فهرست مطالب

۱) مقدمه ۱

۲) مروری بر کارهای گذشته ۳

۲-۱) مرور بر فرآیند شکل‌دهی نموی متقارن ۵

۲-۱-۱) اسپینینگ و شکل‌دهی برشی ۵

۲-۲) مقایسه شکل دهی نامتقارن ورق (AISF) با اسپینینگ و شکل‌دهی برشی ۷

۲-۳) شکل‌دهی نموی نامتقارن ۸

۲-۳-۱) عناصر اصلی در شکل‌دهی نموی نامتقارن ۸

۲-۳-۲) انواع شکل‌دهی نموی نامتقارن (AISF) ۹

۲-۳-۲-۱) شکل دهی نموی دو نقطه‌ای (TPIF) ۱۰

۲-۳-۲-۲) شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای ۱۰

۲-۴) مزایاو محدودیت‌های فرآیند ۱۱

۲-۵) تجهیزات مورد استفاده در شکل‌دهی نموی ۱۲

۲-۵-۱) ابزار شکل‌دهی ۱۲

۲-۵-۲) صفحه پشتی ۱۳

۲-۵-۳) ورق گیر ۱۳

۲-۵-۴) ماشین‌های مورد استفاده در شکل‌دهی نموی ورق ۱۳

۲-۶) مسیر حرکت ابزار ۱۵

۲-۶-۱) مسیر ابزار کانتور ۱۶

۲-۶-۲) مسیر ابزار مارپیچی ۱۶

۲-۶-۳) مسیر حرکت ابزار هوشمند ۱۸

۲-۶-۴) فرآیند SPIF دو مسیره ۱۸

۲-۷) سرعت دورانی ابزار شکل‌دهی ۲۰

۲-۸) روانکار ۲۲

۲-۹) نیرو در شکل‌دهی نموی ۲۲

۲-۱۰) زبری سطح ۲۴
۲-۱۱) پارامترهای فرآیند ۲۷
۲-۱۲) معیارهای قابلیت شکل‌دهی برای شکل‌دهی نموی ۲۸
۲-۱۲-۱) بیشینه زاویه طراحی (ϕ_{max}) ۲۹
۲-۱۳) دیاگرام‌های محدود کننده شکل دهی (FLD) و بررسی محدودیت‌های شکل‌دهی ۲۹
۲-۱۳-۱) پیشروی عمودی رو به پایین(Δz) ۳۰
۲-۱۳-۲) سرعت زاویه‌ای اسپیندل ۳۰
۲-۱۳-۳) قطر ابزار شکل دهی ۳۱
۲-۱۳-۴) ضخامت ورق ۳۱
۲-۱۴) اثر ناهمسان گردی ورق بر قابلیت شکل‌پذیری ۳۱
۲-۱۵) مکانیک فرآیند و آنالیز المان محدود (FEA) ۳۲
۲-۱۶) دقت فرآیند ۳۵
۲-۱۷) مدل آنالیز تئوری فرآیند شکل دهی نموی ۳۸
۳) تئوری تغییر شکل در فرآیند شکل‌دهی نموی ۴۰
۳-۱-۱) راستای جانبی ۴۳
۳-۱-۲) راستای ضخامت ۴۳
۳-۱-۳) راستای نصف‌النهاری ۴۴
۳-۲) تئوری به کار رفته در SPIF متداول ۴۵
۳-۲-۱) حالت‌های تنش-کرنش ۴۵
۳-۳) سطح تخت و چرخشی متقارن (المان پوسته A و B) ۴۶
۳-۳-۱) گوشه‌ها (المان پوسته نوع(c)) ۴۷
۳-۳-۲) سطح تخت تحت شرایط کرنش صفحه‌ای کششی ۴۹
۳-۳-۳) سطح متقارن چرخشی تحت شرایط کرنش صفحه‌ای کششی ۵۰
۳-۴) گوشه‌ها تحت شرایط کشش دو محوری مساوی ۵۰
۳-۵) نازک شدگی در شعاع گوشه‌ها ۵۱

۳-۵-۱) شرایط کرنش صفحه‌ای ۵۱
۳-۵-۲) شرایط کشش دو محوری برابر ۵۲
۳-۶) سطوح دیوار شیب دار ورق در نزدیک ابزار شکل دهی ۵۴
۴) بستر آزمایش ۵۷
۴-۱) تجهیزات مورد استفاده در آزمایش ۵۷
۴-۱-۱) دینامومتر ۵۷
۴-۱-۲) آمپلی‌فایر A5070 ..... ۵۸
۴-۱-۳) کارت دریافت داده‌ها ۵۹
۴-۱-۴) دیجیتایزر ۶۱
۴-۱-۵) دستگاه CNC ۶۲
۴-۱-۶) دوربین دیجیتال ۶۲
۴-۱-۷) قالب شکل‌دهی ۶۳
۴-۱-۸) ابزار شکل دهی ۶۴
۴-۱-۹) دستگاه حکاکی ۶۵
۴-۲) شرح آزمایش ۶۶
۴-۲-۱) مسیر حرکت ابزار ۶۷
۴-۲-۲) تنظیمات دینامومتر ۶۸
۴-۳) تست کشش ۶۸
۴-۳-۱) اندازه گیری R ۷۰
۴-۴) تعریف پارامترهای فرآیند ۷۱
۵) کرنش در فرآیند شکل‌دهی نموی نامتقارن ۷۴
۵-۱) بررسی کرنش و ضخامت ورق در زوایای طراحی مختلف ۷۷
۵-۱-۱) زاویه طراحی 50^{o} درجه ۷۷
۵-۱-۲) زاویه طراحی 60^{o} درجه ۷۸
۵-۱-۳) زاویه طراحی 70^{o} درجه ۷۹

