

سید الطائفة  
العلیاء  
الکرام



دانشکده مهندسی

گروه مکانیک - ساخت و تولید

عنوان پایان نامه:

بررسی تجربی- عددی برگشت فنری در فرآیند خمش ورق چندلایه  
کامپوزیتی فلزی- الیافی

مؤلف:

سعید امیرنژاد

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته ساخت و تولید

استاد راهنما:

دکتر مهراں کدخدایان

۱۳۸۹/۱۱/۹

## اصالت اثر

اینجانب سعید امیرنژاد آروق تأیید می‌نمایم مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب بوده و در صورت استفاده موردی از دست‌آوردهای پژوهشی دیگران مطابق مقررات به آنها ارجاع شده است. این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرکی هم‌سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه‌ی حقوق مادی و قانونی این اثر متعلق به دانشکده فنی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد.

امضا دانشجو:

سعید امیرنژاد آروق

تاریخ

امضا استاد راهنما:

مهران کدخدایان

تاریخ

## تأییدیه گروه مکانیک

### پایان نامه حاضر تحت عنوان:

بررسی تجربی - عددی برگشت فنری در فرآیند خمش ورق چندلایه کامپوزیتی فلزی - الیافی که توسط آقای سعید امیرنژاد آروق تهیه و به هیات داوران ارائه شده، به عنوان کار پژوهشی دوره کارشناسی ارشد ناپیوسته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید، مورد تأیید شورای تحصیلات تکمیلی گروه مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد می باشد.

تاریخ دفاع: نمره: درجه ارزشیابی:

### اعضای هیات داوران:

نام و نام خانوادگی سمت امضا

۱- دکتر مهران کدخدایان استاد راهنما

۲- دکتر جلیل رضایی پژند استاد ممتحن

۳- دکتر سعید حدیدی مود استاد ممتحن

۴- دکتر مجید معاونیان نماینده تحصیلات تکمیلی

تقدیم بہ ...

پدر و مادری کہ پسر شدند تا من جوان بنامم

# قدردانی و تشکر

شکر و سپاس به درگاه خداوند بلند مرتبه که نعمات خود را بر ما ارزانی داشت. بدون شک دستیابی به موفقیت‌های حاصل شده تنها در سایه حمایت‌ها و راهنمایی‌های استاد راهنمای محترم جناب آقای دکتر مهران کدخدایان ممکن بود.

همچنین بر خود لازم می‌داند از جناب آقای دکتر معتکف که موافقت خود را با اجرای فرآیند طراحی و ساخت کامپوزیت‌های فلزی-الیافی در آزمایشگاه CAD/CAM دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد مبدول داشتند و همچنین سایر همکاری‌هایشان کمال تشکر و قدردانی نمایم.

از جناب آقای دکتر رضایی‌پژند که در بحث نحوه ساخت و تست غیرمخرب کامپوزیت فلزی-الیافی و تحلیل المان محدود فرآیندهای انجام شده مشاوره‌های مفید و پیش‌برنده‌ای ارائه دادند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

همچنین از مدیریت دانشکده‌ی فنی شهید منتظری و بخصوص آقای مهندس مدیری مدیر گروه ساخت و تولید دانشکده‌ی منتظری و آقایان مهندس نقوی و فنودی به دلیل موافقت با انجام آزمایش‌های خمش و استفاده از امکانات موجود در این دانشکده کمال تشکر و قدردانی را دارم. از شرکت جوش گستر توس و شخص آقای مهندس احمدی به دلیل مشاوره‌ها و راهنمایی‌های ارزنده در زمینه‌ی تست رادیو گرافی ورق‌های کامپوزیتی صادقانه کمال تشکر خود را ابراز می‌دارم. از جناب آقای دکتر ضابط ریاست محترم آزمایشگاه تست‌های مخرب دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی تقدیر فراوان به عمل می‌آید.

جا دارد از زحمات مدیریت محترم کتابخانه، آموزش کل دانشگاه و واحد انتشارات دانشکده مهندسی تقدیر نمایم، ضمن اینکه از مسئولین محترم کارگاه‌های مکانیک و متالورژی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی به قرار زیر که خدمات ارزنده‌ای برای تکمیل این کار ارائه داشتند صادقانه تشکر نمایم:

جناب آقای مهندس شاهوار مسئول محترم کارگاه ماشین‌کاری، جناب آقای ولی زاده مسئول محترم آزمایشگاه تست کشش.

ضمن قدردانی از کلیه دوستان عزیز که در این کار سهم داشته‌اند از ایشان نام برده می‌شود: آقای مهندس حمیدرضا فضلی، آقای مهندس علی صولتی، آقای مهندس امین اسماعیل زاده و آقای مهندس احسان بهرامی مطلق.



بسمه تعالی .

مشخصات رساله /پایان نامه تحصیلی دانشجویان .

