



## مطالعه عددی اثر ورق گیر جانبی و روش پیش‌روی در آزمون شیار فرآیند شکل‌دهی نموی بر کاهش نیروهای وارد بر کلگی دستگاه

منوچهر محمدحسینی میرزائی<sup>۱\*</sup> و بهزاد سلطانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، گروه مکانیک جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مکانیک جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۳/۱۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۱۱/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۱۷

### چکیده

در این مطالعه، روش‌های متداول آزمون شیار در شکل‌دهی نموی با رویکرد تحلیل نیروهای وارد شده به کلگی ماشین CNC، به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی شده است. در ابتدا، تحلیل اجزای محدود به کمک نرم‌افزار آباکوس مطابق با پژوهشی عملی، انجام و اعتبارسنجی شد. در تحلیل، ابزار و ورق گیر اجسامی صلب و ورق، انعطاف‌پذیر فرض گردیدند. سپس استفاده از ورق گیر جانبی به کمک مقید کردن لبه‌های جانبی ورق، مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد که استفاده از ورق گیر جانبی، سبب افزایش نیرو می‌شود؛ هرچند تعداد رفت و برگشت ابزار به نصف کاهش می‌یابد و با یکبار رفت و برگشت، ابزار آزمون شیار کامل می‌شود؛ همچنین به کمک روش باردهی شیب‌دار، برای جلوگیری از رخداد قله‌های نیرویی آسیب‌زا به دستگاه، می‌توان این آزمون را با هزینه کمتر انجام داد. مثلاً برای ورق AA 7075-O با طول شکل‌دهی ۸۰ mm بین دو گام متفاوت ۰/۲۵ mm با دوبار رفت و برگشت و ۰/۵۰ mm با یکبار رفت و برگشت، وضعیت باردهی با شیب کمتر همراه با دوبار رفت و برگشت، نیروی عمودی قله بیشینه کمتر است و برای ماشین CNC با ظرفیت نیرویی کمتر، بسیار مناسب‌تر است.

**کلمات کلیدی:** شکل‌دهی نموی؛ آزمون شیار؛ شبیه‌سازی اجزای محدود؛ نیروی شکل‌دهی.

## Numerical Study of Side Fixture and Feed Rate Method for Decrease of Force Imposed by Spindle of Machine on the Incremental Forming Groove Test

M. Mohammad Hosseini Mirzaei<sup>1,\*</sup>, B. Soltani<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Department of Solid Mechanics, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.

<sup>2</sup> Assistant Prof., Department of Solid Mechanics, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.

### Abstract

In this study, conventional methods of the groove test on an incremental forming process by finite element method have been investigated in order to analyze the forces imposed by the spindle of CNC machine. Initially, the finite element method analysis using ABAQUS software was validated by empirical research in the published paper. In this analysis, tool and clamping are supposed rigid body and the sheet is deformable body. When using the side fixture for constraining of side edge of sheet was investigated, it was found that the use of the side fixture increase force between 2 to 2.5 times. However the number of tool sweeps would be halved and groove test would be completed with 1 tool sweep. Also by smoothly graded loading for prevention of traumatic force peaks to the machine, this test can be done at a lower cost. For example, for AA7075-0 sheet with 80mm forming path between two different steps 0.25 with 2 sweeps and 0.5mm with 1 sweep, using lower slope and 2 tool sweeps, the maximum vertical force peaks decrease and process is very proper for low load capacity CNC machine.