۵-۲) بررسی دقت روش حکاکی..... ۸۰
۶) شبیه سازی فرآیند..... ۸۳
۶-۱) معرفی روش اجزاء محدود..... ۸۴
۶-۲) شبیه سازی فرآیند..... ۸۵
۶-۳) شبیه سازی آزمایشات جسویت و یانگ..... ۸۵
۶-۳-۱) تعریف هندسه مدل ۸۵
۶-۳-۲) تعریف مدل ماده ۸۸
۶-۳-۳) مونتاژ مدل..... ۸۸
۶-۳-۴) تعین روش حل مسئله..... ۸۹
۶-۳-۵) تعین بارگذاری و شرایط مرزی..... ۹۰
۶-۳-۶) تعیین شرایط و سطوح تماس..... ۹۰
۶-۳-۷) تعیین نوع مش بندی ۹۰
۶-۳-۷-۱) انواع المان‌ها..... ۹۰
۶-۳-۸) بررسی صحت هندسه المان..... ۹۱
۶-۳-۸-۱) پدیده ساعت شنی..... ۹۲
۶-۳-۹) بررسی همگرایی مش بندی..... ۹۳
۶-۳-۱۰) بررسی نتایج شبیه سازی آزمایش جسویت..... ۹۶
۶-۴) شبیه سازی آزمایش..... ۹۸
۷) بررسی نتایج..... ۱۰۲
۷-۱) اثر مسیر حرکت ابزار بر نیروی شکل‌دهی..... ۱۰۳
۷-۲) زوایه طراحی ۱۰۴
۷-۲-۱) زاویه طراحی ^{o} ۴۰ و ^{o} ۵۰ درجه..... ۱۰۵
۷-۲-۲) زاویه طراحی ^{o} ۶۰ درجه..... ۱۰۷
۷-۲-۳) زاویه طراحی ^{o} ۷۰ درجه..... ۱۰۸
۷-۲-۴) زاویه طراحی ^{o} ۷۵ درجه..... ۱۰۹
۷-۲-۵) بررسی اثر زاویه شکل‌دهی بر نیرو و ضخامت نهایی ورق..... ۱۱۱

۷-۳) بررسی پیشروی عمودی..... ۱۱۴
۷-۳-۱) بررسی اثر پیشروی بر نیرو و ضخامت ورق..... ۱۱۶
۷-۴) قطر ابزار شکل‌دهی..... ۱۱۸
۷-۴-۱) بررسی اثر قطر ابزار شکل‌دهی بر نیرو و ضخامت دیواره..... ۱۱۸
۷-۵) ضخامت اولیه ورق..... ۱۲۱
۷-۵-۱) بررسی اثر ضخامت اولیه ورق بر نیرو و ضخامت دیواره..... ۱۲۴
۷-۶) نتایج شبیه‌سازی فرآیند برای دو زاویه طراحی 40^{o} و 60^{o} درجه..... ۱۲۵
۸) نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات..... ۱۲۷
۸-۱) اثر زاویه طراحی..... ۱۲۸
۸-۲) اثر پیشروی عمودی (ΔZ)..... ۱۲۸
۸-۳) اثر قطر ابزار شکل‌دهی..... ۱۲۹
۸-۴) اثر ضخامت ورق..... ۱۲۹
۸-۵) نیرو..... ۱۳۰
۸-۶) قابلیت شکل پذیری..... ۱۳۰
۸-۷) ارائه پیشنهادات..... ۱۳۰

فهرست نمادها

زاویه طراحی (شکل‌دهی) یا زاویه دیواره پروفیل با سطح افق	ϕ
بیشینه زاویه طراحی که قطعه بدون شکست تغییر شکل می‌دهد	ϕ_{max}
پیشروی عمودی ابزار در هر مرحله	Δz
قطر سر ابزار شکل‌دهی	D
ضخامت اولیه ورق	t_0
ضخامت نهایی ورق بعد از فرآیند شکل‌دهی	t_f
کرنش حقیقی	ε
کرنش مهندسی	e
تنش در جهت نصف‌النهای	σ_φ
تنش در جهت ضخامت	σ_t
تنش در جهت جانبی	σ_θ
اصطکاک در جهت نصف‌النهاری	μ_φ
اصطکاک در جهت جانبی	μ_θ
اصطکاک در جهت جانبی	μ_t
کرنش در جهت جانبی	ε_θ
کرنش در جهت ضخامت	ε_t

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱) اسپینینگ سنتی و شکل‌دهی برشی یک مخروط ۶

