

## بررسی عددی و تجربی بازگشت فنری در خم‌کاری U شکل گرم ورق آلومینیوم آلیاژی AL5083-H111

محمد شفیعی علویجه<sup>۱\*</sup>، حسین امیرآبادی<sup>۲</sup>، حسین ترابیان<sup>۳</sup>، ظهیر کریمی<sup>۴</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۳/۲۲	یکی از مهمترین محدودیت‌ها در شکل‌دهی مطلوب ورق‌های فلزی، مواجهه با پدیده بازبایی کشسان در طول بار برداری است که منجر به بازگشت فنری می‌گردد. بازگشت فنری مهمترین عامل در عدم دقت ابعادی ورق‌های فلزی خمش یافته است. بنابراین ارزیابی و پیش‌بینی بازگشت فنری بعد از فرآیند شکل‌دهی برای تولید محصولات دقیق ضروری است. در این مقاله، تأثیر پارامترهای دما، ضریب اصطکاک، نیروی ورق‌گیر و ضخامت ورق روی بازگشت فنری در فرآیند خم‌کاری U شکل گرم ورق‌هایی از جنس آلیاژ آلومینیوم AL5083-H111 به روش تجربی (آزمایشگاهی) و روش عددی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار آنالیز اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمون‌های تجربی تطابق خوبی را نشان می‌دهد و صحت روش عددی را تأیید می‌نماید.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۱۱	
<b>واژگان کلیدی:</b> بازگشت فنری، خم‌کاری U شکل گرم، روش تجربی، روش عددی، آلیاژ AL5083-H111	

### ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در خصوص کاهش وزن اتومبیل‌ها انجام شده است. کاهش وزن اتومبیل‌ها مزایای بسیاری از جمله کاهش مصرف سوخت و آلودگی حاصل از آنها را در پی دارد. یکی از راهکارها برای کاهش وزن اتومبیل‌ها استفاده از مواد دارای نسبت استحکام به وزن بالا می‌باشد که از جمله این مواد می‌توان به آلیاژهای آلومینیوم اشاره کرد [۱]. استفاده از آلیاژهای آلومینیوم، مشکلاتی را نیز به همراه دارد که از مهمترین این مشکلات، بازگشت فنری زیاد در شکل‌دهی این نوع آلیاژها به دلیل پایین بودن مدول الاستیسیته آنها می‌باشد. بازگشت فنری یک پدیده اجتناب ناپذیر در فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی است که حین مرحله باربرداری به دلیل بازیافت الاستیک و رها شدن انرژی تنش‌های الاستیک اتفاق می‌-

افتد و در نتیجه آن هندسه و ابعاد نهایی قطعه تغییر می‌کند. بنابراین در فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌هایی از جنس آلیاژهای آلومینیوم، پیش‌بینی و کنترل بازگشت فنری برای تولید قطعات با دقت بالا ضروریست. فرآیندهای شکل‌دهی فلزات از نقطه نظر دما به سه دسته سردکاری، گرم‌کاری و داغ‌کاری تقسیم می‌شوند. وقتی تغییر شکل پلاستیک در دمای اتاق انجام شود به آن سردکاری گویند، وقتی تغییر شکل پلاستیک در دمای بالای تبلور مجدد صورت گیرد به آن داغ‌کاری گویند و وقتی تغییر شکل پلاستیک بین این دو دما صورت گیرد به آن گرم‌کاری گویند. فرآیند گرم‌کاری در مقایسه با فرآیند سردکاری، تعداد مراحل تغییر شکل و نیروی لازم برای تغییر شکل را کاهش می‌دهد. همچنین این فرآیند در مقایسه با داغ‌کاری، امتیاز بالا بردن دقت ابعادی و کیفیت

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mshafiei@birjand.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۲. دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۳. استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی،

تهران

۴. کارشناس ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

بازگشت فنری در فرآیند خم کاری U شکل گرم و داغ ورقه-های فولادی و آلومینیومی بررسی کرده‌اند. آنها دریافته‌اند که افزایش دما سبب کاهش بازگشت فنری می‌گردد. کیم و همکارانش با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس<sup>۱</sup>، اثر دما را بر بازگشت فنری ورقی از جنس آلیاژ آلومینیوم AA5754-O بررسی کرده‌اند. اوزترک و همکارانش در فرآیند خم کاری U شکل گرم ورق‌هایی از جنس فولاد DP600 اثر دما را بر بازگشت فنری بررسی کرده‌اند. یانگ و همکارانش با استفاده از تست‌های تجربی و نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس به بررسی بازگشت فنری در خم کاری U شکل داغ ورق‌هایی از جنس فولادهای با استحکام بسیار بالا پرداخته‌اند.

در این مقاله در فرآیند خم کاری U شکل ورق‌هایی از جنس آلیاژ آلومینیوم AL5083-H111 اثر دما بر بازگشت فنری بررسی شده، سپس در دمای ۳۰۰°C اثر پارامترهای نیروی ورقگیر، ضریب اصطکاک و ضخامت ورق بر بازگشت فنری بررسی گردیده است.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم AL5083-H111 اندازه‌گیری شده بوسیله دستگاه کوانتومتر ARL 3560 OES

عنصر	درصد ترکیب
Mg	۴/۰۹
Si	۰/۱۳۷
Cu	۰/۰۳۸
Mn	۰/۵۴
Cr	۰/۰۶۷
Fe	۰/۳۴
Ti	۰/۰۴۲
Zn	۰/۱۱۴
Al	۹۴/۶

## ۲- مواد و تجهیزات مورد استفاده

در این تحقیق سنبه، ماتریس و ورقگیر از جنس فولاد ابزاری با سختی HRC ۵۵ و ورق‌ها از جنس آلیاژ آلومینیوم AL5083-H111 ساخته شده‌اند. آلیاژ آلومینیوم (آلومینیوم - منیزیم) AL5083-H111 کارپذیر و غیرقابل عملیات حرارتی است. این آلیاژ دارای استحکام بالا، قابلیت

