



## تحلیل تجربی اثر میزان کرنش بر ضرایب ناهمسانگردی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ با استفاده از روش آنالیز تصاویر دیجیتال

امید ارجمند<sup>۱</sup>، مهدی گردویی<sup>۲\*</sup>، حسین خسروی<sup>۳</sup> و سجاد ایزدپناه<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده مهندسی برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۴/۱۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۷/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۱۶

### چکیده

ناهمسانگردی ورق‌های فلزی تولید شده از نورد، اگرچه موجب افزایش کشش‌پذیری می‌شود، اما اثرات مضر ناخواسته‌ای چون پدیده گوشواره‌ای شدن را موجب می‌شود. در این تحقیق، به بررسی تغییرات ضرایب ناهمسانگردی با افزایش تغییر شکل در آزمون کشش تک محوری آلومینیوم آلیاژی AA۶۰۶۱-O با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال در دو حالت شبکه‌بندی منظم دایره‌ای و نامنظم تصادفی پرداخته شده است. نمونه‌های برش شده در جهات صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای نورد پس از شبکه‌بندی توسط دستگاه کشش اینسترون کشیده و مقادیر کرنش طولی و عرضی هنگام فرآیند محاسبه شده است. در ادامه با این مقادیر، ضرایب ناهمسانگردی در جهات مذکور و همچنین تغییرات ضرایب ناهمسانگردی نرمال و ناهمسانگردی صفحه‌ای با پیشرفت فرآیند محاسبه گردید که مشخص شد با افزایش کرنش، ضرایب ناهمسانگردی در راستای صفر و ۴۵ درجه، روندی نزولی و در راستای ۹۰ درجه، دارای رفتار نوسانی است. نتایج نشان داد که با اعمال ۱۰ درصد کرنش طولی در ورق، ضریب ناهمسانگردی نرمال و قدر مطلق ناهمسانگردی صفحه‌ای به ترتیب، ۵۱ درصد و ۶۳ درصد کاهش می‌یابد. در پایان، نحوه سخت‌شوندگی پلاستیک ورق بر اساس معیار تسلیم هیل درجه‌ی دو، هنگام کشش مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که نحوه رشد سطح تسلیم، کاملاً ناهمسانگرد است.

**کلمات کلیدی:** همبستگی تصاویر دیجیتال؛ شبکه‌بندی منظم و تصادفی؛ ضریب ناهمسانگردی پلاستیک.

## Experimental Analysis of Strain Effect on Anisotropic Coefficients of 6061 Aluminum Sheet using Digital Image Processing

O. Arjmand<sup>1</sup>, M. Gerdooei<sup>2\*</sup>, H. Khosravi<sup>3</sup>, S. Izadpanah<sup>1</sup>

<sup>1</sup> MSc Student, Mech. Eng., Shahrood Univ. of Tech., Shahrood, Iran.

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Mech. Eng., Shahrood Univ. of Tech., Shahrood, Iran.

<sup>3</sup> Assoc. Prof., Elec. Eng., Shahrood Univ. of Tech., Shahrood, Iran.

### Abstract

The anisotropy of mechanical property in sheet metals, due to the rolling process, causes useful effects such as increasing drawability and harmful effects like the earing phenomenon. In this work, the variation in the anisotropic coefficient during the uniaxial tension of the AA6061-O sheet is considered using the digital image correlation technique by the two marking methods of regular arrays of circles and irregular accidental pattern. The meshed samples of this alloy are cut in the three directions 0, 45, and 90 degrees with respect to the rolling direction, and stretched by an Instron test machine. During the test, the transverse and longitudinal strains are measured, and then, using these two parameters, the anisotropic parameters in different directions, as more as the planar and normal anisotropic coefficients, are computed. It is demonstrated that during the straining on the samples, the anisotropic parameters in the 0 and 45 directions show a decreasing trend, and in the 90 direction, it has a wavy manner. The results obtained indicate that after 10 percent elongation, the normal and planar anisotropies of the sheet decrease by 51% and 63%, respectively. Finally, the plastic-hardening behavior of the sheet in different stages of the tension is studied using the Hill's quadratic yield criterion, and it appears that the yield surface grows totally as an anisotropic manner.

**Keywords:** Digital Image Correlation; Regular and Accidental Grid Patterns; Plastic Anisotropic Coefficient.

## ۱- مقدمه

مربعی از ورق نورد سرد شده و مقایسه نتایج آن با نتایج حاصل از آزمایش تجربی، به بررسی ناهمسانگردی ماده با استفاده از معیار تیم هیل ۴۸ پرداخته شد و به این نتیجه رسیدند که ناهمسانگردی، مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در ارتفاع کشش ورق است [۵]. کوثری‌نیا و همکاران، به بررسی تحلیلی اثر ناهمسانگردی ورق‌های فلزی بر عیوب شکل‌دهی پرداختند؛ سپس اثر حالات مختلف از رفتار ناهمسانگردی را بر عیوب اصلی شکل‌دهی در فرآیندهای مختلف ورق‌های فلزی، مورد بحث قرار دادند [۶].

پورقانعی و سرخابی، پس از تهیه عکس‌های متوالی از فیلم تهیه شده هنگام انجام آزمون کشش نمونه با کمک الگوریتم‌های پردازش تصویر و تکنیک هم‌بستگی تصاویر دیجیتال، الگوهای چاپ شده روی نمونه را تا آخرین عکس ردگیری کرده، مختصات  $(x, y)$  آن‌ها به دست می‌آید. سرانجام با پردازش روی مختصات به دست آمده توسط الگوریتم محاسبه جابجایی، مقدار دقیق تغییر طول نمونه و در نهایت کرنش محاسبه می‌شود. مهم‌ترین نقص این تحقیق، وابستگی نتایج به شدت نور تابیده شده به نمونه و همچنین دقت پایین تصویربرداری دوربین استفاده شده و در نتیجه، خطای قابل توجه در ردیابی الگوهای دیجیتالی اشاره کرد [۷].

در سال ۲۰۰۷، خلیلی و افتخاری با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر در نرم‌افزار IMAQ کرنش را استخراج کردند. آن‌ها برای ایجاد الگو و مجموعه الگو در روی سطح نمونه از اسپری رنگ‌پاشی و شابلون استفاده کردند که بصورت دستی آماده شده بود [۸].

در این مقالات، مقادیر ضرایب ناهمسانگردی هنگام فرآیند مقدار ثابتی در نظر گرفته شده است. فرضیه مورد بررسی در این تحقیق آن است که آیا افزایش کرنش در فرآیند شکل‌دهی ورق موجب تغییر در میزان ناهمسانگردی ورق می‌شود یا خیر که به نظر می‌رسد، ایجاد کرنش خود موجب تغییر در ساختار کریستالی و در نتیجه تغییرات ضرایب ناهمسانگردی می‌شود؛ لذا در این تحقیق، با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال در دو حالت شبکه‌بندی منظم دایره‌ای و شبکه‌بندی نامنظم تصادفی، به بررسی این فرضیه در آزمون کشش تک‌محوری ورق آلومینیومی پرداخته شده است.

فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی به دلیل سبکی وزن محصولات تولیدی از ورق، تنوع هندسه محصول و نیروی کم برای شکل‌دهی و همچنین استحکام بالا، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا، کشور ایران به‌عنوان بیستمین تولیدکننده آلومینیوم در سال ۲۰۱۳ موفق به تولید ۷۷۰۰۰۰ تن از این فلز شد و با سرمایه‌گذاری ۱۱/۴ میلیارد دلاری که پیش‌بینی شده در این صنعت انجام شود، میزان تولید آلومینیوم در سال ۲۰۲۵، به ۱/۵ میلیون تن خواهد رسید [۱].

ناهمسانگردی پلاستیک<sup>۱</sup> در ورق‌های فلزی که از ایجاد کریستال‌های جهت‌دار در اثر فرآیند نورد نشأت می‌گیرد، با ضریب ناهمسانگردی  $R$  به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود.

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\varepsilon_w}{-\varepsilon_w - \varepsilon_t} \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $\varepsilon_t$  و  $\varepsilon_w$  به ترتیب، کرنش طولی، عرضی و ضخامتی هنگام کشش تک‌محوری ورق پس از ۱۰ تا ۲۰ درصد تغییر طول نسبی است [۲]. ضریب ناهمسانگردی برای نمونه برش شده با زاویه  $\theta$  نسبت راستای نورد ورق را با  $R_\theta$  نمایش می‌دهند. بر این اساس، ضریب ناهمسانگردی نرمال<sup>۲</sup> ( $\bar{R}$ ) و ناهمسانگردی صفحه‌ای<sup>۳</sup> ( $\Delta R$ ) مطابق روابط (۲-۳) محاسبه می‌شود [۳و۲].

$$\bar{R} = \frac{R_0 + R_{90} + 2R_{45}}{4} \quad (2)$$

$$\Delta R = \frac{R_0 + R_{90} - 2R_{45}}{2} \quad (3)$$

در اغلب ورق‌های فلزی به دلیل وجود ناهمسانگردی صفحه‌ای،  $\Delta R$  مخالف صفر بوده، لذا فنجان تولیدی، دارای لبه‌های نابرابر از لحاظ ارتفاع است که به این عیب گوشواره-ای شدن<sup>۴</sup> گفته می‌شود [۴].

اثر ناهمسانگردی پلاستیک، متغیرهای مختلف ذاتی و محیطی فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی در مقالات متعدد داخلی و خارجی، مورد بررسی قرار گرفته است که به‌عنوان نمونه، می‌توان به مقاله ترزپینسکی و همکاران اشاره کرد. در این تحقیق، با تحلیل سه‌بعدی فرآیند کشش فنجانی

<sup>1</sup> Plastic anisotropy

<sup>2</sup> Normal anisotropy coefficient

<sup>3</sup> Planar anisotropy coefficient

<sup>4</sup> Earing

به تغییر شکل برشی است. به کمک توابع مذکور، جابجایی نقاط مشخص از جسم و به تبع آن تغییر طول نمونه تا لحظه پارگی را می‌توان به دست آورد.

برای تعیین ثوابت معادلات مذکور، از تطبیق عکس‌های متوالی یک قطعه تحت تغییر شکل در یک حوزه همبستگی نزدیک به ناحیه مورد نظر و تشخیص نقاط متناظر با بررسی شدت نور خاکستری آن‌ها استفاده می‌شود.

### ۳- شرح روش تجربی

ماده مورد آزمایش، ورقی از جنس آلومینیوم آلیاژی AA6061-O به ضخامت اولیه ۱/۳ میلی‌متر است. این ورق، دارای عمر خستگی و چقرمگی بالا، قابلیت ماشین‌کاری نسبتاً خوب، وزن سبک، استحکام بالا و قابلیت جوشکاری با انواع روش‌ها و شکل‌پذیری مطلوب است که کاربرد وسیعی در ساخت لوله‌های فلزی، تیرهای برق مرتفع، دیگ‌های بخار، ناوهای نظامی، بدنه فضاپیماها و روتور هلی‌کوپترها دارد. ترکیب شیمیایی این آلیاژ که تحت عملیات حرارتی آنیل قرار گرفته، در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلومینیوم آلیاژی AA6061-O

عنصر	Al	Cr	Cu	Fe	Mg
درصد	۹۵/۸	تا ۰/۰۴	تا ۰/۱۵	Max=۰/۷	تا ۰/۸
وزنی	تا ۹۸/۶	۰/۳۵	۰/۴		۱/۲

نمونه‌های آزمایش کشش تک‌محوره‌ی ورق، بر طبق استاندارد ASTM-E8 در زوایای صفر، ۴۵ و ۹۰ نسبت به جهت نورد با استفاده از دستگاه وایرکات از این آلیاژ برش شده، سپس روی سری اول نمونه‌ها با استفاده از اسپری سفید و مشکی، الگوی مش نامنظم تصادفی ایجاد شد. روی سری دوم از نمونه‌ها نیز، دایره‌هایی توپر به قطر ۳ میلی‌متر و فاصله مرکز تا مرکز ۸ میلی‌متر چاپ گردید. در شکل ۲، یک نمونه اولیه از هر سری از آزمون‌ها قبل از تغییر شکل به همراه ابعاد هندسی آن نمایش داده شده است.

در شکل ۳، اجزاء مختلف آزمون تجربی شامل نگهدارنده، دوربین، نمونه آزمون کشش و طول‌سنج نمایش داده شده است. آزمایش‌های کشش تک‌محوری، با استفاده از دستگاه آزمون کشش اینسترون ۸۸۰۲ به ظرفیت نامی ۲۵ تن و سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. برای اندازه‌گیری دقیق

### ۲- همبستگی تصاویر دیجیتال<sup>۱</sup>

یکی از روش‌هایی که می‌تواند نتایج بسیار دقیقی از اندازه‌گیری میزان کرنش در اختیار قرار دهد، استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال (DIC) است. تاکنون مقالات متعددی در مورد استفاده از روش DIC در اندازه‌گیری کرنش به ثبت رسیده است [۹-۱۳]. در این روش، با تصویربرداری از یک قطعه مسطح تحت کشش صفحه‌ای که بافت ظاهری آن دارای شبکه‌بندی است، میزان جابجایی و تغییر شکل در سطح به صورت صفحه‌ای استخراج می‌شود.

تغییر موقعیت یک المان مربعی از فریم اولیه به فریم کنونی، در شکل ۱ نمایش داده شده است. اگر  $G$  نقطه مرکز این مجموعه پیکسل مربوط به عکس مرجع باشد که پس از جابجایی به  $G^*$  جابجا می‌شود؛ رابطه بین مختصات این دو نقطه را می‌توان به صورت روابط (۴-۵) بیان کرد:

$$X^* = X + U(X, Y) \quad (4)$$

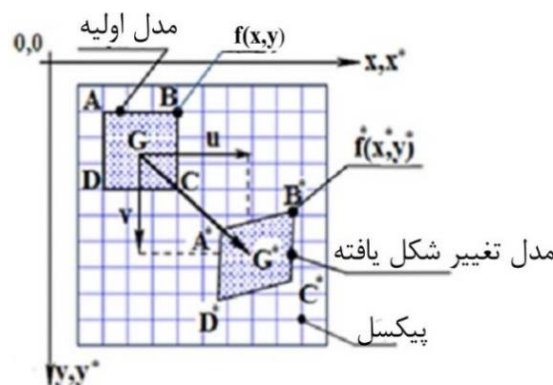
$$Y^* = Y + V(X, Y) \quad (5)$$

$U$  و  $V$  نشان‌دهنده، میدان جابجایی برای یک الگو است که به صورت روابط (۶-۷) تعریف می‌شود:

