

## فرایند کشش عمیق استوانه‌های با نسبت کشش خیلی بالا

قادر فرجی<sup>۱</sup>، محمد کاظم بشارتی گیوی<sup>۲\*</sup>، سعید یارمحمدی<sup>۳</sup> و محمود موسوی مشهدی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا دانشکده مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

<sup>۳</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

<sup>۴</sup> استاد دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۵/۱۰/۱۱، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۷/۸/۱۴، تاریخ تصویب ۸۸/۵/۲۰)

### چکیده

در این مقاله، فرایند کشش عمیق استوانه‌های با نسبت کشش حدود ۹ با استفاده از روش المان محدود و آزمایش‌های تجربی انجام گرفته است. کشش استوانه‌های با نسبت کشش بالا بدون عملیات آنیل در وسط فرایند بسیار مشکل است و از طرفی اضافه کردن عملیات آنیل به فرایند تولید این قطعات، باعث افزایش هزینه و زمان تولید می‌شود. در این پژوهش استوانه‌های با نسبت کشش حدود ۹ از بلاتک اولیه به ضخامت ۰.۶ و قطر ۳۶ میلی‌متر با وجود آنیل حرارتی در مراحل محدودی از فرایند، تولید شده است. نسبت کشش برای مراحل مختلف کشش با استفاده از روش المان محدود تعیین و سپس درستی نتایج با آزمایش‌های تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. فرایند کشش عمیق با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS/Explicit شبیه‌سازی شده و آزمایش‌های تجربی برای ساخت استوانه‌ای به قطر ۴ میلی‌متر و ارتفاع ۷۰ میلی‌متر از بلاتک به قطر ۳۶ میلی‌متر انجام گرفته است. تأثیر عوامل اساسی فرایند با استفاده از روش المان محدود بررسی شده و با نتایج تجربی مقایسه شده است. مقایسه نتایج مطابقت خوبی را نشان می‌دهد. توزیع ضخامت قطعات حاصل از روش المان محدود و آزمایش‌های تجربی در تعدادی از مراحل کشش مقایسه و بررسی شده است.

**واژه‌های کلیدی:** کشش عمیق استوانه‌ای، نسبت کشش بالا، جنس برنج، المان محدود، آزمایش‌های تجربی

### مقدمه

قطعات کشش عمیق شش مرحله‌ای با روش المان محدود توسط Se-Ho Kim و همکارانش انجام گرفت [۴]. تلاش‌ها برای رسیدن به نسبت‌های کشش بالاتر در فرایند کشش عمیق قطعات توسط Ku و همکارانش انجام گرفت. آنها موفق شدند به نسبت کشش حدود ۴/۹۷ در کشش عمیق قطعات (نسبت کشش به نسبت بالا) دست یابند [۵]. در تحقیق دیگری Tiruvarudchelvan به نسبت کشش ۳ با استفاده از بالشتک از جنس اورتان دست یافته است [۶]. در این پژوهش، فرایند کشش عمیق استوانه‌های با نسبت کشش خیلی بالا (حدود ۹) در ۹ مرحله کشش عمیق، ابتدا با استفاده از روش المان محدود شبیه‌سازی شده و سپس آزمایش‌های تجربی با هدف ساخت استوانه‌ای با نسبت کشش حدود ۹، قطر ۴ میلی‌متر و ارتفاع حدود ۷۰ میلی‌متر از بلاتک اولیه به قطر ۳۶ میلی‌متر با استفاده از نتایج المان محدود انجام شده است. عوامل اساسی فرایند شامل کلیرانس قالب، ضریب اصطکاک، شعاع لبه سنبه، شعاع لبه ماتریس، نسبت  $D/t$  و