دانشگاه فردوسی مشهد

عنوان رساله /پایان نامه: بررسی تجربی- عددی برگشت فنری در فرآیند خمش ورق چندلایه کامپوزیتی فلزی- الیافی

نام نویسنده: سعید امیرنژاد آروق

نام استاد راهنما: دکتر مهرا کدخدایان

دانشکده: <input type="checkbox"/> فنی مهندسی <input type="checkbox"/>	گروه: مکانیک	رشته تحصیلی: مکانیک- ساخت و تولید <input type="checkbox"/>
---	--------------	--

تاریخ تصویب: <input type="checkbox"/>	تاریخ دفاع: <input type="checkbox"/> ۱۳۸۹/۱۱/۹ <input type="checkbox"/>
---------------------------------------	---

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد <input type="checkbox"/>	تعداد صفحات: <input type="checkbox"/> ۱۳۲
---	---

چکیده رساله /پایان نامه :

امروزه کامپوزیت‌های لایه‌ای فلزی- الیافی FML<sup>۱</sup> به دلیل دارا بودن خواص مکانیکی خوب و وزن کم بسیار مورد توجه طراحان، به ویژه صنایع هوافضا قرار گرفته است. کامپوزیت‌های FML خواص بهتری نسبت به هر دو آلیاژ آلومینیوم و مواد کامپوزیتی از خود نشان می‌دهد. در این پژوهش، خواص خمشی این کامپوزیت‌ها مورد بررسی عددی- تجربی قرار گرفته است. از آنجایی که این چندلایه‌ها دارای قابلیت فرم‌دهی محدود می‌باشند و فایبرها flexible (فلیکسبل) می‌باشند، از این رو در آنها برگشت‌فنری بیشتری در مقایسه با ورق‌های یکپارچه فلزی ایجاد می‌گردد که نوعی عیب محسوب می‌شود. در روش تجربی و به منظور کمینه کردن برگشت فنری نمونه‌هایی با زاویه الیاف، تعداد لایه‌ها و ضخامت‌های متفاوت از هم، به روش لایه‌گذاری دستی ساخته شد و مورد آزمایش خمش قرار گرفت. از طرفی تست خمش U و V انجام شده به روش طراحی آزمایش تاگوچی بهینه شد و تأثیر پارامترهایی همچون (شعاع قالب، سرعت پانچ و فشار وارد بر ورق) نیز بر روی برگشت‌فنری کامپوزیت فلز- الیاف‌شیشه بررسی گردید. نتایج آزمایشات نشان داد در شرایط بهینه‌ی آزمایش زمانی که فایبرها موازی با خط خمش باشند اجزای فلزی کمترین شعاع خمش و زاویه برگشت‌فنری را خواهند داشت. از آنجایی که رویکرد دیگر این پژوهش کاهش هزینه‌ها در طراحی است، لذا نتایج تجربی این پژوهش با داده‌های عددی بدست آمده از روش المان محدود مقایسه گردید.

امضای استاد راهنما:

تاریخ:

کلید واژه:

کامپوزیت چندلایه فلزی- الیافی

فرآیند خمش

برگشت فنری

المان محدود

طراحی آزمایش به روش تاگوچی

# فهرست

- ۱- مقدمه..... ۱
- ۱-۱- فرآیندهای متداول شکل‌دهی فلزات..... ۲
- ۱-۱-۱- خمکاری..... ۲
- ۱-۱-۲- کشش..... ۴
- ۱-۱-۳- کشش عمیق..... ۴
- ۲-۱- عیوب در شکل‌دهی ورق فلزی..... ۵
- ۱-۲-۱- ناتوانی ورق در انتقال نیروی مورد نیاز..... ۵
- ۲-۲-۱- شکست..... ۶
- ۳-۲-۱- چروکیدگی..... ۶
- ۴-۲-۱- برگشت‌فنی..... ۶
- ۳-۱- مواد مرکب (کامپوزیت‌ها)..... ۷
- ۱-۳-۱- کامپوزیت‌ها چه هستند؟..... ۷
- ۲-۳-۱- نحوه عملکرد الیاف‌ها و ماتریکس (زمینه)..... ۸
- ۲-۳-۱- مزایای خاص کامپوزیت‌ها..... ۹
- ۳-۳-۱- معایب کامپوزیت‌ها..... ۹
- ۴-۳-۱- کامپوزیت فلزی - الیافی..... ۱۰
- ۴-۱- اهداف پژوهش..... ۱۰
- ۵-۱- ساختار پایان نامه..... ۱۲
- ۲- مروری بر کارهای گذشته..... ۱۳
- ۳- ورق‌های چندلایه کامپوزیتی فلزی - الیافی..... ۱۹



