ISME

بررسی پدیدهٔ برگشت پذیری در فرایند خمشی- کششی U شکل صفحات ناهمسانگرد

در این مقاله اثر عواملی همچون ضخامت ورق، نیروی ورقگیر، ضریب اصطکاک، جنس ورق، ناهمسانگردی صفحه‌ای ورق، جهت برش ورق نسبت به جهت نورد، نقش مدلهای سخت شوندگی و شعاعهای راکورد سمبه و ماتریس بر روی میزان برگشت پذیری در یک فرایند خمشی- کششی U شکل مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. به این منظور شبیه سازی سه بعدی این فرایند توسط روش المان محدود و با استفاده از نرم افزار Ansys بر روی سه جنس مختلف از آلیاژهای آلومینیومی و فولادی انجام گرفت و با ساخت یک قالب به مطالعهٔ این فرآیند به صورت آزمایشگاهی پرداخته شد. نتایج قسمتی از بررسی‌های انجام شده حاکی از رابطهٔ مستقیم میزان نرمال ناهمسانگردی صفحه‌ای ورق با زوایای برگشت پذیری است و همچنین نشان دهندهٔ نقش مهم نیروی ورقگیر در تأثیر جهت برش ورق بر روی میزان برگشت پذیری می‌باشد. مقایسهٔ نتایج بدست آمده از شبیه سازی با کار آزمایشگاهی نشان دهندهٔ تطابق خوب این دو روش در تجزیه و تحلیل این فرایند می باشد.

مهران کدخدایان[۱]
دانشیار

محمد اسماعیل گلمکانی[۲]
دانشجوی دکترا

واژه‌های کلیدی: برگشت پذیری، فرایند خمشی- کششی، صفحات ناهمسانگرد

۱- مقدمه

برگشت پذیری ناشی از حذف بخش الاستیک کرنشهای قطعه کار پس از فرایند باربرداری می‌باشد و می‌تواند به طور نامناسبی شکل قطعه را تحت تأثیر قرار دهد. به منظور برآورده کردن هدف طراح از شکل محصول نهایی از لحاظ شکل ظاهری و سادگی در مونتاژ، راهکارهایی را جهت کاهش این پدیده در فرایندهای شکل‌دهی باید مورد توجه قرار داد. اغلب ورق‌های فلزی در فرایند شکل دهی تحت تاثیر ترکیبی از بارگذاری خمشی، کششی و باربرداری می‌باشند و بنابراین شکل پیچیده‌ای از برگشت پذیری در آنها رخ میدهد. در گذشته از تجربهٔ طراح و روش سعی وخطا به منظور کاهش میزان برگشت پذیری و بالا بردن دقت ابعادی محصول استفاده می‌شد که

[۱] نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسي مکانیک، دانشکده مهندسي، دانشگاه فردوسي مشهد Kadkhoda@um.ac.ir
[۲] دانشجوی دکترا، گروه مهندسي مکانیک، دانشکده مهندسي، دانشگاه فردوسي مشهد

باعث انجام آزمایشات وقت گیر و پرهزینه می گردید[۱]. در دهه‌های گذشته به منظور پیش بینی پدیدهٔ برگشت پذیری از تئوري‌های ساده‌ای که بر اساس فرضیات مهندسی خمش خالص یک تیر ساده صورت گرفته بود، استفاده می‌گردید. هیل به منظور توصیف مشخصه های مکانیکی، تئوری پلاستیسیتهٔ غیر همسانگرد را ارائه کرد به نحوی که هر دو پارامتر غیر همسانگرد بودن و سخت شوندگی به منظور بررسی اثرات قابلیت خمش و برگشت پذیری در فرایند شکل‌دهی مد نظر قرار گرفتند[۲]. لئو به ارائهٔ روشی جهت محاسبهٔ برگشت پذیری و قابلیت خمش پلاستیک ورقه‌های فلزی ناهمسانگرد پرداخت[۳]. دن ژوان و همکارانش با استفاده از قانون سخت شوندگی ترکیبی غیر خطی و تابع تسلیم بارلات به پیش بینی برگشت پذیری ورقهای فلزی پرداختند[۴].

در روشهای تحلیلی جهت شبیه سازی فرایند فرضیات ساده شده‌ای بکار می روند که منجر به پیش بینی‌های دقیقی نمی‌گردد. امروزه با توجه به پیشرفتهایی که در تکنیکهای شبیه سازی عددی صورت گرفته است، پیش بینی صحیح برگشت پذیری و طراحی ابزار در حال بهبود و توسعه است. به طور کلی، پدیدهٔ بر گشت پذیری تحت تاثیر ترکیبی از پارامترهایی همچون شکل ابزار و ابعاد آن، تغییرات دمایی، شرایط تماس اصطکاکی و خواص ورق مي‌باشد و همین امر امکان تخمین دقیق مقدار برگشت پذیری را توسط این روشها دشوار می‌سازد. با توجه به مزایای تکنولوژی محاسبات عددی، فرایند شکل‌دهی ورق‌های فلزی با استفاده از روش المان محدود می‌تواند مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. ناراسیمان و همکارش نشان دادند که تکنیک المان محدود مي‌تواند به طور صحیحی برگشت پذیری ورق‌های فلزی را پیشنهاد کند[۵]. ساموئل با استفاده از روش المان محدود به مطالعهٔ پدیدهٔ برگشت پذیری ورق‌های فلزی از سه آلیاژ آلومینیومی و فولادی در یک فرایند خمشی- کششی به صورت آزمایشگاهی و تحلیل اجزاء محدود پرداخت[۶]. پاپلوکس و همکارانش به شبیه سازی پدیدهٔ برگشت پذیری در فرایند خمشی-کششی U شکل به صورت دو بعدی و با استفاده از روش المان محدود پرداختند. آنها در این تحقیق پارامترهای مؤثر بر روی پدیدهٔ برگشت پذیری همچون نیروی ورقگیر، ضریب اصطکاک و خواص مواد بررسی کردند[۷].گومس و همکارانش نقش مقدار ناهمسانگرد بودن مواد را بر روی تغییرات برگشت پذیری در فولادهای با مقاومت بالا مطالعه کردند. آنها کار خود را بر روی مدلهای مختلف بارلات، هیل و ون مایزز برای قطعاتی با هندسهٔ U شکل انجام دادند و به بحث و مقایسهٔ نتایج خود با مقادیر تجربی پرداختند[۹و ۸]. راجایی و همکارانش اثرات غیر همسانگرد بودن صفحات نورد شده را بر روی میزان برگشت پذیری در فرایند خمشی-کششی فولاد ضد زنگ ۴۱۰ مطالعه کردند[۹].

در تحقیق حاضر، در یک فرایند خمشی-کششی U شکل به بررسی اثر عوامل متعددی همچون ناهمسانگردی صفحه ای ورق، ضخامت ورق، نیروی ورقگیر، ضریب اصطکاک و جنس ورق بر روی پدیدهٔ برگشت پذیری پرداخته شده است. بررسی ها به دو صورت آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی صورت گرفته است. مطالعات آزمایشگاهی با ساخت یک قالب خمشی-کششی U شکل و انجام فرایند بر روی سه آلیاژ از آلومینیوم و فولاد که به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف از جمله خودرو و هوا-فضا کاربرد دارند، انجام شده است. در شبیه سازی عددی نیز که توسط روش المان محدود و به صورت سه بعدی توسط نرم افزار Ansys10 انجام شده است، علاوه بر بررسی موارد گفته شده، اثرات برخی از این عوامل بر روی نحوهٔ توزیع کرنش پلاستیک در طول قطعه مطالعه

گردیده است. همچنین اثرات نوع سخت شوندگی ایزوتروپیک وسینماتیک و شعاعهای راکورد سمبه و ماتریس در شبیه سازی عددی فرایند شکل دهی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. از عواملی که تاکنون کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته است بررسي اثرات ميزان ناهمسانگردي صفحه‌اي نمونه‌ها و بررسي اثر جهت برش نمونه‌ها نسبت به جهت نورد ورق مي‌باشد كه به دو صورت آزمايشگاهي و عددي به طور جامع در اين تحقيق مورد مطالعه قرار گرفتند. به علاوه، با استفاده از نمودارهاي توزيع كرنش پلاستيك در طول نمونه‌ها به توجيه اثرات پارامترهاي مختلف بر روي ميزان برگشت پذيري توجه شده است كه مي‌تواند دليل قانع كننده‌اي در بررسي روند برخي پديده‌ها معرفي گردد. مقايسه انجام شده بين نتايج بدست آمده از شبيه سازی با نتايج كار آزمايشگاهی نشان دهندة تطابق خوب اين دو روش در تجزيه وتحليل اين فرايند مي باشد.

۲- خواص مواد و روش آزمایش

آزمايشها به گونه اي طراحي شدند تا بتوان عواملی همچون جنس ورق، ضخامت ورق، نيروي ورقگير و ضريب اصطكاك را برروي پديده برگشت پذيري بررسي كرد. جنس ورقهاي استفاده شده از آلياژهاي آلومينيم و فولاد مي‌باشند كه در ضخامتهاي ۰/۷، ۱/۲، ۱/۵و۲ ميليمتر تهيه شدند و سپس توسط دستگاه گيوتيني در سه راستاي ۰، ۴۵و ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد ورقهاي فلزي با اندازة ۱in *۹in (۲۲۸/۶^{mm}*۲۵/۴^{mm}) بريده شدند. در شكل (۱) نمايی از قالب ساخته شده جهت مطالعة فرايند آورده شده است. شعاع سمبه و ماتريس اين قالب به ترتيب ۸ ميلی متر و ۱۰ ميلی متر مي‌باشند. كورس قالب نيز ۳۳ ميلی متر در نظر گرفته شده است. برای انجام فرايند توسط اين قالب از يک پرس هيدروليكی دارای جک از زير استفاده شد. تناژ جک بالای اين پرس ۴۰ تن و جک زير آن ۱۰ تن می‌باشد.