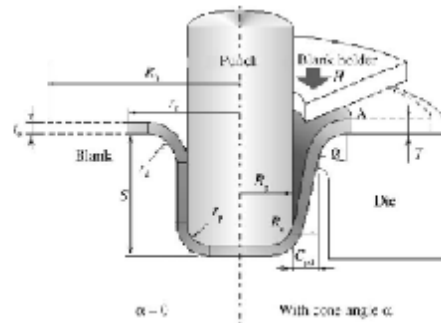
کشش عمیق قطعات استوانه‌ای از دیرباز به دلیل کاربردهای زیاد مورد توجه پژوهشگران و صنعتگران بوده است. فرایند کشش عمیق قطعات استوانه‌ای با نسبت کشش بالا به دلیل کار سختی‌های به وجود آمده در قطعات در حین مراحل ابتدایی کشش، بدون عملیات آنیل کردن امکان‌پذیر نیست. از طرفی به دلیل کاربردهای خاص این قطعات در صنایع نظامی و صنایع مختلف، بررسی فرایند کشش عمیق قطعات استوانه‌ای با نسبت کشش بسیار بالا مورد توجه محققان زیادی بوده است. تلاش‌هایی توسط Wan و همکارانش برای رسیدن به نسبت حد نهایی کشش قطعات مخروطی با استفاده از روش المان محدود انجام شد [۱]. Seung Ho و همکارانش با استفاده از روش المان محدود معکوس، مطالعاتی در ارتباط با کشش استوانه‌های با نسبت کشش بالا انجام داده‌اند [۲]. Se Ho Kim و همکارانش نیز کشش عمیق قطعات مستطیلی چهار مرحله‌ای را به کمک روش المان محدود انجام داده‌اند [۳]. پژوهش دیگری با هدف ساخت

استفاده از ورق گیر انجام گرفت. سنبه در هر مرحله به اندازه‌ای پایین آورده می‌شود که قطعه استوانه‌ای بدون فلنج حاصل شود. لقی قالب‌ها در حدود ۰.۱ ضخامت ورق در نظر گرفته شده است [۷]. نسبت کشش در مراحل مختلف با استفاده از روش المان محدود برای ۹ مرحله کشش حاصل شد که در جدول (۲) نشان داده شده است. با توجه به جدول (۲) مشاهده می‌شود که نسبت کشش در مراحل اولیه کمتر از حد تعیین شده در کارهای پیشین است [۲،۳] و همین کم بودن نسبت کشش در مراحل اولیه، امکان کشش عمیق ۹ مرحله‌ای را در این پژوهش امکان‌پذیر کرده است.

### آزمایش‌های تجربی

ورق مورد استفاده در این پژوهش از جنس آلایژ مس و روی (برنج) با درصد عناصر داده شده در جدول (۳) است. برای تعیین عناصر موجود از آزمایش کوانتومتری استفاده شده است. اعداد داده شده در جدول، بر حسب درصد وزنی عناصر است. شکل (۳) نمایی از قالب‌های استفاده شده برای کشش این قطعات را نشان می‌دهد. عوامل اصلی فرآیند شامل لقی قالب‌ها، شعاع لبه ماتریس‌ها، شعاع لبه سنبه‌ها و ضریب اصطکاک هستند. نیروی ورق‌گیر در مرحله اول کشش توسط یک صفحه روی بلانک تأمین شد و مقدار نیروی ورق‌گیر مقدار بهینه حاصل از المان محدود را داشت. برای هم‌محور کردن قطعات از راهنمایی در اطراف سنبه در شروع کشش استفاده می‌شود. برای اعمال نیروی کشش از یک پرس استاندارد هیدرولیک ۱۰۰ تن استفاده شده است. مقادیر شعاع لبه سنبه و ماتریس و کلیرانس نیز بر اساس نتایج بهینه حاصل از شبیه‌سازی المان محدود انتخاب شده است. عملیات کشش در ۹ مرحله برای ساخت قطعه با نسبت کشش ۹ در یک شرکت صنعتی انجام شده است. اندازه‌گیری توزیع ضخامت با استفاده از روش عکسبرداری سه‌بعدی انجام شده است. در طی سال‌های اخیر، فناوری‌های اندازه‌گیری دیجیتال در فرم‌دهی ورق‌های فلزی و طراحی و ساخت ابزار آنها هر روز بیشتر و بیشتر در صنایع به کار برده می‌شود. سیستم اندازه‌گیری اپتیک استفاده شده در این پژوهش ATOS نام دارد که تأمین‌کننده اطلاعات کامل هندسی قطعات به وسیله عکسبرداری و ایجاد مقطع‌های مورد نظر را دارد و پس از

