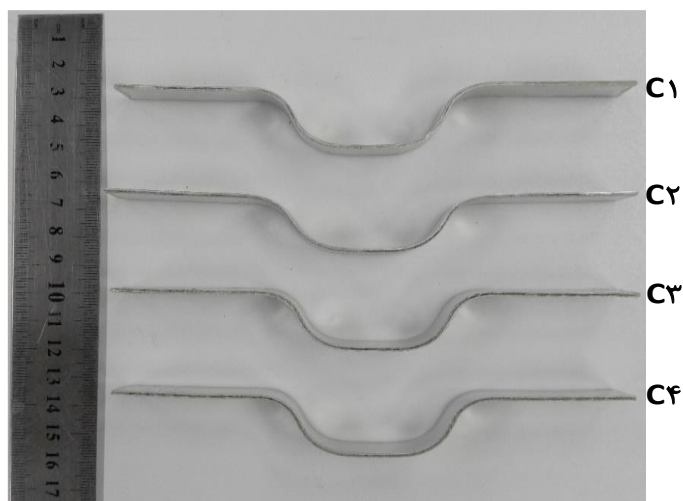
نمودار میله‌ای میزان برگشت‌فتری در شکل ۴-۱۱ قابل مشاهده است. با توجه به نمودار، بیشینه و کمینه میزان برگشت‌فتری برای رویه آلومینیوم AA1050-O در ناحیه افقی (θ_H) به ترتیب برابر $1/76^\circ$ و $0/2^\circ$ و در ناحیه عمودی (θ_V) به ترتیب برابر $21/5^\circ$ و $18/45^\circ$ می‌باشد.



شکل ۴-۱۱: نمودار میله‌ای میزان برگشت‌فتری در FML با رویه AA1050-O بر حسب لایه‌چینی

۴-۱-۵ اثر عمق کانال بر برگشت‌فتری در ورق فیبر فلزی با رویه AA1050-O

نتایج پژوهش نشان می‌دهد که عمق کانال بر میزان برگشت‌فتری تاثیرگذار است. برای بررسی این تاثیر، FML در دو عمق ۲۰ mm (نمونه C) و ۲۵ mm (نمونه B) خم شد. نتایج حاصل از خم تا عمق ۲۵ mm در جدول ۴-۸ ارائه شد. نمونه‌های خم شده FML با رویه AA1050-O با عمق کانال ۲۵ mm (نمونه‌های C) در شکل ۴-۱۲ نمایش داده شده است.



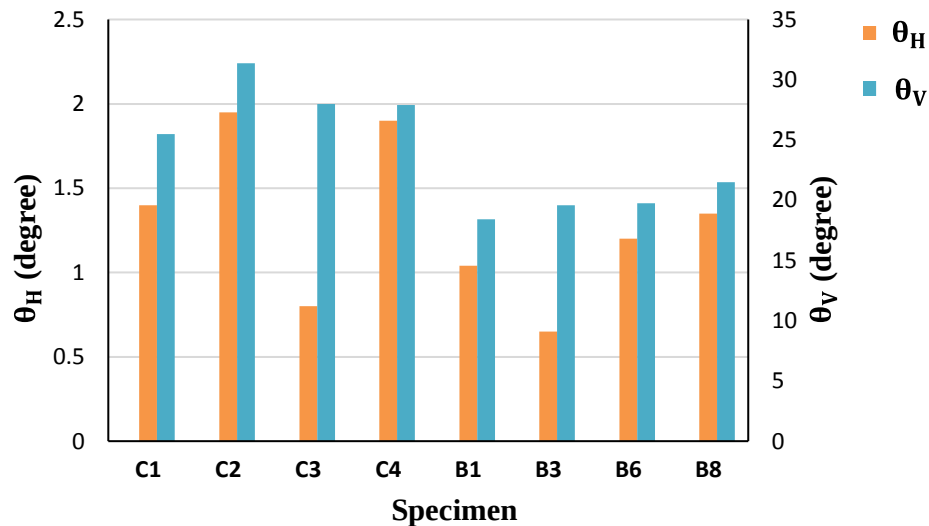
شکل ۴-۱۲: نمونه خم شده FML با رویه AA1050-O با عمق کانال ۲۰ mm با لایه چینی مختلف

نتایج به دست آمده برای نمونه‌هایی با عمق خم ۲۰ mm و با ضخامت نهایی ۱/۴ mm در جدول ۴-۹ قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۴-۹: میزان برگشت فنری FML با رویه AA1050-O برای عمق کانال ۲۰ mm و ۲۵ mm و لایه چینی مختلف

Al/core/Al لایه چینی (degree)	نمونه	عمق کانال (mm)	θ_H (degree)	θ_V (degree)
۰/۰/۰	C۱	۲۰	۱/۴	۲۵/۵
	B۱	۲۵	۱/۰۴	۱۸/۴۲
۰/۹۰/۰	C۲	۲۰	۰/۸	۲۷/۹۸
	B۳	۲۵	۰/۶۵	۱۹/۶
۹۰/۰/۹۰	C۳	۲۰	۱/۹۵	۳۱/۳۷
	B۶	۲۵	۱/۲	۱۹/۷۵
۹۰/۹۰/۹۰	C۴	۲۰	۱/۹	۲۷/۹۲
	B۸	۲۵	۱/۳۵	۲۱/۵