شکل ۲-۲) قانون سینوس‌های اسپینینگ و تست قابلیت چرخش طراحی شده به وسیله کیگ ۷

شکل ۲-۳) انواع شکل‌دهی نموی نامتقارن ورق ۹

شکل ۲-۴) عناصر اصلی شکل‌دهی نموی نامتقارن ۹

شکل ۲-۵) شکل کلی فرآیند شکل‌دهی نموی دونقطه‌ای ۱۱

شکل ۲-۶) ابزار کاربید سمنتیت با قطر ۶ و ۱۰ و ۳۰ میلی متر و ابزار پلاستیکی..... ۱۳

شکل ۲-۷) فرز CNC معمولی با قابلیت ورق گیر متحرک..... ۱۴

شکل ۲-۸) ماشین هایی که برای این هدف خاص (SPIF) ساخته شده‌اند..... ۱۵

شکل ۲-۹) انتخاب مسیر ابزار مناسب برای SPIF..... ۱۵

شکل ۲-۱۰) مسیر ابزار کانتور برای تولید لنز چراغ به روش SPIF..... ۱۶

شکل ۲-۱۱) تثبیت موقعیت سطح بازتابنده توسط پشتیبان دیواره..... ۱۷

شکل ۲-۱۲) رابطه سینوس برای محاسبه ضخامت نهایی در SPIF دو مسیره..... ۱۹

شکل ۲-۱۳) یک مثال برای کاربرد شکل‌دهی چند مسیره، سطح بازتابنده چراغ اتومبیل..... ۱۹

شکل ۲-۱۴) ایجاد تاخوردگی در مرحله دوم شکل‌دهی..... ۲۰

شکل ۲-۱۵) هندسه و سرعت‌های ابزار..... ۲۱

شکل ۲-۱۶) جزییات سنسورها در شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای..... ۲۳

شکل ۲-۱۷) نیروی اندازه‌گیری شده در شکل‌دهی هرم در ϕ=۴۰ ..... ۲۳

شکل۲ -۱۸) نیروی اندازه گیری شده در زوایای ϕ=۳۰ و ϕ=۴۵ و ϕ=۶۰ ..... ۲۴

شکل ۲-۱۹) یک مثال از ایجاد شیار بر روی صافی سطح..... ۲۶

شکل ۲-۲۰) نماهای صافی سطح ۳D برای ۴ سایز مختلف ΔZ قطر ابزار ۱۲.۵ mm..... ۲۶

شکل ۲-۲۱) پروفیل های ۲D صافی سطح برای ۳ سایز مختلف ΔZ..... ۲۶

شکل ۲-۲۲) تاثیر زاویه طراحی ϕ و گام Δz و سایز ابزار بر روی زبری سطح R_z ۲۷

شکل ۲-۲۳) فرآیند قابل انجام برای ساخت یک قطعه..... ۲۸

شکل ۲-۲۴) FLD_0 برای ΔZ مختلف با نمایش کرانهای بالا و پایین، AA 1005-0، قطر ابزار mm ۱۲..... ۳۰

شکل ۲-۲۵) FLD برای $t_0=1.5$ mm، DC04، تاثیر اندازه ابزار شکل‌دهی بر محدودیت‌های شکل‌دهی..... ۳۱

شکل ۲-۲۶) نازک شدگی ورق برای یک فنجان متقارن..... ۳۴

شکل ۲-۲۷) مقایسه نتایج هندسه قطعه اندازه گیری شده با نتایج محاسبات..... ۳۴

شکل ۲-۲۸) یک جزء از قطعه ایجاد شده بدون پلیت پشتی و همراه با پلیت در مقایسه با قطعه مورد نظر ایجاد شده با CAD..... ۳۶

شکل ۲-۲۹) تعین هندسه واقعی قطعه مورد نظر براساس اندازه گیری فیدبک..... ۳۸

شکل۲ -۳۰) شماتیک فرآیند شکل دهی نموی چند نقطه..... ۳۸

شکل ۳-۱) تصویر شماتیک نحوه تماس موضعی ورق و ابزار..... ۴۱

شکل ۳-۲) آنالیز غشایی برایSPIF..... ۴۲

شکل ۳-۳) نمای شماتیک برش قطاعی فرآیند SPIF..... ۴۵

شکل۳ -۴) جزئیات مربوط به برش عرضی المان پوسته ای..... ۴۹

شکل ۳-۵) بیان شماتیک مسیر نازک شدن در راستای قطاع..... ۵۳

شکل ۳-۶) نمایش تغیرات آزمایشگاهی ضخامت نسبت به عمق در راستای دو برش قطاعی از یک شکل مخروط ناقص ۵۳