**Keywords:** Incremental Forming; Groove Test; Finite Element Simulation; Forming Force.

## ۱- مقدمه

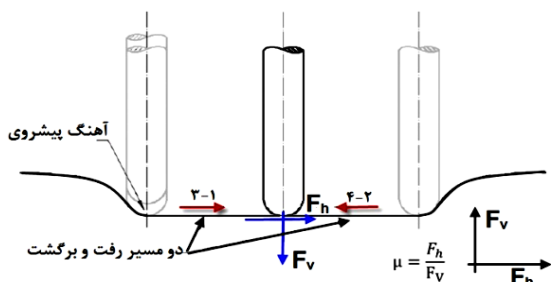
یکی از روش‌های شکل‌دهی ورق که امروزه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و در صنایعی چون، صنایع خودروسازی، صنایع فضایی و وسایل پزشکی و غیره کاربرد دارد، شکل‌دهی نموی است. در این روش که برای شکل‌دهی قطعات پیچیده استفاده می‌شود، نیازی به قالب و هزینه‌های بالای آن نیست، بلکه از دستگاه CNC و ابزار مخصوص آن برای شکل‌دهی استفاده می‌شود. این روش با توجه به مقرون به صرفه بودن آن جهت تحقیق و توسعه<sup>۱</sup> بسیار مناسب است. از این روش بیشتر برای ساخت نمونه‌های اولیه و قطعات با تعداد کم استفاده می‌شود زمان لازم برای این شکل‌دهی، بیشتر از روش‌های معمول است [۱]. در روش شکل‌دهی نموی برای بررسی پارامترهای موثر در شکل‌دهی و همچنین به‌دست آوردن منحنی حد شکل‌دهی که در آن شکست ورق اتفاق می‌افتد، از آزمون شیپار<sup>۲</sup> استفاده می‌کنند [۲]. در این آزمایش، یک باریکه‌ای از ورق مد نظر برش داده، در یک نگهدارنده قرار می‌دهند و با ابزاری که شکل‌دهی با آن صورت می‌گیرد، شیپاری روی ورق ایجاد کرده، عمق شیپار را تا حدی زیاد می‌کنند تا شکست در قطعه رخ دهد و سپس کرنش‌های کمینه و بیشینه را در نمونه آزمون اندازه‌گیری می‌کنند تا نمودار حد برای جنس مورد نظر مشخص شود. ابزار شکل‌دهی ممکن است، بدون چرخش باشد که در این حالت، ابزار به‌صورت آزادانه حرکت می‌کند که این امر به‌منظور جلوگیری از اصطکاک لغزشی و تبدیل آن به اصطکاک غلتشی است. کیم و پارک [۳]، تأثیر پارامترهای فرآیند همچون، نوع ابزار، اندازه ابزار، اصطکاک در میان سطوح ابزار و ورق و ناهمگنی سطحی ورق را روی قابلیت شکل‌پذیری توسط آزمایش‌های تجربی و تحلیل‌های اجزای محدود بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که اصطکاک کمتر بین ابزار و ورق، به شکل‌دهی بهتر کمک می‌کند. آتاناسیو و همکاران [۴]، نشان دادند که برای ایجاد کیفیت سطح و دقت هندسی مناسب، تنظیم هوشمندانه مسیر ابزار با گام مناسب با توجه به هندسه قطعه مهم است. کارینو و همکاران [۵]، تأثیر قطر ابزار را بر این فرآیند مطالعه کردند و

نشان دادند که با کاهش قطر ابزار، تولید قطعات پیچیده ممکن و آسان‌تر شده، نیروی شکل‌دهی کاهش خواهد یافت. آمبراجیو و همکارانش [۶]، از یک تحلیل آماری برای تأثیر پارامترهای مختلف بر دقت شکل‌دهی استفاده کردند. آمبراجیو و همکاران و فیلیک و همکاران [۷و۶]، به این نتیجه رسیدند که بررسی بارهای شکل‌دهی، مهم بوده، تحت نظارت قرار دادن نیروها می‌تواند ابزار مناسبی برای کنترل و پیش‌بینی فرآیند باشد. راج و همکارانش [۸]، به بهینه‌سازی مسیر ابزار به منظور کاهش نیروی مصرفی به‌صورت تجربی پرداخته‌اند. بارانی شولی و همکاران [۹]، به کمک آزمایش، حد شکل‌پذیری آلیاژ تیتانیومی خاصی را در دمای بالا مورد مطالعه قرار دادند. قاسمی و سلطانی، به مطالعه تجربی پارامترهای موثر بر نیروی شکل‌دهی، دقت ابعادی و توزیع ضخامت در فرآیند شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای پرداختند. آنان آزمایش‌هایی را روی ورقی از جنس آلومینیوم (AL-1200) با ایجاد یک هرم ناقص انجام دادند و سپس نیروها را در جهت‌های مختلف اندازه گرفتند و تأثیر پارامترها را بر نیروی شکل‌دهی بررسی کردند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که افزایش سرعت پیشروی ابزار، نیروی عمودی را کاهش می‌دهد و با افزایش سرعت چرخش، نیروی افقی کاهش می‌یابد و استفاده از روان‌کار در بهبود فرآیند، تأثیرگذار بوده است [۱۰].