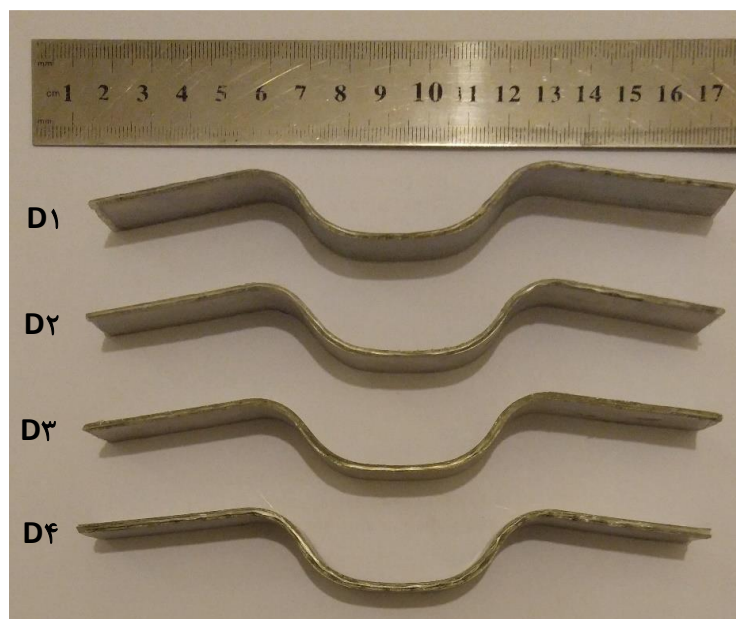
برای مقایسه میزان برگشت‌فتری در این آزمون، نمودار میله‌ای این نمونه‌ها در کنار هم مطابق شکل ۴-۱۳ رسم شد. بر این اساس، میزان برگشت‌فتری با کاهش عمق خم در هر دو ناحیه افقی (θ_H) و عمودی (θ_V) افزایش می‌یابد. همچنین بیشینه برگشت‌فتری برای نمونه‌هایی با عمق خم ۲۰ mm در ناحیه افقی (θ_H) و ناحیه عمودی (θ_V) به ترتیب برابر $1/95^\circ$ و $31/37^\circ$ بوده و کمینه برگشت‌فتری نیز به ترتیب برابر $0/8^\circ$ و $25/5^\circ$ می‌باشد.



شکل ۴-۱۳: نمودار میله‌ای میزان برگشت‌فتری FML با رویه AA1050-O با عمق کانال ۲۰ mm (نمونه‌های C) و ۲۵ mm (نمونه‌های B)

۴-۱-۶ اثر ضخامت هسته بر برگشت‌فتری ورق فیبر فلزی با رویه AA2024-T3

در این قسمت به بررسی اثر ضخامت هسته ورق فیبر فلزی بر میزان برگشت‌فتری پرداخته شده است. نمونه‌ها با ضخامت ثابت ورق AA2024-T3 (t_m) برابر ۰/۶۶ mm و ضخامت هسته (t_c) متغیر مطابق شکل ۴-۱۴ ساخته شد.



شکل ۴-۱: نمونه خم شده FML با رویه آلومینیوم AA2024-T3 با ضخامت هسته متفاوت و ضخامت ورق

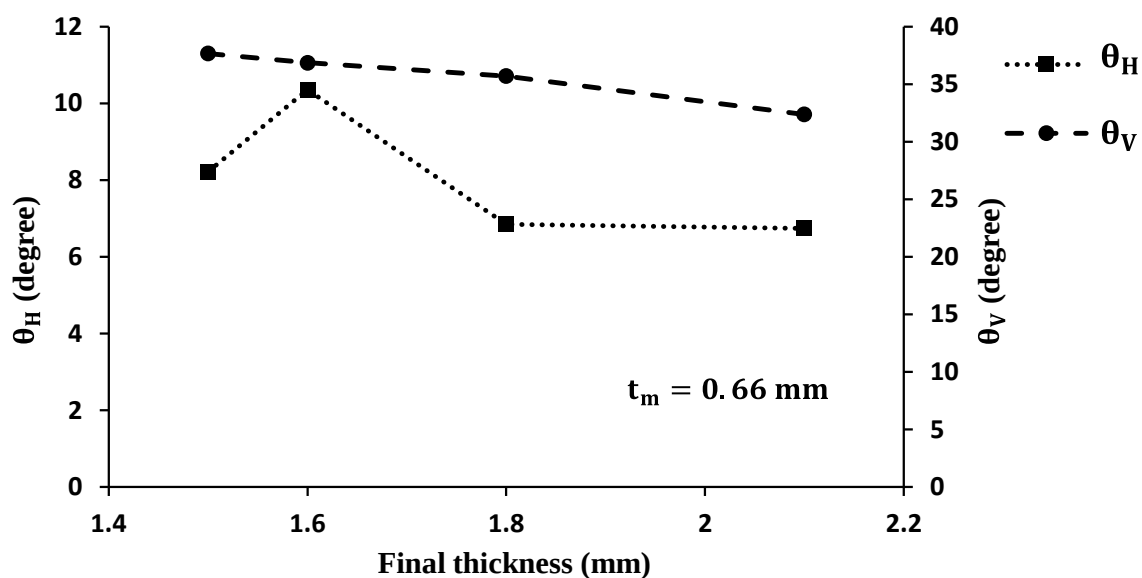
ثابت، $t_{f1}=1/5$ mm، $t_{f2}=1/6$ mm، $t_{f3}=1/8$ mm، $t_{f4}=2/1$ mm

نتایج حاصل از خم کاری نمونه‌ها با ضخامت نهایی مختلف در جدول ۴-۱۰ قابل مشاهده است. لایه‌چینی این نمونه‌ها بر اساس جهات ۰/۰/۰ می‌باشد.