نیروی ورق‌گیر بررسی شد و حد نهایی نسبت کشش برای هر یک از مراحل تعیین شده است. شکل (۱) قالب عمومی فرآیند کشش و اجزای آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱: اجزای اصلی قالب فرآیند کشش عمیق.

### المان محدود

در این تحقیق شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی استوانه‌های با نسبت کشش خیلی بالا با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است. در تحلیل مدل ساخته شده، به دلیل مسائل مربوط به واگرایی روش ضمنی<sup>۱</sup> از روش حل صریح<sup>۲</sup> استفاده شده است. مدل به شکل دوبعدی هم‌محور<sup>۳</sup> است. پس از غلبه بر اثر اندازه مش، از تعداد ۲۴ المان دو بعدی پوسته‌ای در مدل‌سازی استفاده شده است. خواص مکانیکی بلانک از آزمایش کشش ورق در سه جهت نوردی حاصل و در جدول (۱) آمده است. ضریب اصطکاک، مدول یانگ و چگالی نیز در جدول (۱) نشان داده شده است. قطر بلانک اولیه ۳۶ میلی‌متر و ضخامت آن ۰.۶ میلی‌متر است ( $D/t=60$ ). شکل (۲) نمونه‌های حاصل از آزمایش کشش را نشان می‌دهد. فرآیند در ۹ مرحله مدل‌سازی شده است. نیروی ورق‌گیر بهینه در مرحله اول از فرآیند با روش سعی و خطا در نرم‌افزار المان محدود برای رسیدن به بهترین توزیع ضخامت قطعه و ابعاد انتخاب می‌شود. در مرحله دوم و مراحل بعدی به دلیل کوچک بودن قطعه و کم بودن نسبت  $D/t$  امکان کشش موفق در صورت استفاده از ورق‌گیر وجود نداشت و در این مراحل (از مرحله دوم به بعد) نیازی به استفاده از ورق‌گیر نبود. در صورتی که از ورق‌گیر استفاده می‌شد، نسبت کشش مراحل بعدی به طور فزاینده‌ای کم می‌شد و پارگی اتفاق می‌افتاد. بنابراین در مرحله دوم و مراحل بعد از آن، عملیات کشش بدون

جدول ۱: خواص مکانیکی جنس ورق .

Mechanical properties						Other parameters
% Elongation	Ultimate strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Initial dimension (mm)	Young modulus (GPa)	Specimen Direction (from rolling)	Friction Coefficient ( $\mu$ )
38.5	240	102.6	0.6x12.5	1.5	°0	0.1
42.9	245/8	110.3	0.6x12.54	1.5	°45	Density (Kg/m <sup>3</sup> )
35.6	281.6	127.9	0.6x12.58	1.5	°90	8000



شکل ۲: نمونه‌های حاصل از آزمایش کشش.

جدول ۲: نسبت‌های کشش حاصله از روش المان محدود در مراحل مختلف ( $\beta = D/d$ )

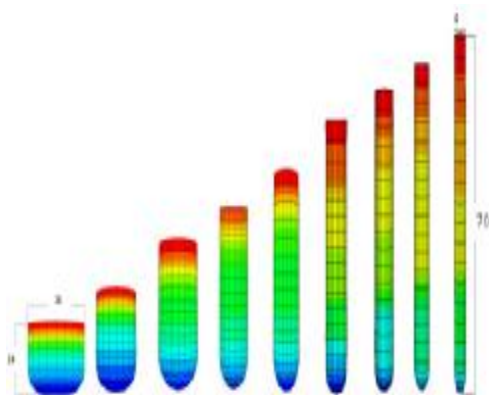
Drawing stage	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	$\beta_6$	$\beta_7$	$\beta_8$	$\beta_9$
Drawing ratio	2.1	1.41	1.35	1.34	1.21	1.195	1.13	1.1	1.09

جدول ۳: عناصر موجود در جنس ماده اولیه.