- ۳-۱-۱- مقدمه..... ۲۰
- ۳-۲-۲- تاریخچه‌ای از توسعه‌ی ورق‌های کامپوزیتی فلز- الیافی..... ۲۰
- ۳-۳-۳- ویژگی ورق‌های چندلایه کامپوزیتی..... ۲۲
- ۳-۳-۱- ویژگی‌های مکانیکی..... ۲۲
- ۳-۳-۲- ویژگی‌های فیزیکی چند لایه FML..... ۲۵
- ۳-۳-۱-۲- دانسیته..... ۲۵
- ۳-۳-۲-۲- مشخصات الکتریکی و مغناطیسی..... ۲۶
- ۳-۴-۳- فرآیندهای تولید در ورق‌های کامپوزیتی فلزی- الیافی..... ۲۶
- ۳-۴-۱- ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها..... ۲۶
- ۳-۴-۲- عملیات برش کامپوزیت‌ها..... ۲۸
- ۳-۴-۱-۲- فرآیند برش..... ۲۹
- ۳-۴-۲-۲- فرآیند برش لبه‌ای..... ۲۹
- ۳-۴-۲-۳- فرآیند سوراخکاری..... ۲۹
- ۳-۵-۳- قابلیت فرم‌دهی در ورق‌های کامپوزیتی فلزی- الیافی..... ۳۱
- ۳-۵-۱- تغییر شکل در صفحه..... ۳۱
- ۳-۵-۲- پروسه‌های فرم‌دهی متداول ورق‌های کامپوزیتی فلزی- الیافی..... ۳۱
- ۳-۵-۱-۲- فرآیند خمش پروفیل‌ها..... ۳۲
- ۳-۵-۲-۲- فرآیند خمش استوانه‌ای..... ۳۳
- ۳-۵-۲-۳- فرآیند فرم‌دهی فشاری..... ۳۳
- ۳-۵-۲-۴- فرآیند فرم‌دهی کششی..... ۳۴
- ۳-۵-۲-۵- فرآیند فرم‌دهی غلتشی..... ۳۴
- ۳-۵-۳- پیش‌بینی برگشت‌فتری در ورق‌های کامپوزیتی فلزی- الیافی..... ۳۴
- ۳-۶-۳- مدل‌سازی تحلیلی ویژگی‌های مکانیکی ورق‌های کامپوزیتی فلزی- الیافی..... ۳۵
- ۳-۶-۱- تئوری کلاسیک لایه‌ها..... ۳۵

۳۶	۳-۶-۲- محاسبه‌ی منتجه‌ی لنگر.....
۳۸	۴- پروسه ساخت ورق‌های کامپوزیتی فلزی- الیافی.....
۳۹	۴-۱- مقدمه.....
۳۹	۴-۲- اتصالات مواد کامپوزیتی.....
۳۹	۴-۲-۱- اتصالات چسبی.....
۴۰	۴-۲-۲- انواع چسب‌ها.....
۴۱	۴-۲-۲-۱- چسب‌های دوجزئی اختلاطی (اپوکسی).....
۴۲	۴-۲-۲-۲- چسب‌های دوجزئی غیراختلاطی.....
۴۲	۴-۲-۲-۳- چسب‌های یک جزئی بدون اختلاط.....
۴۲	۴-۲-۳- معایب اتصالات چسبی.....
۴۳	۴-۳- آماده‌سازی و ساخت نمونه‌های کامپوزیتی فلز-الیاف شیشه.....
۴۳	۴-۳-۱- روش آماده‌سازی سطح.....
۴۴	۴-۳-۲- روش ساخت نمونه‌ها.....
۴۸	۵- تست مخرب و غیرمخرب بر روی کامپوزیت‌های فلزی- الیافی.....
۴۹	۵-۱- تست کشش ورق‌های کامپوزیتی فلز- الیاف.....
۵۹	۵-۲- شبیه سازی تست کشش به روش المان محدود.....
۶۸	۵-۳- آزمون غیر مخرب کامپوزیت های فلز- الیاف.....
۷۳	۶- برگشت فنری در فرآیند خمش V شکل در کامپوزیت‌های فلزی- الیافی.....
۷۴	۶-۱- مقدمه.....
۷۴	۶-۲- محاسبه برگشت فنری در ورق‌های کامپوزیتی فلزی- الیافی.....
۷۴	۶-۲-۱- آنالیز برگشت فنری.....
۷۵	۶-۲-۲- روابط ساختاری تنش- کرنش.....
۷۷	۶-۲-۳- محاسبه مرز نواحی الاستیک- پلاستیک.....