$$U(X, Y) = a_1X + a_2Y + a_3XY + a_4 \quad (6)$$

$$V(X, Y) = b_1X + b_2Y + b_3XY + b_4 \quad (7)$$

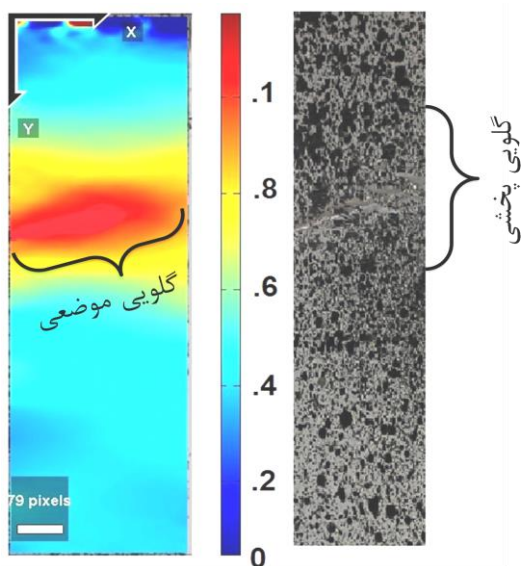
$a_4$  و  $b_4$  مربوط به حرکت جسم صلب و  $a_1, a_2, b_1, b_2$  مربوط به تغییر طول نمونه، همچنین ثوابت  $a_3$  و  $b_3$  مربوط



شکل ۱- تغییر موقعیت و ردیابی موقعیت لکه‌ها در روش همبستگی تصاویر دیجیتال

<sup>۱</sup> Digital Image Correlation (DIC)

همچنین شعاع کرنش<sup>۳</sup> برابر با ۵ پیکسل انجام و مقادیر کرنش و درنهایت میزان ضرایب ناهمسانگردی برای هر سه جهت صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای نورد تا رسیدن به لحظه گلویی شدن محاسبه و تعیین گردید که جزئیات روند تحلیل در مرجع [۱۴] بیان شده است. نمونه‌ای از قطعه کشیده شده از این سری آزمون در لحظه گلویی شدن برای نمونه هم‌جهت با راستای نورد، به همراه توزیع کرنش طولی به‌دست آمده، در شکل ۴ نمایش داده شده است.

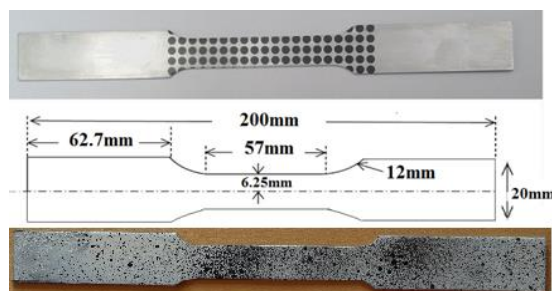


شکل ۴- نمونه مش‌بندی شده به روش تصادفی و توزیع کرنش طولی به‌دست آمده از روش DIC

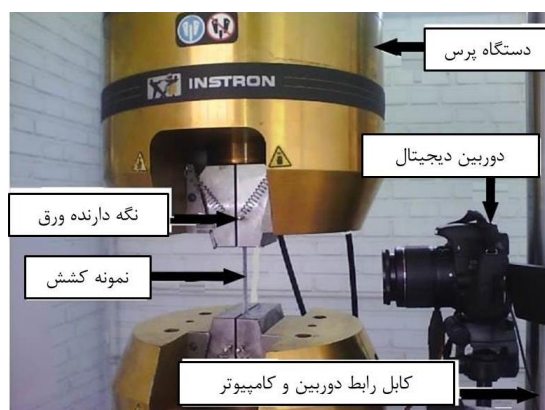
در روش دوم، به‌منظور بررسی صحت نتایج روش قبل و انتخاب شرایط بهینه از اندازه و فواصل لکه‌ها با استفاده از کد عددی ابتکاری نوشته شده در جعبه‌ابزار پردازش تصویر نرم-افزار متلب آنالیز تصاویر نمونه شبکه‌بندی شده به روش دایره‌ای منظم (شکل ۵) به شرح زیر اجرا شد. مرحله اول: گام نخست در الگوریتم پردازش تصویر، حذف نویز از تصاویر است. بدین منظور، در ابتدا تصاویر خوانده شده به‌صورت سیاه و سفید تبدیل می‌شود و سپس با اعمال فیلتر میانه<sup>۴</sup> نویزهای موجود در عکس از بین می‌رود.

<sup>3</sup> Strain radius  
<sup>4</sup> Medium filter

کرنش ضمن استفاده از طول‌سنج، از دوربین فیلم‌برداری دیجیتال با دقت ۱۴ مگاپیکسل و فیلم‌برداری با نرخ ۲۰۰ فریم بر ثانیه استفاده شد.



شکل ۲- ابعاد نمونه‌های برش شده در دو حالت مش‌بندی دایره‌ای منظم و مش‌بندی نامنظم تصادفی



شکل ۳- طرح آزمون کشش تک‌محوری و موقعیت اجزاء

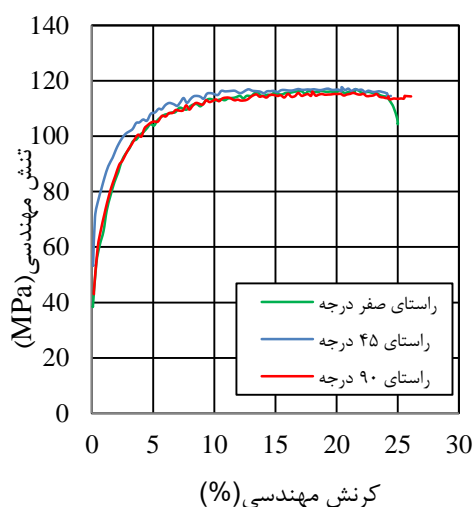
#### ۴- اندازه‌گیری مقادیر کرنش و ضرایب ناهمسانگردی

در این پژوهش، بررسی مقادیر کرنش و میزان ناهمسانگردی به روش همبستگی تصاویر دیجیتال با انجام دو سری آزمون انجام گردیده است. در روش اول، تحلیل کرنش آزمون کشش تک‌محوری روی نمونه با شبکه‌بندی تصادفی با استفاده از کد در نرم‌افزار متلب نسخه R2013a، با در نظر گرفتن شعاع ذرات<sup>۱</sup> برابر ۴۰ پیکسل، فاصله ذرات<sup>۲</sup> برابر ۵ پیکسل و

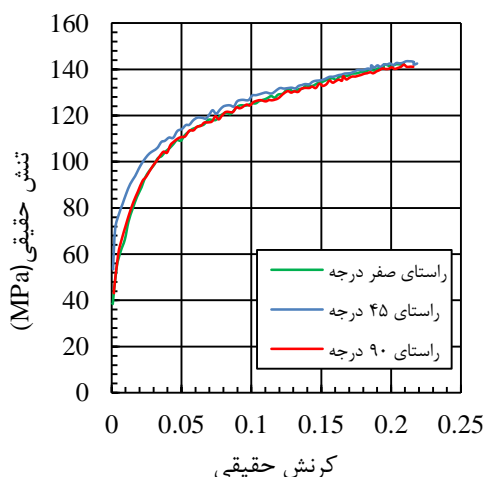
<sup>1</sup> Subset radius  
<sup>2</sup> Subset spacing