در اين قالب سمبه در كفشک پايين به طور ثابت قرار داده شده است. در ابتدای فرايند، اپراتور ورق را بر روی سمبه قرار مي‌دهد. سپس با شروع فرايند، ماتريس متصل به جک بالا به سمت ورق مي‌آيد و آن را با نيرويی ثابت به سمت پايين فشار مي‌دهد. از طرف ديگر ورقگير نيز بوسيلة پينهايی كه از داخل كفشک پايين مي‌گذرد به جک زير متصل شده است و توسط آن نيرويی ثابت به سمت بالا به ورق اعمال مي‌كند. به علت بالاتر بودن نيروی جک بالا نسبت به جک زير، ماتريس موجب پايين آمدن ورقگير مي‌شود كه اين موجب خم شدن قطعه مي‌گردد. پس از اتمام كورس، با بالا رفتن جک بالا، ورقگير نيز به سمت بالا مي‌آيد و قطعة شكل داده شده را نيز با خود بالا مي‌آورد. با بيرون آمدن قطعه از داخل قالب، كرنشهای الاستيک موجود سبب پديدة برگشت پذيری مي‌شوند. به منظور محاسبة دقيق زوايای انحناء ديوارة جانبی θ_1 و برگشت پذيری لبه‌ها θ_2 مطابق شكل (۲) از يک كاغذ شطرنجی استفاده شده است. در شكل (۳) سه نمونة مختلف از ورقهای شكل داده شده نشان داده شده است. منحنی تنش- كرنش حقيقی از آزمايش كشش انجام شده بر اساس استاندارد $ASTM-E8M$ برای اين سه آلياژ به دست آمده است، شكل (۴).

اكثر ورقهاي فلزي مورد استفاده در صنعت به منظور ايجاد خواص مكانيكي، تحت نورد قرار مي‌گيرند. ورقهاي فلزي نورد شده داراي خواص مكانيكي يكسان در جهات مختلف نمي باشند در نتيجه بايد آنها را ورقهاي

ناهمسانگرد دانست. مطالعات صورت گرفته توسط محققین نشان داده است که فرض رفتار همسانگرد برای ورقهای فلزی جهت پیش بینی کرانه های بالا و پایین میزان برگشت پذیری، مناسب نیست[۶]. بنابراین، علاوه بر تعریف خواصي همچون مدولهاي يانگ، مدولهاي برشي و همچنين ناحية غير خطی منحنی تنش و کرنش براي هر نمونه بايد ميزان ناهمسانگردی صفحه‌اي ورقها را نيز مشخص کرد. به منظور دستيابي به خواص دقيق ورقهاي مورد آزمايش جهت شبيه سازي فرايند، برروي هر ورق در جهات مختلف برش آن نسبت به راستاي نورد، آزمايش کشش براساس استاندارد ASTM-E8M صورت گرفت. شکل (۵) نمودار تنش- کرنش آلیاژ St37 را در سه راستای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد نشان می‌دهد. با توجه به ناهمسانگرد بودن نمونه‌های مورد آزمایش که تحت عملیات نورد قرار گرفته‌اند، باید سه مدول الاستیسیتهٔ E و سه مدول برشی G جهت تعیین رفتار الاستیک نمونه‌ها محاسبه شوند. با توجه به ناهمسانگردی صفحه‌ای ورقها برای هر نمونه طبق رابطهٔ (۱) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} E_2 &= E_3 \\ G_{12} &= G_{13} \end{aligned} \qquad (۱)$$

در هر نمونهٔ آزمایش E_1 مدول الاستیسیته در جهت برش ورق می‌باشد و E_2 مدول الاستیسیتهٔ بدست آمده از آزمایش کشش براي نمونه‌اي است که راستاي آن نود درجه نسبت به راستاي ۱ در صفحه چرخيده باشد. E_3 نیز مدول الاستیسیته در جهت ضخامت می‌باشد. مقادیر مدولهای برشی نیز با فرض نسبت پواسون ۰/۳ برای آلیاژهای فولادی و ۰/۳۳ برای آلیاژ آلومینیومی طبق روابط ذیل محاسبه مي‌گردند[۱۰].

$$G_{12} = \frac{E_0 E_{45}}{E_0(1-\frac{E_{45}}{4E_{90}}) + E_{45}(\frac{\nu}{2}-\frac{1}{4})} \qquad (۲)$$

$$G_{23} = \frac{E}{2(1+\nu)} \qquad (۳)$$

رفتار ناهمسانگرد ورقهاي فلزي تحت زاويه α نسبت به جهت نورد توسط پارامتر r_α که بیانگر نسبت کرنش پلاستيك مي‌باشد، تعيين مي‌گردد. نسبت کرنش پلاستیک پارامتری است که نشانگر توانایی ورق به نازک شدن یا ضخیم شدن در برابر بارهای کششی یا فشاری صفحه‌ای می‌باشد و طبق رابطهٔ (۴) تعریف می‌گردد.

$$r_\alpha = \frac{\varepsilon_w^\rho}{\varepsilon_t^\rho} \qquad (۴)$$

در رابطه بالا ε_w^P و ε_t^P به ترتيب کرنشهاي پلاستيك واقعي در جهات ۲ و۳ می‌باشند (جهات همراستا با پهنا و ضخامت نمونهٔ آزمایش کشش تك محوره که تحت زاویه α نسبت به جهت نورد بریده شده اند). در مورد ورقهاي نازك، اندازه گيري صحيح کرنش پلاستيك در راستاي ضخامت دشوار است، لذا با فرض تراکم ناپذیری ماده از رابطهٔ ذیل استفاده می گردد،

$$\varepsilon_{ii}^{p}=0\rightarrow\varepsilon_{3}^{p}=-\left(\varepsilon_{1}^{p}+\varepsilon_{2}^{p}\right)\ \rightarrow r_{\alpha}=\frac{-\varepsilon_{2}^{p}}{\varepsilon_{1}^{p}+\varepsilon_{2}^{p}} \quad (۵)$$

مقادیر $\varepsilon_{w}^{p},\varepsilon_{l}^{p}$ (کرنشهای پلاستیک عرضی و طولی) مطابق با استاندارد ASTM:E-517-81 که حاوي روش اندازه گيري مقدار نسبت كرنش پلاستيك، براي ورقهاي فلزي است، محاسبه شدند. با داشتن این مقادیر میزان نسبت کرنش پلاستیک و ناهمسانگردی ورق‌ها محاسبه می گردد. طبق رابطة (۶) می‌توان مقدار نرمال ناهمسانگردی ورق‌ها را با استفاده از نسبتهای کرنش پلاستیک محاسبه کرد،

$$r=\frac{r_{0}+2r_{45}+r_{90}}{4} \quad (۶)$$

۳- شبیه سازی عددی

امروزه از روش المان محدود به عنوان یک ابزار قدرتمند در تجزیه و تحلیل فرایندهای شکل‌دهی و پدیده برگشت پذیری به طور گسترده‌ای استفاده می‌گردد. در بررسی برگشت پذیری توسط روش المان محدود عوامل عددی زیادی همچون تعداد نقاط انتگرال‌گیری در ضخامت ورق، نوع المان، مش بندی، شرایط مرزی، الگوریتم تماس و نوع حلگر نقش تعیین کننده‌ای دارند. علاوه بر این، بسیاری از عوامل فیزیکی مانند خواص مواد، ضریب اصطکاک، نیروی ورقگیر، هندسة قالب و چگونگی بارگذاری و باربرداری نیز بر روی شبیه‌سازی این پدیده نقش بسزایی دارند. وابستگی پدیده برگشت پذیری به پارامترهای گفته شده، شبیه سازی آن را دشوار و پیچیده کرده است.