شکل ۳-۷) نمای شماتیکی از میدان تنش در برش شعاعی از جزء شکل داده شده..... ۵۵

شکل ۴-۱) دینامومتر 9255b استفاده شده در این تحقیق..... ۵۸

شکل ۴-۲) آمپلی فایر A5070..... ۵۹

شکل ۴-۳) تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال..... ۵۹

شکل ۴-۴) کارت دریافت داده و تجهیزات جانبی آن..... ۶۰

شکل ۴-۵) سیگنالهای ورودی به کارت تحلیل داده ها..... ۶۱

شکل ۴-۶) دیجیتایزرRenishaw با دقت ۰.۰۱ میلیمتر..... ۶۱

شکل ۴-۷) نحوه اندازه گیری ضخامت دیواره قطعه کار..... ۶۲

شکل ۴-۸) دستگاه CNC مدل VMC850 مورد استفاده جهت انجام تست‌ها.....۶۲
شکل ۴-۹) دوربین دیجیتال Flea2 ساخت شرکت Point Grey.....۶۳
شکل ۴=۱۰) قالب طراحی و ساخته شده برای فرآیند شکل‌دهی نموی.....۶۴
شکل ۴-۱۱) نقشه ساخت ابزار طراحی شده جهت انجام آزمایشات.....۶۵
شکل ۴-۱۲) ابزارهای مورد استفاده جهت انجام آزمایشات.....۶۵
شکل ۴-۱۳) حکاکی دوایری به قطر ۲.۵ میلی‌متر جهت محاسبه کرنش در راستای ضخامت.....۶۶
شکل ۴-۱۴) دستگاه الکترولیت مورد استفاده جهت حکاکی بر روی ورق جهت اندازه گیری کرنش‌ها.....۶۶
شکل۴-۱۵) ابعاد هندسی نمونه تست کشش بر اساس استاندارد ASTM E8M.....۶۸
شکل۴-۱۶) دستگاه یونیورسال کشش ZWICK/Z250.....۶۹
شکل ۴-۱۷) نمایش نمونه در حین تست کشش.....۷۰
شکل ۵-۱) نمایش کرنش در دوایر حکاکی.....۷۵
شکل ۵-۲) حکاکی دوایری به قطر ۲.۵ میلی‌متر جهت محاسبه کرنش در راستای ضخامت.....۷۶
شکل ۵-۳) اندازه‌گیری ابعاد دایره‌های حکاکی شده بر روی ورق، برای مخروط با زاویه طراحی ۵۰ درجه.....۷۷
شکل ۵-۴) اندازه‌گیری ابعاد دایره‌های حکاکی شده بر روی ورق، برای مخروط با زاویه طراحی ۶۰ درجه.....۷۸
شکل ۵-۵) اندازه‌گیری ابعاد دایره‌های حکاکی شده بر روی ورق، برای مخروط با زاویه طراحی ۷۰ درجه.....۷۹
شکل ۶-۱) نمایش هندسه مورد استفاده جهت نگه‌دارنده.....۸۷
شکل ۶-۲) نمایش هندسه مورد استفاده جهت صفحه پشتی.....۸۷
شکل ۶-۳) نمایش هندسه مورد استفاده جهت ابزار شکل دهی.....۸۷
شکل ۶-۴) نمایش هندسه مورد استفاده جهت ورق خام.....۸۸
شکل ۶-۵) نمایش روش مونتاژ مدل.....۸۹
شکل ۶-۶) نحوه تعریف بخش بندی و تأثیر آن بر نوع مش‌بندی ۹۱
شکل ۶-۷) مدل استفاده شده جهت شبیه‌سازی ورق.....۹۲
شکل ۶-۸) نمودار تغییرات حداقل ضخامت بر حسب تعداد المان برای المان پوسته‌ای در حل دینامیک-ضمنی.....۹۴

شکل ۶-۹) نمودار تغییرات حداقل ضخامت بر حسب تعداد المان برای المان پوسته‌ای در حل دینامیک-صریح.....۹۴

شکل ۶-۱۰) نمودار تغییرات حداقل ضخامت بر حسب تعداد المان برای المان آجری در حل دینامیک-ضمنی.....۹۵

شکل ۶-۱۱) نمودار تغییرات حداقل ضخامت بر حسب تعداد المان برای المان آجری در حل دینامیک-صریح.....۹۵

شکل ۶-۱۲) نمودار تغییر ضخامت دیواره مخروط شبیه سازی شده با شیب ۳۰ درجه به روش SPIF یک مسیره با المان پوسته‌ای (T_0=۱.۲۱mm).....۹۶

شکل ۶-۱۳) نمودار تغییر ضخامت دیواره مخروط شبیه سازی شده با شیب ۳۰ درجه به روش SPIF یک مسیره با المان آجری (T_0=۱.۲۱mm).....۹۷

شکل ۶-۱۴) نمودار تغییر ضخامت دیواره مخروط شبیه سازی شده با شیب ۳۰ درجه به روش SPIF یک مسیره به روش دینامیک صریح (T_0=۱.۲۱mm).....۹۸

شکل ۶-۱۵) نمایش هندسی مدل صفحه پشتی مورد استفاده در شبیه‌سازی آزمایشات.....۹۹

شکل ۶-۱۶) نمایش هندسی مدل ورق گیر مورد استفاده در شبیه‌سازی آزمایشات.....۹۹

شکل ۶-۱۷) نمایش مسیر حرکت ابزار در طی یک مرحله از شبیه سازی.....۱۰۰

شکل۷-۱) نمودار نیروی شکل‌دهی با مسیر ابزار کانتور.....۱۰۳

شکل ۷-۲) نمودار نیروی شکل‌دهی با مسیر ابزار کانتور ۱۰۴

شکل ۷-۳) نمایش تغییرات نیرو بر حسب زمان در راستای محور Z در زاویه ^{o} ۴۰ درجه.....۱۰۵

شکل۷-۴) نمایش تغییرات نیرو بر حسب زمان در راستای محور Z در زاویه ^{o} ۵۰ درجه.....۱۰۶

شکل ۷-۵) منحنی تغییرات ضخامت در راستای دیواره مخروط در زاویه ^{o} ۴۰ درجه.....۱۰۶