۷۷.....	۴-۲-۶- محاسبه گشتاور خمشی.....
۸۰.....	۳-۶- مطالعه تجربی برگشت فبری در ورق‌های کامپوزیتی فلزی- الیافی.....
۸۰.....	۱-۳-۶- طراحی آزمایش و بهینه‌سازی برگشت فبری به روش تاگوچی.....
۸۶.....	۲-۳-۶- بررسی پارامترهای تأثیرگذار در برگشت فبری ورق‌های کامپوزیتی فلزی- الیافی.....
۸۶.....	۱-۲-۳-۶- بررسی تأثیر شعاع پانچ، سرعت پانچ و فشار وارد بر ورق روی برگشت فبری .....
۹۱.....	۲-۲-۳-۶- بررسی تأثیر تغییر زوایای الیاف روی برگشت فبری.....
۹۳.....	۳-۲-۳-۶- بررسی تأثیر افزایش ضخامت و تعداد لایه‌ها روی برگشت فبری.....
۹۶.....	۴-۶- مطالعه عددی برگشت فبری در ورق‌های کامپوزیتی فلزی- الیافی.....
۱۰۳.....	۷- برگشت فبری در فرآیند خمش U شکل در کامپوزیت‌های فلزی- الیافی.....
۱۰۴.....	۱-۷- مقدمه.....
۱۰۵.....	۲-۷- مطالعه تجربی برگشت فبری در ورق‌های کامپوزیتی فلزی- الیافی.....
۱۰۹.....	۳-۷- مطالعه عددی برگشت فبری در ورق‌های کامپوزیتی فلزی- الیافی.....
۱۱۳.....	۸- بحث و نتیجه‌گیری.....
۱۱۹.....	پیشنهاد برای کارهای آینده.....
۱۲۰.....	مراجع.....
۱۱۵.....	پیوست‌ها.....
۱۲۴.....	پیوست ۳- تست رادیوگرافی صنعتی (تست غیر مخرب).....
۱۲۹.....	پیوست ۱- مقالات استخراج شده از پایان نامه.....

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: (الف) خم کاری ورق در یک ماشین تاکننده. (ب) خم کاری در خم کن پرسی در یک قالب ۷ شکل ..... ۳
- (ج) مقطع مجموعه ای از غلتک ها در شکل دهی غلتکی (د) پیچاندن یک لبه به سمت پایین
- شکل ۱-۲: (الف) یک لبه انقباضی که نشان دهنده کمانش احتمالی است ..... ۳
- (ب) یک لبه انبساطی با ترک خوردگی در گوشه. (ب) لبه دار کردن یک ورق خمیده
- شکل ۱-۳: قطعه نمونه ای که در یک فرآیند مهرزنی یا قالب کشش شکل داده می شود ..... ۴
- شکل ۱-۴: (الف) ابزاربندی کشش عمیق یک فنجان استوانه ای ..... ۵
- (ب) فنجان نمونه ای که طی مرحله کشش عمیق شکل گرفته است
- شکل ۱-۵: برگشت فتری در ورق فلزی ..... ۷
- شکل ۳-۱: ورق چندلایه کامپوزیتی فلزی-الیافی ..... ۲۱
- شکل ۳-۲: مقایسه نمودار رشد ترک در GLARE و آلومینیم ..... ۲۴
- شکل ۳-۳: FML بعنوان پلی در مقابل ترک ..... ۲۴
- شکل ۳-۴: سوراخ کاری در کامپوزیت های فلزی-الیافی ..... ۳۰
- شکل ۳-۵: خمش در کامپوزیت های فلزی-الیافی ..... ۳۲
- شکل ۳-۶: خم کاری پروفیل ها در کامپوزیت فلزی-الیافی ..... ۳۳
- شکل ۴-۱: حالت های معمولی گسیختگی در چسب ..... ۴۰
- شکل ۴-۲: شماتیکی از روش لایه گذاری دستی جهت ساخت FML ..... ۴۵
- شکل ۴-۳: روش لایه گذاری دستی جهت ساخت FML ..... ۴۵
- شکل ۴-۴: نمایی از (الف) الیاف شیشه و (ب) نمونه های ساخته شده به روش لایه گذاری دستی ..... ۴۶
- شکل ۵-۱: استاندارد D638 انتخاب شده جهت ساخت نمونه های تست کشش ..... ۵۰
- شکل ۵-۲: نمایی از دستگاه تست کشش Zwick و تعدادی از نمونه های استاندارد کشش ..... ۵۱
- شکل ۵-۳: نمودار تنش کرنش بدست آمده برای نمونه یکپارچه آلومینیومی ..... ۵۵
- شکل ۵-۴: نمودار تنش کرنش بدست آمده برای نمونه کامپوزیت فلز-الیاف شیشه ۳/۲ ..... ۵۵
- شکل ۵-۵: نمودار تنش کرنش بدست آمده برای نمونه کامپوزیت فلز-الیاف شیشه ۳/۲ ..... ۵۶
- شکل ۵-۶: نمودار تنش کرنش بدست آمده برای نمونه کامپوزیت فلز-الیاف شیشه ۲/۱ ..... ۵۶
- با زاویه الیاف صفر درجه ..... ۵۶
- شکل ۵-۷: نمودار تنش کرنش بدست آمده برای نمونه کامپوزیت فلز-الیاف شیشه ۲/۱ ..... ۵۶
- با زاویه الیاف ۹۰ درجه ..... ۵۷
- شکل ۵-۸: نمودار تنش کرنش بدست آمده برای چند نمونه کامپوزیت فلز-الیاف شیشه ۳/۲