کلیه مطالعات فوق و کارهای انجام شده قبلی دیگر، محدودیت‌های نیرویی دستگاه‌ها را بررسی نکرده‌اند؛ چرا که از نظر صنعتی و کاربردی، دستگاه‌های CNC قدیمی که دارای محدودیت نیرویی و دورانی کلگی و ابزار هستند به علت محدودیت‌های برنامه‌ای و نرم‌افزاری برای ماشینکاری بسیار کم کاربرد شده، برای انجام فرآیند شکل‌دهی نموی که فرآیند زمانبری است، بخوبی مقرون به صرفه به نظر می‌رسند. این دستگاه‌ها محدودیت نیرویی و سرعت چرخش ابزار داشته، به محض اینکه نیرویی بیشتر از حد مجاز به نسبت سرعت دوران ابزار به کلگی آن وارد شود، به راحتی از دقت خارج شده، باید کاربر کلگی دستگاه را دوباره کالیبره و تنظیم نماید. در بیشتر کارگاه‌های بزرگ اکثر این دستگاه‌ها از رده خارج محسوب شده، موارد بسیار مناسبی برای استفاده در فرآیند شکل‌دهی نموی به‌نظر می‌رسند و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشند. در این دستگاه‌ها در

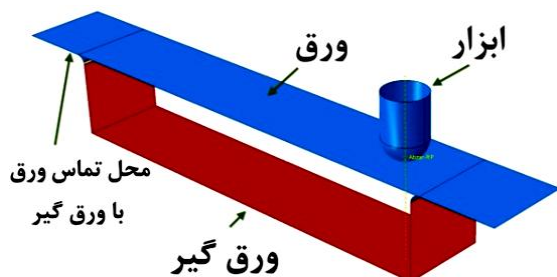
<sup>1</sup> R&D<sup>2</sup> Groove Test

ورق،  $140\text{ mm}$  و عرض آن،  $20\text{ mm}$  انتخاب شده است. مسیر ابزار آزمون شیار به صورتی تعیین شده است که ابزار ابتدا به اندازه  $0.5\text{ mm}$  روی ورق به صورت عمودی فشار وارد کند و سپس در راستای طول ورق به اندازه  $80\text{ mm}$  حرکت کند و سپس همین مسیر را بدون تغییر مکان عمودی اضافه، برگردد و این رفت و برگشت را یک بار دیگر نیز انجام دهد و همزمان نیروهای عمودی و افقی وارد بر ابزار در طی حرکت افقی اندازه‌گیری شود (شکل ۱). این شرایط کاملاً با آزمون شیار انجام شده در منبع [۲] مطابقت دارد. نسبت نیروی افقی به نیروی عمودی، برابر ضریب اصطکاک بین سطح و ابزار است. لازم به ذکر است که سرعت پیشروی ابزار برابر  $1000\text{ mm}$  در دقیقه بوده، ابزار حرکتی حول محور خود ندارد.



شکل ۱- طرح‌واره مسیر حرکت ابزار در آزمون شیار

در این تحلیل، ورق روی یک ورق‌گیر صلب قرار گرفته، از دو طرف کاملاً ثابت بوده، هیچ حرکتی ندارد. ابزار در نقطه‌ایی شکل‌دهی خود را آغاز می‌کند که از لبه نگهدارنده به اندازه  $10\text{ mm}$  و از وسط ورق به اندازه  $40\text{ mm}$  فاصله دارد. در شکل ۲، طرح‌واره‌ای از مدل مشاهده می‌شود.