شکل۷-۶) منحنی تغییرات ضخامت در راستای دیواره مخروط در زاویه ^{o} ۵۰ درجه.....۱۰۶

شکل ۷-۷) نمایش تغییرات نیرو بر حسب زمان در راستای محور Z در زاویه ^{o} ۶۰ درجه.....۱۰۷

شکل۷ -۸) منحنی تغییرات ضخامت در راستای دیواره مخروط در زاویه ^{o} ۶۰ درجه.....۱۰۸

شکل۷-۹) نمایش تغییرات نیرو بر حسب زمان در راستای محور Z در زاویه ^{o} ۷۰ درجه.....۱۰۹

شکل ۷-۱۰) منحنی تغییرات ضخامت در راستای دیواره مخروط در زاویه ^{o} ۷۰ درجه.....۱۰۹

شکل ۷-۱۱) پارگی ورق قابل مشاهده در زاویه طراحی ^{o} ۷۵ درجه.....۱۱۰

شکل۷-۱۲) نمایش تغییرات نیرو بر حسب زمان در راستای محور Z در زاویه ^{o} ۷۵ درجه.....۱۱۰

شکل ۷-۱۳) مقایسه نمودار تغییرات نیرو بر حسب زمان فرآیند، برای زوایای شکل‌دهی ^{o} ۴۰، ^{o} ۵۰، ^{o} ۶۰، ^{o} ۷۰ و ^{o}۷۵ درجه.....۱۱۲

شکل ۷-۱۴) مقایسه نمودار تغییر ضخامت در راستای دیواره برای زوایای شکل‌دهی ^{o}۴۰، ^{o}۵۰، ^{o}۶۰، ^{o}۷۰ و ^{o}۷۵ درجه.....۱۱۲

شکل ۷-۱۵) نمایش تغییرات نیرو بر حسب زمان در راستای محور Z در پیشروی عمودی ۰.۳۵.....۱۱۴

شکل ۷-۱۶) منحنی تغییرات ضخامت در راستای دیواره مخروط در پیشروی عمودی ۰.۳۵mm.....۱۱۴

شکل ۷-۱۷) نمایش تغییرات نیرو بر حسب زمان در راستای محور Z در پیشروی عمودی ۰.۵.....۱۱۴

شکل ۷-۱۸) منحنی تغییرات ضخامت در راستای دیواره مخروط در پیشروی عمودی ۰.۵mm.....۱۱۵

شکل ۷-۱۹) نمایش تغییرات نیرو بر حسب زمان در راستای محور Z در پیشروی عمودی ۰.۷۵ mm.....۱۱۵

شکل ۷-۲۰) منحنی تغییرات ضخامت در راستای دیواره مخروط در پیشروی عمودی۰.۷۵ mm.....۱۱۵

شکل ۷-۲۱) مقایسه نمودار تغییرات نیرو بر حسب زمان فرآیند برای پیشروی‌های عمودی ۰.۲۵، ۰.۳۵، ۰.۵ و ۰.۷۵ میلی‌متر.....۱۱۶

شکل ۷-۲۲) مقایسه نمودار تغییر ضخامت در راستای دیواره برای پیشروی‌های عمودی ۰.۲۵، ۰.۳۵، ۰.۵ و ۰.۷۵ میلی‌متر.....۱۱۶

شکل ۷-۲۳) نمایی از قطعه شکل داده شده در پیشروی۰.۷۵ mm قطر ابزار شکل‌دهی.....۱۱۷

شکل ۷-۲۴) نمایش تغییرات نیرو بر حسب زمان در راستای محور Z با قطر ابزار۶ mm.....۱۱۸

شکل ۷-۲۵) منحنی تغییرات ضخامت در راستای دیواره مخروط با قطر ابزار۶ mm.....۱۱۹

شکل ۷-۲۶) نمایش تغییرات نیرو بر حسب زمان در راستای محور Z با قطر ابزار ۱۰mm.....۱۱۹

شکل ۷-۲۷) منحنی تغییرات ضخامت در راستای دیواره مخروط با قطر ابزار ۶mm.....۱۱۹

شکل ۷-۲۸) مقایسه نمودار تغییرات نیرو بر حسب زمان فرآیند ببرای قطر ابزارهای ۶، ۸ و ۱۰ میلی‌متر.....۱۲۰

شکل ۷-۲۹) مقایسه نمودار تغییر ضخامت در راستای دیواره برای قطر ابزارهای ۶، ۸ و ۱۰ میلی‌متر.....۱۲۰