سطح و پایین آوردن هزینه انرژی را دارا می‌باشد. یکی از قطعاتی که در صنایع شکل‌دهی و از جمله در صنایع اتومبیل‌سازی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد، قطعات U شکل می‌باشد. اغلب تحقیقات انجام گرفته پیرامون بازگشت فنری در فرآیند خم کاری U شکل ورق‌های فلزی، در شرایط شکل‌دهی سرد انجام شده‌اند که از جمله این تحقیقات می‌توان به تحقیقات پوربقرات و همکارانش [۲] و [۳]، ساموئل [۴]، لیو و همکارانش [۵]، راگابی و همکارانش [۶]، پاپلوکس و پنتل [۷]، سوسا و همکارانش [۸] و هاما و همکارانش [۹] اشاره کرد. پوربقرات و همکارانش با استفاده از روش هیبریدی فرآیند خم کاری U شکل را شبیه سازی کرده‌اند. ساموئل اثر شعاع سنبه، شعاع ماتریس و مقدار ناهمسانگردی را بر میزان بازگشت فنری بررسی نموده است. لیو و همکارانش نیز برای جبران بازگشت فنری در خمش کششی قطعات U شکل، استفاده از نیروی نگهدارنده متغییر را پیشنهاد نموده‌اند. راگابی و همکارانش به صورت آزمایشگاهی و شبیه سازی اجزای محدود، اثر مقدار ناهمسانگردی را بر میزان بازگشت فنری ورقه‌های فولاد ضد زنگ ۴۱۰ مورد بررسی قرار داده‌اند. پاپلوکس و پنتل تأثیر نیروی ورقگیر و ضریب اصطکاک را بر میزان بازگشت فنری مورد بررسی قرار داده‌اند. سوسا و همکارانش تحقیقاتی را در زمینه بهینه‌سازی این فرآیند به روش الگوریتم ژنتیک انجام داده‌اند. هاما و همکارانش با استفاده از تکنیکی به نام ناگاتا، اثر دقت در مدل‌سازی ماتریس و سنبه را در شبیه‌سازی بازگشت فنری فولادهای با استحکام بالا مورد بررسی قرار داده‌اند.

تحقیقات انجام گرفته پیرامون بازگشت فنری در فرآیند خم کاری U شکل ورق‌های فلزی در شرایط شکل‌دهی گرم و داغ بسیار اندک هستند. از جمله این تحقیقات می‌توان به تحقیقات مون و همکارانش [۱۰]، یانایگیموتو و ایامادا [۱۱-۱۳]، کیم و همکارانش [۱۴]، اوزترک و همکارانش [۱۵] و یانگ و همکارانش [۱۶] اشاره کرد. مون و همکارانش اثر دمای ابزار را روی بازگشت فنری ورقی از جنس آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ بررسی کرده‌اند. آنها نشان دادند که استفاده از ماتریس گرم و سنبه سرد سبب کاهش بازگشت فنری می‌گردد. یانایگیموتو و ایامادا اثر دما را بر

<sup>۱</sup> ABAQUS

### ۳- روش تجربی

در این تحقیق، تمامی آزمایش‌ها به وسیله پرس هیدرولیکی با سرعت ثابت ۱ mm/s انجام شده‌اند. قبل از انجام هر آزمایش سطوح ماتریس، سنبه، ورقگیر و هر دو طرف ورق به خوبی تمیز شده و بوسیله روانکار مناسب روغنکاری شده‌اند. در این تحقیق برای ایجاد ضرایب اصطکاک ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ به ترتیب از روانکارهای TOWERDRAW 9510، TOWERPRO 5608، KLENEDRAW 3401 و KLENEDRAW 4801 که همگی تولید شرکت Tower Oil & Technology می‌باشند، استفاده شده و برای ایجاد ضریب اصطکاک ۰/۲۵، آزمایش‌ها بدون استفاده از روانکار انجام شده‌اند. سپس ورق و قالب شکل‌دهی برای رسیدن به دمای مورد نظر و شرایط پایدار حرارتی به مدت ۳۰ دقیقه داخل کوره نگهداشته می‌شوند. ورق و قالب شکل‌دهی پس از خارج شدن از داخل کوره، بلافاصله جهت انجام آزمایش به داخل محفظه ترموستاتیکی که در شکل (۲) نشان داده شده است، منتقل می‌شوند. این محفظه ترموستاتیک بوسیله یک سنسور ترموکوپل که به ورق اتصال داده شده است، دمای ورق را اندازه‌گیری کرده و در صورتی که دمای ورق بیش از ۵ درجه سانتیگراد با دمای مورد نظر برای انجام آزمایش اختلاف داشته باشد، با روشن یا خاموش کردن گرم‌کن، دما را تنظیم می‌کند. در نتیجه استفاده از این محفظه ترموستاتیک، آزمایش‌ها در شرایط دمایی پایدار انجام شده و می‌توان در طول فرآیند خم‌کاری از تبادل حرارتی بین ابزار شکل‌دهی و ورق صرف‌نظر کرد.



شکل ۲: محفظه ترموستاتیک به همراه دستگاه پرس و سیستم کنترل دما

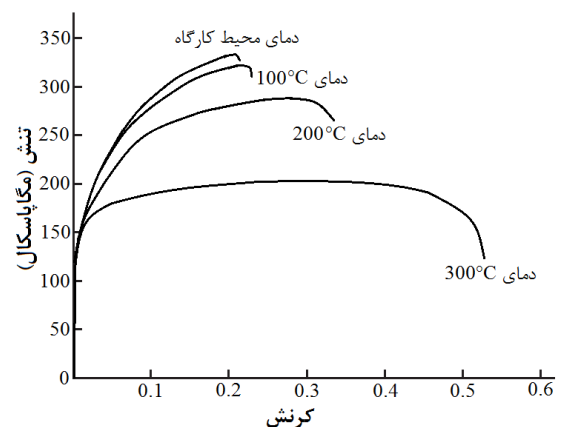
جوشکاری خوب، مقاومت بالا در مقابل خوردگی در محیط‌های آبی و شکل‌پذیری مطلوب می‌باشد. مشخصه H111 برای این آلیاژ بیانگر نوع کار سختی اعمال شده است. در جدول ۱ ترکیب شیمیایی این آلیاژ که با استفاده از آنالیز انجام شده بوسیله دستگاه کوانتومتر ARL 3560 OES به دست آمده، نشان داده شده است.

