# فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


**فصل اول: مقدمه**

۱-۱پیش‌گفتار ..... ۲

۱-۲ اهداف پژوهش ..... ۳

۱-۳ ساختار پایان‌نامه ..... ۵

**فصل دوم: مروری بر کارهای گذشته**

۲-۱پیش‌گفتار ..... ۸

۲-۲ پیش‌بینی بازگشت فنری ..... ۸

۲-۳ کاهش بازگشت فنری ..... ۹

۲-۴ جبران‌سازی بازگشت فنری ..... ۱۰

۲-۴-۱ روش تنظیم جابجایی ..... ۱۴

**فصل سوم: مبانی نظری شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند شکل‌دهی و بازگشت فنری در مطالعه حاضر**

۳-۱ پیش‌گفتار ..... ۱۸

۳-۲ خواص و رفتار ماده ..... ۱۹

۳-۲-۱ خواص الاستیک ..... ۱۹

۳-۲-۲ خواص پلاستیک ..... ۱۹

۳-۲-۳ سخت‌شوندگی یا کرنش‌سختی ..... ۲۱
۳-۲-۴ مواد همسانگرد و ناهمسانگرد ..... ۲۴
۳-۳ المان پوسته‌ای ..... ۲۷
۳-۳-۱ ضخامت پوسته و نقاط مقطع ..... ۲۸
۳-۳-۲ عمودهای پوسته و سطوح پوسته ..... ۳۰
۳-۴ مواد چندلایه ..... ۳۰
۳-۵ تحلیل به روش ضمنی و صریح ..... ۳۲
۳-۵-۱ انتخاب بین تحلیل به روش صریح و ضمنی: ..... ۳۳
۳-۶ تماس و اصطکاک ..... ۳۳
۳-۶-۱ تعریف تماس در ABAQUS\Explicit ..... ۳۴
۳-۶-۲ مدل‌های اصطکاک ..... ۳۵
۳-۷ تحلیل شبه استاتیکی در ABAQUS\Explicit ..... ۳۸
۳-۷-۱ مسائل شکل‌دهی فلزات ..... ۳۹
۳-۷-۲ بازگشت فنری ..... ۴۱

**فصل چهارم: خمش U شکل**

۴-۱ پیش‌گفتار ..... ۴۴
۴-۲ مشخصات استاندارد فرآیند ..... ۴۴
۴-۳ شبیه‌سازی و صحت سنجی فرآیند ..... ۴۶
۴-۳-۱ زمان پایین آمدن سنبه ..... ۵۴
۴-۳-۲ فرمولاسیون تماس ..... ۵۷

۴-۳-۳ نحوه‌ی پایین آمدن سنبه ..... ۶۱
۴-۳-۴ تعداد نقاط انتگرال‌گیری در راستای ضخامت ورق..... ۶۷
۴-۳-۵ اندازه‌ی المان‌های استفاده شده در مش‌بندی ورق ..... ۷۰
۴-۴ جبران‌سازی بازگشت فنری ..... ۷۶
۴-۴-۱ ورق تک‌لایه ..... ۸۰
۴-۴-۲ ورق دولایه ..... ۸۸

**فصل پنجم: خمش V شکل**

۵-۱ مقدمه..... ۹۹
۵-۲ شبیه‌سازی و صحت‌سنجی فرآیند ..... ۹۹
۵-۳ جبران‌سازی بازگشت فنری ..... ۱۰۷
۵-۳-۱ ورق تک‌لایه ..... ۱۱۰
۵-۳-۲ ورق دولایه ..... ۱۱۵

**فصل ششم: خمش دوراستا**

۶-۱ پیش‌گفتار ..... ۱۲۲
۶-۲ شبیه‌سازی و صحت‌سنجی فرآیند ..... ۱۲۳
۶-۳ جبران‌سازی بازگشت فنری ..... ۱۳۲
۶-۳-۱ بررسی پارامترهای بازگشت فنری ورق در طول فرآیند جبران‌سازی..... ۱۳۴
۶-۳-۲ قالب اصلاح شده..... ۱۳۸

**فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات**

۷-۱ نتیجه‌گیری ..... ۱۴۲

۷-۲ پیشنهادات ..... ۱۴۴

**مراجع** ..... **۱۴۶**

# فهرست شکل‌ها

**شماره عنوان** **صفحه**


شکل ۲-۱: الگوریتم جبران‌سازی خودکار بازگشت فنری ..... ۱۱

شکل ۲-۲: مراحل اعمال روش تنظیم جایجایی در هر چرخه از تکرار ..... ۱۵

شکل ۲-۳: فلوچارت روش تنظیم جابجایی ..... ۱۶

شکل ۳-۱: منحنی تنش-کرنش (i) نمودار خطی دوگانه، (ii) ماده‌ی صلب سختی‌پذیر ..... ۲۱