جدول ۴-۱۰: نمونه‌های خم شده FML با رویه AA2024-T3 بر اساس ضخامت نهایی

نمونه	ضخامت نهایی (mm)	θ_H (degree)	θ_V (degree)
D۱	۱/۵	-۸/۲۲	۳۷/۶۶
D۲	۱/۶	-۱۰/۳۶	۳۶/۸۶
D۳	۱/۸	-۶/۸۵	۳۵/۷۱
D۴	۲/۱	-۶/۷۴	۳۲/۳۷

مطابق با شکل ۴-۱۵، میزان برگشت‌فتری در ناحیه عمودی (θ_V) با افزایش ضخامت نهایی، با یک شیب ملایم کاهش یافته و در ناحیه افقی (θ_H) در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

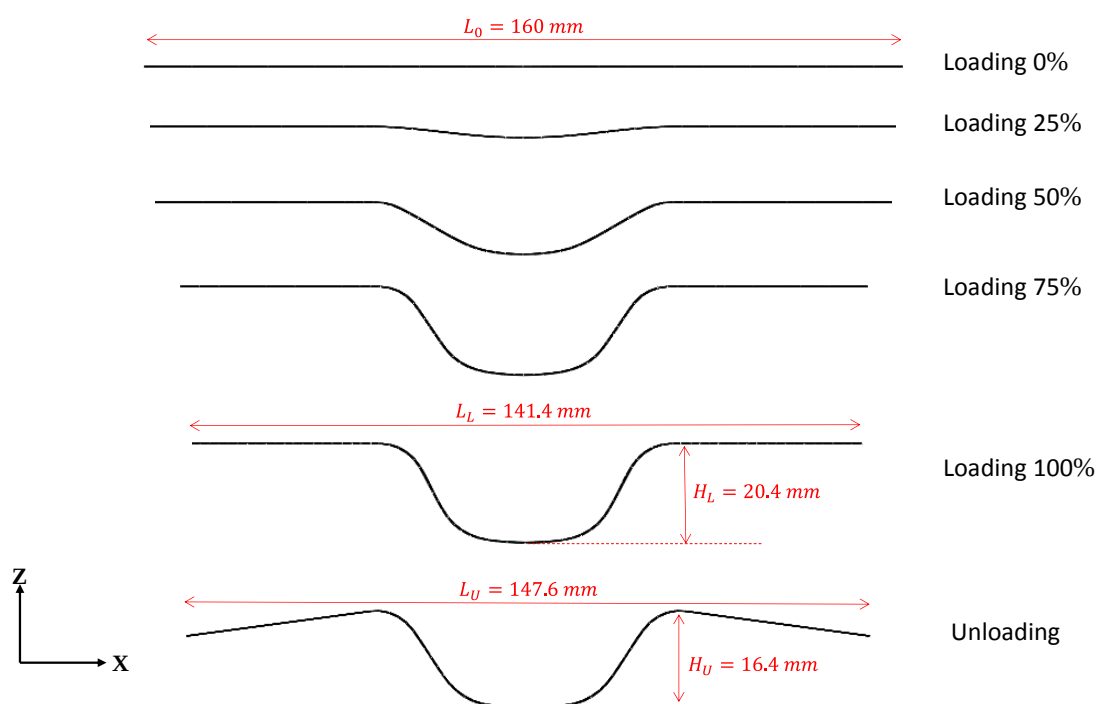


شکل ۴-۱۵: نمودار اندازه برگشت‌فتری در FML با رویه آلومینیوم AA2024-T3 بر اساس ضخامت نهایی