اوزترک و همکارانش [۱۷]، برای استخراج خصوصیات و رفتار مکانیکی ورق آلیاژ آلومینیوم AL5083-H111 آزمون کشش تک محوری طبق استاندارد ASTM E8، در نرخ‌های کرنش  $0.0083 \text{ S}^{-1}$  تا  $0.16 \text{ S}^{-1}$  و در دماهای منفی صد تا مثبت سیصد درجه سانتیگراد انجام داده‌اند که در این تحقیق برای معرفی خصوصیات و رفتار ماده در مدل‌سازی اجزای محدود از نتایج این آزمایش‌ها استفاده شده است. برای ورق‌های استفاده شده در این تحقیق، منحنی تنش-کرنش در دماهای مختلف در شکل (۱) نشان داده شده است.

برخی از خصوصیات مکانیکی و هندسی ورق‌های مورد استفاده در این تحقیق، در جدول ۲ بیان شده‌اند.

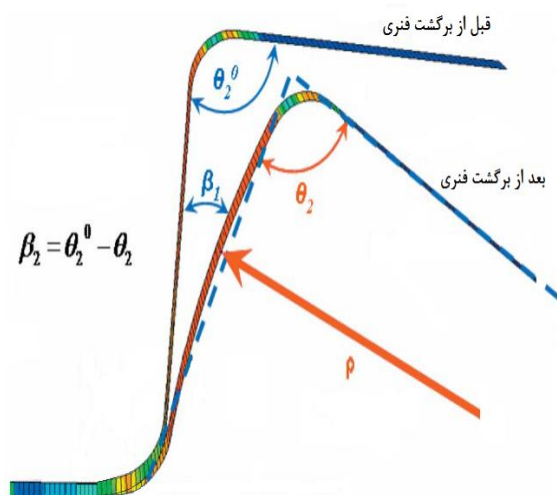
جدول ۲: خواص هندسی و مکانیکی ورق [۱۷ و ۱۸]

پارامتر	مقدار
چگالی	$2700 \text{ kg/m}^3$
مدول یانگ	۷۲ GPa
طول	۳۰۰ mm
عرض	۳۵ mm
ضخامت	۱، ۱/۲ و ۱/۵ mm
ضریب پواسون	۰/۳۳
ضریب انبساط حرارتی	$2/5 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
گرمای ویژه	$9/45 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}^2 \times \text{K}$
قابلیت هدایت حرارتی	$117 \text{ W/m} \times \text{K}$

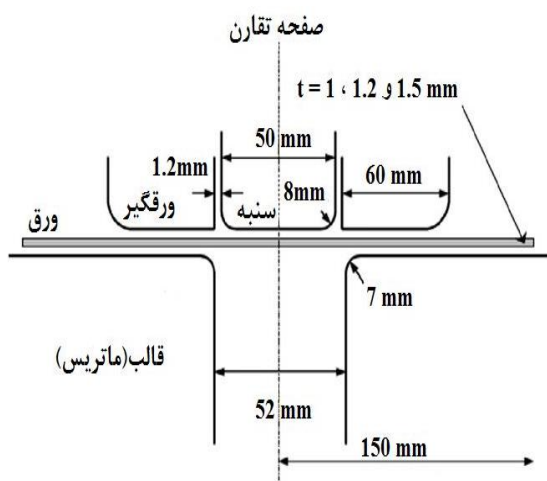


شکل ۱: منحنی تنش - کرنش در دماهای مختلف [۱۷]

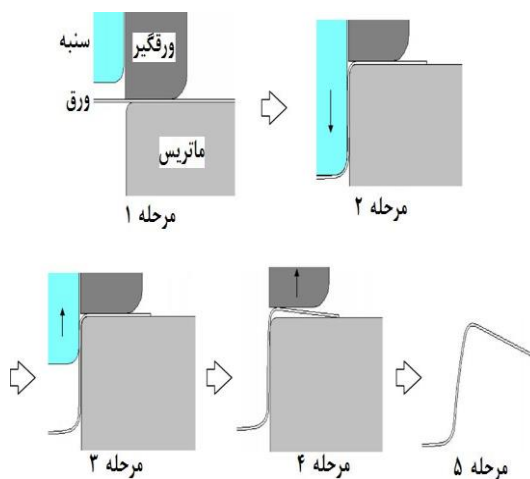
این کار باعث شده که خط‌هایی مانند خطای ناشی از پیچش ورق کاهش یافته و در نتیجه صحت نتایج حاصل افزایش یابد.



شکل ۴: کمیت‌های معرف بازگشت فنری و انحنای دیواره جانبی شامل  $\beta_1$ ،  $\beta_2$  و  $\rho$



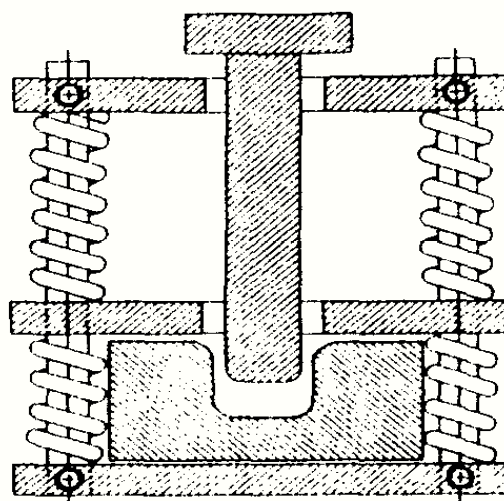
شکل ۵: نمایش شماتیک هندسه قالب و ورق



شکل ۶: مراحل مختلف شبیه سازی فرآیند

برای انجام هر آزمایش ابتدا ورق در موقعیت صحیح خود در وسط قالب قرار داده شده، سپس ورقگیر پایین آمده و ورق بوسیله اعمال نیروی ورقگیر در موقعیت خود ثابت می‌شود. بوسیله کوتاه و بلند کردن فنرهای نشان داده شده در شکل (۳)، مقدار نیروی ورقگیر برای انجام هر آزمایش تنظیم می‌شود.