شکل ۳-۲: سخت‌شوندگی همسانگرد (i) جزء کرنش و جزء تنش، (ii) جابجایی سطح تسلیم..... ۲۳

شکل ۳-۳: سخت‌شوندگی سینماتیک (i) جزء کرنش و جزء تنش، (ii) جابجایی سطح تسلیم ..... ۲۳

شکل ۳-۴: پیکربندی نقاط مقطع در یک پوسته ..... ۲۹

شکل ۳-۵: عمودهای مثبت برای پوسته‌ها ..... ۳۰

شکل ۳-۶: رفتار اصطکاکی ..... ۳۶

شکل ۳-۷: مدل اصطکاکی با تأخیر زمانی ..... ۳۷

شکل ۴-۱: ابزار شکل‌دهی و ابعاد آن در فرآیند خمش U شکل ..... ۴۵

شکل ۴-۲: پارامترهای ارزیابی بازگشت فنری در فرآیند خمش U شکل ..... ۴۵

شکل ۴-۳: مشخصات هندسی ابزار شکل‌دهی ..... ۴۶

شکل ۴-۴: شرط مرزی تقارن اعمال شده روی ورق ..... ۴۹

شکل ۴-۵: ابزارآلات مش‌بندی شده (i) قالب، (ii) ورق‌گیر، (iii) سنبه ..... ۴۹

شکل ۴-۶: ورق و ابزارآلات مدل شده در نرم‌افزار ..... ۵۰

شکل ۴-۷: مدل کامل ابزارآلات شکل‌دهی و ورق جامد ..... ۵۱

شکل ۴-۸: مدل کامل ابزارآلات شکل‌دهی و ورق پوسته‌ای ..... ۵۲

شکل ۴-۹: زاویه‌ی $\theta_1$ بدست آمده از سه مدل‌سازی صورت گرفته ..... ۵۲
شکل ۴-۱۰: زاویه‌ی $\theta_2$ بدست آمده از سه مدل‌سازی صورت گرفته ..... ۵۳
شکل ۴-۱۱: نمودار تغییرات زاویه‌ی $\theta_1$ برای زمان‌های مختلف فرود سنبه ..... ۵۵
شکل ۴-۱۲: نمودار تغییرات زاویه‌ی $\theta_2$ برای زمان‌های مختلف فرود سنبه ..... ۵۶
شکل ۴-۱۳: نمودار تغییرات شعاع انحنای $\rho$ برای زمان‌های مختلف فرود سنبه ..... ۵۷
شکل ۴-۱۴: میانگین درصد خطا در زمان‌های مختلف فرود سنبه ..... ۵۷
شکل ۴-۱۵: زاویه‌ی $\theta_1$ برای فرمولاسیون‌های سینماتیک و پنالتی در دو زمان مختلف تحلیل ..... ۵۹
شکل ۴-۱۶: زاویه‌ی $\theta_2$ برای فرمولاسیون‌های سینماتیک و پنالتی در دو زمان مختلف تحلیل..... ۵۹
شکل ۴-۱۷: شعاع انحنای $\rho$ برای فرمولاسیون‌های سینماتیک و پنالتی در دو زمان مختلف تحلیل . ۶۰
شکل ۴-۱۸: میانگین درصد خطا برای فرمولاسیون‌های سینماتیک و پنالتی در دو زمان مختلف..... ۶۰
شکل ۴-۱۹: زاویه‌ی $\theta_1$ برای دامنه‌های خطی و هموار در تعداد گام‌های مختلف حرکت سنبه..... ۶۲
شکل ۴-۲۰: زاویه‌ی $\theta_2$ برای دامنه‌های خطی و هموار در تعداد گام‌های مختلف حرکت سنبه..... ۶۳
شکل ۴-۲۱: شعاع انحنای $\rho$ برای دامنه‌های خطی و هموار در تعداد گام‌های مختلف حرکت سنبه.. ۶۳
شکل ۴-۲۲: نمودار انرژی جنبشی در برابر انرژی داخلی کل برای حرکت سنبه در یک گام..... ۶۵
شکل ۴-۲۳: : نمودار انرژی جنبشی در برابر انرژی داخلی کل برای حرکت سنبه در دو گام ..... ۶۵
شکل ۴-۲۴: نمودار انرژی جنبشی در برابر انرژی داخلی کل برای حرکت سنبه در سه گام ..... ۶۶
شکل ۴-۲۵: میانگین درصد خطا برای دامنه‌های خطی و هموار در تعداد گام‌های مختلف ..... ۶۶
شکل ۴-۲۶: زاویه‌ی $\theta_1$ برای تعداد نقاط مختلف انتگرال‌گیری ..... ۶۸
شکل ۴-۲۷: زاویه‌ی $\theta_2$ برای تعداد نقاط مختلف انتگرال‌گیری ..... ۶۸
شکل ۴-۲۸: شعاع انحنای $\rho$ برای تعداد نقاط مختلف انتگرال‌گیری ..... ۶۹