شکل ۲- مدل‌سازی آزمون شیار در نرم‌افزار آباکوس

بیشتر مواقع پارامترهایی وجود دارد که به ازای سرعت خاصی از ابزار می‌توان نیروی مخصوص به همان سرعت را به کَلگی وارد کرد که به محض افزایش نیروی اعمالی به کَلگی سنج عملکرد دستگاه وارد منطقه قرمز شده، بدون در نظر گرفتن اختراهای دستگاه، کالیبراسیون آن‌ها از بین خواهد رفت و کاربر باید دوباره با صرف زمان نسبتاً زیاد، دستگاه را کالیبره نماید. در برخی از دستورالعمل‌های دستگاه‌ها، حدود نیروهای اعمالی به کَلگی در سرعت‌های متفاوت چرخش ابزار ذکر شده است.

در این مطالعه، به کمک نرم‌افزار آباکوس با تحلیل آزمون شیار در دو وضعیت با ورق‌گیر جانبی و بدون ورق‌گیر جانبی، نیروهایی که به کَلگی دستگاه CNC وارد می‌شوند، بررسی و مقایسه گردیده، وضعیت بهتر از لحاظ نیروی وارده به کَلگی دستگاه گزارش شده است؛ همچنین در ادامه دو وضعیت پیشروی ابزار در آزمون شیار بررسی شده است. قابل ذکر است که این نتایج برای انجام آزمون شیار برای گستره زیادی از ورق‌های با ضخامت‌ها و جنس‌های متفاوت، بسیار با اهمیت و مهم می‌گردند. این مطالعه می‌تواند در واقع بخشی از امکان‌سنجی پروژه مهمتری باشد که در آن لازم می‌شود، این آزمون برای تعداد زیادی ورق، از لحاظ جنس، شرایط و ضخامت انجام پذیرد. پس سرعت انجام آزمون و استفاده حداکثری از حداقل امکانات، بسیار با اهمیت و اقتصادی به نظر می‌رسد. برای اعتبارسنجی، خروجی نرم‌افزار با داده‌های موجود در منبع [۲] مقایسه می‌شوند. در این مطالعه، به مدل‌سازی فرایند آزمون شیار در نرم‌افزار آباکوس پرداخته شده، پس از مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج عملی موجود در مقاله دورانت و همکاران [۲] جهت اعتبارسنجی تحلیل، با اضافه نمودن ورق‌گیرهای جانبی تحلیل دوباره انجام شده، نتایج با یکدیگر مقایسه می‌گردند. در انتها با تحلیل دو وضعیت پیشروی ابزار، روش بهتر انجام این آزمون از میان چهار حالت گزارش شده است.

## ۲- مدل‌سازی

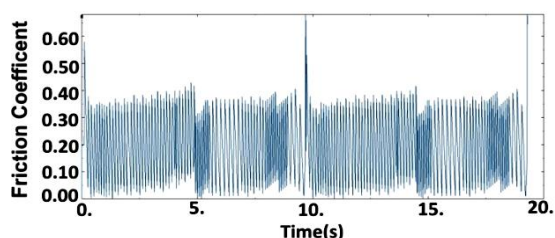
مورد مطالعه در اینجا، آلومینیوم 7075-O است. این آلیاژ یکی از پر کاربردترین فلزات در صنعت هوایی است. طول

<sup>1</sup> Condition

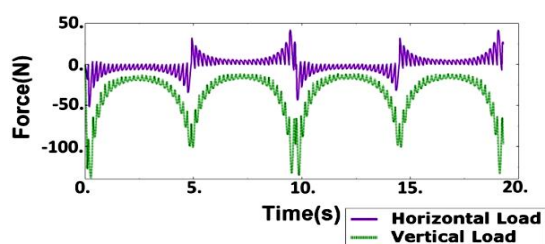
### ۳- اعتبارسنجی

جهت اعتبارسنجی تحلیل با داشتن نیروهای عمودی و افقی وارد بر ابزار و تقسیم نیروی افقی بر نیروی عمودی، مقدار ضریب اصطکاک بین ابزار و ورق قابل استخراج است که مد نظر مطالعه [۲] بوده است. با انتخاب المان‌های چهاروجهی خطی<sup>۲</sup> به اندازه ۲mm و به تعداد ۷۰۰ جزء، ضریب اصطکاک و نیروها به ترتیب مطابق شکل‌های ۳ و ۴ حاصل می‌گردند.