## ۵- ارائه‌ی نتایج

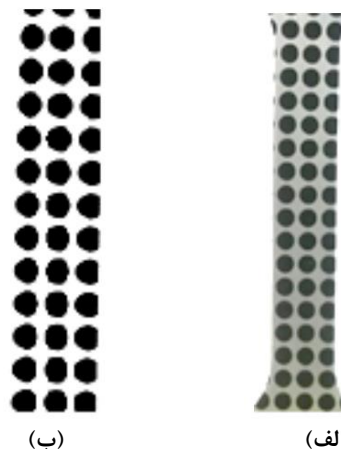
پس از انجام آزمایش کشش تک‌محوری، خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم AA6061-O شامل، منحنی‌های تنش-کرنش، مؤلفه‌های استحکام مکانیکی و کرنش سختی و ضرایب ناهمسانگردی با استفاده از استاندارد ASTM E517 در جهت‌های مختلف استخراج شد. شکل‌ها ۶ و ۷ به ترتیب، نمودارهای تنش-کرنش مهندسی و حقیقی این ورق را نشان می‌دهد.



شکل ۶- منحنی تنش و کرنش مهندسی برای نمونه‌های برش شده در سه جهت صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه آلیاژ AA6061-O



شکل ۷- منحنی تنش و کرنش حقیقی برای نمونه‌های برش شده در سه جهت ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه از آلیاژ AA6061-O



شکل ۸- آماده‌سازی تصویر در روش دوم (الگوی مش منظم)، (الف) تصویر اولیه، (ب) تصویر پس از آستانه‌گذاری و لبه‌یابی

مرحله دوم: به منظور کاهش حجم تحلیل با اعمال آستانه‌گذاری<sup>۱</sup> مناسب تصویرهای اصلی به فرمت باینری تبدیل می‌شود. در یک تصویر باینری، هر پیکسل تنها یکی از دو مقدار گسسته صفر و یک را اختیار می‌کند.

مرحله سوم: با استفاده از الگوریتم‌های که در محیط نرم‌افزار متلب ایجاد شده است، با افکنش<sup>۲</sup> در دو مرحله افقی و عمودی، محدوده اصلی تغییر شکل مشخص و شکل‌های متناظر در تصاویر متوالی شناسایی می‌شود.

مرحله چهارم: لبه تصاویر در واقع نقاطی بوده که در آن‌ها شدت روشنایی به‌طور ناگهانی تغییر می‌کند. با استفاده از دستوره‌های لبه‌یاب در این مرحله، لبه‌ها شناسایی و فاصله بین هر دو لبه استخراج می‌شود.

مرحله پنجم: در این مرحله، محاسبه کرنش‌ها و ضریب ناهمسانگردی پس از اندازه‌گیری تغییر طول و عرض لبه‌های قطعه بر حسب پیکسل انجام می‌گیرد. برای این هدف، مقادیر کرنش طولی و عرضی به ترتیب از روابط  $\epsilon_l = \ln \frac{l}{l_0}$  و  $\epsilon_w = \ln \frac{w}{w_0}$  محاسبه و کرنش ضخامتی از رابطه حجم ثابت به‌صورت  $\epsilon_t = -(\epsilon_w + \epsilon_l)$  محاسبه و درنهایت مقدار ضریب ناهمسانگردی برای هر فریم با استفاده از رابطه  $R = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t}$  محاسبه می‌شود. توضیح بیشتر انجام هر یک از مراحل، در مرجع [۱۵] بیان شده است.

<sup>۱</sup> Thresholding

<sup>۲</sup> Projection

می‌دهد. میزان ضریب ناهمسانگردی برای راستای ۴۵، بیش‌ترین و برای راستای ۹۰، کم‌ترین مقدار را دارد که این تفاوت به‌صورت مشابه در دیگر گزارش‌های علمی نیز تأیید شده است [۱۶]. همچنین کم بودن ضریب ناهمسانگردی  $R$  (بین ۰/۵ تا ۱) در ورق‌های آلومینیومی، نشان از تمایل بالای ورق مذکور به نازک شدن ضخامتی در فرآیندهایی مانند کشش عمیق خواهد داشت [۳].

در شکل ۸ به‌صورت نمونه، تفاوت در ضریب ناهمسانگردی ورق‌های فلزی در جهات مختلف نمایش داده شده است.

جدول ۳- پارامتر ناهمسانگردی  $R$  اندازه‌گیری شده با استفاده از روش سنتی

زاویه نسبت به نور (درجه)	$R$
۰	۰/۵۶
۴۵	۰/۶۵
۹۰	۰/۴۴

مطابق شکل‌های (۶-۷)، در ابتدا تغییر شکل تنش سیلان در جهت ۴۵، بیشتر از جهات ۰ و ۹۰ است که در ادامه از میزان این تفاوت کاسته می‌شود. در ادامه ثوابت مکانیکی جنس ماده از منحنی‌های فوق استخراج شده که نتایج در جدول ۲ گزارش شده است. در این جدول  $k$  و  $n$  به ترتیب، مقادیر ضریب سختی و توان کرنش سختی در معادله ساختاری  $\sigma = k\varepsilon^n$  است.

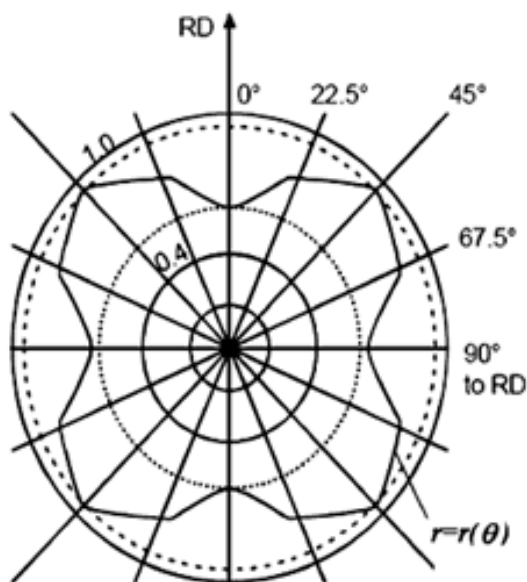
جدول ۲- خواص مکانیکی ورق AA6061-O

افزایش طول (%)	$n$	$k$ (MPa)	تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	زاویه نسبت به نور (درجه)
۲۵	۰/۲۳	۲۱۰	۱۱۷	۴۹/۹	۰
۲۴/۳۳	۰/۱۸	۱۹۱	۱۱۸	۷۳/۲	۴۵
۲۶/۹	۰/۲۳	۲۰۹	۱۱۶	۵۰/۳	۹۰

نتایج ارائه شده در جدول ۲، اختلاف موجود بین رفتار ورق را در راستای ۴۵ درجه نسبت به دو جهت دیگر آشکارا نمایش می‌دهد. تنش تسلیم اولیه در جهت ۴۵ درجه، بیش از ۴۰ درصد از جهات دیگر بیشتر است که با پیشرفت کرنش از میزان این اختلاف کم می‌شود، به‌گونه‌ای که تنش نهایی ورق در سه جهت مذکور، تقریباً با هم برابر خواهد بود.