شکل ۴-۲۹: میانگین درصد خطا برای تعداد نقاط مختلف انتگرال‌گیری ..... ۶۹
شکل ۴-۳۰: مش‌بندی ورق در راستای طولی در دو ناحیه‌ی متفاوت ..... ۷۰
شکل ۴-۳۱: زاویه‌ی $\theta_1$ برای المان‌های مختلف ..... ۷۲
شکل ۴-۳۲: زاویه‌ی $\theta_2$ برای المان‌های مختلف ..... ۷۲
شکل ۴-۳۳: شعاع انحنای $\rho$ برای المان‌های مختلف ..... ۷۳
شکل ۴-۳۴: میانگین درصد خطا برای المان‌های مختلف ..... ۷۳
شکل ۴-۳۵: شکل ورق (i) ابتدای فرآیند، (ii) انتهای فرآیند، (iii) پس از بازگشت فنری ..... ۷۴
شکل ۴-۳۶: نمودار انرژی جنبشی برای شبیه‌سازی نهایی ..... ۷۵
شکل ۴-۳۷: نمودار انرژی جنبشی در مقایسه با انرژی داخلی کل برای شبیه‌سازی نهایی ..... ۷۶
شکل ۴-۳۸: ورق و ابزارآلات مدل شده برای عملیات جبران‌سازی ..... ۷۷
شکل ۴-۳۹: هم‌پوشانی قالب، ورق و سنبه در انتهای فرآیند شکل‌دهی ..... ۷۸
شکل ۴-۴۰: پنج ناحیه‌ی مربوط به منحنی‌های سازنده‌ی قالب در یک نمونه‌ی اصلاح شده ..... ۷۹
شکل ۴-۴۱: نمودار تغییرات $\theta_1$ در چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۸۱
شکل ۴-۴۲: میزان انحراف $\theta_1$ از ۹۰ درجه در چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۸۱
شکل ۴-۴۳: نمودار تغییرات $\theta_2$ در چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۸۲
شکل ۴-۴۴: میزان انحراف $\theta_2$ از ۹۰ درجه در چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۸۲
شکل ۴-۴۵: میانگین انحراف $\theta_1$ و $\theta_2$ از ۹۰ درجه برای چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۸۴
شکل ۴-۴۶: نمودار تغییرات $\rho$ در چرخه‌های مختلف فرآیند اصلاح ..... ۸۵
شکل ۴-۴۷: هندسه‌ی قالب قبل و بعد از فرآیند اصلاح ..... ۸۶
شکل ۴-۴۸: هندسه‌ی ورق پس از بازگشت فنری اولیه و انتهایی ..... ۸۶