Cu	Zn	Sn	Mn	Fe
Base	36.5	0.05	0.001	0.05
Ni	Si	Al	Ag	Co
0.03	0.005	0.01	0.01	0.01



شکل ۳: شکل قالب‌های مورد استفاده در فرآیند.



شکل ۴: قطعات حاصل از المان محدود.



شکل ۵: قطعات ساخته شده در مراحل مختلف کشش حاصل از آزمایش‌های تجربی.

### بررسی توزیع ضخامت

اندازه‌گیری توزیع ضخامت قطعات ساخته شده در تعدادی از مراحل فرآیند، با استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری اپتیک استفاده شده است و نتایج حاصل از بررسی توزیع ضخامت در این قطعات، با نتایج المان محدود مقایسه شده است (شکل‌های ۷، ۸ و ۹). شکل (۶) توزیع ضخامت قطعات ساخته شده در مراحل دوم، چهارم و نهم را نشان می‌دهد. شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) توزیع ضخامت حاصل در المان محدود و مقایسه آنها را با نتایج تجربی در مراحل ذکر شده را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج خطا در حدود ۴.۲ درصد را نشان می‌دهند که از دیدگاه مهندسی قابل قبول است. شکل (۱۰) نمودارهای توزیع ضخامت در ۹ مرحله کشش حاصل از نتایج المان محدود را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل‌ها ملاحظه می‌شود، حداکثر تغییرات ضخامت ۴۰ درصد ضخامت اولیه ورق است که در مقایسه با مقدار اندازه‌گیری شده تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

تبدیل این عکس‌ها به فایل‌های مورد نظر، می‌توان به وسیله نرم‌افزارهای مرتبط با سیستم‌های CAD/CAM انواع اقدام‌های لازم از جمله ایجاد سطح و یا اندازه‌گیری نقاط مختلف قطعه را انجام داد.

### بحث و بررسی نتایج

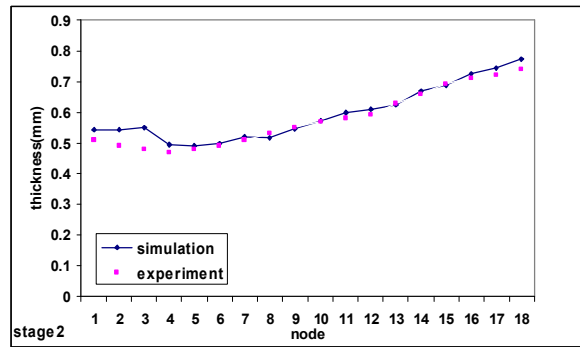
جدول (۲) نسبت‌های کشش حاصل از روش المان محدود را برای مراحل اول تا نهم کشش نشان می‌دهد. نسبت کشش، همان نسبت قطر اولیه به قطر قطعه حاصل از هر مرحله است:

$$\beta = D/d \quad (1)$$

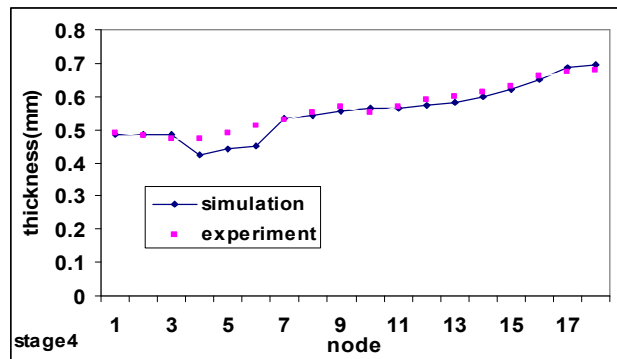
که در آن  $D$  قطر بلانک (در مرحله ۱) و قطر قطعه (در مراحل بعدی) و  $d$  قطر قطعه حاصل از مرحله کشش است. شکل (۴) و (۵) قطعات حاصل از فرآیندهای کشش عمیق حاصل از مدل‌سازی المان محدود و آزمایش‌های تجربی را نشان می‌دهند. شکل (۵) نشان می‌دهد که امکان ساخت قطعات با نسبت کشش بسیار بالا امکان‌پذیر است. در این تحقیق قطعه استوانه‌ای با نسبت کشش ۹ به قطر ۴ میلی‌متر و طول ۷۰ میلی‌متر در ۹ مرحله کشش ساخته شده است. نتایج نشان می‌دهند که نیروی ورق‌گیر برای مرحله اول مقدار بهینه‌ای با هدف رسیدن به بهترین قطعه از نظر توزیع ضخامت و ابعاد داشت، ولی در مراحل دوم و مراحل پس از آن، نیروی ورق‌گیر مقدار صفر را داشت و با افزودن نیروی ورق‌گیر در این مراحل، امکان کشش موفق وجود ندارد. یکی از نتایج مهم این تحقیق، رسیدن به تأثیر رابطه بین نسبت‌های کشش در مراحل مختلف فرآیند است. اگر این رابطه رعایت نشود، امکان کشش موفق وجود ندارد. رابطه به این معنا است که در صورت استفاده از نسبت‌های کشش ارائه شده در پژوهش‌های پیشین برای مراحل اولیه به دلایل مختلف مانند کارسختی و توزیع نامناسب ضخامت در قطعات حاصل از این مراحل، امکان کشش قطعات با نسبت کشش بسیار بالا وجود ندارد و به همین دلیل مقادیر نسبت کشش در مراحل اولیه کمتر از حالت معمول است و استراتژی انتخاب نسبت کشش در همه مراحل اهمیت ویژه‌ای دارد.



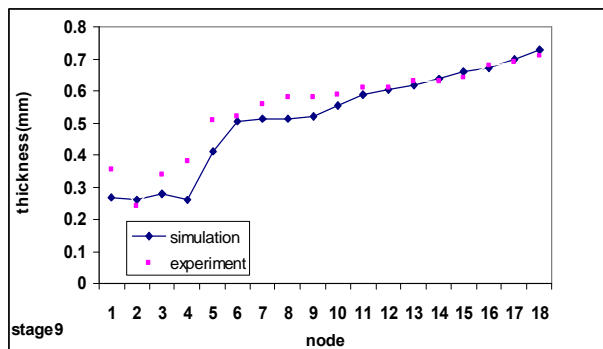
شکل ۶: توزیع ضخامت قطعات ساخته شده (مراحل دوم، چهارم و نهم).



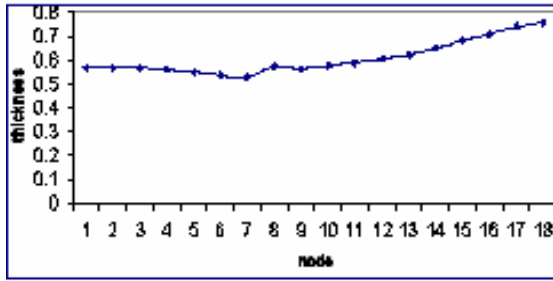
شکل ۷: توزیع ضخامت در مرحله دوم کشش و مقایسه آن با نتایج تجربی.



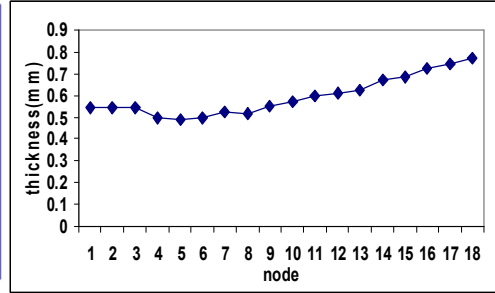
شکل ۸: توزیع ضخامت در مرحله چهارم کشش و مقایسه آن با نتایج تجربی.