شکل ۷-۳۰) نمایش تغییرات نیرو بر حسب زمان در راستای محور Z با ضخامت اولیه ورق ۰.۸ میلی‌متر.....۱۲۱
شکل ۷-۳۱) منحنی تغییرات ضخامت در راستای دیواره مخروط با ضخامت اولیه ورق ۰.۸ میلی‌متر.....۱۲۱
شکل ۷-۳۲) نمایش تغییرات نیرو بر حسب زمان در راستای محور Z با ضخامت اولیه ورق ۱.۲ میلی‌متر.....۱۲۲
شکل ۷-۳۳) منحنی تغییرات ضخامت در راستای دیواره مخروط با ضخامت اولیه ورق ۱.۲ میلی‌متر.....۱۲۲
شکل ۷-۳۴) نمایش تغییرات نیرو بر حسب زمان در راستای محور Z با ضخامت اولیه ورق ۱.۵ میلی‌متر.....۱۲۲
شکل ۷-۳۵) منحنی تغییرات ضخامت در راستای دیواره مخروط با ضخامت اولیه ورق ۱.۵ میلی‌متر.....۱۲۳
شکل ۷-۳۶) مقایسه نمودار تغییرات نیرو بر حسب زمان فرآیند برای ضخامت‌های اولیه ۰.۸، ۱، ۱.۲ و ۱.۵ میلی‌متر ۱۲۳
شکل ۷-۳۷) مقایسه نمودار تغییر ضخامت در راستای دیواره برای ضخامت‌های اولیه ۰.۸، ۱، ۱.۲ و ۱.۵ میلی‌متر.....۱۲۴
شکل ۷-۳۸) نتایج شبیه‌سازی ضخامت در زاویه ^{o} ۴۰ درجه.....۱۲۴
شکل ۷-۳۹) نتایج شبیه‌سازی ضخامت در زاویه ^{o} ۶۰ درجه.....۱۲۵

فهرست جدول‌ها

جدول ۲-۱) تاثیرات روانکاری و سرعت اسپیندل بر روی صافی سطح..... ۲۲

جدول ۲-۲) نتایج آزمایشی رابطه نیروی پیکF_p با میانگین نیرو F_s ۲۵

جدول ۲-۳) لیست مواد با ضخامت اولیه و زاویه طراحی ماکزیمم و FLD حداکثر کرنش بزرگ به کرنش..... ۲۹

جدول ۲-۴) مقایسه روش صریح و ضمنی با داده های آزمایشی..... ۳۴

جدول ۲-۵) دقت در استراتژی مسیر ابزارهای مختلف..... ۳۷

جدول ۳-۱) روابط تنشها و حالت کرنشها در مدهای اصلی فرآیند SPIF و مقایسه آنها با روابط فرآیند استمپینگ..... ۴۸

جدول۴ -۱) خواص مکانیکی آلیاژ Al1200 حاصل از تست کشش ۶۹

جدول ۴-۲) ضرایب ناهمسانگردی مربوط به آلیاژ Al1200..... ۷۱

جدول ۴-۳) شماره گذاری تست ها و نمایش پارامترهای مربوط به هر فرآیند..... ۷۲

جدول ۵-۱) مقادیر ضخامت بدست آمده، برای زوایای مختلف شکل‌دهی..... ۸۰

جدول ۶-۱) خصوصیات ماده AL3003-O..... ۸۸

جدول ۶-۲) علت‌های پدید ساعت شنی و راه حل‌های کم کردن آن..... ۹۲

جدول ۷-۱) مشخصات پارامترهای فرآیند جهت انجام تست شماره ۱ و ۲..... ۱۰۵

جدول ۷-۲) مشخصات پارامترهای فرآیند جهت انجام تست شماره ۳..... ۱۰۷

جدول ۷-۳) مشخصات پارامترهای فرآیند جهت انجام تست شماره ۴..... ۱۰۹

جدول ۷-۴) مشخصات پارامترهای فرآیند جهت انجام تست شماره ۵..... ۱۰۹

جدول ۷-۵) مقادیر پیک نیرو و شیب نمودار برای زوایای شکل‌دهی مختلف..... ۱۱۲

جدول ۷-۶) مشخصات پارامترهای فرآیند جهت انجام تست شماره۳، ۶-۸..... ۱۱۳

جدول ۷-۷) مشخصات پارامترهای فرآیند جهت انجام تست شماره ۹-۱۰..... ۱۱۸

جدول ۷-۸) مشخصات پارامترهای فرآیند جهت انجام تست شماره ۱۱-۱۳..... ۱۲۱

چکیده

شکل‌دهی ورق به صورت سنتی نیاز به قالب‌های مخصوص و گران قیمت دارد، قالب های مثبت و منفی (نرومادگی) که هر طرف قالب به یک طرف شکل محصول مورد نظر شباهت دارد. صنعتگران حتی برای تولید نمونه اولیه و آزمایشی قطعه صنعتی، مجبور به ساخت این قالب‌ها می‌شوند.کارخانجات صنعتی اخیراً کوشش می‌کنند تا قابلیت انعطاف‌پذیری بیشتری را در شکل‌دهی ورق داشته و پاسخگوی نیاز مشتری باشند. این کوشش‌ها روند شکل‌دهی را به سمت روش‌های جدید شکل‌دهی، که انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به روش های سنتی دارند، متمایل کرده است. یکی از این روش‌ها، روش شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای ورق (SPIF) است، که قطعه بدون نیاز به قالب اختصاصی شکل‌دهی می‌شود. این روش برای شکل‌دهی هر دو نوع قطعات متقارن و نامتقارن کاربرد دارد، که قطعه تنها با استفاده از یک ماشین فرز CNC ویک ابزار ساده سرکروی شکل‌دهی می‌شود. مزیت این روش توانایی ساخت نمونه اولیه قطعات و یا تولید قطعات در دسته های کوچک و زمان کم می‌باشد. قابلیت شکل‌دهی با استفاده از این روش برمبنای پارامترهای مختلف شکل‌دهی است که این پارامترها در طول طراحی فرآیند تعریف می‌شوند. در این پروژه چهار پارامتر زاویه طراحی، پیشروی عمودی، قطر ابزار و ضخامت ورق در نظر گرفته شده و اثر این پارامترها بر روی قابلیت شکل‌پذیری ورق، این بررسی با استفاده از نمودارهای نیرو و نازک‌شدگی ورق که به وسیله آزمایشات تجربی و شبیه سازی فرآیند با استفاده از نرم افزار ABAQUS بدست آمده، انجام شده است .