### ۶- نتایج اندازه‌گیری ضرایب ناهمسانگردی

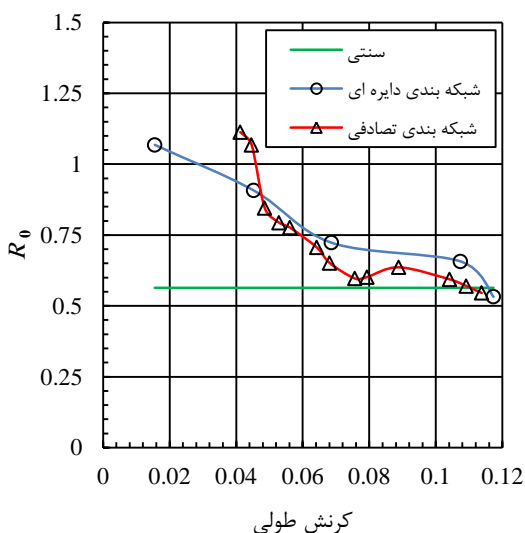
در این بخش، ضرایب ناهمسانگردی ورق به سه روش مورد محاسبه قرار گرفت. در روش اول با استفاده از استاندارد ASTM E517 که روش سنتی و متداول در اندازه‌گیری این ضرایب است، پس از ۱۰ درصد افزایش طول نسبی، تغییر ابعادی نمونه در جهات طولی و عرضی اندازه‌گیری و از رابطه ۱ ضریب ناهمسانگردی محاسبه شد. در روش دوم و سوم، با استفاده از پیوستگی تصاویر دیجیتال به ترتیب با شبکه‌بندی منظم و تصادفی که در بخش چهارم شرح آن ذکر شد، پارامتر ناهمسانگردی  $R$  محاسبه گردید. جدول ۳، مقادیر ضرایب ناهمسانگردی که با استفاده از روش اول (سنتی) به ازای کرنش ۱۰ درصد به دست آمده نشان



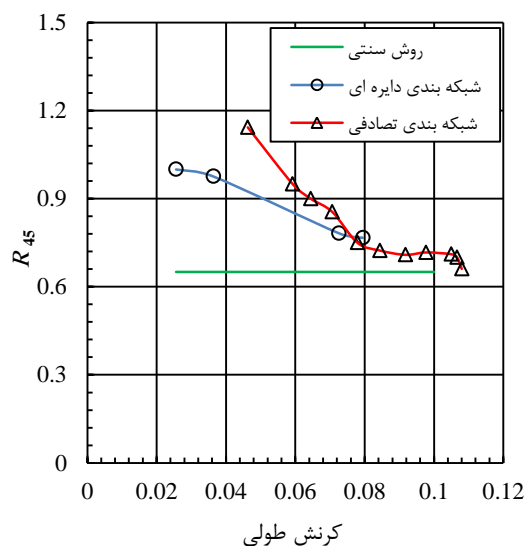
شکل ۸- تغییرات ضریب ناهمسانگردی ورق‌های فلزی بر روی صفحه ورق در جهات مختلف [۱۶]

در شکل ۹، تغییرات ضریب ناهمسانگردی  $R_0$  برحسب کرنش طولی که با استفاده از روش سنتی و روش همبستگی

تصادفی نمایش داده شده است؛ لذا می‌توان نتیجه گرفت، نتایج حاصل از روش همبستگی تصاویر دیجیتال در حالت الگوی نامنظم تصادفی، دارای دقت و صحت بیشتری نسبت به مش منظم است؛ زیرا در این روش به علت کوچک بودن



شکل ۹- تغییرات ضریب ناهمسانگردی  $R_0$  برحسب کرنش طولی، محاسبه شده از روش سنتی، الگوی مش بندی منظم و تصادفی



شکل ۱۰- تغییرات ضریب ناهمسانگردی  $R_{45}$  برحسب کرنش طولی نمونه، محاسبه شده از روش سنتی، الگوی مش بندی منظم و تصادفی

تصاویر دیجیتال در دو نوع الگو فوق‌الذکر محاسبه شده، مشاهده می‌شود.

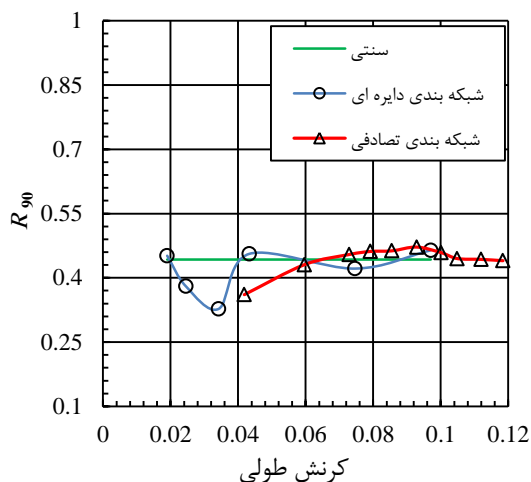
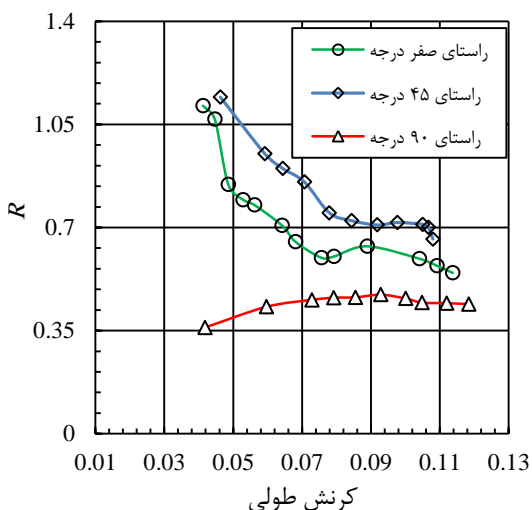
مطابق شکل، افزایش کرنش موجب کاهش ضریب ناهمسانگردی لحظه‌ای در راستای صفر می‌شود که تا رسیدن به کرنش طولی ۰/۱۲، این مقدار با مقدار محاسبه شده از روش سنتی برابری خواهد کرد. بر این اساس، می‌توان قضاوت کرد که استفاده از روش سنتی در تحلیل فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی به ازای کرنش‌های کوچک، دارای خطا است. به‌عنوان مثال، در فرآیند خم‌کاری ورق به ضخامت  $t$ ، روی شعاع قالب  $\rho$  که میزان کرنش از رابطه  $\varepsilon = \frac{t}{2\rho}$  محاسبه می‌شود؛ مادامی که نسبت خم  $\frac{\rho}{t}$  بزرگ‌تر از ۵ باشد؛ کرنش طولی از ۰/۱۲ کوچک‌تر و ضریب ناهمسانگردی واقعی از ضریب ناهمسانگردی سنتی بیشتر خواهد بود. همچنین از شکل ۹ برمی‌آید که الگوی مش تصادفی در کرنش ۰/۱ با دقت بیشتری با نتایج اندازه‌گیری سنتی منطبق خواهد شد. در شکل ۱۰، تغییرات ضریب ناهمسانگردی  $R_{45}$  برحسب کرنش طولی که با استفاده از روش سنتی و روش همبستگی تصاویر دیجیتال ارائه شده است.