شکل ۴-۴۹: توزیع تنش فون‌مایزز روی راستای طولی ورق ..... ۸۷
شکل ۴-۵۰: توزیع کرنش پلاستیک معادل روی راستای طولی ورق ..... ۸۸
شکل ۴-۵۱: ورق دولایه‌ی آلومینیوم-فولاد ..... ۸۹
شکل ۴-۵۲: نمودار تغییرات $\theta_1$ در چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۹۱
شکل ۴-۵۳: میزان انحراف $\theta_1$ از ۹۰ درجه در چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۹۱
شکل ۴-۵۴: نمودار تغییرات $\theta_2$ در چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۹۲
شکل ۴-۵۵: میزان انحراف $\theta_2$ از ۹۰ درجه در چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۹۲
شکل ۴-۵۶: میانگین انحراف $\theta_1$ و $\theta_2$ از ۹۰ درجه برای چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۹۳
شکل ۴-۵۷: نمودار تغییرات $\rho$ در چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۹۴
شکل ۴-۵۸: هندسه‌ی قالب قبل و بعد از فرآیند اصلاح ..... ۹۵
شکل ۴-۵۹: هندسه‌ی ورق پس از بازگشت فنری اولیه و انتهایی ..... ۹۵
شکل ۴-۶۰: توزیع تنش فون‌مایزز در راستای طولی ورق ..... ۹۶
شکل ۴-۶۱: توزیع کرنش پلاستیک معادل در راستای طولی ورق ..... ۹۶
شکل ۵-۱: ابزار شکل‌دهی در فرآیند خمش V شکل ..... ۱۰۰
شکل ۵-۲: مشخصات هندسی ابزار شکل‌دهی ..... ۱۰۱
شکل ۵-۳: شرط مرزی تقارن اعمال شده روی ورق ..... ۱۰۲
شکل ۵-۴: ورق و ابزارآلات مدل شده در نرم‌افزار ..... ۱۰۳
شکل ۵-۵: نمودار تغییرات انرژی جنبشی در طول فرآیند شبیه‌سازی ..... ۱۰۴
شکل ۵-۶: ورق مش‌بندی شده ..... ۱۰۵
شکل ۵-۷: ابزارآلات مش‌بندی شده (i) سنبه، (ii) قالب ..... ۱۰۵

شکل ۵-۸: مراحل شکل‌دهی، (i) قبل از پیش‌روی، (ii) پیش‌روی تا نیمه، (iii) پیش‌روی کامل ... ۱۰۶
شکل ۵-۹: نمودار زاویه‌ی خمش بدست آمده در مقایسه با نتایج مرجع ..... ۱۰۷
شکل ۵-۱۰: سه ناحیه‌ی مربوط به منحنی‌های سازنده‌ی قالب ..... ۱۰۹
شکل ۵-۱۱: هم‌پوشانی قالب، ورق و سنبه در انتهای فرایند شکل‌دهی ..... ۱۰۹
شکل ۵-۱۲: نحوه‌ی اندازه‌گیری زاویه‌ی خمش ورق ..... ۱۱۰
شکل ۵-۱۳: نمودار تغییرات $\alpha$ در چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۱۱۲
شکل ۵-۱۴: درصد انحراف $\alpha$ از ۶۰ درجه در چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۱۱۲
شکل ۵-۱۵: هندسه‌ی ورق پس از بازگشت فنری اولیه و انتهایی ..... ۱۱۴
شکل ۵-۱۶: توزیع تنش فون‌مایزز روی راستای طولی ورق ..... ۱۱۴
شکل ۵-۱۷: توزیع کرنش پلاستیک معادل روی راستای طولی ورق ..... ۱۱۵
شکل ۵-۱۸: نمودار تغییرات $\alpha$ در چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۱۱۷
شکل ۵-۱۹: درصد انحراف $\alpha$ از ۶۰ درجه در چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۱۱۷
شکل ۵-۲۰: هندسه‌ی ورق پس از بازگشت فنری اولیه و انتهایی ..... ۱۱۸
شکل ۵-۲۱: توزیع تنش فون‌مایزز روی راستای طولی ورق ..... ۱۱۹
شکل ۵-۲۲: توزیع کرنش پلاستیک معادل روی راستای طولی ورق ..... ۱۱۹
شکل ۶-۱: شکل شماتیک خمش در دو راستا ..... ۱۲۲
شکل ۶-۲: قالب در فرآیند خمش دوراستا ..... ۱۲۴
شکل ۶-۳: سنبه در فرآیند خمش دوراستا ..... ۱۲۴
شکل ۶-۴: نحوه‌ی قرارگیری لایه‌ها در ورق ساندویچی شبیه‌سازی شده ..... ۱۲۶
شکل ۶-۵: ورق و ابزارآلات مدل شده در نرم‌افزار ..... ۱۲۷

شکل ۶-۶: شرط مرزی تقارن اعمال شده روی ورق ..... ۱۲۷

شکل ۶-۷: نمودار انرژی جنبشی در مقایسه با انرژی داخلی کل ..... ۱۲۸

شکل ۶-۸: ورق مش‌بندی شده ..... ۱۲۹

شکل ۶-۹: سنبه‌ی مش‌بندی شده ..... ۱۳۰

شکل ۶-۱۰: قالب مش‌بندی شده ..... ۱۳۰

شکل ۶-۱۱: مراحل شکل‌دهی ورق، (i) قبل از حرکت سنبه، (ii) پیشروی کامل سنبه ..... ۱۳۱