- با زاویه الیاف ۹۰-۹۰..... ۵۷
- شکل ۵-۹: نمودار تنش کرنش بدست آمده برای چند نمونه کامپوزیت فلز-الیاف شیشه 1/2
- با زاویه الیاف ۴۵ درجه..... ۵۸
- شکل ۵-۱۰: نمودار تنش کرنش بدست آمده برای نمونه کامپوزیت فلز-الیاف شیشه 1/2
- با زاویه الیاف ۹۰ درجه و ضخامت ۰/۸ میلی متر لایه خارجی..... ۵۸
- شکل ۵-۱۱: وارد کردن خواص ماده و نوع المان Solid 186 استفاده شده جهت شبیه‌سازی المان محدود..... ۶۰
- شکل ۵-۱۲: شبیه‌سازی المان محدود نمونه یکپارچه فلزی جهت تست کشش..... ۶۰
- شکل ۵-۱۳: مقایسه نمودار نیرو-جابجایی بدست آمده از نتایج بنجامین و حل عددی انجام شده در این پژوهش برای فولاد ۱۰۱۰..... ۶۱
- شکل ۵-۱۴: کانتور توزیع تنش در نمونه شبیه سازی شده (St 1010)..... ۶۲
- شکل ۵-۱۵: مقایسه تجربی و عددی نمودار نیرو-جابجایی برای آلومینیوم ۱۱۰۰..... ۶۲
- شکل ۵-۱۶: مشخصات المان Solid 46 و نحوه چیدمان لایه‌ها..... ۶۳
- شکل ۵-۱۷: کانتور توزیع تنش در نمونه کشش FML 2/1..... ۶۴
- شکل ۵-۱۸: مقایسه تجربی و عددی نمودار نیرو-جابجایی برای FML2/1 با زاویه الیاف ۹۰ درجه..... ۶۵
- شکل ۵-۱۹: چیدمان لایه ها در FML3/2 و المان بندی نمونه در نرم افزار ANSYS..... ۶۶
- شکل ۵-۲۰: کانتور تنش در نمونه FML3/2 تحت کشش..... ۶۶
- شکل ۵-۲۱: مقایسه تجربی و عددی نمودار نیرو-جابجایی برای FML3/2..... ۶۷
- شکل ۵-۲۲: مقایسه تجربی و عددی نمودار نیرو-جابجایی برای FML2/1 با زاویه الیاف صفر درجه..... ۶۸
- شکل ۵-۲۳: (الف) فیلم و (ب) نمونه رادیوگرافی، برای ورق چندلایه کامپوزیتی فلزی-الیافی..... ۷۲
- شکل ۶-۱: چیدمان لایه ها در ورق N لایه..... ۷۶
- شکل ۶-۲: نمایی از قالب V شکل ساخته شده جهت تست خمش..... ۸۲
- شکل ۶-۳: نمودارهای اثر هر فاکتور بر روی برگشت‌فتری میانگین در خمش V شکل..... ۸۵
- شکل ۶-۴: نمایی از تأثیر مستقل هر پارامتر روی برگشت‌فتری FML..... ۸۶

- شکل ۶-۵: برگشت فنری در FML ۲/۱ ..... ۸۸
- شکل ۶-۶: کامپوزیت فلز-الیاف شیشه ۲/۱ ..... ۸۸
- شکل ۶-۷: پیش بینی نتایج آزمایشات انجام نشده به روش تاگوچی ..... ۸۹
- شکل ۶-۸: تأثیر شعاع قالب روی برگشت فنری کامپوزیت فلز-الیاف شیشه ۲/۱ ..... ۸۹
- شکل ۶-۹: تأثیر سرعت پانچ روی برگشت فنری کامپوزیت فلز-الیاف شیشه ۲/۱ ..... ۹۰
- شکل ۶-۱۰: تأثیر فشار وارد بر ورق روی برگشت فنری کامپوزیت فلز-الیاف شیشه ۲/۱ ..... ۹۱
- شکل ۶-۱۱: نمایی از قالب خمش V ساخته شده جهت تست ورق های کامپوزیتی فلزی-الیافی ..... ۹۱
- شکل ۶-۱۲: تأثیر زاویه الیاف کامپوزیت روی برگشت فنری FML 2/1 ..... ۹۳
- شکل ۶-۱۳: نمودار تأثیر زاویه الیاف بر روی برگشت فنری FML2/1 با ضخامت آلومینیوم ۰/۴ mm ..... ۹۳
- شکل ۶-۱۴: تأثیر ضخامت لایه خارجی بر روی برگشت فنری FML 2/1 با زاویه الیاف صفر درجه ..... ۹۴
- شکل ۶-۱۵: تأثیر افزایش تعداد لایه ها بر روی برگشت فنری FML ..... ۹۵
- شکل ۶-۱۶: تأثیر تعداد لایه ها در برگشت فنری در صورت ثابت بودن ضخامت کلی ..... ۹۶
- شکل ۶-۱۷: مشخصات المان های (الف) Plane 82 و (ب) Contact استفاده شده ..... ۹۷
- جهت شبیه سازی المان محدود ..... ۹۷
- شکل ۶-۱۸: شبیه سازی و مش بندی فرآیند خمش V شکل ..... ۹۸
- شکل ۶-۱۹: نمودار حساسیت مش ..... ۹۹
- شکل ۶-۲۰: شبیه سازی فرآیند خمش و وارد کردن خواص مواد در نرم افزار ANSYS ..... ۱۰۰
- شکل ۶-۲۱: شبیه سازی برگشت فنری در فرآیند خمش ورق کامپوزیتی فلزی-الیافی ..... ۱۰۱
- شکل ۶-۲۲: تأثیر شعاع قالب روی برگشت فنری به روش المان محدود ..... ۱۰۱
- شکل ۶-۲۳: تأثیر تعداد لایه ها و ضخامت لایه خارجی روی برگشت فنری به روش المان محدود ..... ۱۰۲
- شکل ۷-۱: شماتیکی از قالب خمش U شکل ..... ۱۰۵
- شکل ۷-۲: نمایی از قالب U-bending ساخته شده جهت تست خمش ..... ۱۰۶
- شکل ۷-۳: برگشت فنری در فرآیند خمش U ..... ۱۰۷