۲-۴- نتایج تحلیل المان محدود

۱-۲-۴ ارائه هندسه خم و برگشت فنی FML با رویه AA2024-T3 در چندین مرحله

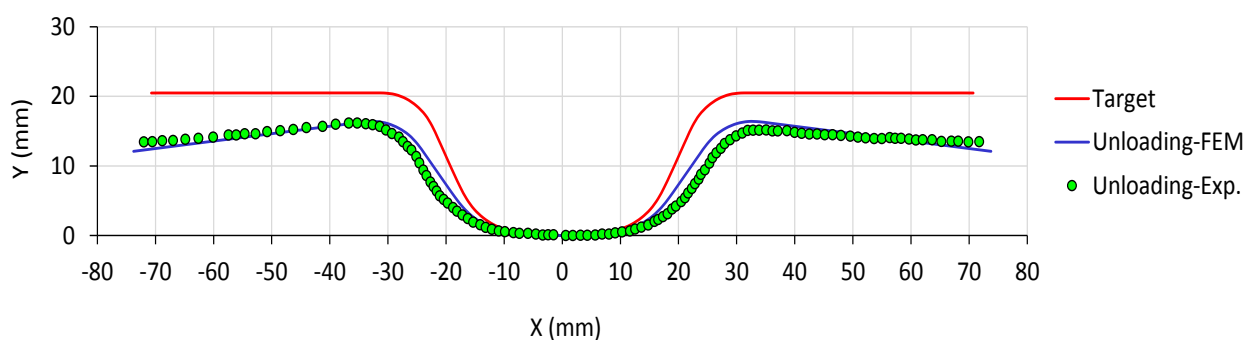
در این بخش، نمونه با لایه چینی ۰/۰/۰ و ضخامت ۱/۸ mm مدل سازی شد. شکل ۱۶-۴ مراحل مختلف خم کاری نمونه در چند مرحله و همچنین برگشت فنی آن بعد از باربرداری را نشان می دهد.



شکل ۱۶-۴: مراحل بارگذاری و باربرداری FML با رویه AA2024-T3 و با $t_c = 0.48 \text{ mm}$, $t_m = 0.66 \text{ mm}$

لایه چینی ۰/۰/۰

به منظور صحت سنجی نتایج عددی، به عنوان نمونه برگشت فنی ورق FML با رویه AA2024-T3 و لایه چینی ۰/۰/۰ با کانتور تجربی در شکل ۱۷-۴ مورد مقایسه قرار گرفته است.

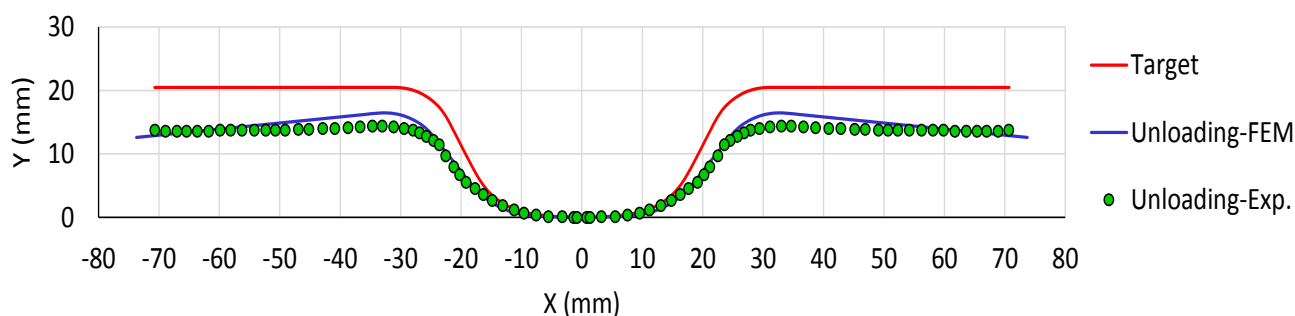


شکل ۱۷-۴: مقایسه برگشت فنی ورق FML با خم ناودانی شکل در حالت عددی و تجربی با لایه چینی

۰/۰/۰

مطابق شکل، کانتور به دست آمده از شبیه سازی عددی از دقت مطلوبی برخوردار است. خطای موجود بین این دو نتیجه را می توان به تغییر شکل ناخواسته از نیروی خارج کردن قطعه از قالب نسبت داد.

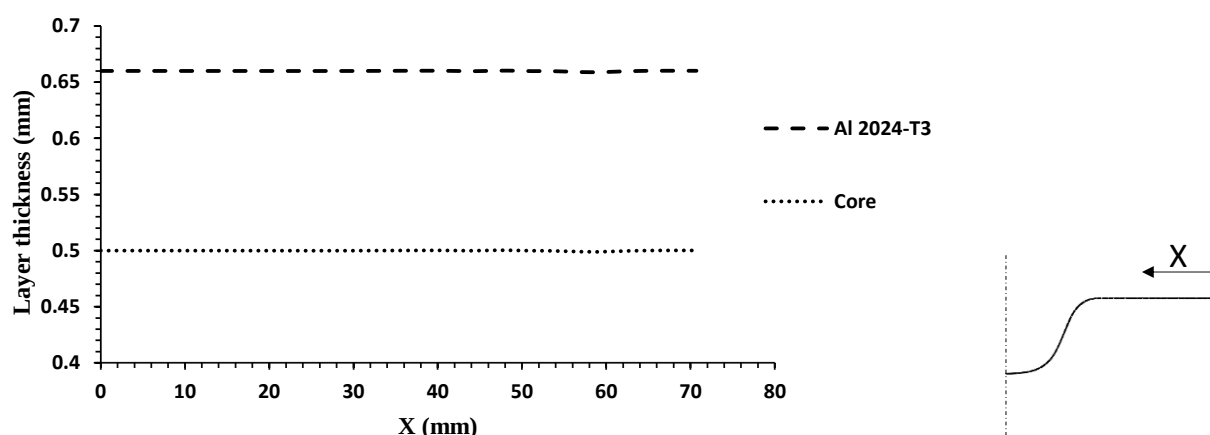
نتایج مشابه مربوط به برگشت فوری ورق FML با لایه چینی ۰/۹۰/۰ در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است. مطابق با شکل، نتایج عددی و تجربی از صحت و دقت مناسبی برخوردار است.