شکل ۶-۱۲: : نمودار شعاع انحنای بدست آمده در مقایسه با نتایج مرجع ..... ۱۳۲

شکل ۶-۱۳: مسیرهای تعریف شده روی قالب ..... ۱۳۴

شکل ۶-۱۴: نمودار تغییرات $R_x$ در چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۱۳۵

شکل ۶-۱۵: میزان انحراف $R_x$ از ۹۰ میلی‌متر در چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۱۳۵

شکل ۶-۱۶: نمودار تغییرات $R_z$ در چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۱۳۶

شکل ۶-۱۷: میزان انحراف $R_z$ از ۹۰ میلی‌متر در چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۱۳۶

شکل ۶-۱۸: میانگین انحراف $R_x$ و $R_z$ از مقدار مطلوب برای چرخه‌های مختلف اصلاح قالب..... ۱۳۷

شکل ۶-۱۹: هندسه‌ی ورق پس از بازگشت فنری اولیه و انتهایی ..... ۱۳۸

شکل ۶-۲۰: توزیع تنش فون‌مایزز روی راستای طولی ورق ..... ۱۳۹

شکل ۶-۲۱: توزیع کرنش پلاستیک معادل روی راستای طولی ورق..... ۱۴۰

# فهرست جدول‌ها

**شماره عنوان صفحه**


جدول ۳-۱: خصوصیات کلیدی ABAQUS/Standard و ABAQUS/Explicit ..... ۳۲

جدول ۴-۱: : مشخصات هندسی ابزار در فرآیند شبیه‌سازی شده ..... ۴۷

جدول ۴-۲: خواص فیزیکی و مکانیکی AA6022-T3 ..... ۴۷

جدول ۴-۳: زوایای بازگشت فنری برای سه مدل‌سازی صورت گرفته ..... ۵۲

جدول ۴-۴: نتایج بدست آمده برای پارامترهای بازگشت فنری در زمان‌های مختلف فرود سنبه ..... ۵۵

جدول ۴-۵: نتایج بدست آمده برای پارامترهای بازگشت‌فنری در فرمولاسیون سینماتیک و پنالتی .. ۵۸

جدول ۴-۶: نتایج بدست آمده برای پارامترهای بازگشت فنری در دامنه‌های خطی و هموار ..... ۶۲

جدول ۴-۷: پارامترهای بازگشت فنری برای تعداد نقاط مختلف انتگرال‌گیری ..... ۶۷

جدول ۴-۸: پارامترهای بازگشت فنری برای المان‌های مختلف ..... ۷۱

جدول ۴-۹: پارامترهای بهینه برای شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی و بازگشت فنری ..... ۷۴

جدول ۴-۱۰: نتایج بازگشت فنری برای شبیه‌سازی با پارامترهای مطلوب ..... ۷۶

جدول ۴-۱۱: نتایج بدست آمده برای زوایای بازگشت فنری در چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۸۳

جدول ۴-۱۲: شعاع انحناهای بدست آمده در چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۸۴

جدول ۴-۱۳: خصوصیات فیزیکی و مکانیکی فولاد JIS SUS430 ..... ۹۰

جدول ۴-۱۴: : نتایج بدست آمده برای زوایای بازگشت فنری در چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۹۳

جدول ۴-۱۵: شعاع انحناهای بدست آمده در چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۹۴

جدول ۵-۱: مشخصات هندسی ابزار در فرآیند شبیه‌سازی شده ..... ۱۰۰

جدول ۵-۲: خواص فیزیکی و مکانیکی CK67 ..... ۱۰۲

جدول ۵-۳: نتایج بدست آمده برای زاویه‌ی خمش ورق تک‌لایه در چرخه‌های مختلف ..... ۱۱۱

جدول ۵-۴: : نتایج بدست آمده برای زاویه‌ی خمش ورق دولایه در چرخه‌های مختلف ..... ۱۱۶

جدول ۶-۱: مشخصات هندسی ابزار در  فرآیند شبیه‌سازی شده ..... ۱۲۵

جدول ۶-۲: خواص فیزیکی و مکانیکی مواد سازنده‌ی ورق ..... ۱۲۶

جدول ۶-۳: نتایج بدست آمده برای صحت سنجی فرآیند ..... ۱۳۲

جدول ۶-۴: نتایج بدست آمده برای شعاع‌های انحنای ورق در چرخه‌های مختلف اصلاح قالب ..... ۱۳۷