فصل اول

مقدمه

۱ مقدمه

در گذشته فرآیندهای شکل‌دهی ورق به صورت سنتی صورت می‌گرفت و برای ساخت هر قطعه نیاز به قالبهای مخصوص بود. ساخت قالب علاوه بر هزینه، زمان زیادی را به خود اختصاص می‌داد. هرگونه تغییر در هندسه محصول نیاز به ساخت مجدد قالب و یا اصلاح قالب بوده که این مسئله مشکلات زیادی را برای سازنده‌گان به وجود می‌آورد. سازنده‌گان حتی برای تولید نمونه اولیه و آزمایشی یک قطعه، مجبور به ساخت این قالب‌ها می‌شدند. کوشش‌های بسیاری انجام شد تا قابلیت انعطاف‌پذیری بیشتری را در شکل‌دهی ورق داشته و پاسخگوی نیاز مشتری باشند. این کوشش‌ها روند شکل‌دهی را به سمت روش‌های جدید شکل‌دهی، که انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به روش های سنتی دارند، کشاند. امروزه فرآیندهای جدید، با انعطاف پذیری بالا وجود دارد، که به وسیله تغییر شکل پلاستیک ورق فلزی در یک موضع نقطه‌ای قادر به تولید قطعات پیچیده می‌باشند. این روش‌ها، برای تولید نمونه اولیه یک قطعه، در بازه زمانی کوتاه، مثلا یک روز و یا تولید قطعات در دسته‌های کوچک کارایی خوبی دارند. یکی از این روش‌ها، روش شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای ورق (SPIF[1]) است، که قطعه بدون نیاز به قالب اختصاصی شکل‌دهی می‌شود. این روش برای شکل‌دهی هر دو نوع قطعات متقارن و نامتقارن کاربرد دارد. در این روش قطعه تنها با استفاده از یک ماشین فرز CNC[2] و یک ابزار ساده سر کروی شکل‌دهی می‌شود. مزیت این روش توانایی ساخت نمونه اولیه قطعات و یا تولید قطعات در دسته‌های کوچک و در زمان کم می‌باشد. قابلیت شکل‌دهی با استفاده از این روش برمبنای پارامترهای مختلف شکل‌دهی است که این پارامترها در طول طراحی فرآیند تعریف می‌شوند. پارامترهای قابل تنظیم در این فرآیند را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

[1] Single point incremental forming
[2] Computer numerial control

- پارامترهای قابل تنظیم دستگاه: پیشروی عمودی، سرعت حرکت ابزار، سرعت چرخش اسپیندل، مسیر حرکت ابزار، قطر ابزار
- پارامتر جنس: پارامترهای مرتبط با جنس ورق
- پارامترهای طراحی: شیب دیواره (زاویه طراحی)، هندسه قطعه و ضخامت ورق

از میان پارامترهای ذکر شده، در این پروژه به بررسی چهار پارامتر زاویه طراحی، پیشروی عمودی، قطر ابزار و ضخامت ورق پرداخته می‌شود و اثر هر یک از این پارامترها، بر نیرو و قابلیت شکل‌پذیری مورد بررسی قرار می‌گیرد و در ۷ فصل خلاصه شده است که عبارتند از:

فصل اول مقدمه و روند پروژه را گزارش می‌کند.

فصل دوم مروری بر روش‌های شکل‌دهی نموی به صورت کلی و شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای ورق فلزی به صورت خاص بوده و چگونگی پیشرفت فرآیند از مرحله طراحی تا ایجاد مسیر ابزار شکل‌دهی را برای تولید محصول نهایی نشان می‌دهد و پارامترهای فرآیند و اثرات این پارامترها بر روی این روش شکل‌دهی را مورد بحث قرار داده و مطالعاتی که تا کنون بر روی این روش شکل‌دهی انجام شده، جمع بندی می‌شود.

فصل سوم تئوری تغییر شکل در فرآیند شکل‌دهی نموی را مورد بررسی قرار می‌دهد. با استفاده از روابط تنش و کرنش و روابط تعادل در هر المان ورق، حالات مختلف تغییر شکل که در این روش شکل‌دهی اتفاق می‌افتد را مورد بررسی قرار می‌دهد.

فصل چهارم بستر آزمایش را شرح می‌دهد. در این فصل تجهیزات به کار رفته در آزمایش، روش انجام آزمایش و پارامترهای در نظر گرفته شده در هر آزمایش معرفی می‌شوند.