در این تحقیق شبیه سازی فرایند خمشی- کششی U شکل توسط نرم افزار Ansys10 انجام شده است. با توجه به سه بعدی بودن شبیه سازی و رفتار ناهمسانگرد و غیر خطی نمونه‌های آزمایشی و همچنین وجود کرنش های بزرگ پلاستیک، جزء Solid185 انتخاب گردید. به منظور شبیه سازی رفتار ناهمسانگرد مواد نیز از تئوری هیل به دلیل سادگی آن به طور گسترده‌ای در روش المان محدود استفاده می‌گردد. در کد المان محدود بکار رفته جهت مدلسازی رفتار ورقهای فلزی نیز از این معادله استفاده شده است. لذا، برای تعریف خواص مواد در مدل اجزاء محدود باید با توجه به ناهمسانگردی هر نمونه علاوه بر تعریف خواص ناحیة الاستیک و پلاستیک، ثابتهای معادله هیل نیز تعیین گردند. چنانچه هر المان از ورق تنها در معرض تنشهاي صفحه اي xy باشد به طوري كه محور x در جهت نورد، محور y در جهت عرض ورق و z عمود بر آن باشد، معيار تسليم هيل به صورت رابطة ذيل در مي‌آيد،

$$(G+H)\sigma_{x}^{2}-2H\sigma_{x}\sigma_{y}+(H+F)\sigma_{y}^{2}+2N\tau_{xy}^{2}=1 \quad (۷)$$

در رابطة بالا N ,M ,L ,H ,G ,F پارامترهايي هستند كه حالت جاري ناهمسانگردي را بيان مي‌كنند. به منظور اطمینان از همگرایی تحلیل، علاوه بر ایجاد المان هایی منظم و مکعبی، باید گره های هر المان در موقعیت تماس بر روی هم یا نزدیک به هم قرار گیرند. لازم به ذکر است که اگر وجوه المانها به صورت مستطیلی یا نوار

باریک باشند به طوری که نسبت طول به عرض المان به هم نزدیک نباشد، مسأله در مراحل اولیهٔ حل واگرا می‌گردد. به منظور مدلسازی فرایند تماس از روش سطح با سطح استفاده شد.
در شبیه سازی فرایند مورد مطالعه، سطوح قالب -که شامل سمبه، ماتریس و ورقگیر می باشند- به صورت صلب و ورق به صورت انعطاف پذیر در نظر گرفته شده‌اند. لذا با توجه به سه بعدی بودن شبیه سازی، سطوح صلب با جزء هدف Targe170 و سطوح انعطاف پذیر با جزء تماس Canta174 مدل گردیدند. شکل (۶) نحوه مش بندی مدل و سطوح در حال تماس را نشان می‌دهد. شکل (۷) نیز نشان دهندهٔ اثر تعداد اجزاء بر روی میزان برگشت پذیری می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده از مش بندي‌های مختلف مدل و همچنین در نظر گرفتن زمان تحلیل هر مش بندی، از تعداد ۸۱۲ جزء برای مش بندی نمونهٔ آلومنیومی ۲ میلی متری استفاده شد. نظر به شبه استاتیکی بودن فرایند، حلگر استاتیکی ضمنی برای تحلیل مسأله بکار گرفته شد. به منظور مدلسازی فرایند تماس و رفتار اصطکاکی بین سطوح نیز از الگوریتم لاگرانژی و قانون اصطکاکی کولمب استفاده گردید.

۴- نتایج و بحث

به منظور بررسی نحوهٔ تأثیر هر گونه عاملی بر روی پدیدهٔ برگشت پذیری باید اطلاعات صحیحی از چگونگی توزیع کرنشهای پلاستیک در قطعه کار پس از فرایند باربرداری داشت. براین اساس قبل از بررسی مستقیم اثرات نیروی ورقگیر، ضریب اصطکاک و ضخامت ورق‌ها بر روی پدیدهٔ برگشت پذیری به مطالعهٔ اثرات این عوامل بر روی توزیع کرنشهای پلاستیک در قطعه کار پس از فرایند باربرداری پرداخته می شود. شکل (۸) نحوهٔ توزیع کرنشهای پلاستیک را در مقادیر مختلف نیروهای ورقگیر، برای آلیاژ Al6061 در طول قطعه کار نشان می‌دهد. شکل‌های (۹) تا (۱۲) به ترتیب بیانگر توزیع کرنش پلاستیک برای آلیاژ Al6061 در مقادیر مختلف ضریب اصطکاک، ضخامت، شعاع راکورد ماتریس و شعاع راکورد سمبه می‌باشند. در شکل (۱۳) نیز به بررسی تأثیر جهت برش ورق بر روی نحوهٔ توزیع کرنش پلاستیک در طول قطعه کار برای آلیاژ St37 پرداخته شده است.
همانطور که از شکل‌های (۸) تا (۱۳) پیداست با افزایش میزان نیروی ورقگیر، ضریب اصطکاک، ضخامت ورق و شعاع راکورد ماتریس و کاهش شعاع راکورد سمبه و زاویهٔ برش ورق نسبت به جهت نورد به مقدار کرنشهای پلاستیک افزوده می‌گردد.
چنانکه ذکر گردید، پدیدهٔ برگشت پذیری ناشی از حذف بخش الاستیک کرنشهای قطعه کار پس از فرایند باربرداری می‌باشد. بنابراین با توجه به مطالعه‌ای که بر روی اثر عوامل مختلف در چگونگی توزیع کرنشهای پلاستیک در قطعه کار شده است می‌توان دلایل قانع کننده‌ای را در چگونگی تأثیر این عوامل بر روی پدیدهٔ برگشت پذیری ارائه کرد. شکل‌های (۱۵) و (۱۶) به ترتیب تأثیر ضخامت ورقهای فلزی را بر روی میزان زوایای برگشت پذیری برای دو آلیاژ St13 و Al6061 به دو صورت آزمایشگاهی و تحلیل عددی نشان می‌دهند. نتایج بدست آمده نشان دهندهٔ رابطهٔ معکوس ضخامت ورقهای فلزی با پدیدهٔ برگشت پذیری می باشدکه علت آن را می‌توان در تشکیل یک ناحیهٔ پلاستیک وسیعتر بازای یک تغییر شکل معین دانست، شکل (۱۰) . شکل‌های (۱۷،۱۸و۱۹) به ترتیب نحوهٔ تغییرات برگشت پذیری را در مقادیر مختلف نیروی ورقگیر برای سه آلیاژ St13،

St37 و Al6061 نشان می‌دهند. از این نمودارها پیداست که با افزایش نیروی ورقگیر از میـزان برگشـت پـذیری کاسته می‌گردد که این امر را می‌توان به افزایش کرنش‌های پسماند یا پلاستیک در قطعه کار نسـبت داد، شـکل (۸). در فرایند مورد مطالعه، دیواره‌های جانبی قطعه U شکل تحت ترکیبی از بارگذاریهای مختلف می‌باشـند. در این جا، توزیع تنش در دیوارهٔ نزدیک به قالب به صورت تنش کششی و در دیوارهٔ نزدیک به پانچ به صورت تـنش فشاری است و این توزیع غیر یکنواخت تنش موجب بروز پدیدهٔ انحنا دیوارهٔ جانبی می‌گردد. بـا افـزایش نیـروی ورقگیر، توزیع تنش در سرتاسر ضخامت دیوارهٔ جانبی به سمت کشش میل می‌کند که نتیجهٔ آن کاهش انحـراف شکل قطعه می‌باشد. به منظور بررسی اثر ضریب اصطکاک به صـورت آزمایشـگاهی فراینـد شـکل دهـی بـر روی چندین ورقهٔ خشک و آغشته به روغن انجام گردید. در تحلیل عددی انجام گرفته نیز جهت مطالعهٔ نقش ضـریب اصطکاک بین سطوح ورق و قالب علاوه بر شبیه سازی آزمایشهای انجام شده، با درنظـر گـرفتن چنـدین ضـریب اصطکاک به مطالعهٔ دقیقتر تأثیر ضریب اصطکاک بر روی پدیدهٔ برگشت پذیری پرداخته شد. در این‌جا به عنـوان نمونه و به منظور درک بهتر نحوهٔ تأثیر عوامل مورد بررسی بر روی شکل نهایی قطعه کـار، تصـویری از محصـول نهایی برای دو ضریب اصطکاک مختلف نشان داده شده است، شکل (۲۰). شکل‌های (۲۱) تا (۲۴) نشـان دهنـدهٔ نتایج مطالعات انجام شده به منظور بررسی اثر ضریب اصطکاک بر روی پدیدهٔ برگشت پذیری برای سه آلیاژ مورد مطالعه می‌باشد.

همانطور که از شکلها پیداست با افزایش ضریب اصطکاک بین سطوح از میزان زوایای برگشت پذیری کاسته می-شود. دلیل این امر را می‌توان تشکیل یک منطقهٔ پلاستیک وسیعتر قبل از فرایند باربرداری دانسـت، شـکل (۹) . به منظور بررسی اثر ناهمسانگردی ورق‌ها بر روی میزان برگشت پذیری نیـز مطالعـاتی بـه صـورت آزمایشـگاهی وتحلیلی انجام شده است. با توجه به متفاوت بودن جنس آلیاژهای مـورد بررسـی و همچنـین جهـت بـرش آنهـا نسبت به راستای نورد، میزان ناهمسانگردی آنها نیز یکسان نخواهد بود. شـکل (۲۵) نشـان دهنـدهٔ نحـوهٔ تـأثیر ناهمسانگردی صفحه ای ورقهای بریده شده در راستای صفر درجه بر روی زوایای برگشـت پـذیری اسـت. شـکل (۲۶) نیز چگونگی تغییرات زوایای برگشت پذیری را در مقادیر مختلف ناهمسـانگردی صـفحه‌ای ورقهـای بریـده شده در راستای ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد، نشان می‌دهد. همانطور که از نمودارها پیداست با افزایش میـزان ناهمسانگردی ورقها به میزان برگشت پذیری نیز افزوده می‌شود، که این نکته با توجه بـه شـکل (۱۴) کـه نشـان دهندهٔ کاهش کرنش پلاستیک مؤثر با افزایش میزان ناهمسانگردی ورقها و در نتیجه کاهش منطقهٔ پلاسـتیک و کاهش نسبت کرنشهای پلاستیک به کرنشهای الاستیک می‌باشد، قابل درک است.