- شکل ۷-۴: ترک در ورق کامپوزیتی FML 3/2 در خمش ۹۰ درجه..... ۱۰۷
- شکل ۷-۵: تأثیر افزایش ضخامت لایه خارجی روی برگشت فنری FML2/1..... ۱۰۸
- شکل ۷-۶: تأثیر تغییر زاویه الیاف روی برگشت فنری FML 2/1..... ۱۰۹
- شکل ۷-۷: مش بندی ورق و قالب خمش U شکل..... ۱۱۰
- شکل ۷-۸: شبیه سازی فرآیند خمش U شکل..... ۱۱۱
- شکل ۷-۹: تأثیر تغییر ضخامت لایه خارجی روی برگشت فنری به روش المان محدود..... ۱۱۱
- شکل ۷-۱۰: شبیه سازی برگشت فنری در فرآیند خمش U شکل..... ۱۱۲
- شکل ۸-۱: مقایسه نتایج تجربی و المان محدود تأثیر سرعت پانچ و شعاع قالب روی برگشت فنری..... ۱۱۵
- شکل ۸-۲: مقایسه نتایج تجربی و المان محدود تأثیر افزایش تعداد لایه ها و ضخامت لایه خارجی روی برگشت فنری در خمش V شکل..... ۱۱۶
- شکل ۸-۳: مقایسه نتایج تجربی و المان محدود تأثیر ضخامت لایه خارجی روی برگشت فنری در فرآیند خمش U شکل..... ۱۱۷
- شکل ۸-۴: منحنی توزیع تنش در ورق چند لایه ۱/۲ FML پیش بینی شده توسط نرم افزار ANSYS..... ۱۱۸

# فهرست جداول

- جدول ۳-۱: مقایسه‌ی ویژگی‌های مکانیکی سه نوع GLARE با آلومینیم..... ۲۵
- جدول ۵-۱: نامگذاری نمونه‌ها، نحوه لایه گذاری و زاویه الیاف هر کدام از نمونه‌ها..... ۵۳
- جدول ۵-۲: مقادیر تنش تسلیم و نهایی حاصل از آزمایش کشش در ورق های FML..... ۵۶
- جدول ۵-۳: روش های مختلف آزمون غیرمخرب و موارد استفاده و چگونگی اعمال آنها..... ۶۳
- جدول ۶-۱: عوامل مؤثر بر برگشت فنری در فرآیند خمش و مقادیر انتخابی برای آزمایش..... ۷۸
- جدول ۶-۲: آرایه ی L9 طراحی تاگوچی با ۴ عامل و سطوح مختلف..... ۷۹
- جدول ۶-۳: مقادیر برگشت فنری بدست آمده مطابق با آرایه پیشنهاد شده ی تاگوچی..... ۷۹
- جدول ۶-۴: مشخصات ماده و مقادیر ثابت ها..... ۸۲
- جدول ۸-۱: مقایسه برگشت فنری کامپوزیت فلز-الیاف شیشه در فرآیند خمش U , V شکل..... ۱۱۲