شکل ۴-۱۸: مقایسه برگشت فوری ورق FML با خم ناودانی شکل در حالت عددی و تجربی با لای چینی ۰/۹۰/۰

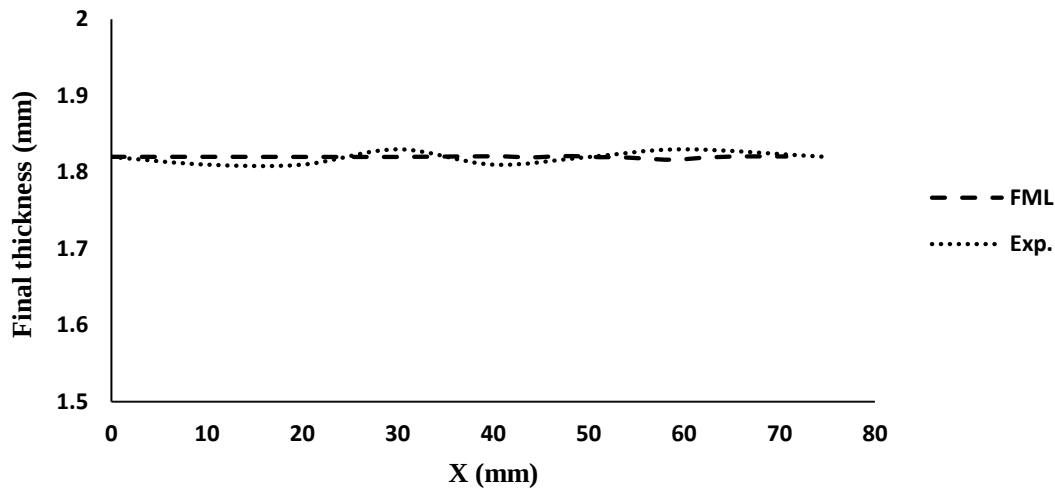
۴-۲-۲ توزیع ضخامت

مطابق با شکل ۴-۱۹، توزیع ضخامت در دو لایه آلومینیوم AA2024-T3 و هسته مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل، فرآیند شکل دهی کانال و باربرداری تاثیر به سزایی در ضخامت ورق اولیه FML ندارد.



شکل ۴-۱۹: توزیع ضخامت لایه AA2024-T3 و هسته کامپوزیتی با $t_{c0}=0/48$ mm، $t_{m0}=0/66$ mm و لایه چینی ۰/۰/۰

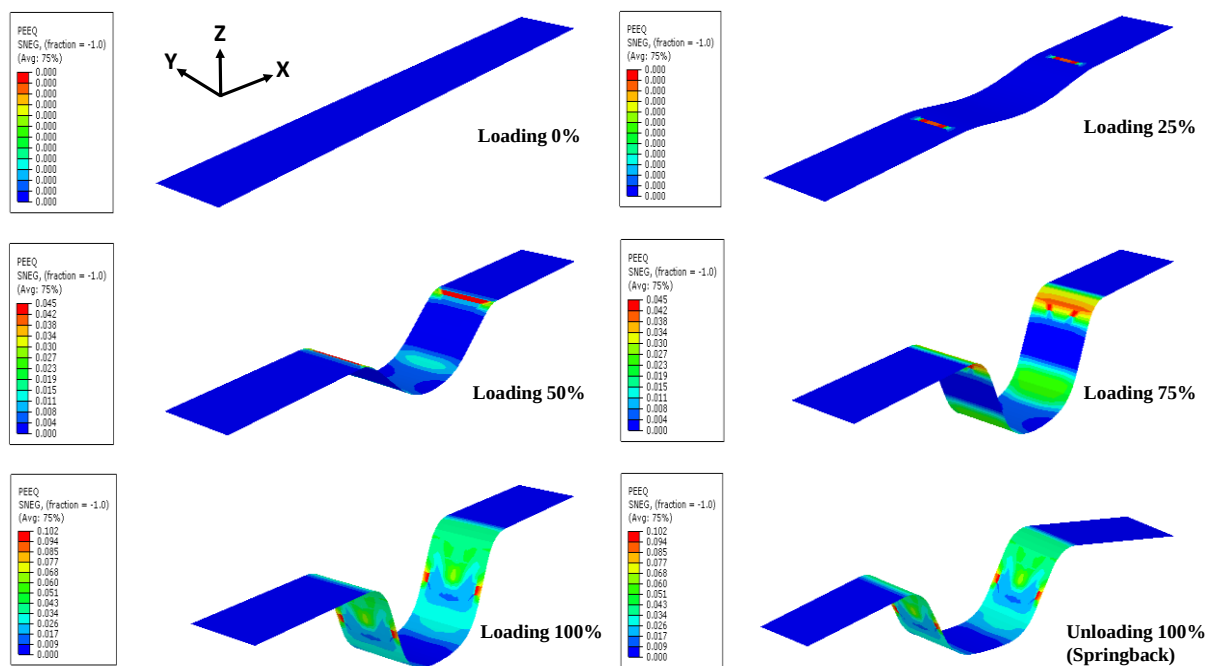
در شکل ۲۰-۴ مقایسه توزیع ضخامت در حالت تجربی و عددی برای FML ارائه شده است. مطابق با شکل، توزیع ضخامت یکنواختی در حالت عددی مشاهده می‌شود. اما در حالت تجربی این توزیع ضخامت دارای پیک‌های متوسطی بوده و میزان خطای آن در حدود ± 0.01 نسبت به مقدار ارائه شده می‌باشد.