برای بررسی اثر جهت برش ورق بر روی زوایای برگشت پذیری، نمونه‌ها در سـه راسـتای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجـه نسبت به جهت نوردشان بریده شدند و سپس مورد آزمایش قرار گرفتند. در مطالعهٔ ایـن عامـل در شـبیه سـازی عددی نیز میزان ناهمسانگردی هر نمونه با توجه به جهت برش آن نسبت به جهت نـورد، در کـد اجـزاء محـدود تعریف گشت. به منظور بررسی نقش نیروی ورقگیر، بررسی‌ها ی انجـام شـده در مقـادیر پـایین و بـالای نیـروی ورقگیر صورت گرفته است. شکل‌های (۲۷و۲۸) و (۲۹و۳۰) به ترتیـب بیـانگر اثـرات جهـات بـرش ورق بـر روی پدیدهٔ برگشت پذیری در ورقهای آلومینیومی برای نیروهای ورقگیر ۵ و ۱۲ کیلو نیوتن به صورت آزمایشـگاهی و

تحلیل عددی می‌باشند. نتایج مطالعات بعمل آمده حاکی از تفاوت در نحوهٔ تغییرات برگشت پذیری در مقادیر نیروهای بالا و پایین ورقگیر می‌باشد. در مقادیر نیروی پایین ورقگیر با افزایش زاویهٔ برش تا مقدار ۴۵ درجه از میزان برگشت پذیری کاسته می‌شودوسپس از زاویهٔ ۴۵درجه تا۹۰درجه به مقدارآن افزوده می‌گردد. این درحالی است که برای مقادیر نیروهای بیشتر ورقگیر با افزایش زاویهٔ برش به میزان برگشت پذیری نیز افزوده می‌گردد.

شکل‌های (۳۱) و (۳۲) نیز نشان دهندهٔ تغییرات برگشت پذیری در جهات مختلف برش ورق برای ورقهای St۱۳ می‌باشند. نتایج یافته های بدست آمده نشان می‌دهند که با توجه به میزان تأثیر عوامل ناهمسانگردی و تنش تسلیم که متأثر از تغییر زوایای برش ورق می‌باشند، می‌توان به تحلیل اثر جهت برش ورق های فلزی بر روی پدیدهٔ برگشت پذیری پرداخت که در این میان نقش نیروی ورقگیر نیز کاملاً قابل توجه است. لازم به ذکر است که در این مطالعات ضخامت ورق آلومینیومی ۲ میلی متر و ضخامت ورق St۱۳ ، ۱/۵ میلی متر می‌باشد و نیروی بالای ورقگیر بکاررفته برای آن برابر ۱۱/۵ کیلو نیوتن در نظر گرفته شد.

به طور خلاصه افزایش زوایای برگشت پذیری با افزایش زاویهٔ برش ورق نسبت به جهت نورد را می‌توان به در کاهش میزان کرنشهای پلاستیک در طول قطعه کار نسبت داد، شکل (۱۳) .

بررسی اثرات شعاع سمبه و ماتریس بر روی پدیدهٔ برگشت پذیری نیز در اینجا می تواند مورد مطالعه قرار گیرد. شکل (۳۳) نشان دهندهٔ اثر شعاع راکورد ماتریس و شکل (۳۴) نیز نشان دهندهٔ اثر شعاع راکورد سمبه بر روی زوایای برگشت پذیری می‌باشند. همانطور که از شکلها پیداست با افزایش شعاع راکورد ماتریس از میزان این زوایا کاسته و با افزایش شعاع راکورد سمبه به اندازهٔ آنها افزوده می‌شود که با توجه به شکلهای (۱۱و۱۲) و توضیحات گفته شده در مورد چگونگی ارتباط میان نحوهٔ توزیع کرنشها و میزان برگشت پذیری کاملا توجیه پذیر است.

در سالهای اخیر با توجه به نیاز روزافزون استفاده از آلیاژهای آلومینیوم و فولادهای با مقاومت بالا (که دارای نسبتهای تنش تسلیم به مدول الاستیسیتهٔ زیادی هستند) به جای فولادهای سنتی، پیش بینی صحیح برگشت پذیری ورق ها به منظور طراحی دقیق قالب بیشتر از گذشته مورد توجه قرار دارد. در این تحقیق نیز به منظور مطالعهٔ جنس ورقهای فلزی، به بررسی اثر نسبت تنش تسلیم به مدول الاستیسیتهٔ آنها بر روی پدیدهٔ برگشت پذیری پرداخته شده است. شکل (۳۵) تغییرات میزان برگشت پذیری را در نسبتهای مختلف تنش تسلیم به مدول الاستیسیته نشان می‌دهد. از این نمودار پیداست که با افزایش نسبت تنش تسلیم به مدول الاستیسیته به میزان برگشت پذیری افزوده می‌گردد. در ذکر علت این پدیده چنین می‌توان گفت که با افزایش میزان تنش تسلیم یک نمونه با مدول الاستیسیتهٔ ثابت و بازای یک تغییر شکل مشخص و کرنش معلوم، تنشهای ماده دیرتر وارد ناحیهٔ پلاستیک می‌شوند و نسبت کرنشهای پلاستیک به کرنشهای الاستیک کاهش می‌یابد، لذا افزایش نسبت تنش تسلیم به مدول الاستیسیته موجب افزایش میزان برگشت پذیری می‌گردد.

در فرایند خم U شکل، ورقهای فلزی در معرض تاریخچه ای از تغییرشکلهای پیچیده همچون بارگذاری خمشی-کششی و باربرداری خمشی و خمش معکوس قرار می‌گیرند. به بیان دیگر پیش بینی صحیح برگشت پذیری ورقها بوسیلهٔ روش اجزاء محدود به شدت وابسته به نوع قوانین سخت شوندگی حاکم بر ماده می‌باشد. در

تحقیق جاری به منظور بررسی اثر نوع سخت شوندگی بر روی پدیدة برگشت پذیری ورق دو قانون سخت شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک غیرخطی مورد مطالعه قرار گرفتند. در مورد هر نمونه نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشهای انجام شده مقایسه گردیدند. جداول (۱) و (۲) نشان دهندة اثرات نوع سخت شوندگی مورد استفاده قرار گرفته بر روی برگشت پذیری ورقهای آلومینیومی در فرایند مورد مطالعه می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود مدل سخت شوندگی سینماتیکی به نحو بهتری می‌تواند میزان زوایای برگشت پذیری را پیش بینی نماید. در اینجا لازم به ذکر است که مدل سخت شوندگی سینماتیکی به علت در نظر گرفتن اثر باشینگر در فرآیند هایی که برخی اجزا دچار باربرداری محلی می گردند کاراتر از سخت شوندگی ایزوتروپیک عمل می کند. در تحقیق حاضر نیز به دلیل وجود توام اثر خمش و کشش در فرآیند، در برخی اجزا اثر یکی بر دیگری غلبه کرده و سبب باربرداری از جزء می گردد که علت نتایج دقیقتر این نوع سخت شوندگی را توضیح می دهد.

مقایسه منحنی‌های رسم شده حاکی از تطابق خوبی بین نتایج کار آزمایشگاهی و تحلیل عددی می‌باشد. بررسی ها نشان می دهند که نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی در کلیة موارد حدود ۵ تا ۸ درصد اختلاف دارد که با توجه به بستگی شبیه‌سازی عددی صورت گرفته به نوع المان بکاررفته، مش بندی و نوع حلگر قابل قبول می باشد. بعلاوه نتایج بدست آمده با یافته‌های مراجع[۳،۶، ۹و۱۱] همخوانی مناسبی دارند.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق در یک فرایند خمشی-کششی U شکل به بررسی اثر عوامل ضخامت ورق، نیروی ورقگیر، ضریب اصطکاک، ناهمسانگردی صفحه‌ای ورق، شعاع راکورد سمبه و ماتریس، جهت برش ورق نسبت به جهت نورد، نوع مدل سخت شوندگی و جنس ورق بر روی پدیدة برگشت پذیری پرداخته شده است. مطالعات وبررسی‌ها به دو صورت آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی صورت گرفته است. شبیه سازی این فرایند بر روی سه جنس مختلف از آلیاژهای آلومینیومی و فولادی و توسط روش المان محدود و با استفاده از نرم افزار Ansys 10 به صورت سه بعدی انجام گرفت. به علاوه با ساخت یک قالب خمشی-کششی U شکل، مطالعة این فرآیند بصورت آزمایشگاهی نیز انجام پذیرفت. در هر آزمایش برای یک جنس با ضخامت معین از نیروهای ورقگیر مختلفی استفاده گردید. در چندین آزمایش نیز از ورقهای آغشته به روغن جهت بررسی نقش ضریب اصطکاک استفاده شد. به علاوه، اثرات میزان ناهمسانگردي صفحه‌اي نمونه‌ها و جهت برش آنها نسبت به جهت نورد نیز به دو صورت آزمایشگاهي و عددي در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفتند.

مقایسة انجام شده بین نتایج بدست آمده از شبیه سازی با نتایج کار آزمایشگاهی نشان دهندة تطابق خوب این دو روش در تجزیه وتحلیل این فرایند مي‌باشد. نتایج مهم بدست آمده در تحقیق جاری را می‌توان در موارد ذکر شدة ذیل خلاصه کرد:

۱. با افزایش میزان ناهمسانگردی نرمال صفحه‌ای ورق، به میزان زوایای برگشت پذیری افزوده می‌شود.