فصل پنجم به بررسی کرنش در این روش شکل‌دهی می‌پردازد. روش‌های اندازه‌گیری کرنش و نازک شدگی و دقت هر روش در این فصل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فصل ششم به بررسی نتایج بدست آمده از آزمایشات می‌پردازد. در این فصل با استفاده از نمودارهای نیرو و منحنی‌های نازک‌شدگی بدست آمده از آزمایشات، اثر پارامترهای تعریف شده بر روی نیرو و قابلیت شکل‌پذیری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فصل هفتم : به بررسی اندازه‌گیری نیرو در فرایند شکل‌دهی نموی و رفتار نیرو در شناخت و بررسی اثر پارامترهای فرایند

فصل‌هشتم جمع‌بندی مطالب و ارائه پیشنهادات می‌باشد.

فصل
دوم

مروری بر کارهای گذشته

۲ مروری بر کارهای گذشته

فکر واندیشه شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای بدون قالب (AISF[1]) درحدود سال ۱۹۶۰ مطرح شد. با این وجود، این تکنولوژی اخیراً با پیشرفت تکنولوژی CNC به میزان کافی، به واقعیت تبدیل شده است. اولین گزارشات در مورد AISF بدون قالب، در سال ۱۹۷۰ توسط ادوارد لیزاک به ثبت رسیده است. در این گزارشات قابلیت شکل‌دهی بدون قالب اشکال مختلف مورد بررسی قرار گرفته و شکل‌دهی یک قطعه مخروطی شکل، با ابزار ارزان قیمت و ساده شرح داده شده است. لیزاک در این گزارشات نشان داد که می‌توان اشکال مختلف را تنها با تجهیزات استاندارد موجود درکارگاه های ماشین ابزار شکل‌دهی نمود. این فرآیند برای ساخت نمونه اولیه قطعات بسیار مفید است. میشل در سال ۱۹۹۱ پیشرفت تجهیزات اتوماسیون، که سبب انعطاف‌پذیری فرآیند شکل‌دهی می‌شود را پیش‌گویی کرد[۱].

امروزه روش‌های جدید شکل‌دهی وجود دارند که به وسیله تغییر شکل پلاستیک ورق فلزی، در یک موضع نقطه‌ای، قادر به تولید قطعات پیچیده و انعطاف‌پذیر می‌باشند. یکی از این روش‌ها، روش شکل‌دهی نموی ورق فلزی می‌باشد. این روش برای تولید قطعات در دسته‌های کوچک و یا تولید نمونه اولیه یک قطعه در بازه زمانی یک روز بسیار مفید است. این فرآیند از این جهت مورد توجه قرار گرفته که کارخانه‌ها می‌توانند با استفاده از مهارت یک اپراتور فرز CNC شکل‌دهی ورق فلزی را انجام دهند.

در گذشته برای انجام فرآیندها معمولاً از روش‌های سنتی استفاده می‌شد که برای دستیابی به فرآیند نیاز به علوم هندسی، ابزار مخصوص و قالب‌های گران قیمت داشت. در فرآیند اخیر سخت افزار و نرم افزار CNC قادر به

[1] Asymmetric incremental single forming

شکل‌دهی کامل ورق می‌باشد. روش جدید شکل‌دهی انعطاف‌پذیری در شکل‌دهی را آسان کرده و بدون نیاز به قالب، تولید اشکال پیچیده با ابزار ساده صورت می‌گیرد هدف نهایی در این فرآیند، شکل‌دهی بدون قالب است. در ادامه روند پیشرفت فرآیند مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۱ مرور بر فرآیند شکل‌دهی نموی متقارن

فرآیند شکل‌دهی نموی متقارن را می‌توان در حالت کلی اسپینینگ[1] نامید. براون[۲] در گزارشات خود به صورت جامع فرآیند اسپینینگ را مورد بررسی قرار داده و آن رابه سه بخش زیرتقسیم کرده است:

۱- اسپینینگ سنتی

۲- شکل‌دهی برشی

۳- شکل‌دهی جاری شدن

دو نوع اول و دوم به دلیل کاربرد بیشتر به صورت خلاصه شرح داده می‌شود.

۲-۱-۱ اسپینینگ و شکل‌دهی برشی

اسپینینگ و شکل‌دهی برشی دو فرآیند شبیه به هم هستند که برای شکل‌دهی اشکال متقارن استفاده می‌شوند. اسپینینگ در ابتدا در مصر باستان به کار گرفته شد و بعد از آن در چین رشد کرد[۱]. این فرآیند پیوسته در حال رشد و توسعه می‌باشد. برای مثال برای ساخت قطعات با یک محور تقارن در صنعت هوا فضا و خودروسازی کارایی زیادی دارد. این روش شکل‌دهی، نیازمند یک قالب و ورق می‌باشد که ورق در طول فرآیند، شکلِ قطعه مورد نظر را به خود می‌گیرد.

ورق فلزی بر روی یک دیسک سالید قرار می‌گیرد و به چرخش درمی‌آید. ابزار دوار، برای ایجاد فشار موضعی به کار گرفته می‌شود و ماده به آرامی شکل می‌پذیرد. ورق فلزی بر روی دیسک چرخان قطر بزرگتری نسبت به محصول نهایی دارد و ماده به صورت شعاعی کشیده می‌شود تا از پیچش قطعه جلوگیری کند. شکل‌دهی با چندین ضربه ممتد ابزار صورت می‌گیرد. شکل ۲-۱ جریان ماده را از بلانک اصلی تا شکل مخروط نهایی (گنبدی

[1] Spining