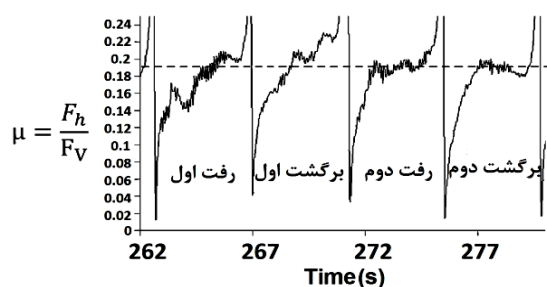
شکل ۳، تطابق خوبی از لحاظ مقدار و از نظر رفتار<sup>۳</sup> با شکل ۵ دارد.



شکل ۳- ضریب اصطکاک حاصل از تحلیل FEM



شکل ۴- نیروهای افقی و عمودی حاصل از تحلیل FEM



شکل ۵- ضریب اصطکاک حاصل از آزمون شیار به صورت تجربی [۲]

رابطه مربوط به خواص پلاستیک ماده از معادله  $\sigma(\text{MPa}) = 330\varepsilon^{0.19}$  استخراج شده، چگالی ورق، ۲۸۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است [۲]. مشخصات ورق، در جدول ۱ ارایه شده است.

جدول ۱- مشخصات ورق [۲]

مقدار	مشخصه
۷۵	مدول یانگ (GPa)
۰.۳	ضریب پواسون
۱۰۰	استحکام تسلیم (MPa)
۲۰۰	استحکام نهایی (MPa)
۲۲	درصد ازدیاد طول <sup>۱</sup>
۱	ضخامت (mm)

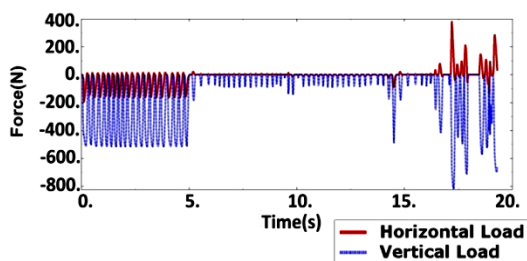
ضریب اصطکاک بین ابزار و ورق، برابر ۰/۱۹ است که در نرم‌افزار وارد شده است. سرعت پیشروی ابزار، ۱۰۰۰mm در دقیقه است و مسیر حرکت آن شامل، یک گام عمودی و دو مسیر رفت و برگشتی افقی است. ابزار از محلی که در آن قرار داده شده است، شکل‌دهی را شروع می‌کند. ابتدا به صورت عمودی به اندازه ۰/۵mm ورق را به سمت پایین فشار داده، سپس در راستای طول ورق به اندازه ۸۰mm در جهت افقی حرکت می‌کند تا به انتهای مسیر افقی خود برسد، سپس بدون آن که ارتفاع آن تغییر کند، مسیری که به صورت افقی طی کرده است را بر می‌گردد و سپس این رفت و برگشت را یک بار دیگر هم تکرار می‌کند. در واقع مسیر افقی ابزار شامل، دو بار رفت و برگشت در راستای طول ورق بدون تغییر در ارتفاع و با سرعت مد نظر است. زمان هر رفت یا برگشت، ۴/۸ ثانیه در نظر گرفته شده است که با توجه به جابه‌جایی ابزار در جهت طول ۸۰mm ورق، سرعت ۱۰۰۰mm در دقیقه لحاظ شده است. روش حل، پنج گام بدین صورت در نظر گرفته شده است که در یک گام ابزار در ورق پایین رفته، در گام‌های بعدی، ابزار طول ورق را در جهت‌های رفت و برگشت می‌پیماید.

<sup>۲</sup> Linear Quadrilateral Element

<sup>۳</sup> Manner

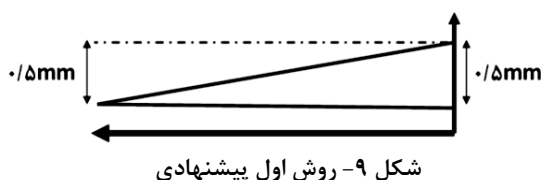
<sup>۱</sup> Elongation

انجام شده، تنها در انتهای مسیر به علت برگشت فنری نیاز به پیشروی بیشتر است.