۲. میزان زوایای برگشت پذیری با شعاع راکورد سمبه رابطـهٔ مسـتقیم و بـا شـعاع راکـورد مـاتریس رابطـهٔ معکوس دارند.
۳. نتایج نشان دهندهٔ نقش چشمگیرنیروی ورقگیر در نحوهٔ تأثیر جهت برش ورق بـر روی میـزان برگشـت پذیری می‌باشند. بطوریکه در مقادیر پایین نیروی ورقگیر تفاوت ناچیزی بین زوایای برگشـت پـذیری در جهات مختلف موجود می‌باشد، درحالی که در مقادیر بالای نیروی ورقگیر با افـزایش زاویـهٔ بـرش ورقهـا نسبت به جهت نورد به میزان برگشت پذیری افزوده می‌گردد.
۴. نتایج مطالعات حاکی از قابلیت بهتر مدل سخت شوندگی سـینماتیکی در پـیش بینـی پدیـدهٔ برگشـت پذیری در مورد Al6061 می‌باشد.
۵. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که میزان زوایای برگشت پـذیری بـا نسـبت تـنش تسـلیم بـه مـدول الاستیسیته نسبت مستقیم و با ضخامت ورق، نیروی ورقگیر و ضریب اصطکاک رابطهٔ معکوس دارد.

مراجع

[1] Thanki, S.J., Raval, H.K., and Dave, A.K., "Prediction of the Punch Reversal Position under V-plate Bending using Real Material (power-law) Behavior", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 114, pp. 227–232, (2001).

[2] Hill, R., "A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals", Proc. Roy. Soc. London. Vol. 193, pp. 281–297, (1948).

[3] Leu, D.K., "A Simplified Approach for Evaluating Bendability and Springback in Plastic Bending of Anisotropic Sheet Metal", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 66, pp. 9-17, (1997).

[4] Dongjuan, Z., Zhenshan, C., Xueyu, R., and Yuqiang, L., "An Analytical Model for Predicting Springback and Side Wall Curl of Sheet after U-bending", International Journal of Computational Materials Science, Vol. 38, No. 4, pp. 707-714, (2007).

[5] Narasimhan, N., and Lovell, M.R., "Predicting Springback in Sheet Metal Forming: an Explicit to Implicit Sequential Solution Procedure, Numeric. Meth. Des. Anal. Vol. 33, pp. 29–42, (1999).

[6] Samuel, M., "Experimental and Numerical Prediction of Springback and Side Wall Curl in U-Bendings of Anisotropic Sheet Metals, Journal of Materials Processing Technology", Vol. 105, pp. 382-393, (2000).

[7] Papeleux, L., and Ponthot, J.P., Finite Element Simulation of Springback in Sheet Metal Forming, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 125,126, pp. 785–791, (2002).

[8] Gomes, C., Onipede, O., and Lovell, M., Investigation of Springback in High Strength Anisotropic Steels, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 159, pp. 91–98, (2005).

[9] Ragai, I., Lazim, D., and Nemes, J., Anisotropy and Springback in Draw-bending of Stainless Steel 410: Experimental and Numerical Study, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 166, pp. 116–127, (2005).

[10] Berthelot, J.M., *"Composite Materials, Mechanical Behaviour and Structural Analysis"*, Springer, NewYork, (1999).

[11] Firat, M., "U-channel Forming Analysis with an Emphasis on Springback Deformation", Journal of Materials and Design, Vol. 28, No. 1, pp. 147-154, (2007).

فهرست علایم انگلیسی

E : مدول الاستیسیته

G : مدول برشی

r : نرمال ناهمسانگردی

فهرست علایم یونانی

ν : ضریب پواسون

ε_w^p : کرنشهاي پلاستيك واقعي در جهت پهنا

ε_t^p : کرنشهاي پلاستيك واقعي در جهت ضخامت

r_α : نسبت کرنش پلاستیک

θ : زاویهٔ برگشت پذیری

جدولها

جدول۱- تأثیر نوع سخت شوندگی بر روی برگشت پذیری

Al6061(90 deg), t = 2 mm, F = 5 KN

	Experiment	**Isotropic hardening**	**Kinematic hardening**
θ_1 (°)	۴/۶۳۵	۳/۸۱	۴/۴۸
θ_2 (°)	۲/۵۶	۲/۰۹	۲/۵۲

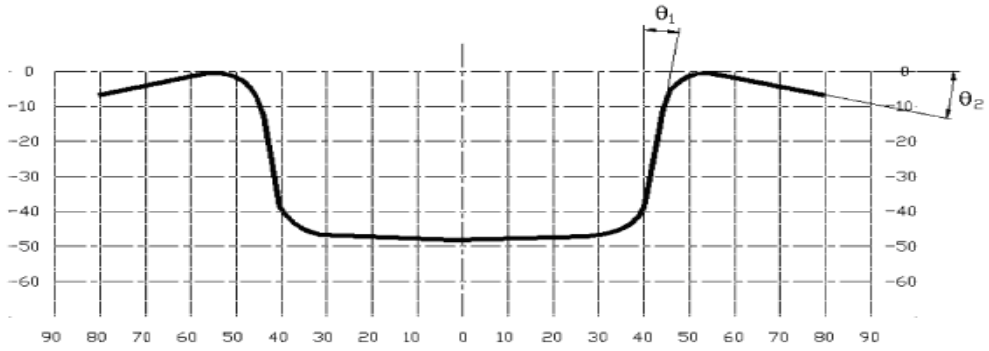
جدول۲- تأثیر نوع سخت شوندگی بر روی برگشت پذیری

Al6061(90 deg), t = 2 mm, F = 3.5KN

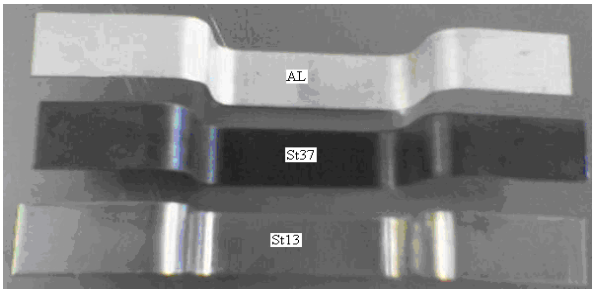
	Experiment	**Isotropic hardening**	**Kinematic hardening**
θ_1 (°)	۶/۳۴	۵/۲	۵/۸۱
θ_2 (°)	۴/۶۳۵	۳/۴	۳/۹۴