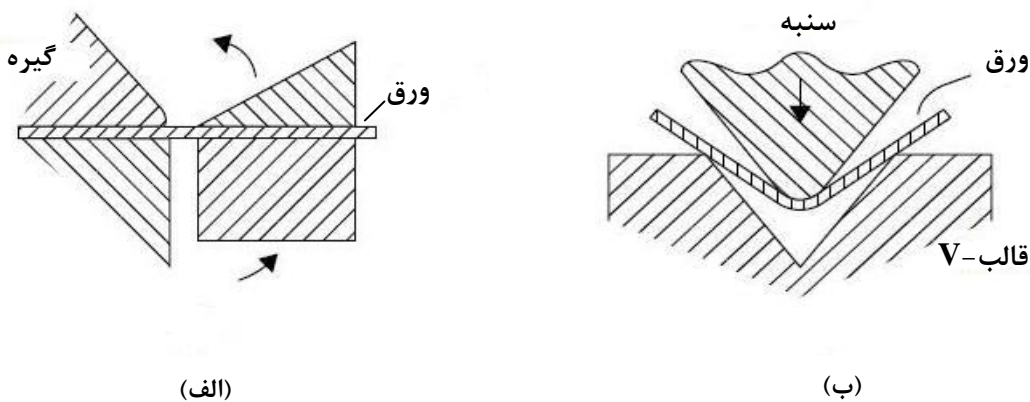
## فصل اول

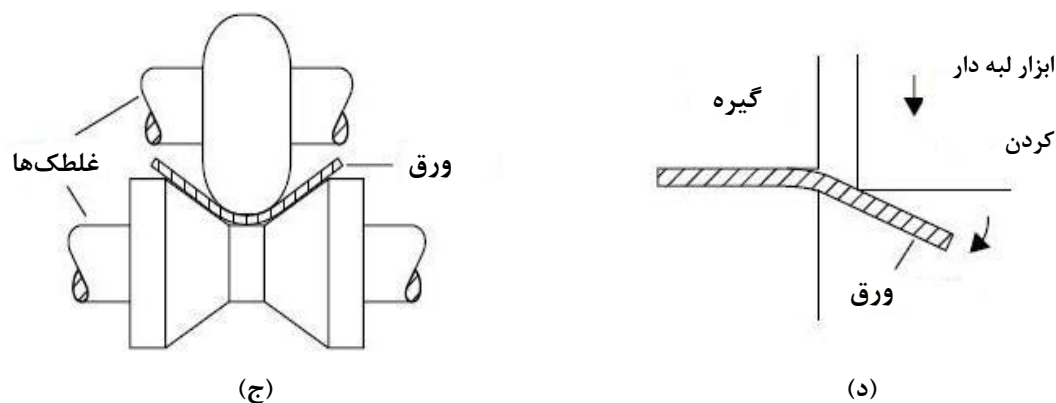
### مقدمه

## ۱-۱- فرآیندهای متداول شکل دهی

## ۱-۱-۱- خم کاری

ساده‌ترین فرآیند شکل دهی، خم کردن یک خط مستقیم است. تغییر شکل مومسان فقط در محدوده خم رخ می‌دهد و مواد دورتر از ناحیه، تغییر شکل پیدا نمی‌کنند. اگر ماده فاقد شکل پذیری باشد، ممکن است در سطح بیرونی ناحیه خم ترک خوردگی رخ دهد، اما معمولاً بیشترین مشکل دستیابی به یک زاویه خم دقیق و تکرارپذیر می‌باشد. روش‌های گوناگون خم کاری در امتداد یک خط راست در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. در تا کردن (الف)، قطعه کار در سمت چپ آن ثابت نگاه داشته شده و لبه آن بین ابزارهای متحرکی نگه داشته می‌شود که می‌چرخد. در شکل دهی با خم کن پرس (ب)، یک سنبه به طرف پایین حرکت می‌کند و ورق را به درون قالب V شکل فشرده می‌کند. برای ایجاد خم‌های پیوسته در ورق‌های طویل می‌توان از شکل دهی غلتکی (ج)، استفاده کرد. در ماشین‌های شکل دهی غلتکی، مجموعه‌ای از غلتک‌ها وجود دارد که به صورت نموی ورق را خم می‌کنند و پانل‌های عریض مانند پانل‌های پوشش سقف یا مقاطع ناودانی پیچیده را می‌توان با این فرآیند تولید کرد. یک روش برای خم کردن لبه یک قطعه مهرزنی شده، لبه‌دار کردن یا پیچاندن است که در شکل ۱-۱ (د) آمده است. قطعه کار در سمت چپ خود نگاه داشته می‌شود و ابزار لبه‌دار کردن به سمت پایین حرکت می‌کند تا خم را ایجاد کند [1].

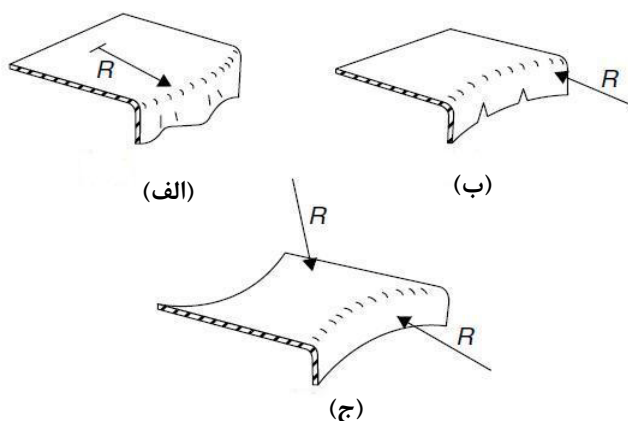




شکل ۱-۱- الف) خم‌کاری ورق در یک ماشین تاکننده، ب) خم‌کاری در خم‌کن پرسی در یک قالب V شکل،