شکل ۸- نیروهای افقی و عمودی با استفاده از ورق‌گیرهای جانبی

تحلیل ۳: در تحلیل سوم، دو روش بار دهی عمودی بدون ورق‌گیرهای جانبی بررسی می‌شود. در روش اول در رفت اول، ابزار به اندازه  $0/5\text{mm}$  به صورت خطی از ابتدا تا انتهای مسیر پایین رفته، در انتهای مسیر بدون جابجایی عمودی ابزار، مسیر برگشت طی می‌شود. در روش دوم در رفت اول، ابزار به صورت خطی به اندازه  $0/25\text{mm}$  پایین رفته، سپس بدون جابجایی عمودی مسیر برگشت اول طی می‌شود، این کار دوباره انجام شده تا رفت و برگشت دوم هم انجام پذیرد. در شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب، روش‌های اول و دوم باردهی به صورت طرح‌واره‌ای نمایش داده شده است.



شکل ۹- روش اول پیشنهادی



شکل ۱۰- روش دوم پیشنهادی

در شکل ۱۱، نیروهای افقی و عمودی وارد بر کلگی دستگاه در روش اول و بدون ورق‌گیر نمایش داده شده است؛ همچنین در شکل ۱۲، همین نیروها در روش دوم و بدون ورق‌گیر جانبی ارائه شده است.

در شکل ۶، ورق تحت آزمون شیبار که تحلیل FEM آن انجام گردیده، نشان داده شده است.



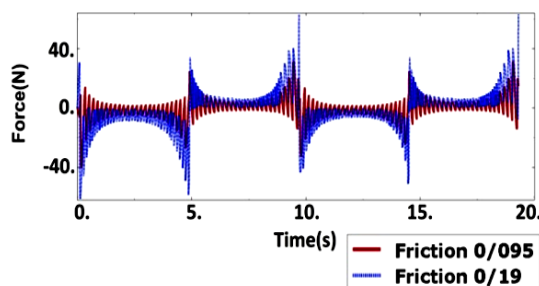
شکل ۶- ورق AA7075-0 تحت آزمون شیبار در مرجع [۲]

#### ۴- تحلیل عددی FEM

حل قبلی را به عنوان حل مرجع انتخاب نموده، تاثیر تغییر عوامل دیگر روی نیروهای وارد به کلگی دستگاه، بررسی و مقایسه می‌گردند.

تحلیل ۱: کاهش ضریب اصطکاک

یکی از روش‌های پیشنهادی برای کاهش اصطکاک، استفاده از سمباده از سمباده ۳۸۰ تا ۵۰۰ (سیستم اروپایی)، جهت افزایش صافی سطح ورق‌ها است؛ همچنین می‌توان از روغن SAE 40 هنگام آزمون استفاده کرد تا ضریب اصطکاک به  $0/095$  کاسته شود. با استفاده از این ضریب اصطکاک قابل دسترسی، فقط تحلیل FEM انجام شده، مشخص گردید که با توجه به شکل ۷، نیرو افقی در هر قسمت تقریباً ۱۰۰ درصد کاسته شده است. واضح است که تغییر در ضریب اصطکاک بر نیروی عمودی موثر نخواهد بود.



شکل ۷- مقایسه نیروهای افقی با تغییر ضریب اصطکاک

تحلیل ۲: با توجه به روش انجام آزمون شیبار، می‌توان از ورق‌گیرهای جانبی نیز در دو سمت ورق استفاده کرد؛ البته شعاع انحنای آن باید با شعاع انحناهای ورق‌گیر در دو انتها یکسان باشد. با توجه به این موضوع در شکل ۸ مشخص می‌شود که حجم عمده‌ای از شکل‌دهی در همان رفت اولی

کرنش در جهت طول ورق در نقطه انتهایی تماس ابزار و ورق نشان داده شده است. برای مشخص شدن این موضوع، برای مثال کرنش‌های طولی در نقطه‌ای مشخص با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