شکلها

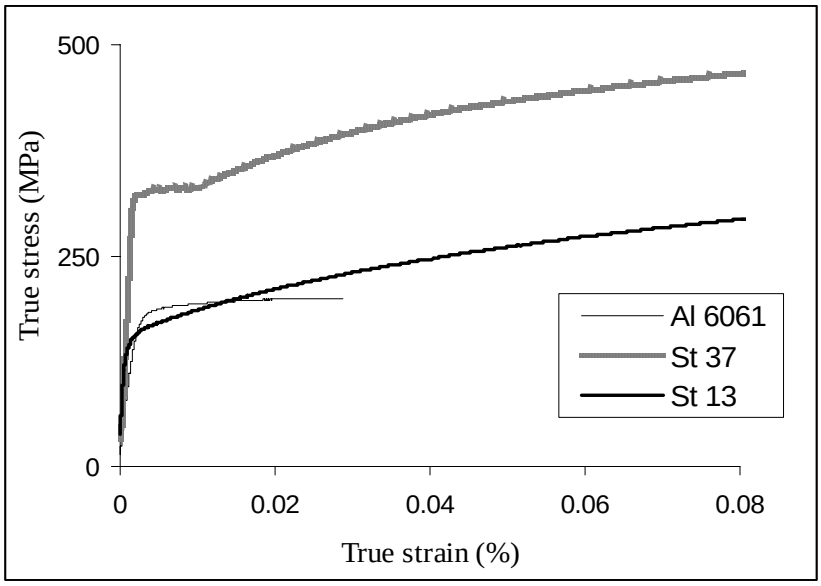
شکل۱- قالب ساخته شده برای انجام فرایند



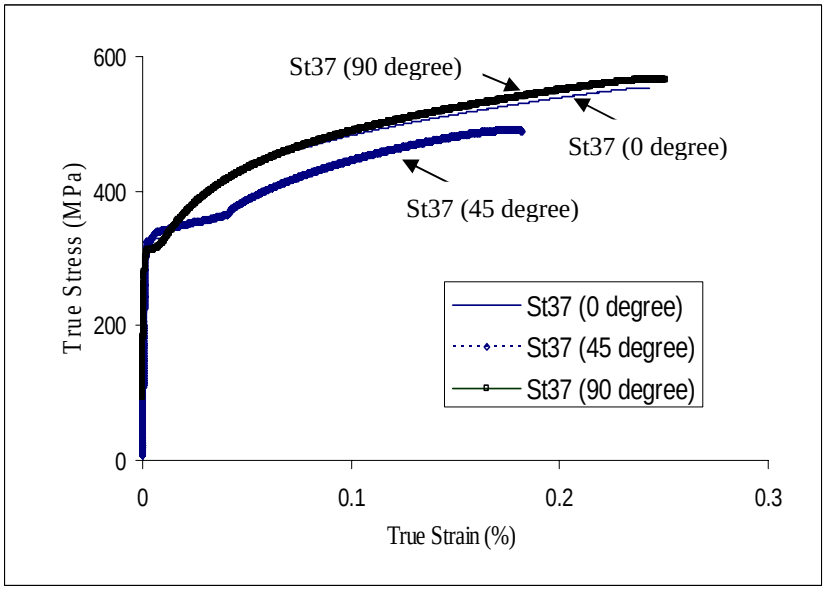
شکل ۲- اندازه‌گیری زوایای برگشت پذیری



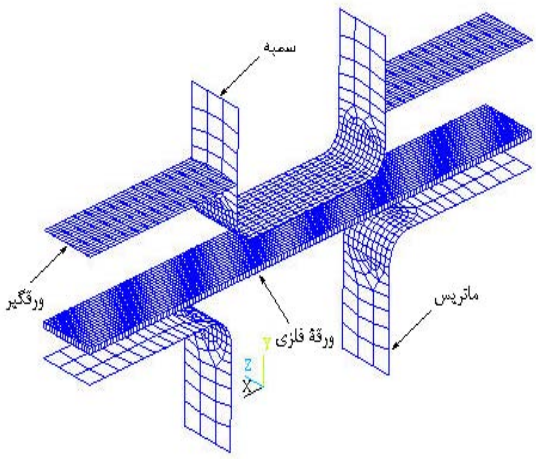
شکل ۳- ورق‌های شکل داده شده



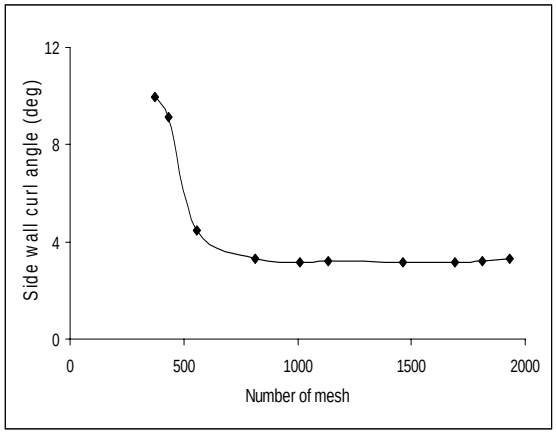
شکل ۴- منحنی تنش- کرنش برای سه آلیاژ مورد مطالعه



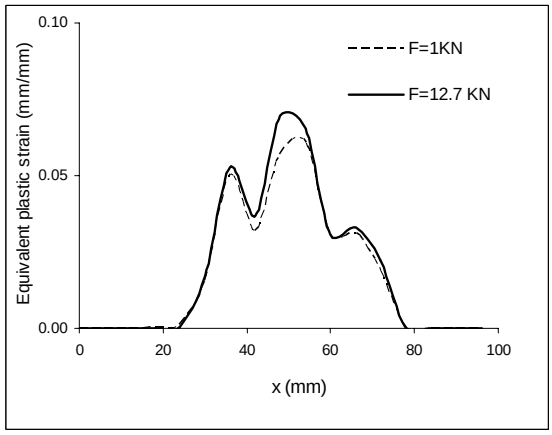
شکل۵- نمودار تنش- کرنش St37 در سه راستا



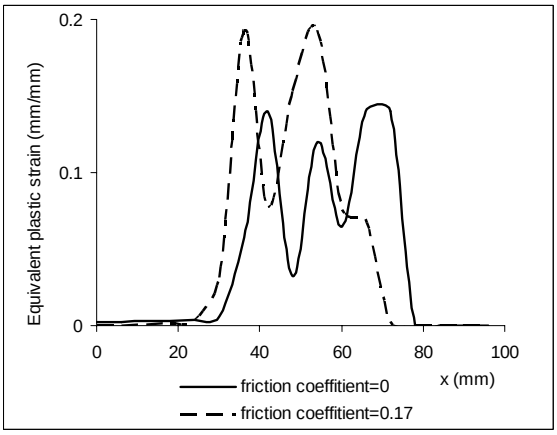
شکل ۶ - هندسة مدل و مش بندی آن



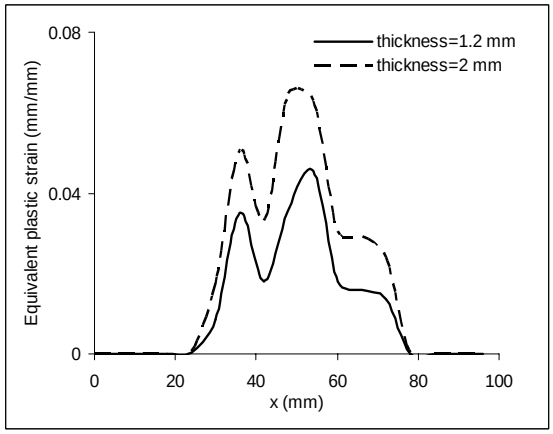
شکل۷- حساسیت مش برای نمونه‌های ۲ میلی‌متری



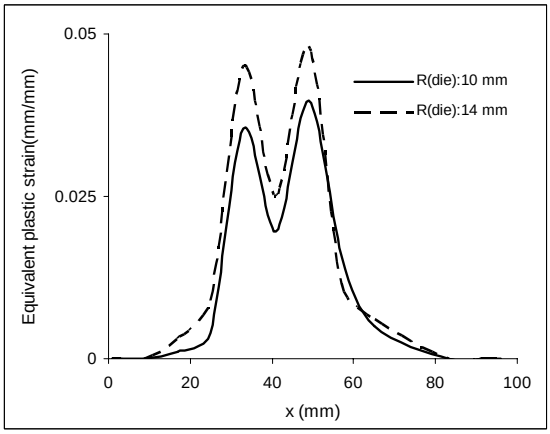
شکل ۸- تأثیر نیروی ورقگیر بر روی توزیع کرنش پلاستیک در راستای طول نمونه



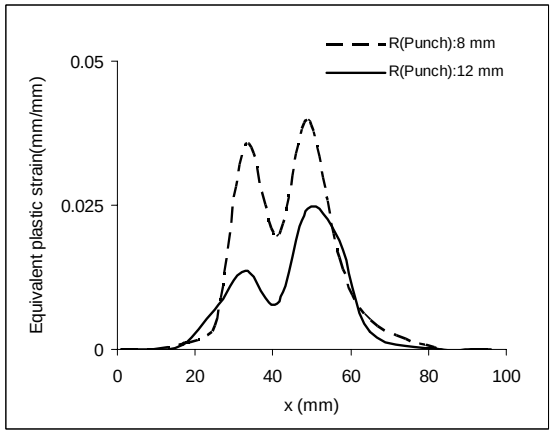
شکل ۹- تأثیر ضریب اصطکاک بر روی توزیع کرنش پلاستیک در راستای طول نمونه



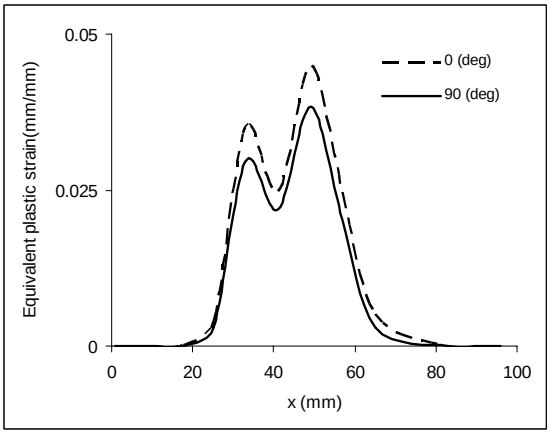
شکل ۱۰- تأثیر ضخامت بر روی توزیع کرنش پلاستیک در راستای طول نمونه



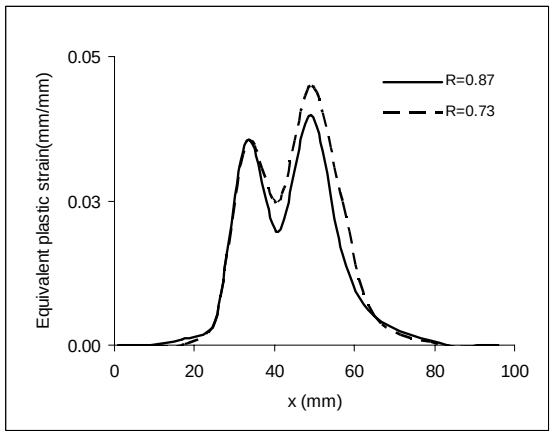
شکل ۱۱- تأثیر شعاع راکورد ماتریس بر روی توزیع کرنش پلاستیک در راستای طول نمونه



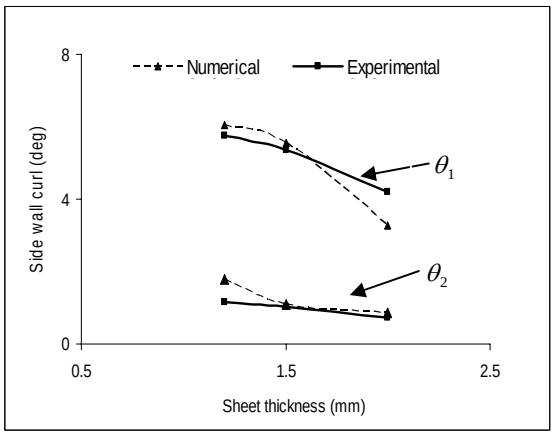
شکل ۱۲- تأثیر شعاع راکورد سمبه بر روی توزیع کرنش پلاستیک در راستای طول نمونه



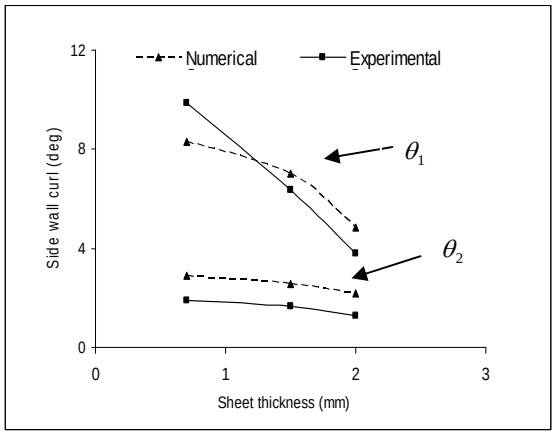
شکل ۱۳- تأثیر جهت برش ورق بر روی توزیع کرنش پلاستیک در راستای طول نمونه