تغییرات ضریب ناهمسانگردی در جهت ۴۵ درجه نسبت به نورد، با افزایش کرنش طولی با روندی نزولی به سمت ضریب ناهمسانگردی استخراج شده توسط روش سنتی پیش می‌رود. همچنین ضرایب ناهمسانگردی در مش تصادفی نامنظم، بالاتر از مقدار مش منظم به دست آمده است که به نظر می‌رسد، به مقدار واقعی نزدیک‌تر باشد. علت این خطا در روش مش منظم، به علت بزرگ‌تر بودن ناحیه شعاع اندازه‌گیری نسبت به مش تصادفی خواهد بود.

ضریب ناهمسانگردی در جهت ۹۰ درجه مطابق شکل ۱۱، حالتی نوسانی را پیرامون ضریب ناهمسانگردی حاصل از روش سنتی دارد. این ضریب با عبور کرنش طولی از مقدار ۰/۱ با نوسان تقریباً کم و یکنواخت، با مقدار سنتی برابر می‌شود. نتایج مشابه در خصوص رفتار نوسانی ضریب ناهمسانگردی با افزایش کرنش برای ورق آلومینیومی AlMg4.5Mn0.7 در مرجع [۳] ارائه شده است.

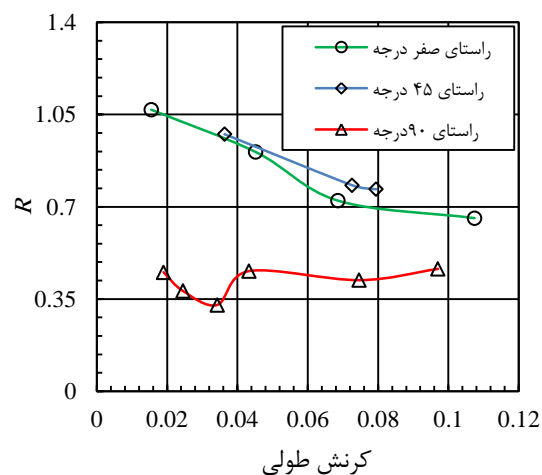
به جهت جمع‌بندی نتایج فوق، در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ تغییرات ضریب ناهمسانگردی در روش همبستگی تصاویر دیجیتال در جهات مختلف با افزایش کرنش طولی در نمونه‌هایی با دو نوع شبکه‌بندی به ترتیب دایره‌های منظم و

است و همچنین ضریب ناهمسانگردی صفحه‌ای  $\Delta R$  که معرف میزان متوسط تفاوت در خواص درون صفحه‌ای ورق است، با در اختیار داشتن مقادیر ضرایب در جهات مختلف نسبت به کرنش از رابطه ۲ و ۳ قابل محاسبه است که نتایج در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ گزارش شده است.

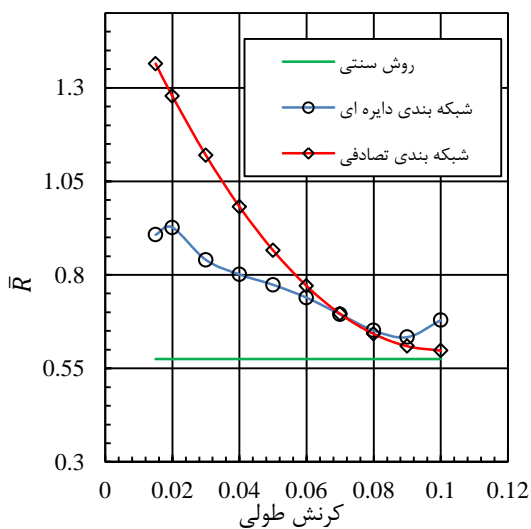


شکل ۱۱- تغییرات ضریب ناهمسانگردی  $R_{90}$  برحسب کرنش طولی، محاسبه‌شده از روش سنتی، الگوی مش بندی منظم و تصادفی

شکل ۱۳- تغییرات ضریب ناهمسانگردی  $R$  در سه جهت نسبت به راستای نورد، برحسب کرنش طولی، محاسبه‌شده از الگوی مش تصادفی



شکل ۱۲- تغییرات ضریب ناهمسانگردی  $R$  در سه جهت نسبت به راستای نورد، برحسب کرنش طولی، محاسبه‌شده از الگوی مش دایره‌ای منظم



شکل ۱۴- تغییرات ضریب ناهمسانگردی نرمال  $\bar{R}$  نسبت به کرنش طولی، محاسبه‌شده از روش سنتی، الگوی مش بندی منظم و تصادفی

شعاع حوزه همبستگی نسبت به مش منظم، تعداد نقاط قابل بررسی بسیار بیشتر بوده، در نتیجه ضریب ناهمسانگردی به صورت محلی قابل اندازه‌گیری است؛ در حالی که در مش منظم، تعداد نقاط قابل اندازه‌گیری محدود به تعداد دایره است.

ضریب ناهمسانگردی نرمال  $\bar{R}$  که بیان‌کننده متوسط تفاوت خواص در جهت عمود، نسبت به جهات مماس بر ورق



به‌منظور بررسی نحوه رشد سطح تسلیم در ورق آلومینیوم AA6061-O، در ابتدا فرض شد که ورق از معیار هیل ۴۸ تبعیت می‌کند. رابطه تنش معادل این معیار در شرایط تنش صفحه‌ای، به شکل رابطه ۱۰ است.

$$\sigma_1^2 - \frac{2R_0}{1+R_0}\sigma_1\sigma_2 + \frac{R_0(1+R_{90})}{R_{90}(1+R_0)}\sigma_2^2 = \sigma_0^2 \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)،  $\sigma_1$  و  $\sigma_2$  مقدار تنش‌های اصلی و  $\sigma_0$  برابر با مقدار تنش تسلیم در جهت مرجع است که در این پژوهش، منطبق بر راستای نورد در نظر گرفته شده است. اگر تنش تسلیم در راستای صفر و ۹۰ درجه نسبت به راستای نورد به ترتیب برابر با  $\sigma_{y_0}$  و  $\sigma_{y_{90}}$  باشد، می‌توان نوشت:

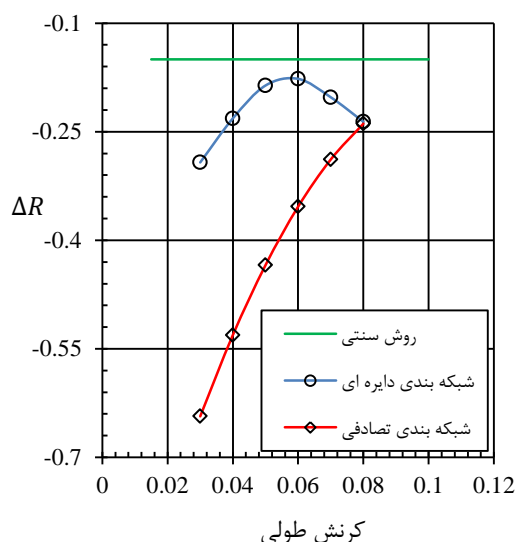
$$\sigma_{y_{90}} = \sigma_{y_0} \sqrt{\frac{R_{90}(1+R_0)}{R_0(1+R_{90})}} \quad (11)$$