### جدول ۲- کرنش در جهت طول ورق در نقطه انتهایی تماس ابزار و ورق

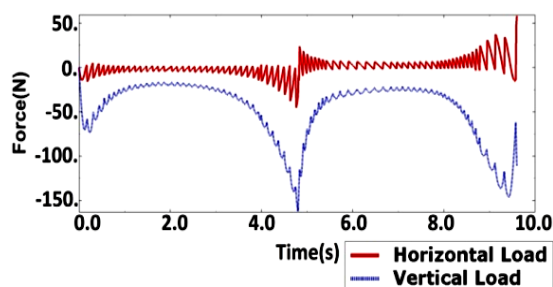
روش آزمون	کرنش طولی در نقطه انتهایی پایین رفتن ابزار در ورق
مرسوم در [۲]	۰/۰۰۱
مرسوم در [۲] با اصطکاک ۰/۰۹۵	۰/۰۰۱
استفاده از ورق گیر	۰/۰۰۲
۱ بار رفت و برگشت (روش اول)	۰/۰۰۱
۲ بار رفت و برگشت (روش دوم)	۰/۰۰۱

با توجه به مقادیر جدول مشاهده می‌شود که به جز روش استفاده از ورق گیر جانبی، در بقیه روش‌ها، کرنش‌های مذکور برابر مقدار خروجی شبیه‌سازی روش آزمون انجام شده در مرجع [۲] می‌باشند. کرنش‌ها در سایر جهت‌های دیگر نیز، باید محاسبه و استخراج شوند.

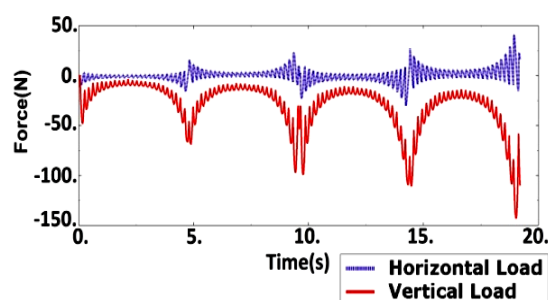
جدول ۳، کرنش در جهت عرض ورق در نقطه انتهایی تماس ابزار و ورق ارائه شده است. با توجه به این جدول، مشخص می‌شود، همانند کرنش در جهت طول، کرنش عرضی نیز در همه روش‌ها بجز روش استفاده از ورق گیر مقادیر یکسانی بدست می‌آید.

### جدول ۳- کرنش در جهت عرض ورق در نقطه انتهایی تماس ابزار و ورق

روش آزمون	کرنش عرضی در نقطه انتهایی پایین رفتن ابزار در ورق
مرسوم در [۲]	۰/۰۰۱
مرسوم در [۲] با اصطکاک ۰/۰۹۵	۰/۰۰۱
استفاده از ورق گیر	۰/۰۰۲
۱ بار رفت و برگشت (روش اول)	۰/۰۰۱
۲ بار رفت و برگشت (روش دوم)	۰/۰۰۱



شکل ۱۱- نیروهای افقی و عمودی در روش اول بدون ورق گیرهای جانبی



شکل ۱۲- نیروهای افقی و عمودی در روش دوم بدون ورق گیرهای جانبی

با مقایسه دو روش مشخص است که از لحاظ بیشینه نیرو بین دو روش اول و دوم، تفاوت محسوس مشاهده نمی‌شود و فقط در روش دوم، تعداد قله بیشینه کمتری در طول فرآیند مشاهده می‌گردد.

با توجه به شکل‌های قبل مشخص می‌شود که با یک دستگاه CNC رومیزی که برخی دارای محدودیت نیرویی کمتر از ۱۰۰۰۰ نیوتن می‌باشند، می‌توان به کمک روش ۱ بار رفت و برگشت (روش اول) با سرعت خیلی خوبی آزمون را انجام داد و چنانچه از دستگاه‌های CNC کوچکتری با محدودیت نیرویی کمتر از ۵۰۰۰ نیوتن استفاده شود، روش ۲ بار رفت و برگشت (روش دوم) و یا روش مرسوم ارائه شده در مرجع [۲]، پیشنهاد می‌شود.