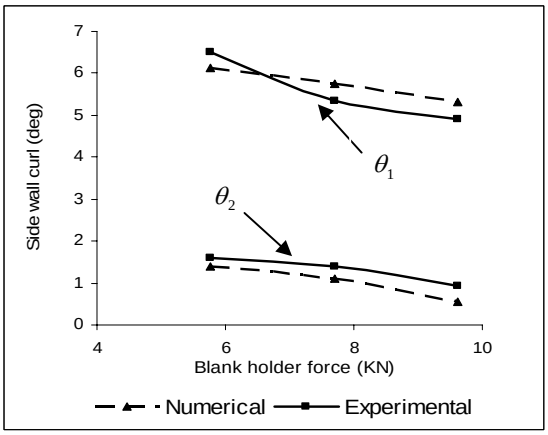
شکل ۱۴- تأثیر ناهمسانگردی ورق بر روی توزیع کرنش پلاستیک در راستای طول نمونه



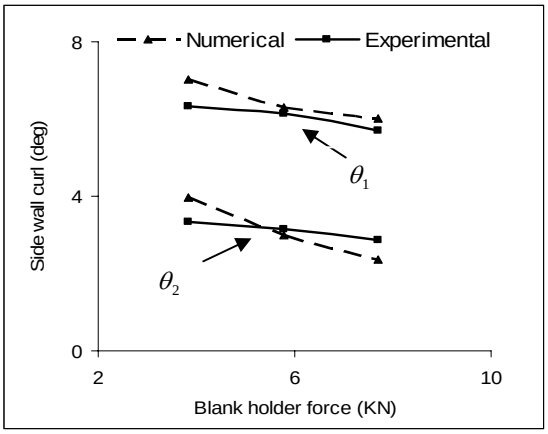
شکل ۱۵- برگشت پذیری در ضخامت ورق St13



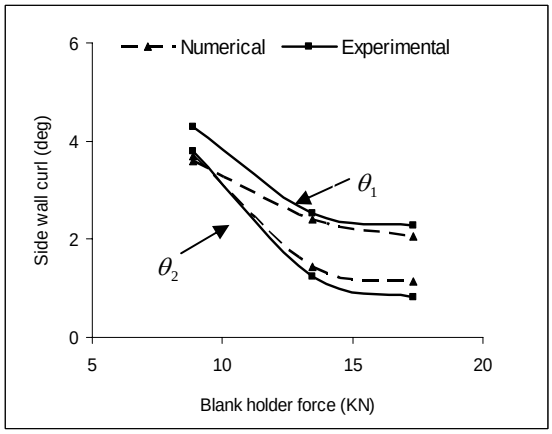
شکل ۱۶- برگشت پذیری در ضخامت ورق Al6061



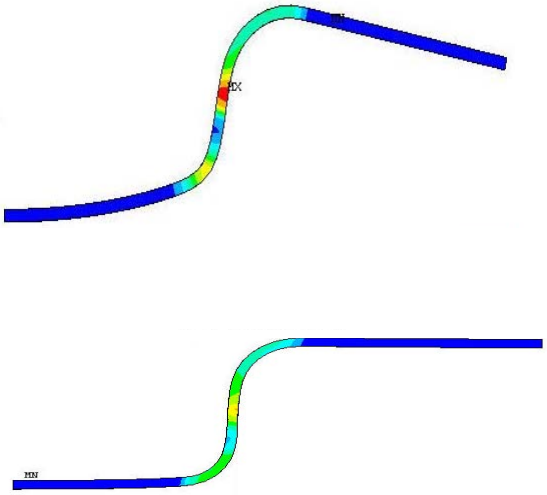
شکل ۱۷- برگشت پذیری در نیروی ورقگیر برایAl6061



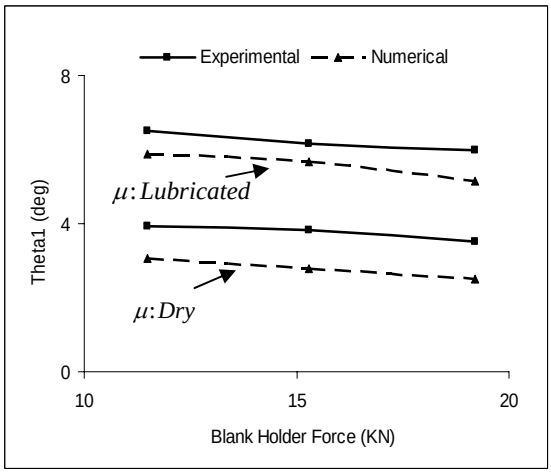
شکل ۱۸- برگشت پذیریSt13 در نیروی ورقگیر



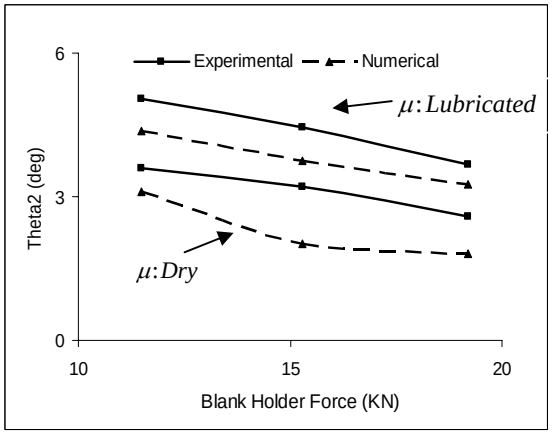
شکل ۱۹- تغییرات برگشت پذیریSt37 با نیروی ورقگیر



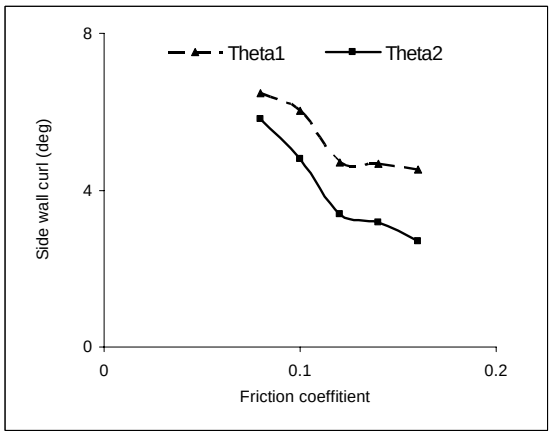
شکل ۲۰- اثر ضریب اصطکاک بر روی شکل قطعه



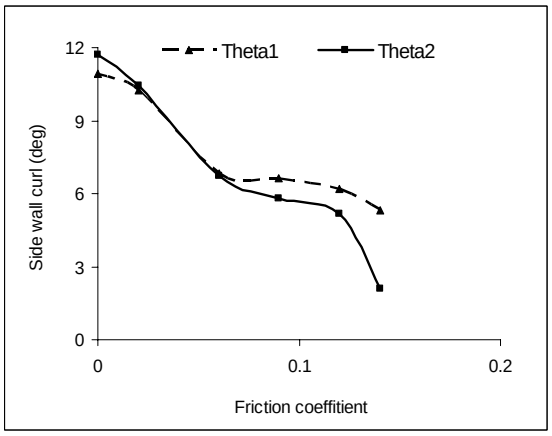
شکل ۲۱- تغییرات منحنی θ_1 با ضریب اصطکاک برای St37



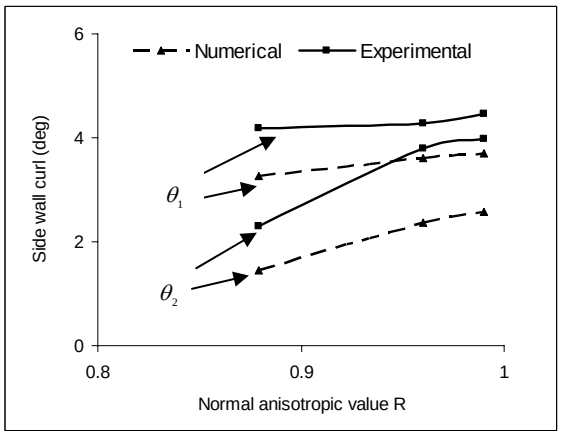
شکل ۲۲- تغییرات θ_2 با ضریب اصطکاک برایSt37



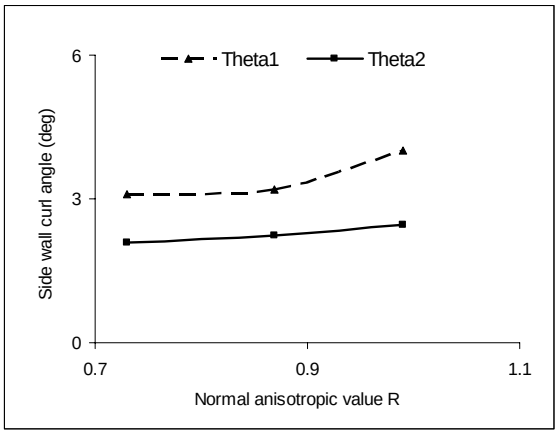
شکل ۲۳- تغییرات برگشت پذیری St13 با ضریب اصطکاک