شکل ۲۰-۴: توزیع ضخامت نهایی FML در حالت تجربی و عددی با $t_{f0} = 1/8$ mm

۳-۲-۴ توزیع کرنش موثر پلاستیک در شکل‌دهی و برگشت‌فنی

شکل ۲۱-۴ توزیع کرنش موثر در مراحل بارگذاری و باربرداری نشان می‌دهد. با توجه به شکل، با مقایسه وضعیت بارگذاری ۱۰۰ درصد و باربرداری توزیع کرنش موثر پلاستیک تغییری نکرده است. این عدم تغییر نشان دهنده این است که رویه فلزی در برگشت‌فنی رفتار کاملاً الاستیک دارد و وارد ناحیه پلاستیک نخواهد شد.



شکل ۴-۲۱: توزیع کرنش موثر رویه AA2024-T3 در مدل سازی شکل دهی و برگشت فنی نمونه با ضخامت

۱/۸ mm و لایه چینی ۰/۰/۰

فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه گیری

در این پایان نامه، به مطالعه تجربی و عددی برگشت فنی ورق های فیبر فلزی 2×1 در خم کاری کانال ناودانی شکل پرداخته شد. برای ساخت ورق FML از رویه های فلزی AA2024-T3 و AA1050-O استفاده شد. هسته کامپوزیتی از فیبر شیشه تک جهته گرید E با زمینه پلی یورتان و بدون استفاده از واسطه ی چسب، با فشردن طبقات چیده شده به صورت فلز/هسته/فلز در دما و زمان مناسب ساخته شد. برای اجرای این کار پرس گرم هیدرولیک طراحی و ساخته شد. خم کاری ورق های FML در قالب خم انجام و پس از باربرداری، زوایای دیواره ی محصول اندازه گیری و اثر پارامترهای مختلف بر برگشت فنی FML بررسی شد. سعی و خطا بر روی ساخت لایه نازک پلی یورتان از گرانول نشان داد که بهترین شرایط ساخت لایه پلی یورتان با ضخامت 0.6 mm در دمای 150°C ، فشار $2-4 \text{ bar}$ و مدت زمان 4 min می باشد. در غیر این صورت وجود حباب های ریز و درشت و یا پارگی موضعی محتمل می باشد. عمق بیشینه کانال برای خم کاری FML با رویه AA2024-T3 برابر 20 mm و رویه AA1050-O برابر 25 mm می باشد. با افزایش عمق کانال احتمال جدایش افزایش می یابد. دما، فشار و ضخامت نهایی ساخت FML با رویه AA2024-T3 برابر 170°C ، 10 bar و $1/8 \text{ mm}$ و برای رویه AA1050-O برابر 170°C ، 10 bar و $1/5 \text{ mm}$ می باشد. این شرایط برای ساخت یک FML سالم مناسب بوده و در هنگام خم جدایشی مشاهده نخواهد شد.

بیشینه و کمینه میزان برگشت فنی برای رویه آلومینیوم AA2024-T3 در ناحیه افقی (θ_H) به ترتیب برابر $5/36^\circ$ و $-3/71^\circ$ و در ناحیه عمودی (θ_V) به ترتیب برابر $42/5^\circ$ و $37/66^\circ$ است. مقایسه نمونه A2 و A5 نشان داد در حالتی که فیبر در جهت طولی است و چرخش 90° درجه ای ورق بالا و پایین بر برگشت فنی تاثیرگذار است ولی با مقایسه نمونه A4 و A7 مشخص شد که این چرخش در حالتی که فیبر در جهت عرضی است بر برگشت فنی تاثیر چندانی ندارد. مقایسه حالت A1 و A3 نشان داد که استفاده از فیبر با جهت طولی ورق خم شده ($0/0/0$) در مقایسه با فیبر با جهت عرضی ($0/90/0$) منجر به زاویه برگشت فنی عمودی (θ_V) کمتری خواهد شد. با مقایسه حالت A1 و A6 مشخص شد در حالتی که ورق های بالا و پایین همسو باشد؛ چرخش ورق تاثیر چندانی بر برگشت فنی ورق ندارد. دلیل این موضوع این است که تفاوت ناهمسانگردی درون صفحه ای ورق AA2024-T3 در دو جهت 0° و 90° درجه قابل توجه نمی باشد.