پس از اعمال نیروی ورقگیر، با پایین آمدن صفحه بالایی پرس، سنبه به سمت پایین حرکت کرده تا اینکه به عمق ۷۰ میلی‌متری ماتریس برسد. پس از آنکه سنبه به اندازه ۷۰ میلی‌متر در داخل ماتریس نفوذ کرد، عملیات شکل‌دهی ورق پایان یافته، سنبه به سمت بالا بازگشته، ورقگیر از روی ورق برداشته شده، ورق به طور کامل از درون قالب خارج شده و به بیرون محفظه ترموستاتیک منتقل می‌شود تا اینکه در هوای آزاد، با گذشت زمان به دمای محیط کارگاه ( $30^{\circ}\text{C}$ ) برسد.



شکل ۳: طرح شماتیک قالب

در فرآیند خم کاری U شکل ورق، پدیده برگشت فنری را با استفاده از سه پارامتر برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره ( $\beta_1$ ) برگشت فنری زاویه فلنج ( $\beta_2$ ) و شعاع انحنای دیواره جانبی ( $\rho$ ) که در شکل (۴) نشان داده شده‌اند، می‌توان بیان کرد.

در این تحقیق برای اندازه‌گیری این سه پارامتر، هر آزمایش با شرایط یکسان، سه بار تکرار شده و در هر آزمایش، چهار اندازه‌گیری روی چهار گوشه ورق، برای هر کدام از پارامترهای  $\beta_1$ ،  $\beta_2$  و  $\rho$  انجام شده است. در نهایت میانگین این دوازده اندازه‌گیری برای هر کدام از پارامترهای  $\beta_1$ ،  $\beta_2$  و  $\rho$  به عنوان مقدار آن پارامتر در نظر گرفته شده است.

## ۴- روش عددی

در این مقاله برای شبیه‌سازی عددی فرآیند خم‌کاری U شکل ورق، از نرم افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. در تمامی شبیه‌سازی‌ها، سرعت سنبه ثابت و برابر با ۱ mm/s در نظر گرفته شده است. در طی فرآیند شکل‌دهی به علت استفاده از محفظه ترموستاتیک، تغییرات دمای حاصل از انتقال حرارت تماسی، تابشی و جابجایی بین اجزای قالب، ورق و محیط پیرامون ناچیز بوده در نتیجه در شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. در شکل (۵)، طرح شماتیک مسأله خم‌کاری U شکل ورق نشان داده شده است. به دلیل شکل و هندسه مسأله می‌توان آن را به صورت دو بعدی مدل‌سازی کرد. این کار سبب کاهش زمان رسیدن به جواب می‌گردد.

به علت تقارن مسأله نسبت به صفحه میانی، تنها نصف مدل شبیه‌سازی شده است. این عمل سبب افزایش سرعت و کاهش زمان انجام آنالیز اجزای محدود می‌شود. برای شبیه‌سازی مسأله، ورق با استفاده از المان دو بعدی کرنش صفحه‌ای CPE4RT مدل‌سازی شده و اجزای قالب به صورت صلب فرض شده‌اند.

برای انجام این شبیه‌سازی پنج مرحله<sup>۱</sup> تعریف شده است. این کار سبب افزایش صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی می‌گردد. این مراحل که در شکل (۶) نشان داده شده‌اند، عبارتند از:

۱- در اولین مرحله، نیروی ورق‌گیر اعمال می‌شود.  
۲- در دومین مرحله، سنبه با سرعت ثابت به درون حفره قالب (ماتریس) نفوذ کرده و سبب تغییر شکل ورق می‌گردد تا اینکه به عمق ۷۰ میلی‌متری ماتریس برسد.

۳- در سومین مرحله، سنبه به سمت مکان اولیه خود باز می‌گردد.

۴- در چهارمین مرحله، ورق‌گیر از روی ورق برداشته می‌شود.

۵- در پنجمین مرحله که مرحله نهایی می‌باشد، ورق شکل داده شده بطور کامل از قالب خارج شده و دمای آن کاهش می‌یابد تا اینکه به دمای ( ۳۰°C دمای محیط کارگاه) برسد. قابلیت هدایت حرارتی ۱۱۷ W/m.K و ضریب انتقال حرارت جابجایی ۸ W/m².C در نظر گرفته شده است [۱۸ و ۱۹].

نقاط لازم برای اندازه‌گیری مقادیر پارامترهای  $\beta_1$ ،  $\beta_2$  و  $\rho$  در شکل (۷) نشان داده شده‌اند. برای اندازه‌گیری مقادیر این پارامترها، ابتدا مختصات نقاط A و B قبل از وقوع پدیده بازگشت فنری اندازه‌گیری شده که این مختصات با  $A_0$  و  $B_0$  نشان داده شده‌اند، سپس مختصات نقاط A، B، C، D و E پس از وقوع پدیده بازگشت فنری اندازه‌گیری می‌شود. در نهایت با استفاده از این مختصات و معادلات (۱) تا (۸)، مقادیر پارامترهای  $\beta_1$ ،  $\beta_2$  و  $\rho$  به دست آورده خواهد شد.

$$\beta_1 = \theta_1 - \theta_1^0 \quad (1)$$

$$\beta_2 = \theta_2^0 - \theta_2 \quad (2)$$

$$\theta_1^0 = \theta_2^0 = \arccos \frac{\vec{ox.A_0B_0}}{|\vec{ox}| |A_0B_0|} \quad (3)$$

$$\theta_1 = \arccos \frac{\vec{ox.AB}}{|\vec{ox}| |AB|} \quad (4)$$

$$\theta_2 = \arccos \frac{\vec{AB.ED}}{|AB| |ED|} \quad (5)$$

$$x_R = \frac{x_B^2 + y_B^2 - x_A^2 - y_A^2 - \frac{y - y_A}{y_C - y_B} (x_C^2 + y_C^2 - x_B^2 - y_B^2)}{2 \left[ x_B - x_A + (x_C - x_B) \frac{y_A - y_B}{y_C - y_B} \right]} \quad (6)$$

$$y_R = \frac{x_A^2 + y_A^2 - x_B^2 - y_B^2 + 2x_R(x_B - x_A)}{2(y_A - y_B)} \quad (7)$$

$$\rho = \sqrt{(x_A - x_R)^2 + (y_A - y_R)^2} \quad (8)$$

جدول ۳: روش‌های مختلف برای تحلیل مسأله

حالت	شبیه‌سازی شکل‌دهی	شبیه‌سازی برگشت فنری
۱	حل ضمنی	حل ضمنی
۲	حل صریح	حل ضمنی
۳	حل ضمنی	حل صریح
۴	حل صریح	حل صریح