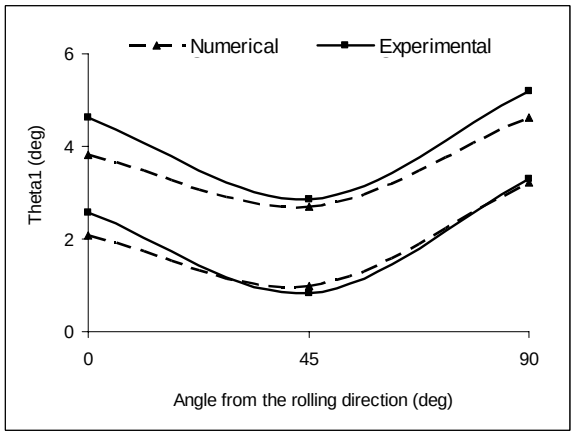
شکل ۲٤- تغییرات برگشت پذیری Al6061 با ضریب اصطکاک



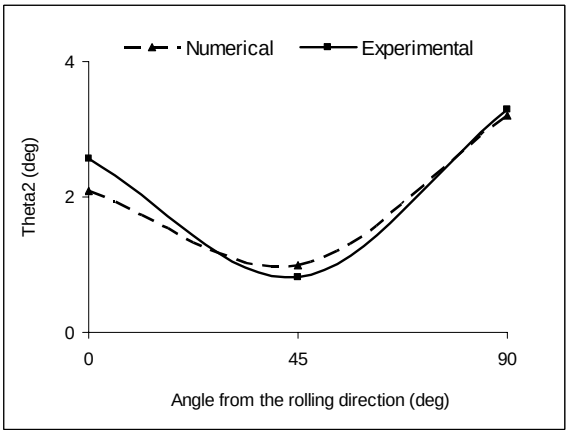
شکل۲۵- تغییرات برگشت پذیری با ناهمسانگردی



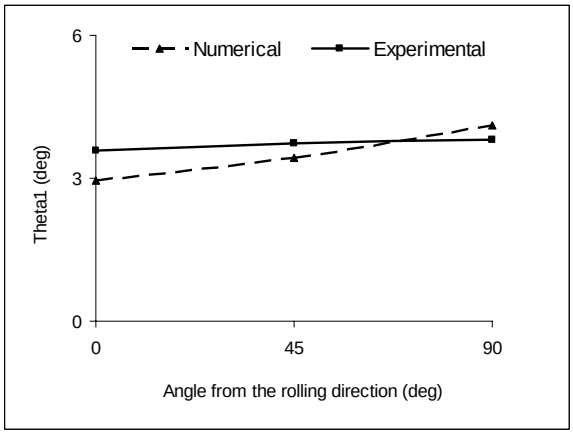
شکل۲۶- تغییرات برگشت پذیری با ناهمسانگردی



شکل۲۷- منحنی θ_1 در زوایای مختلف برش Al6061 (Blank holder force=5KN)

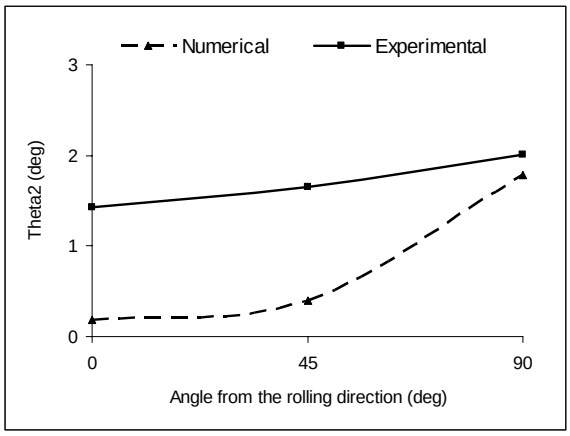


شکل۲۸- منحنی θ_2 در زوایای مختلف برش Al6061



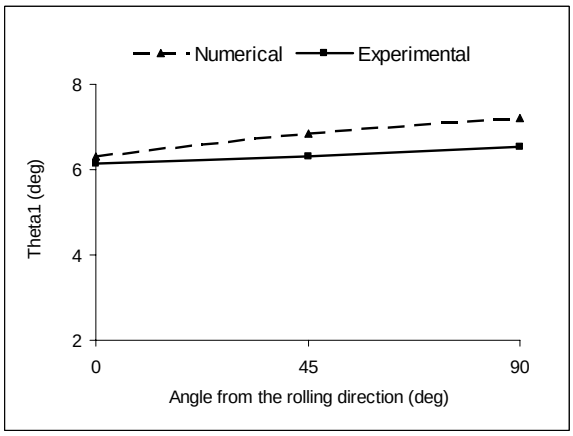
شکل۲۹- منحنی θ_1 در زوایای مختلف برش Al6061

(Blank holder force = 12 KN)



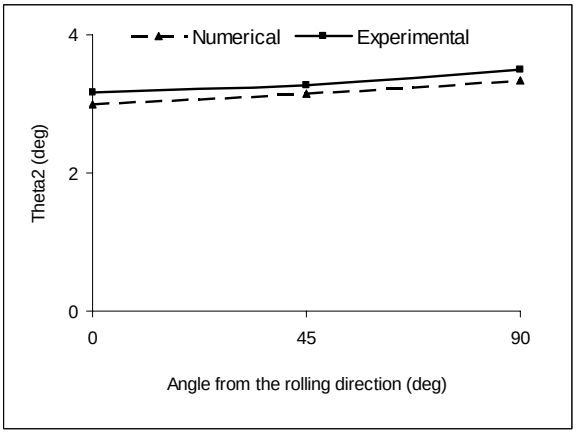
شکل۳۰- منحنی θ_2 در زوایای مختلف برش Al6061

(Blank holder force = 5 KN)

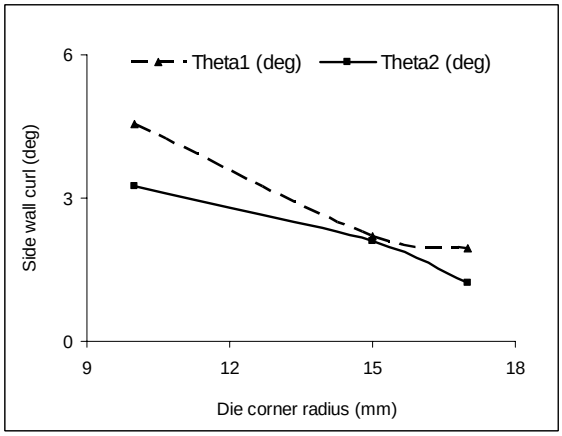


شکل۳۱- منحنی θ_1 در زوایای مختلف برش St13

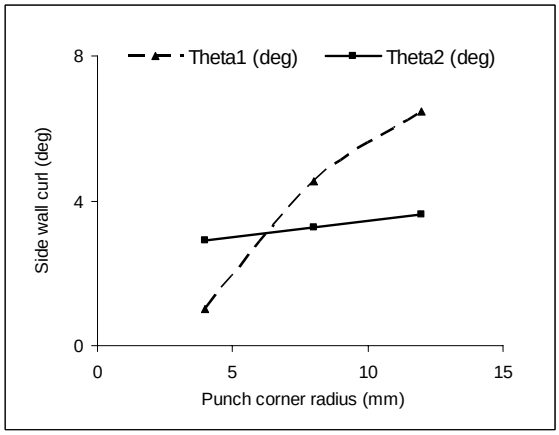
(Blank holder force = 12 KN)



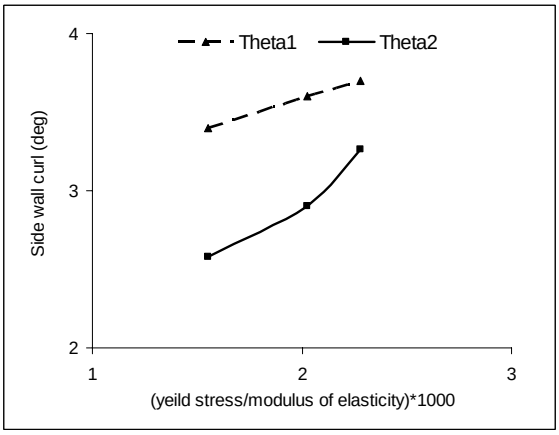
شکل۳۲- منحنی θ_2 در زوایای مختلف برش St13



شکل۳۳- تغییرات برگشت پذیری با شعاع راکورد ماتریس



شکل۳۴- تغییرات برگشت پذیری با شعاع راکورد سمبه



شکل ۳۵- تغییرات برگشت پذیری با نسبتهای مختلف σ_y / E

Abstract

Sheet metal forming may frequently produce the unacceptable products with wrinkle, tear, poor dimension precision, and so on, unless tool and process parameters are appropriately chosen. In particular, the dimension precision becomes a major concern in sheet metal bending process owing to considerable elastic recovery during unloading which leads to springback and side wall curl. In this study, the U-draw bending process on three different Aluminum & Steel alloys which are widely used in the industry especially in the automobile and aircraft industries, is investigated experimentally and numerically to consider the effect of anisotropy, sheet thickness, blank holder force, friction coefficient and sheet material on the springnack and side wall curl. To study the effect of anisotropy and thickness of sheets experimentally, sheets are prepared in three thicknesses and cut out in three orientations due to their rolling directions. Two hardening models (isotropic and kinematics) are used in the model to study the effect of the hardening assumption on the simulation results. The effect of die and punch corner radius on the springnack are also studied numerically. The 3D simulation of springback is modeled using the finite element code, Ansys10. The accuracy of the model is verified by a comparison between the numerical and experimental results. The obtained results show that increasing the blank holder force, friction coefficient and sheet thickness and decreasing the sheet anisotropy would result in the decreasing of springback and side wall curl due to increasing of plastic strain in the specimens.