اندازه برگشت فنی برای ورق FML با رویه AA1050-O به مقدار قابل توجهی کمتر از AA2024-T3 می باشد که این نتیجه را می توان به تفاوت در نسبت $\frac{\sigma_y}{E}$ در دو ورق دانست. نتایج تجربی نشان داد که با کاهش عمق

کانال در FML با رویه AA1050-O میزان برگشت فنی در هر دو ناحیه افقی (θ_H) و عمودی (θ_V) افزایش می‌یابد. در آزمون تجربی با مقایسه نمونه‌هایی با ضخامت نهایی مختلف مشخص شد که میزان برگشت فنی در ناحیه عمودی (θ_V) با افزایش ضخامت نهایی، با یک شیب ملایم کاهش یافته و در ناحیه افقی (θ_H) در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. با بررسی ضخامت نهایی FML با لایه‌چینی ۰/۰/۰ مشخص شد که تغییرات ضخامت رویه فلزی و هسته کامپوزیتی در حین خم‌کاری بسیار ناچیز است. با مقایسه کانتور کرنش موثر مومسان در رویه فلزی AA2024-T3 بعد از شکل‌دهی و باربرداری مشخص شد، ورق فلزی در برگشت فنی ماهیت کاملاً الاستیک دارد.

۵-۲- پیشنهادها

- به‌منظور ارتقاء موضوع پایان‌نامه برای ادامه تحقیق موارد ذیل پیشنهاد می‌شود:
- ساخت FML با تعداد لایه‌های بیشتر (3×2 و 5×4) و بررسی برگشت فنی آن
- ساخت FML با فیبرهایی از جنس کربن، آرامید و شیشه گرید S و مقایسه قابلیت خم‌کاری و میزان برگشت فنی محصولات تولید شده با FML بررسی شده در این پایان‌نامه
- استفاده از رزین اپوکسی و یا رزین پلی‌یورتان ورقه‌ای به‌جای گرانول در ساخت ورق FML و بررسی مقاومت در برابر جدایش لایه‌ها
- بررسی دیگر فرآیندهای تولید ورق‌های FML مانند خم کناره، خم V و U شکل و خم‌کاری کششی
- حل تحلیلی مسئله‌ی خم‌کاری و برگشت فنی ورق‌های FML، محاسبه‌ی زوایای محصول و توزیع تنش پسماند در مقطع و مقایسه نتایج با حل عددی
- استفاده از المان چسب بین لایه‌های FML و استخراج ثوابت رفتاری ماده به‌منظور مدل‌سازی پدیده جدایش در شبیه‌سازی عددی
- ارائه راهکارهای مناسب برای غلبه بر پدیده‌ی برگشت فنی و جدایش لایه‌ها و اصلاح فرآیند ساخت FML و قالب خم‌کاری
- بررسی اثر پارامترهای مختلف مانند شعاع سنبه و ماتریس، شرایط اصطکاکی، نیروی ورق‌گیر، سرعت شکل‌دهی و ... بر برگشت فنی ورق FML

- استفاده از روش DOE برای بهینه‌سازی نتایج سعی و خطای تجربی

- [1] J. Remmers, and R. De Borst, "Delamination buckling of fibre-metal laminates," *Composites Science and Technology*, vol. 61, no. 15, pp. 2207-2213, 2001.
- [2] G. R. Villanueva, and W. Cantwell, "The high velocity impact response of composite and FML-reinforced sandwich structures," *Composites Science and Technology*, vol. 64, no. 1, pp. 35-54, 2004.
- [3] A. Asundi, and A. Y. Choi, "Fiber metal laminates: an advanced material for future aircraft," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 63, no. 1, pp. 384-394, 1997.
- [4] J. Schut, and R. Alderliesten, "Delamination growth rate at low and elevated temperatures in glare." pp. 3-8.
- [5] E. C. Botelho, R. A. Silva, L. C. Pardini, and M. C. Rezende, "A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures," *Materials Research*, vol. 9, no. 3, pp. 247-256, 2006.
- [6] "www.edu.nano.ir."
- [7] "www.substech.com."
- [8] F. L. Matthews, and R. D. Rawlings, *Composite materials: engineering and science*: Elsevier, 1999.
- [9] R. Gibson, "Principles of composite material mechanics, 1994," *New York: McGraw-Hall Inc.*
- [10] Sinke, J., Manufacturing principles for Fiber Metal Laminates. ICCM, 2009. 17: p. 1-10.
- [11] P. K. Mallick, *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*: CRC press, 2007.
- [12] A. Vlot, *Low-velocity impact loading: on fibre reinforced aluminium laminates (ARALL and GLARE) and other aircraft sheet materials*, Delft University of Technology, 1993.
- [13] L. Vogelesang, and A. Vlot, "Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 103, no. 1, pp. 1-5, 2000.
- [14] R. Marissen, "Mechanical aspects related to fibre fracture in ARALL® 2 laminates," *Advances in Fatigue Science and Technology*, pp. 697-707: Springer, 1989.
- [15] A. Vlot, and J. W. Gunnink, *Fibre metal laminates: an introduction*: Springer Science & Business Media, 2011.
- [16] G. S. Wilson, *Fatigue Crack Growth Prediction for generalized fiber metal laminates and hybrid materials*: TU Delft, Delft University of Technology, 2013.
- [17] J. Sinke, "Manufacturing of GLARE parts and structures," *Applied composite materials*, vol. 10, no. 4-5, pp. 293-305, 2003.
- [18] م. کدخدایان و همکاران، "بررسی تجربی و شبیه سازی برگشت فوری در فرآیند خمکاری V شکل برای ورق چند لایه کامپوزیتی فلزی-الیافی"، *مهندسی ساخت و تولید ایران*، تبریز، ۱۳۸۹.
- [19] J. M. Whitney, *Structural analysis of laminated anisotropic plates*: CRC Press, 1987.
- [20] M. Abdullah, and W. Cantwell, "The impact resistance of polypropylene-based fibre-metal laminates," *Composites science and technology*, vol. 66, no. 11, pp. 1682-1693, 2006.
- [21] J. Gresham, W. Cantwell, M. Cardew-Hall, P. Compston, and S. Kalyanasundaram, "Drawing behaviour of metal-composite sandwich structures," *Composite Structures*, vol. 75, no. 1, pp. 305-312, 2006.