قابل توجه است که در شبیه‌سازی برای اطمینان از جوابگویی روش‌ها برای انجام آزمون، لازم است مقادیر کرنش‌ها در انتهای کار اندازه‌گیری شوند. زیرا اگر کرنش‌هایی متفاوتی در قطعه با تغییر باردهی ایجاد شود، دیگر نمی‌توان این روش‌ها را مقایسه کرد. در جدول ۲،

- [2] Durante M, Formisano A, Langella A, Memola F, Memola Capece Minutolo F (2009) The influence of tool rotation on an incremental forming process. *J Mater Process Tech* 209(9): 4621-4626.
- [3] Kim YH, Park JJ (2002) Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal. *J Mater Process Tech* 130-131: 42-46.
- [4] Attanasio A, Ceretti E, Giardini C (2006) Optimization of tool path in two points incremental forming. *J Mater Process Tech* 177: 409-412.
- [5] Carrino L, Giuliano G, Strano M (2006) The effect of the punch radius in dieless incremental forming. *Intelligent Production Machines and Systems 2nd I\*PROMS Virtual International Conference* 204-209.
- [6] Ambrogio G, Cozza V, Filice L, Micari F (2007) An analytical model for improving precision in single point incremental forming. *J Mater Process Tech* 191(1-3): 92-95.
- [7] Filice L, Ambrogio G, Micari F (2006) On-line control of single point incremental forming operations through punch force monitoring. *Ann Cirp* 55(1): 245-248.
- [8] Rauch M, Hascoet J, Hamann J, Plenel J (2009) Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications. *Comput Aided Design* 41: 877-885.

[۹] بارانی شولی ع، امینی نجف‌آبادی س (۱۳۹۴) مطالعه‌ی تجربی حد شکل‌پذیری آلیاژ تیتانیوم در فرآیند شکل‌دهی نموی گرم ورق. *مجله علمی و پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس دوره ۱۵ شماره ۶: ۱۰۷-۱۱۴.*

[۱۰] قاسمی ح، سلطانی ب (۱۳۹۳) مطالعه تجربی پارامترهای موثر بر روی نیروی شکل‌دهی، دقت ابعادی و توزیع ضخامت در فرآیند شکل‌دهی نموی. *مجله علمی و پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس دوره ۱۴ شماره ۱: ۸۹-۹۶.*

## ۵- نتیجه گیری

با توجه به تحلیل انجام شده برای آزمون‌های شیار از بین روش‌های مرسوم در پژوهش‌ها و فعالیت‌های عملی و کاربردی جهت استفاده بهینه از ابزار و ماشین‌های CNC با محدودیت‌های نیرویی مشخص، بهتر است، اولاً از ورق‌گیرهای جانبی در صورت امکان استفاده نشده، همچنین بهتر است، برای جلوگیری از اعمال قله‌های نیرویی به ابزار، از روش‌های پیشروی با شیب باردهی ملایم و کم استفاده شود، ولی باید برای صرفه‌جویی در زمان و هزینه بین حالت باردهی ملایم شکل‌دهی در مراحل کمتر، حالت بالانس و بهینه را اخذ کرد. مثلاً برای AL7075-T0 بین دو روش با گام  $0/5\text{mm}$  و  $0/25\text{mm}$ ، حالت بهتر از لحاظ کمتر بودن قله نیرو، وضعیت پیشروی با شیب  $\frac{0/25}{80}$  همراه با دوبار رفت و برگشت است. همچنین باید دقت شود که روش‌های باردهی باید بگونه‌ای باشند که در نهایت، کرنش‌های اعمالی به قطعه، با کرنش‌های اعمالی از طریق آزمون معیار اصلی اختلاف کمتری داشته باشند.

## ۶- علائم، نشانه‌ها و ارقام

نیروی افقی وارد بر کلگی، N	$F_h$
نیروی عمودی وارد بر کلگی، N	$F_v$
ضریب اصطکاک	$\mu$

## ۷- مراجع

- [1] Jeswiet J, Micari F, Hirt G, Bramley A, Dufflou J, Allwood JM (2005) Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. *Ann Cirp* 54(2): 623-650.