ج) مقطع مجموعه‌ای از غلتک‌ها در شکل‌دهی غلتکی، د) پیچاندن یک لبه به سمت پایین

اگر خم در امتداد یک خط مستقیم نباشد، یا ورق تخت نباشد، تغییر شکل مومسان نه تنها در محل خم رخ می‌دهد، بلکه در قسمت مجاور آن هم ایجاد می‌گردد. شکل ۱-۲ مثال‌هایی را نشان می‌دهد. در لبه‌دار کردن انقباضی (الف)، گوشه کوتاه می‌شود و لبه ممکن است کمانش کند. در لبه‌دار کردن انبساطی (ب)، طول گوشه باید افزایش یابد و شکافته شدن می‌تواند ایجاد مشکل کند. اگر قطعه در نزدیکی لبه خمیده باشد یا اگر نظیر آنچه که در شکل ۱-۲ (ج) نشان داده شده، هم لبه و هم قطعه کار به صورت منحنی باشند، لبه ممکن است کشیده یا فشرده شود که برای تعیین آن اندکی تحلیل هندسی مورد نیاز می‌باشد. همه این لبه‌ها معمولاً با ابزاربندی از نوع نشان داده شده در شکل ۱-۱ (د)، شکل داده می‌شوند [1].

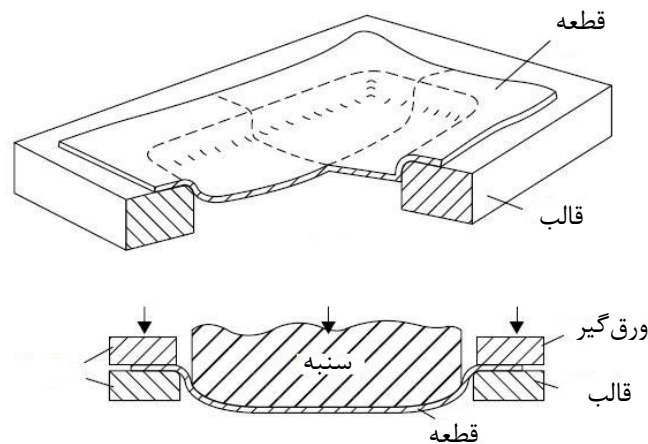


شکل ۱-۲- الف) یک لبه انقباضی که نشان دهنده کمانش احتمالی است،

ب) یک لبه انبساطی با ترک خوردگی در گوشه، ب) لبه دار کردن یک ورق خمیده

## ۱-۱-۲- کشش

قطعه نشان داده شده در شکل ۱-۳ در اثر انبساطدهی بر روی یک سنبه در یک قالب کشش نشان داده شده است. این مجموعه قالب از سنبه و مجموعه حلقه کشش و ورق گیر یا بند تشکیل می‌شود. اصول این فرآیند شبیه انبساطدهی سنبه‌ای است، اما به گوشه بیرونی یا لبه اجازه داده می‌شود که بطور مقید به سمت داخل کشیده شود تا ماده برای شکل قطعه کار تامین گردد. این فرآیند بطور گسترده برای شکل‌دهی پانل‌های خودروها و انواع لوازم خانگی به کار می‌رود. مقدار زیادی از لبه بیرونی پس از شکل‌دادن بریده می‌شود، بطوری که باعث می‌شود این فرآیند راندمان بالا نداشته باشد. با طراحی مناسب ابزاربندی، حجم بالایی از قطعات را می‌توان به سرعت و با کنترل ابعادی خوب تولید کرد [1,2].



شکل ۱-۳- قطعه نمونه‌ای که در یک فرآیند مهرزنی یا قالب کشش شکل داده می‌شود

## ۱-۱-۳- کشش عمیق

درمهرزنی، اغلب قسمت‌های قطعه نهایی با انبساط یافتن بر روی سنبه شکل داده می‌شود، گرچه برخی از مواد پیرامون جداره‌ها ممکن است از لبه به درون کشیده شده باشند. از آنجا که برای انبساط یافتن تا قبل از پارگی حد معینی وجود دارد، قطعات مهرزنی نوعاً کم‌عمقند. برای شکل‌دهی قطعات عمیق‌تر، مقدار بسیار بیشتری ماده باید به درون کشیده شود تا جداره‌ها شکل پیدا کند، چنین فرآیندی کشش عمیق نامیده می‌شود. در شکل ۱-۴، شکل‌دادن یک فنجان ساده استوانه‌ای نشان داده شده است. برای جلوگیری از کمانش لبه، از یک ورق گیر استفاده می‌شود و نیروی نگه‌داشتن از همان مرتبه نیروی سنبه خواهد بود. به دلیل آنکه