یکی از مزایای نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس نسبت به سایر نرم‌افزارهای اجزای محدود مشابه در داشتن روش‌های حل صریح<sup>۲</sup> و ضمنی<sup>۳</sup> می‌باشد. در این مقاله برای انتخاب روش مناسب برای تحلیل مسأله، مطابق جدول ۳، چهار

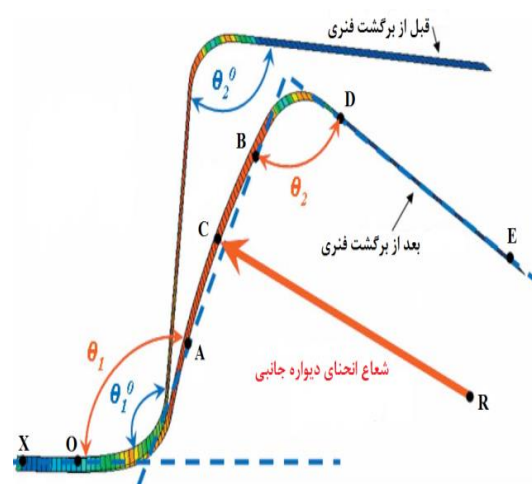
<sup>3</sup> Implicit

<sup>1</sup> Step

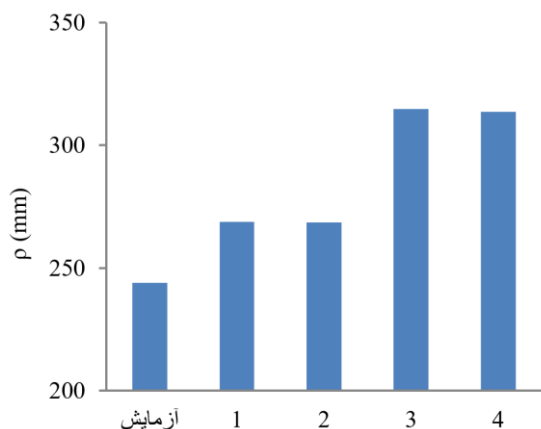
<sup>2</sup> Explicit

نتیجه گرفته می‌شود که استفاده از روش حل ضمنی در شبیه‌سازی بازگشت فنری (مراحل ۳، ۴ و ۵ شکل ۶)، سبب افزایش قابل ملاحظه صحت پیش‌بینی مقادیر پارامترهای  $\beta_1$ ،  $\beta_2$  و  $\rho$  می‌گردد. هر چند استفاده از روش حل صریح در شبیه‌سازی شکل‌دهی (مراحل ۱ و ۲ شکل ۶) تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر صحت پیش‌بینی مقادیر پارامترهای  $\beta_1$ ،  $\beta_2$  و  $\rho$  ندارد ولی زمان انجام محاسبات را به شدت کاهش می‌دهد. بنابراین بهترین حالت برای تحلیل این مسأله که بیشترین دقت و بالاترین سرعت را دارد، حالت ۲ می‌باشد که در آن برای شبیه‌سازی شکل‌دهی از روش حل صریح و برای شبیه‌سازی بازگشت فنری از روش حل ضمنی استفاده شده است.

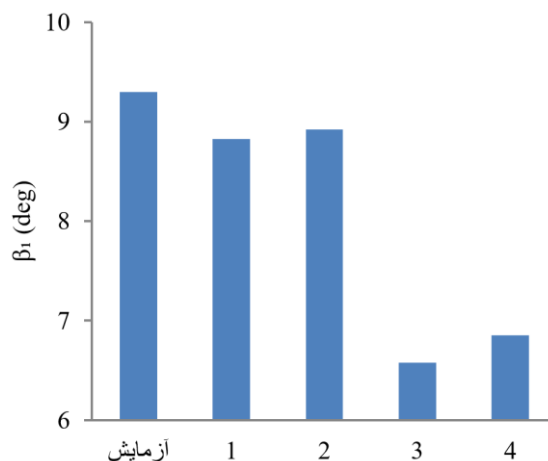
حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.



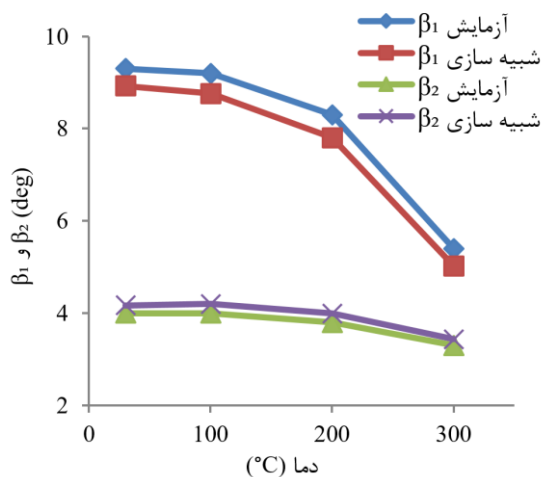
شکل ۷: نقاط لازم برای اندازه‌گیری پارامترهای  $\beta_1$ ،  $\beta_2$  و  $\rho$



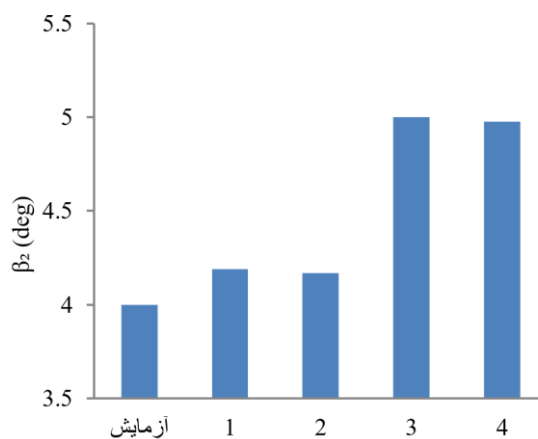
شکل ۱۰: مقادیر  $\rho$  برای حالات مختلف شبیه‌سازی