تنش تسلیم در بارگذاری، دو محور یکسان را نشان می‌دهند. با استفاده از معیار تسلیم فوق‌الذکر و رابطه  $\sigma_b = \sigma_1 = \sigma_2$  می‌توان رابطه ۱۲ را به دست آورد:

$$\sigma_b = \sigma_{y_0} \sqrt{\frac{(1+R)}{2}} \quad (12)$$

در جدول ۴، برای چهار مرحله A تا D از تغییر شکل به ازای مقادیر مختلف کرنش  $\varepsilon$  و ضریب ناهمسانگردی  $\bar{R}$ ، مؤلفه‌های تنش سیلان در دو جهت صفر و ۹۰ درجه ( $\sigma_{y_0}$  و  $\sigma_{y_{90}}$ ) و تنش تسلیم در بارگذاری دومحوری یکسان  $\sigma_b$  مشاهده می‌شود که از روابط ۱۰ تا ۱۲ محاسبه شده است. در ستون‌های دیگر جدول ۴ که با مشخص شده، تغییرات مؤلفه‌های تنش نسبت به حالت A گزارش شده است که پارامتری برای بیان میزان سخت‌شوندگی در مسیرهای مختلف از تغییر شکل صفحه‌ای است. همچنین در شکل ۱۶، مکان هندسی سطح تسلیم هیل ۴۸ در صفحه تنش  $\sigma_1$  و  $\sigma_2$ ، در چهار حالت ذکر شده در جدول ۴ مشاهده می‌شود. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شود، با افزایش میزان کرنش از حالت A تا D، به‌تبع پدیده کرنش سختی، رشد سطح تسلیم و افزایش قطر بزرگ و کوچک بیضی رخ خواهد داد. البته باید به این نکته توجه داشت که با افزایش کرنش از حالت A تا D، ضریب ناهمسانگردی در این ورق، کمتر و در نتیجه نسبت قطر بزرگ به کوچک بیضی کمتر و در نتیجه، شکل کلی بیضی به دایره نزدیک‌تر می‌شود. در خصوص نحوه و میزان سخت‌شوندگی در جهات مختلف می‌توان نتیجه‌گیری کرد؛ اولاً ورق در تمام جهات رفتاری سخت‌شونده دارد، ثانیاً

همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، افزایش کرنش طولی، باعث کاهش در مقدار ضریب ناهمسانگردی نرمال می‌شود و این پارامتر با افزایش کرنش طولی به سمت مقدار استخراج شده از روش سنتی حرکت می‌کند و در کرنش ۰/۱، کم‌ترین اختلاف را با مقدار سنتی دارد.



شکل ۱۵- تغییرات ضریب ناهمسانگردی صفحه‌ای  $\Delta R$  نسبت به کرنش طولی، محاسبه‌شده از روش از مش تصادفی

مطابق شکل ۱۵، افزایش کرنش طولی موجب کاهش ناهمسانگردی صفحه‌ای خواهد شد. بر این اساس، نتیجه می‌شود، شدت پدیده‌های متأثر از ناهمسانگردی صفحه‌ای مانند گوشواره شدن متأثر از میزان کرنش محصول نیز است. در مجموع از نتایج روش DIC با مش تصادفی می‌توان نتیجه گرفت که با اعمال ۱۰ درصد کرنش طولی در ورق، ضریب ناهمسانگردی نرمال و قدر مطلق ناهمسانگردی صفحه‌ای به ترتیب، ۵۱ درصد و ۶۳ درصد کاهش می‌یابد. رابطه ضرایب ناهمسانگردی ورق با کرنش اعمالی را می‌توان به صورت روابط (۸-۹) ارائه نمود:

$$\bar{R} = 104.56\varepsilon^2 - 21.05\varepsilon + 1.66 \quad (8)$$

$$\Delta R = -78.45\varepsilon^2 + 16.72\varepsilon - 1.07 \quad (9)$$

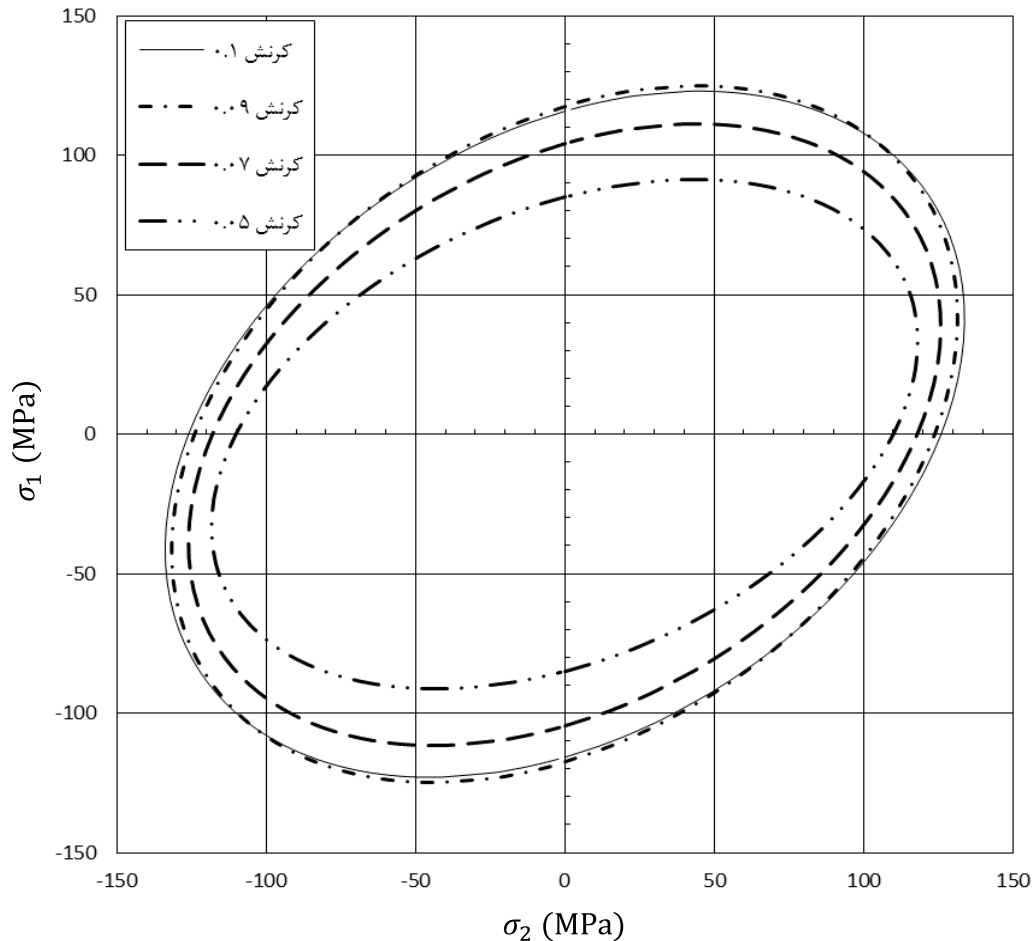
#### ۷- نحوه رشد سطح تسلیم (سخت‌شوندگی)

۰/۰۹، رشد سطح تسلیم و سخت‌شوندگی ورق در حال متوقف شدن است؛ لذا در قالب یک نتیجه کلی می‌توان بیان داشت، این ورق دارای رفتار سخت‌شوندگی مومسان کاملاً ناهمسانگرد است.