## فهرست نمادها

| | |
|---|---|
| شکل اصلاح شده‌ی قالب | $C$ |
| شکل مطلوب قطعه | $D$ |
| شکل ورق پس از بازگشت فنری | $S$ |
| ضریب جبران‌سازی | $a$ |
| مدول کشسانی | $E$ |
| ضریب پواسون | $\upsilon$ |
| کرنش | $\varepsilon$ |
| کرنش پلاستیک | $\varepsilon^p$ |
| ثابت ماده | $A$ |
| ثابت ماده | $B$ |
| توان سخت‌شوندگی | $n$ |
| ضریب سخت‌شوندگی | $K$ |
| نرخ کرنش‌سختی | $H'$ |
| تنش عمودی | $\sigma$ |
| تنش تسلیم | $\sigma_y$ |
| تنش کششی نهایی | $\sigma_u$ |
| تنش برشی | $\tau$ |
| ثابت ناهمسانگردی در تابع تسلیم هیل | $N$ |

| | |
|---|---|
| ثابت ناهمسانگردی در تابع تسلیم هیل | $M$ |
| ثابت ناهمسانگردی در تابع تسلیم هیل | $L$ |
| ثابت ناهمسانگردی در تابع تسلیم هیل | $H$ |
| ثابت ناهمسانگردی در تابع تسلیم هیل | $G$ |
| ثابت ناهمسانگردی در تابع تسلیم هیل | $F$ |
| نسبت کرنش پلاستیک | $r$ |
| نسبت تنش تسلیم | $R_{ij}$ |
| ضریب اصطکاک | $\mu$ |
| فشار | $P$ |
| زاویه‌ی کف قالب با دیواره در خمش U شکل | $\theta_1$ |
| زاویه‌ی شانه قالب با دیواره در خمش U شکل | $\theta_2$ |
| شعاع انحنای دیواره‌ی قالب در خمش U شکل | $\rho$ |
| زاویه‌ی خمش در خمش V شکل | $\alpha$ |
| شعاع انحنای طولی قالب در خمش دوراستا | $R_x$ |
| شعاع انحنای عرضی قالب در خمش دوراستا | $R_z$ |

# فصل ۱: مقدمه

## ۱-۱ پیش‌گفتار

فرآیندهای شکل‌دهی ورق از دیرباز به عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌های تولید صنعتی مورد توجه بوده‌اند. گوناگونی و تنوع روشهای شکل‌دهی از فرآیندهایی ساده چون خمش[۱]، مهرزنی[۲] و کشش عمیق[۳] گرفته تا روش‌های پیچیده‌تری همچون شکل‌دهی ساندویچی[۴]، هیدروفرمینگ[۵] یا شکل‌دهی نموی[۶] نشان از گستره‌ی وسیع قلمرو کاربرد آنها در ساخت قطعات مختلف دارد. این گستردگی را می‌توان در طیف متنوعی از صنایع مختلف همچون صنایع بسته‌بندی (تولید قوطی‌های کنسرو، نوشابه و ...)، صنایع تولید لوازم خانگی و صنایع خودروسازی (ساخت قابهای[۷] داخلی و خارجی، تقویت‌کننده‌ها[۸] و ...) نیز مشاهده نمود.

با وجود گستردگی استفاده از ورق‌ها در طول دهه‌های متمادی، فرآیندهای شکل‌دهی آنها هنوز به صورت تمام و کمال تحلیل نشده‌اند. کمبود اطلاعات در زمینه‌ی درک پیچیدگیهای حاکم بر این فرآیندها سبب شده که عیوب ناشی از شکل‌دهی هنوز به عنوان یکی از مشکلات اساسی در تولید مطرح بوده و در بسیاری از موارد پارامترهای طراحی در یک فرآیند به کمک روش‌های آزمون و خطای سنتی تعیین گردد. عدم دقت کافی در تعیین پارامترهای طراحی از یک طرف کیفیت محصول تولیدی را کاهش داده و از طرف دیگر به دلیل وقتگیر بودن روش‌های آزمون و خطا هزینه‌های تولید را بالا خواهد برد.