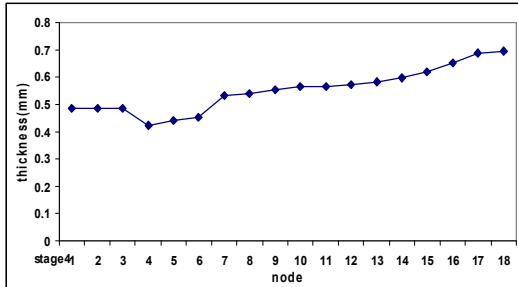
شکل ۹: توزیع ضخامت در مرحله نهم کشش و مقایسه آن با نتایج تجربی.



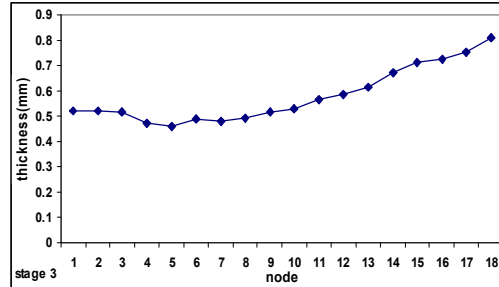
ب) توزیع ضخامت قطعه مرحله ۲



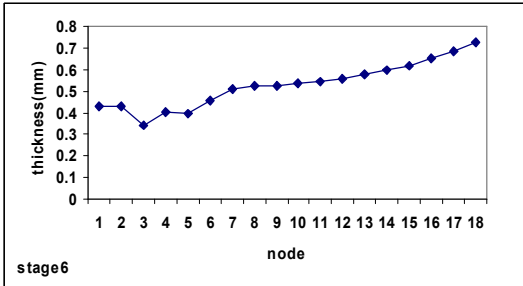
الف) توزیع ضخامت قطعه مرحله اول



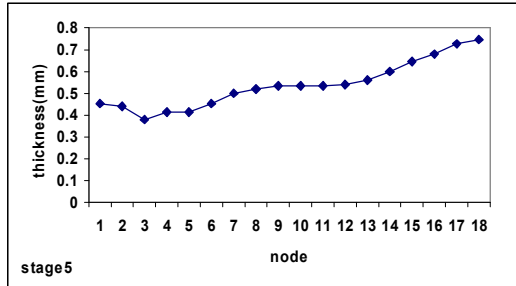
د) توزیع ضخامت قطعه مرحله ۴



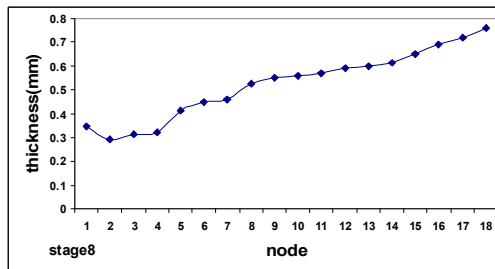
ج) توزیع ضخامت قطعه مرحله ۳



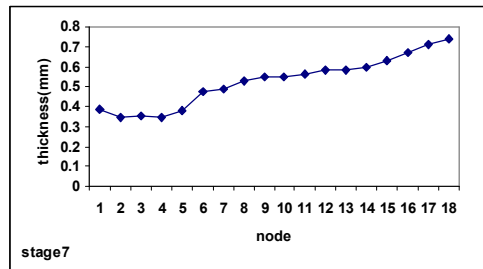
و) توزیع ضخامت قطعه مرحله ۶



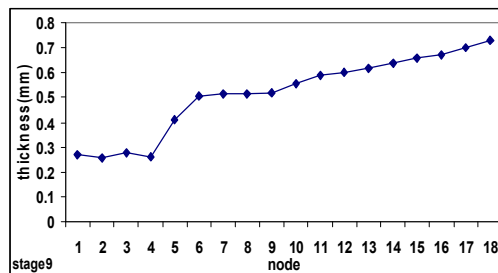
ه) توزیع ضخامت قطعه مرحله ۵



ی) توزیع ضخامت قطعه مرحله ۸



ز) توزیع ضخامت قطعه مرحله ۷



ط) توزیع ضخامت قطعه مرحله ۹

شکل ۱۰: نمودارهای توزیع ضخامت در ۹ مرحله کشش حاصل از نتایج امان محدود.