شکل ۸: مقادیر  $\beta_1$  برای حالات مختلف شبیه‌سازی



شکل ۱۱: اثر تغییرات دما بر مقادیر  $\beta_1$  و  $\beta_2$

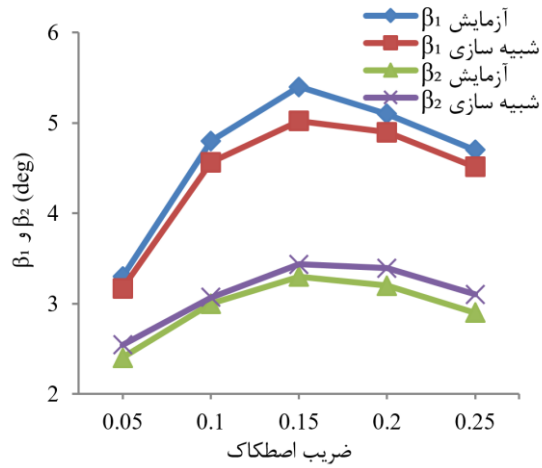


شکل ۹: مقادیر  $\beta_2$  برای حالات مختلف شبیه‌سازی

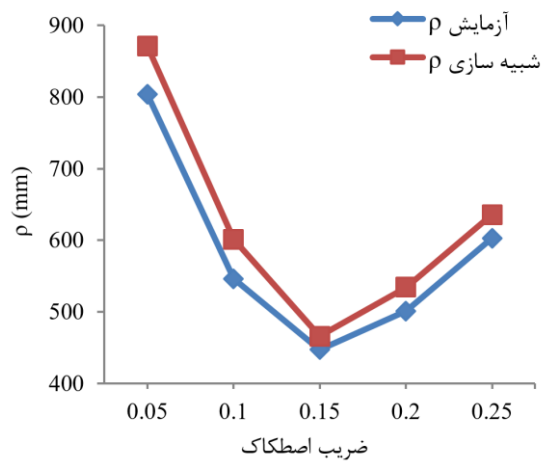
### ۵- نتایج و بحث

تأثیر تغییرات دما روی مقادیر  $\beta_1$ ،  $\beta_2$  و  $\rho$  در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است. از این شکل‌ها نتیجه گرفته می‌شود که افزایش دما سبب کاهش  $\beta_1$  و  $\beta_2$  و

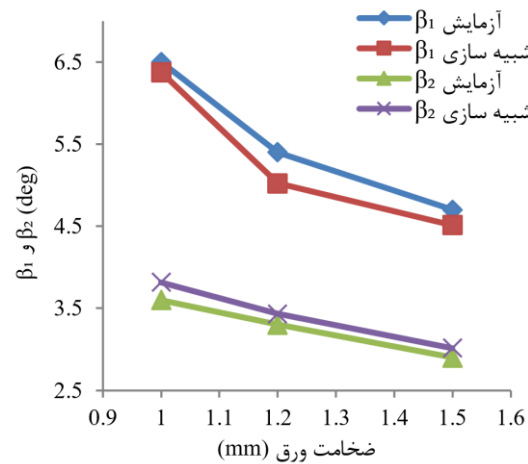
در شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰) به ترتیب مقادیر پارامترهای  $\beta_1$ ،  $\beta_2$  و  $\rho$  که از تست‌های تجربی به دست آمده‌اند، با مقادیر به دست آمده از حالت‌های مختلف تحلیل اجزای محدود مسأله (جدول ۳) مقایسه شده‌اند. از این شکل‌ها



شکل ۱۵: اثر تغییرات ضریب اصطکاک بر مقادیر  $\beta_1$  و  $\beta_2$



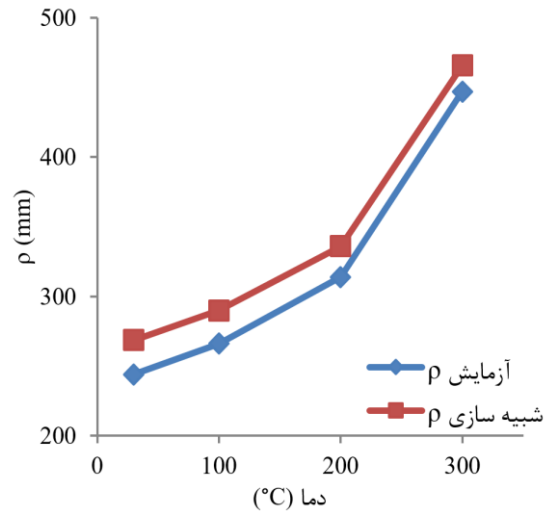
شکل ۱۶: اثر تغییرات ضریب اصطکاک بر مقدار  $\rho$



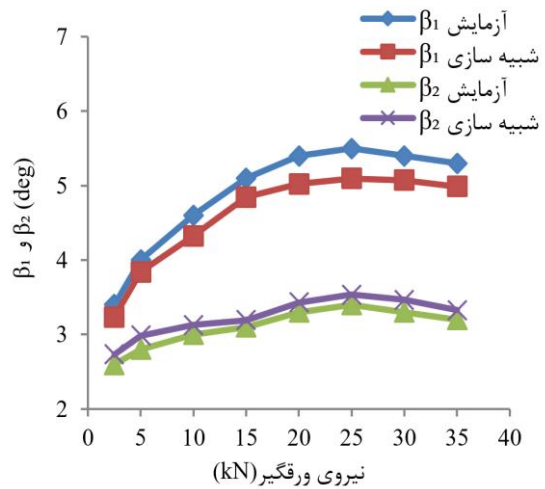
شکل ۱۷: اثر تغییرات ضخامت ورق بر مقادیر  $\beta_1$  و  $\beta_2$