میزان سخت‌شوندگی در جهت عمود بر جهت نورد بیشترین شدت را از خود نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که رشد سطح تسلیم در این جهت، تقریباً دو برابر جهت نورد و ۱/۵ برابر جهت کشش دو محوری یکسان است. با رسیدن به کرنش

جدول ۴- مقادیر تنش سیلان ورق آلومینیوم AA6061-O در جهات مختلف، به ازای مقادیر مختلف کرنش موثر

	$\varepsilon$	$\bar{R}$	$\sigma_{y_0}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{y_0}$ (MPa)	$\sigma_{y_{90}}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{y_{90}}$ (MPa)	$\sigma_b$ (MPa)	$\Delta\sigma_b$ (MPa)
A حالت	۰/۰۵	۰/۸۷	۱۱۰	۰	۸۵/۷	۰	۱۰۶/۳۶	۰
B حالت	۰/۰۷	۰/۷	۱۱۸	۸	۱۰۴	۱۸/۳	۱۰۸/۷۹	۲/۴۳
C حالت	۰/۰۹	۰/۶۱	۱۲۴	۱۴	۱۱۷	۳۱/۳	۱۱۱/۲۶	۴/۹
D حالت	۰/۱	۰/۶	۱۲۶	۱۶	۱۱۷/۵	۳۱/۸	۱۱۲/۷	۶/۳۴



شکل ۱۶- تغییرات سطح تسلیم آلیاز در چهار سطح کرنش مختلف، بر اساس معیار تسلیم هیل ۴۸

## ۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تغییرات خواص ناهمسانگردی و همچنین تغییر شکل سطح تسلیم هیل ۴۸ ورق AA6061-O با اعمال کرنش روی یک نمونه کشش تک‌محوری با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال در دو حالت الگوی دایره‌ای منظم و تصادفی نامنظم، مورد ارزشیابی قرار گرفت که نتایج زیر حاصل گردید:

۱- با افزایش کرنش نمونه در راستای نورده، ضریب ناهمسانگردی روند کاهشی از مقدار ۱ تا ۰/۵۶ از خود نمایش می‌دهد. در کرنشی برابر با ۰/۱۲، میزان ناهمسانگردی به مقدار اندازه‌گیری شده به روش سنتی خواهد رسید. به صورت مشابه برای نمونه راستای ۴۵ نیز، روند نزولی تغییرات ضریب ناهمسانگردی از ۱ تا ۰/۷۵ مشاهده می‌شود. برای نمونه عمود بر جهت نورده، تغییرات  $R$  حول مقدار سنتی نوسانی دارد.

۲- مقادیر ضریب ناهمسانگردی اندازه‌گیری شده به روش سنتی، در کرنش‌های کوچک، دارای خطای قابل توجهی نسبت به واقع است. به همین دلیل، استفاده از روش سنتی برای محاسبه ضریب ناهمسانگردی، در تحلیل فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی در این محدوده از کرنش (مانند خم‌کاری بر شعاع بزرگ قالب)، دارای خطا می‌باشد.

۳- ضریب ناهمسانگردی نرمال ورق  $\bar{R}$ ، با افزایش کرنش، با روند نسبتاً خطی از ۱/۳ تا ۰/۶۳ کاهش می‌یابد. این در حالی است که با افزایش کرنش طولی، قدر مطلق ناهمسانگردی صفحه‌ای  $|\Delta R|$ ، روند نزولی از خود نشان می‌دهد.

۴- مقایسه میزان رشد تنش سیلان ورق در جهات مختلف از تغییر شکل صفحه‌ای، حکایت از سخت‌شوندگی مومسان غیرهمسانگرد برای این ورق دارد.

بررسی رشد سطح تسلیم بر اساس معیار هیل ۴۸ نشان داد، اگر چه ورق در تمام جهات رفتاری سخت‌شونده دارد، ولی با افزایش میزان کرنش پلاستیک، نسبت قطر بزرگ به کوچک بیضی تسلیم کمتر و از ناهمسانگردی کاسته می‌شود. میزان سخت‌شوندگی در جهت عمود بر جهت نورده بیش‌ترین شدت و در جهت نورده کم‌ترین شدت را دارد. رشد سطح تسلیم در جهت نورده تقریباً دو برابر جهت نورده ۱/۵

برابر جهت کشش دومحوری یکسان است. با رسیدن به کرنش ۰/۰۹، رشد سطح تسلیم و در نتیجه سخت‌شوندگی ورق متوقف می‌شود. در قالب یک نتیجه کلی می‌توان بیان داشت، ورق AA6061-O مورد استفاده در این تحقیق، دارای رفتار سخت‌شوندگی مومسان کاملاً ناهمسانگرد است.

## ۹- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله قدردانی ویژه خود را از جناب آقای دکتر محمدباقر نظری، عضو محترم هیئت‌علمی دانشگاه صنعتی شاهرود جهت مساعدت در اجرای آزمون‌های تجربی اعلام می‌دارند.

## ۱۰- مراجع

- [1] Farge E, Fri G (2013) Accessed 20 September; <http://www.Reuters.com>.
- [2] Banabic D (2009) Sheet metal forming processes. Springer, Berlin.
- [3] Aleksandrovic S, Stefanovic M, Adamovic D, Lazic V (2009) Variation of normal anisotropy ratio  $r$  during plastic forming. *Strojnikivestnik* 55(6): 392-399.
- [4] Hosford WF, Caddell RM (2007) Metal forming: mechanics and metallurgy. 3rd edn. New York, Cambridge.
- [5] Trzepieciniski T (2010) 3D Elasto-plastic FEM analysis of the sheet drawing of anisotropic steel sheet. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 10(4): 95-106.
- [6] Kosareenia E, Alizadeh Y (2008) Study of normal anisotropic effect in metallic sheets on formability problems. Proc. 10th Conf. Manufacturing and Production Engineering, Babol, Iran. (In Persian)
- [7] Sorkhabi A.H, Ghaneipour A.K (2012) Measurement of strain in tensile test by video processing, Iran eleventh Student Conference on Electrical Engineering, Kashan, Iran. (In Persian)
- [8] Khalili K, Eftekhari shahri Ehsan (2003) The use of image processing techniques for automatic calculation of local strain. ISME16, Kerman, Iran.
- [9] Li X (2000) Spatial characterization of unstable plastic flows in two aluminum alloys. PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Yale University, New Haven, CT.
- [10] Schreier HW, Braasch JR, Sutton MA (2000) Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation. *Opt. Eng.* 39, 2915-2921.

- [13] Rommel C, Victor S (2008) Strain measurements with the digital image correlation system Vic-2D. System, 106: p. 2D.
- [14] [http://www.ncorr.com/ncorrmanual\\_v1\\_2.pdf](http://www.ncorr.com/ncorrmanual_v1_2.pdf)
- [15] Gonzalez RC, Wintz P (1987) Digital image processing. Addison-Wesley Publishing Company: 275-281.
- [16] Siegert K, TALAT Lecture 3705, <http://www.eaa.net/ea/education/TALAT/index.htm>
- [11] Tong W, Zhang N (2001) An experimental investigation of necking in thin sheets. Proc. ASME Manufacturing Engineering Division MED, New York, A12.
- [12] Vacher P, Haddad A, Arrieux R (1999) Determination of the forming limit diagrams using image analysis by the correlation method. CIRP Annals-Manufacturing Technology 48(1): 227-230.