## نتیجه گیری

در این پژوهش فناوری تولید قطعات استوانه‌ای برنجی با نسبت کشش بسیار بالا (حدود ۹) با کمک روش المان محدود و آزمایش‌های تجربی ایجاد شده است که در مقایسه با کارهای سایر محققان در دیگر کشورها نیز در این ابعاد، نسبت کشش بالایی است. ماکزیمم نسبت کشش در کارهای قبلی حدود ۴/۹۷ بوده است [۵]. در این مقاله، استوانه‌ای به قطر ۴ میلی‌متر و طول ۷۰ میلی‌متر از ورق اولیه به ضخامت ۰/۶ و قطر ۳۶ میلی‌متر در ۹ مرحله کشش ساخته شده است و نسبت کشش قابل حصول در مراحل مختلف کشش برای جنس و ابعاد ذکر شده در متن ارائه شده است، بنابراین قابل استفاده برای مراکز مختلف صنعتی و دفاعی است و از سعی و خطاهای احتمالی جلوگیری می‌کند. یکی از مسائلی که در حصول به نسبت کشش بسیار بالا در این پژوهش مطرح بوده، رابطه بین

نسبت‌های کشش در همه مراحل شکل‌دهی بوده است که نسبت کشش در مراحل ابتدایی کمتر از حد معمول انتخاب می‌شود که امکان افزایش نسبت کشش کل را فراهم می‌کند. در این پژوهش با استفاده از نسبت‌های کشش بهینه حاصل از روش المان محدود، قالب‌های فرآیند در مراحل مختلف طراحی و ساخته شدند و آزمایش‌های تجربی بر اساس نتایج المان محدود انجام گرفت. مقایسه نتایج، تطابق بسیار نزدیکی داشتند. حداکثر خطا با روش المان محدود در حدود ۴/۲ درصد بوده است که از دیدگاه مهندسی قابل قبول است.

## تقدیر و تشکر

در پایان، از همکاری شرکت مهندسی شتاب گامان و اساتید راهنما کمال تشکر و قدردانی می‌شود.

## مراجع

- 1- Min Wan, Yu-Ying Yang, Sho Ben Li, (2001). "Determination of the limiting drawing coefficient in the deep drawing of conical cups." *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 114, PP. 114-117.
- 2- Seung Ho Kim, Se Ho Kim, Hoon Huh, (2001). "Finite element inverse analysis for the design of intermediate dies in multi stage deep drawing processes with larg aspect ratio." *Journal of Material Processing Technology* Vol. 113, PP. 779-785.
- 3- Se Ho Kim, Seung Ho Kim, Hoon Huh, (2001). "Design modification in a multi stage rectangular cup drawing processes with a larg aspect ratio by an elasto- plastic finite element analysis." *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 113, PP.766-773.
- 4- Se-Ho Kim, Seung-Ho Kim, Hoon Huh, (2002). "Tool design in a multi-stage drawing and ironing process of a rectangular cup with a large aspect ratio using finite element analysis." *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, PP.863-875.
- 5- T.W. Ku, B.K. Ha, W.J. Song, B.S. Kang, S.M. Hwang, (2002). "Finite element analysis of multi-stage deep drawing process for high-precision rectangular case with extreme aspect ratio." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130-131, PP. 128-134.
- 6- S.Tiruvarudchelvan, (2002). "Direct redrawing of cup using an annular urethane pad." *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 123, PP. 71-74.
- 7- Metals HB Ninth Edition, V14.

## واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Implicit
- 2 - Explicit
- 3 - Axisymmetric