تأثیر تغییرات نیروی ورقگیر بر مقادیر  $\beta_1$ ،  $\beta_2$  و  $\rho$  در فرآیند خم کاری U شکل گرم ( $T=300^\circ\text{C}$ )، در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است. از این شکل‌ها نتیجه گرفته می‌شود که در مقادیر کوچک نیروی ورقگیر، با

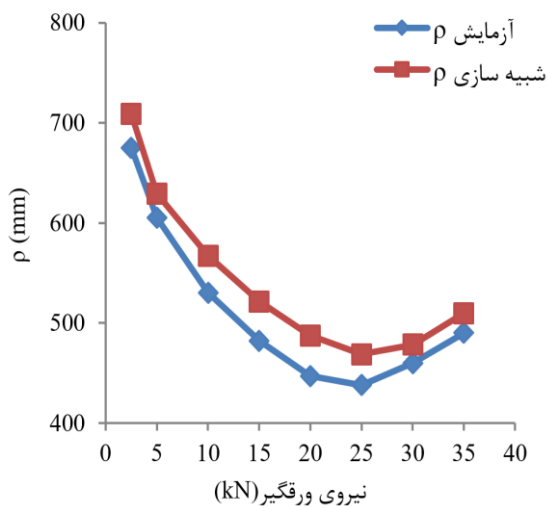
افزایش  $\rho$  می‌گردد. علت این امر کاهش استحکام ورق در اثر افزایش دما می‌باشد.



شکل ۱۸: اثر تغییرات دما بر مقدار  $\rho$



شکل ۱۹: اثر تغییرات نیروی ورقگیر بر مقادیر  $\beta_1$  و  $\beta_2$



شکل ۲۰: اثر تغییرات نیروی ورقگیر بر مقدار  $\rho$



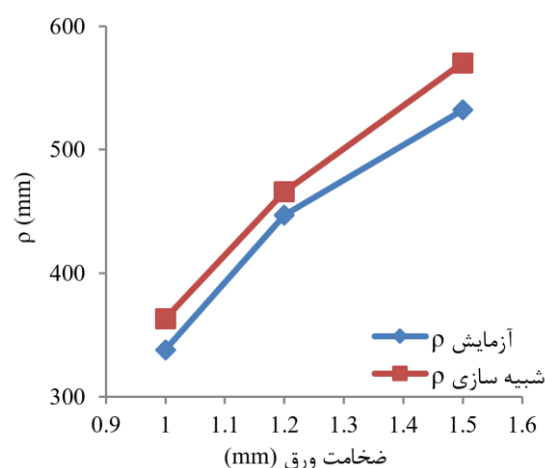
می‌شود که افزایش ضخامت ورق سبب کاهش مقادیر  $\beta_1$  و  $\beta_2$  و افزایش  $\rho$  می‌گردد. علت پدیده فوق گسترش ناحیه مومسان ورق در نتیجه افزایش ضخامت ورق است. از مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی اجزای محدود توسط نرم افزار آباکوس که تعدادی از آنها در شکل‌های (۱۱) تا (۱۸) نشان داده شده‌اند، مشاهده می‌شود که ماکزیمم اختلاف بین نتایج تجربی و عددی برای  $\beta_1$ ،  $\beta_2$  و  $\rho$  به ترتیب برابر با ۷، ۸ و ۱۳ درصد می‌باشد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نرم‌افزار آباکوس ابزاری قابل اعتماد برای پیش‌بینی مقادیر  $\beta_1$ ،  $\beta_2$  و  $\rho$  در این مسأله می‌باشد که به وسیله این نرم‌افزار می‌توان مقادیر  $\beta_1$ ،  $\beta_2$  و  $\rho$  را با صرف هزینه و زمان کمتر از روش آزمایشگاهی و با صحت بالا پیش‌بینی کرد.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، پدیده‌های ناخواسته بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، بازگشت فنری زاویه فلنج و انحنای دیواره جانبی در فرآیند خم کاری U شکل گرم ورق‌هایی از جنس آلیاژ آلومینیوم AL5083-H111 و تأثیر پارامترهای دما، نیروی ورقگیر، ضریب اصطکاک و ضخامت ورق بر این پدیده‌ها با استفاده از تست‌های تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود به وسیله نرم افزار آباکوس، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند. مقایسه نتایج حاصل از تست‌های تجربی و نرم افزار آباکوس نشان می‌دهند که مقادیر بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، بازگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی، در هر دو حالت همخوانی مناسبی با یکدیگر دارند. بنابراین نتیجه گرفته می‌شود که نرم‌افزار آباکوس، ابزاری قابل اعتماد برای پیش‌بینی مقادیر بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، بازگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی می‌باشد.

نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهند که افزایش دما و همچنین افزایش ضخامت ورق سبب کاهش بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، بازگشت فنری زاویه فلنج و انحنای دیواره جانبی می‌گردند. افزایش نیروی ورقگیر و همچنین افزایش ضریب اصطکاک، تا مقادیر معینی سبب افزایش بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، بازگشت فنری زاویه فلنج و انحنای دیواره جانبی می‌گردند ولی پس از آن بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، بازگشت فنری زاویه فلنج و انحنای دیواره جانبی را کاهش می‌دهند.

افزایش نیروی ورقگیر، به تدریج مقادیر  $\beta_1$  و  $\beta_2$  افزایش و  $\rho$  کاهش می‌یابد ولی با عبور نیروی ورقگیر از مقدار معینی (۲۵ kN)، مقادیر  $\beta_1$  و  $\beta_2$  شروع به کاهش و  $\rho$  شروع به افزایش می‌کنند. علت پدیده فوق این است که، در ابتدا با افزایش نیروی ورقگیر، نیروهای غشایی - کششی ایجاد شده در ورق، سبب محدودتر شدن منطقه مومسان حاصل بر روی ورق می‌گردند که علت این امر خمش ورق و تنش-های فشاری ایجاد شده است. با افزایش نیروی ورقگیر، تنش‌های غشایی - کششی حاصل از نیروی ورقگیر توسعه می‌یابد و با گسترش منطقه مومسان، کاهش مقادیر  $\beta_1$  و  $\beta_2$  و افزایش  $\rho$  اتفاق خواهد افتاد.