یکی از اساسی‌ترین مشکلات فرآیندهای شکل‌دهی ورق، پدیده‌ی بازگشت فنری است. این پدیده که در اثر تغییر شکل کشسان ورق پس از باربرداری رخ می‌دهد، سبب بروز خطاهای ابعادی در قطعه‌ی تولیدی و انحراف هندسه‌ی آن از شکل طراحی می‌گردد که خود می‌تواند مشکلاتی همچون عدم کارآیی مطلوب یا عدم تطبیق قطعات در هنگام مونتاژ را به دنبال داشته باشد. ضربه‌ی اقتصادی ناشی از این پدیده به دلیل

[1] Bending
[2] Stamping
[3] Deep drawing
[4] Sandwich forming
[5] Hydroforming
[6] Incremental forming
[7] Panel
[8] Stiffener

تاخیر در تولید، هزینه‌های بازبینی ابزار و وازنی[9] قطعات بی‌کیفیت تنها در صنعت خودروسازی آمریکا در حدود پنجاه میلیون دلار در سال تخمین زده می‌شود [۱]. توجه به این نکات، اهمیت بررسی دقیق پدیده‌ی بازگشت فنری و لزوم مطالعه‌ی روشهای کاهش اثرات نامطلوب آن در فرآیندهای شکل‌دهی ورق را مشخص می‌سازد.

## ۱-۲ اهداف پژوهش

پدیده‌ی بازگشت فنری دارای رفتار پیچیده‌ای است که پیش‌بینی آن را دشوار می‌سازد. در سال‌های اخیر به دلیل گسترش استفاده از آلیاژهای آلومینیوم و فولادهای استحکام بالا در صنایع مختلف و به خصوص صنعت خودروسازی، این پدیده بیشتر مورد توجه قرار گرفته است؛ چرا که پنلهای بدنه‌ی ساخته شده از این آلیاژها در مقایسه با قطعات ساخته شده از فولادهای نرم بازگشت فنری بیشتری از خود نشان می‌دهند [۲]. از طرفی پدیده‌ی بازگشت فنری به ورق‌های فلزی تک‌لایه محدود نمی‌گردد؛ پیدایش ورق-های نوین چون ورق‌های چندلایه‌ی فلزی و ورق‌های ساندویچی و توسعه‌ی فرآیندهای شکل‌دهی بر روی آنها، بازگشت فنری را در این حوزه نیز به عنوان پدیده‌ای با اهمیت مطرح ساخته است. توزیع ناهمگون خواص روی این ورق‌ها، رفتار بازگشت فنری در ورق‌های چندلایه را باز هم پیچیده‌تر نموده است. تلاش‌های بسیاری برای کاهش بازگشت فنری صورت گرفته اما از آنجا که هنوز درک جامعی از این پدیده وجود ندارد، مشکل بازگشت فنری در فرآیندهای شکل‌دهی ورق حتی فرآیندهای متداولی چون فرآیند کشش عمیق هنوز پابرجا مانده است .

یکی از راه‌های برطرف نمودن مشکل بازگشت فنری، اصلاح و بازطراحی قالب (یا ابزار) شکل‌دهی است. در چنین دیدگاهی هدف حذف و یا کاهش بازگشت فنری نمی‌باشد، بلکه کوشش می‌شود با در نظرگرفتن

[9] Rejection

میزان بازگشت فنری، هندسه‌ی قالب به گونه‌ای طراحی گردد که بازگشت فنری را جبران‌سازی نموده و شکل مطلوب را برای ورق نتیجه دهد.

هدف از پژوهش حاضر اصلاح قالب به منظور جبران‌سازی بازگشت فنری در فرآیندهای شکل‌دهی ورق می‌باشد. بدین منظور روش تنظیم جابجایی[۱۰] با در نظر گرفتن اصلاحاتی به عنوان روش پایه برای جبران-سازی بازگشت فنری انتخاب شده است. این روش، روشی کاملا هندسی می‌باشد که در عین سادگی مفهوم از توانایی بالایی برای کاهش اثرات نامطلوب بازگشت فنری برخوردار است. به طور کلی مطالب بررسی شده از دو دیدگاه قابل ارائه می‌باشند: نوع فرآیند شکل‌دهی بررسی شده و نوع ورق به کار رفته در فرآیند شکل-دهی.