- [22] S. Kalyanasundaram, S. DharMalingam, S. Venkatesan, and A. Sexton, "Effect of process parameters during forming of self reinforced-PP based Fiber Metal Laminate," *Composite Structures*, vol. 97, pp. 332-337, 2013.
- [23] L. Mosse, W. Cantwell, M. Cardew-Hall, P. Compston, and S. Kalyanasundaram, "Effect of process temperature and blank-holder force on the forming of fibre metal laminate systems."
- [24] G. Rajkumar, M. Krishna, H. Narasimhamurthy, Y. Keshavamurthy, and J. Nataraj, "Investigation of tensile and bending behavior of aluminum based hybrid fiber metal laminates," *Procedia Materials Science*, vol. 5, pp. 60-68, 2014.
- [25] L. Lang, J. Danckert, and K. B. Nielsen, "Multi-layer sheet hydroforming: Experimental and numerical investigation into the very thin layer in the middle," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 170, no. 3, pp. 524-535, 2005.
- [26] J. Wang, and C.-K. Yang, "Failure analysis of hydroforming of sandwich panels," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 15, no. 2, pp. 256-262, 2013.
- [27] S. Bagherzadeh, B. Mollaei-Dariani, and K. Malekzadeh, "Theoretical study on hydro-mechanical deep drawing process of bimetallic sheets and experimental observations," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 9, pp. 1840-1849, 2012.
- [28] ع. سعادت فرد، م. گردویی و همکاران، "بررسی تجربی قابلیت شکل دهی ورق های چندلایه الیاف-فلزی در فرایند کشش هیدرومکانیکی،" پژوهش های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک ایران، تهران، ۲۰۱۶.
- [29] S. Y. Kim, W. J. Choi, and S. Y. Park, "Spring-back characteristics of fiber metal laminate (GLARE) in brake forming process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 32, no. 5-6, pp. 445-451, 2007.
- [30] M. Parsa, and M. Ettehad, "Experimental and finite element study on the spring back of double curved aluminum/polypropylene/aluminum sandwich sheet," *Materials & Design*, vol. 31, no. 9, pp. 4174-4183, 2010.
- [31] M. Parsa, S. Mohammadi, and A. J. Aghchai, "Al3105/polypropylene/Al3105 laminates springback in V-die bending," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 75, no. 5-8, pp. 849-860, 2014.
- [32] "www.forecast3d.com."
- [33] س. کی پور، طراحی و ساخت پرس گرم هیدرولیکی ۱۰ تن، طرح پژوهشی دانشجویی، صنعتی شاهرود دانشگاه، ۲۰۱۶.
- [34] J. Hu, Z. Marciniak, and J. Duncan, *Mechanics of sheet metal forming*: Butterworth-Heinemann, 2002.

Abstract

Fiber Metal Laminates (FMLs) are one of the more applicable composite sheets that consist of metal layers and fiber-reinforced. These layers are joint to each other with a resin bond (epoxy or polyurethane). In the present study, the experimental and numerical investigation of springback in hat-shaped section bending have been performed. At first, the two types of FMLs were produced with aluminum 2024-T3 and 1050-O sheets, unidirectional E-glass fibers and polyurethane resin by using a hot press at 170 °C and pressure of 10 bar. The specimens produced according to the lay-up in 0° and 90° direction of metal layers and fiber-reinforced core, then the hat-shaped channel bending was performed. The effects of parameters such as FML lay-up, channel depth and core thickness on springback angles in the horizontal and vertical zones were studied. In the numerical section, by using Abaqus software, the parameters such as thickness distribution in FML and equivalent plastic strain in AA2024-T3 layers and the springback of FML with layer of AA2024-T3 with different lay-up were investigated. In this section, the metal layers were modeled as an elastic-plastic material with quadratic Hill's anisotropy criteria and the core layer was assumed as an orthotropic linear elastic material. The experimental results of FML with AA2024-T3 layer showed that the springback of the channel is independent of metal layers direction when the fibers are in the longitudinal orientation, while the fibers are in the transverse direction, the metal layers orientation has not significant effect on the springback. Furthermore, the springback angles of FML with AA1050-O layers are significantly less than that of FML with AA2024-T3 layers. By increasing the final thickness, the vertical springback angle decreased monotonically, while the horizontal angle increased at first and decreased finally. The comparison between numerical and experimental observation showed a desirable agreement of FML geometry after unloading.

Keywords: Fiber Metal Laminate, Springback, Hat-shaped section, Plastic anisotropy, Orthotropic lamina.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
MSc Thesis in Mechanical Engineering
Manufacturing and producing

Investigation of Springback in Forming of Hat Shapes Fiber Metal Laminates

By: Soheil Keipour

Supervisor:
Dr. Mahdi Gerdooei

September 2016