شکل ۱۸: اثر تغییرات ضخامت ورق بر مقدار  $\rho$

اثر تغییرات ضریب اصطکاک بین ورق و تجهیزات شکل-دهی بر مقادیر  $\beta_1$ ،  $\beta_2$  و  $\rho$  در فرآیند خم کاری U شکل گرم ( $T=300^\circ\text{C}$ ) در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل‌ها مشاهده می‌گردد، افزایش ضریب اصطکاک تأثیری مشابه تأثیر نیروی ورقگیر بر مقادیر  $\beta_1$ ،  $\beta_2$  و  $\rho$  می‌گذارد یعنی در مقادیر کوچک ضریب اصطکاک، با افزایش ضریب اصطکاک، به تدریج مقادیر  $\beta_1$  و  $\beta_2$  افزایش و  $\rho$  کاهش می‌یابد ولی با عبور ضریب اصطکاک از مقدار معینی (۰/۱۵)، مقادیر  $\beta_1$  و  $\beta_2$  شروع به کاهش و  $\rho$  شروع به افزایش می‌کنند. استدلال ذکر شده در مورد نیروی ورقگیر مبنی بر چگونگی افزایش منطقه پلاستیک به دلیل غلبه یافتن نیروهای غشایی - کششی در اینجا نیز کاملاً معتبر و قابل استناد می‌باشد.

اثر تغییرات ضخامت ورق بر مقادیر  $\beta_1$ ،  $\beta_2$  و  $\rho$  در فرآیند خم کاری U شکل گرم ( $T=300^\circ\text{C}$ ) در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نشان داده شده است. از این شکل‌ها نتیجه گرفته



## ۷- مراجع

- [1] D. Carle, G. Blount, "The Suitability of Aluminum as an Alternative Material for Car Bodies", *Journal of Materials and Design*, Vol. 20, Issue 5, 1999, pp. 267–272.
- [2] F. Pourboghrat, E. Chu, "Springback in Plane Strain Stretch/Draw Sheet Forming", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 37, Issue 3, 1995, pp. 327–341.
- [3] F. Pourboghrat, E. Chu, "Prediction of Springback and Side Wall Curl in 2-D Draw Bending", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 50, Issues 1–4, 1995, pp. 361–374.
- [4] M. Samuel, "Experimental and Numerical Prediction of Springback and Side Wall Curl in U-Bending of Anisotropic Sheet Metals", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 105, No. 3, 2000, pp. 382–393.
- [5] G. Liu, W. Xu, Y. Bao, "Variable Blank Holder Force in U-Shaped Part Forming for Eliminating Springback Error", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 120, Issues 1–3, 2002, pp. 259–264.
- [6] I. Ragai, D. Lazim, A. Nemes, "Anisotropy and Springback in Draw-Bending of Stainless Steel 410: Experimental and Numerical Study", *Journal of Materials Processing Technology*, V. 166, Issue 1, 2005, pp. 116–127.
- [7] L. Papeleux, J.P. Ponthol, "Finite Element Simulation of Springback in Sheet Metal Forming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vols. 125–126, 2002, pp. 785–791.
- [8] L.C. Sousa, C.F. Castro, C.A.C. Antonio, "Optimal Design of V and U Bending Processes Using Genetic Algorithms", *Journal of Materials Processing Technology*, V. 172, Issue 1, 2006, pp. 35–41.
- [9] T. Hama, T. Nagata, C. Teodosiu, A. Makinouchi, H. Takuda, "Finite Element Simulation of Springback in Sheet Metal Forming Using Local Interpolation for Tool Surfaces", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 50, Issue 2, 2008, pp. 175–192.
- [10] Y.H. Moon, S.S. Kang, J.R. Cho, T.G. Kim, "Effect of Tool Temperature on the Reduction of the Springback of Aluminum Sheets", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 132, Issues 1–3, 2003, pp. 365–368.
- [11] J. Yanagimoto, K. Oyamada, "Springback-Free Isothermal Forming of High-Strength Steel Sheets and Aluminum Alloy Sheets Under Warm and Hot Forming Conditions", *ISIJ International*, Vol. 46, Issue 9, 2006, pp. 1324–1328.
- [12] J. Yanagimoto, K. Oyamada, "Mechanism of Springback-Free Bending of High Strength Steel Sheets Under Warm Forming Conditions", *Journal Annals of the CIRP*, Vol. 56, Issue 1, 2007, pp. 265–268.
- [13] J. Yanagimoto, K. Oyamada, T. Nakagawa, "Springback of High Strength Steels After Hot and Warm Sheet Forming", *Journal Annals of the CIRP*, Vol. 54, Issue 1, 2005, pp. 213–216.
- [14] S.H. Kim, M. Koc, "Numerical Investigations on Springback Characteristics of Aluminum Sheet Metal Alloys in Warm Forming Conditions", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 204, Issues 1–3, 2008, pp. 370–383.
- [15] F. Ozturk, S. Toros, S. Kilic, "Tensile and Springback Behavior of DP600 Advanced High Strength Steel at Warm Temperature", *Journal of Iron and Steel Research*, Vol. 16, Issue 6, 2009, pp. 41–46.
- [16] D.S. Yang, W. Liu, G.J. Hu, J. Zhou, Z. Su, "Study on Hot Forming Process and Springback of Ultra-High Strength Steel Based on ABAQUS Advanced Materials Research", *Journal of Advanced Materials Research*, Vols. 482–484, 2012, pp. 2430–2437.
- [17] F. Ozturk, S. Toros, S. Kilic, "Tensile Deformation Behavior of AA5083-H111 at Cold and Hot Temperatures", *International Journal of Material Research*, Vol. 101, Issue 9, 2010, pp. 1172–1179.
- [18] D.L. Olson, T.A. Siewert, S. Liu, G.R. Edwards, "Welding, Brazing, and Soldering", *ASM International, USA*, 2007.
- [19] A. Bejan, A.D. Kraus, "Heat transfer handbook", Vol. 1, John Wiley & Sons, New Jersey, 2003.