از آنجا که اساسا با حاکم شدن بارگذاری خمشی در یک فرآیند میزان بازگشت فنری افزایش می‌یابد، سه فرآیند خمش U شکل[۱۱]، خمش V شکل[۱۲] و خمش دوراستا[۱۳] برای اعمال عملیات جبران‌سازی انتخاب گشته‌اند. فرآیندهای خمش U و V شکل از فرآیندهای بسیار متداول شکل‌دهی ورق می‌باشند که با وجود کاربرد گسترده، پدیده‌ی بازگشت فنری در آنها هنوز به عنوان مشکلی جدی مطرح می‌باشد. خمش دوراستا نیز فرآیندی سه بعدی است که بازگشت فنری در آن کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

به منظور بررسی همه جانبه‌ی عملیات جبران‌سازی بازگشت فنری، سه نوع ورق تک‌لایه، دولایه و ساندویچی در تحلیل‌ها به کار گرفته شده و در هر حالت هندسه‌ی اصلاح شده‌ی قالب برای آنها بدست آمده است. با توجه به این که آلیاژهای آلومینیوم و فولادهای مقاومت بالا دارای بازگشت فنری قابل ملاحظه‌ای می‌باشند از آلومینیوم AA6022-T3 و فولاد CK67(DIN 17222) برای تحلیل ورق‌های تک‌لایه استفاده شده است. ورق آلومینیوم-فولادی به عنوان ورقی دولایه در بخشی مجزا مورد مطالعه قرار گرفته و قالب اصلاح شده‌ی آن در هر دو فرآیند خمش U و V شکل بدست آمده است. استفاده از ورق‌های ساندویچی به

[10] Displacement Adjustment (DA)
[11] U-shape bending
[12] V-shape bending
[13] Double-curved bending

دلیل وزن پایین و خصوصیات مکانیکی قابل قبول، روز به روز درحال گسترش است. این در حالی است که رفتار بازگشت فنری این گونه ورق‌ها با توجه به پیچیدگی آن، کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. به دلیل اهمیت ورق‌های ساندویچی در کاربردهای نوین همانند صنعت هوافضا، بخش انتهایی پژوهش به جبران-سازی بازگشت فنری در فرآیند خمش دوراستا روی ورق آلومینیوم-پلی‌پروپیلن-آلومینیوم اختصاص یافته است.

## ۱-۳ ساختار پایان‌نامه

**فصل اول:** مقدمه

**فصل دوم:** در این فصل ابتدا بازگشت فنری به عنوان یکی از معضلات اساسی فرآیندهای شکل‌دهی ورق تعریف گشته و تاریخچه‌ی پژوهش‌های صورت گرفته روی این پدیده مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه پس از تشریح دیدگاه جبران‌سازی بازگشت فنری، روش تنظیم جابجایی که در مطالعه‌ی حاضر به عنوان روش پایه برای جبران‌سازی به کار گرفته شده، به تفصیل معرفی گردیده است.

**فصل سوم:** در این فصل پاره‌ای از مفاهیم و شرایط حاکم بر مدل‌سازی و تحلیل مسائل در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس که شبیه‌سازی‌های شکل‌دهی و بازگشت فنری در پژوهش حاضر بر پایه‌ی آنها صورت گرفته، تشریح شده است.

**فصل چهارم:** در این فصل ابتدا پدیده‌ی بازگشت فنری در فرآیند خمش U شکل مورد بررسی قرار گرفته و سپس با اعمال فرآیند جبران‌سازی، هندسه‌ی اصلاح شده‌ی قالب برای دو ورق تک‌لایه و دولایه بدست آمده است. در انتهای فصل نمودار تغییرات پارامترهای بازگشت فنری ارائه شده و نتایج مورد کنکاش قرار گرفته‌اند.

**فصل پنجم:** در این فصل به بررسی پدیده‌ی بازگشت فنری در فرآیند خمش V شکل پرداخته شده است. روش تنظیم جابجایی برای جبران‌سازی بازگشت فنری در این فرآیند به کار گرفته شده و شکل تصحیح شده‌ی قالب برای دو ورق تک‌لایه و دولایه بدست آمده است. در انتهای فصل نمودار تغییرات زاویه-ی خمش به عنوان معیار سنجش بازگشت فنری مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

**فصل ششم:** این فصل به بررسی بازگشت فنری در فرآیند سه بعدی خمش دوراستا روی ورقی ساندویچی از جنس آلومینیوم-پلیمر اختصاص داشته و همچون دو فصل گذشته هندسه‌ی قالب در این فرآیند اصلاح گشته‌اند. در انتها نیز با بهره‌گیری از نتایج بدست آمده، میزان کارآیی جبران‌سازی روی ورق ساندویچی بررسی شده است.

**فصل هفتم:** در این فصل نتیجه‌گیری‌های کلی حاصل از نتایج ارائه شده در سه فصل قبل به صورت خلاصه مطرح شده و پیشنهاداتی برای کارهای قابل انجام در آینده و در راستای تحقیق حاضر ارائه گردیده-اند.