

تأثیر پارامترهای کشش عمیق هیدروفرمینگ و مقایسه روشهای متداول کشش عمیق به روش المان محدود

رضا غفوری آهنگر^{۱*}، فرامرز جوانرودی^۲، مرتضی پاکباز^۳

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

*تهران، صندوق پستی ۱۶۳-۱۶۷۶۵

rghafooria@MechEng.iust.ac.ir

(دریافت مقاله: فروردین ۱۳۸۶، پذیرش مقاله: خرداد ۱۳۸۶)

چکیده - در این مقاله مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از تحلیل المان محدود و نتایج آزمایشگاهی کشش عمیق هیدروفرمینگ در حالت جایگزینی ماتریس با فشار سیال، تأثیر پارامترهای هیدروفرمینگ و همچنین مقایسه‌ای بین روشهای متداول کشش عمیق برای ورقهای آلومینیوم با قطره‌های گوناگون انجام شده است. وجود کرنشهای بزرگ، ناهمسانگردی و ویژگیهای مکانیکی مواد و اصطکاک کولمبی در مناطق تماس اجزای درگیر، از جمله ویژگیهای این تحلیل است. از نرم‌افزار ABAQUS برای این شبیه‌سازی استفاده شده است. ابتدا برای بررسی صحت شبیه‌سازی، نتایج حاصل از المان محدود با نتایج به‌دست آمده از کار آزمایشگاهی در این زمینه، مقایسه شده است. نتایج نشان داده است که پیش‌بینی‌های شبیه‌سازی فرایند کشش عمیق با نتایج تجربی سازگاری قابل‌قبولی دارند. نتایج برای نمودار نیرو - جابه‌جایی و کرنش ضخامت، ارزیابی شده است. سپس تأثیر پارامترهای فشار اولیه، اصطکاک و شعاع سنبه بر تغییرات چروکیدگی، گسیختگی، پدیده گوشه‌ای و کرنش ضخامت بررسی شده است. نتایج به‌دست آمده نشانگر وجود گستره‌ای از فشار محفظه برای کشش عمیق هیدروفرمینگ است. همچنین با استفاده از دو معیار گسیختگی و معیار کرنش، ضخامت چند روش کشش عمیق مقایسه شده و در نهایت کشش عمیق هیدروفرمینگ در حالت جایگزینی ماتریس با فشار سیال به‌عنوان روش بهتر برای دستیابی به بیشترین نسبت کشش پیشنهاد شده است.

کلید واژگان: المان محدود، چروکیدگی، پدیده گوشه‌ای، معیار گسیختگی، معیار کرنش ضخامت.

۱- مقدمه

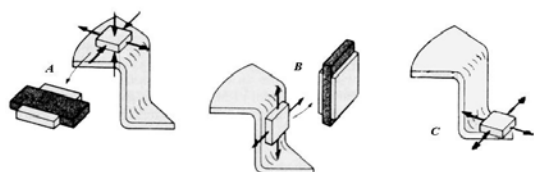
فولادی و ۹ میلیون تن ورق آلومینیومی که تقریباً ۳۵ درصد از کل فولاد و آلومینیوم تولید شده در سراسر دنیا بوده، برای تولید قطعاتی به‌روش کشش عمیق به‌کار رفته است [۱، ۲].

فرایند کشش عمیق نخستین بار در اوایل قرن هیجدهم تجربه شده است. در سال ۱۹۹۸، ۲۶۵ میلیون تن ورق

در سالهای اخیر، بسیاری از روشهای شکل‌دهی ابداع شده و وابسته به کشش عمیق هیدروفرمینگ ورق برای غلبه بر مشکلات ذاتی روشهای سنتی با ابزارهای صلب پیشنهاد شده است، مانند: کشش عمیق به‌وسیله محلول آب [۳]، کشش عمیق هیدرودینامیک [۴]، هیدروفرم [۵]، کشش عمیق به‌وسیله فشار هیدرولیک معکوس کمک‌کننده [۶] و هیدروفرمینگ با قالب متحرک [۷]. مطالعات بسیاری بر روی پدیده گوشه‌ای به‌روش المان محدود انجام شده است. افزایش تعداد گوشه‌ها، ارتفاع پدیده گوشه‌ای را کاهش می‌دهد [۸].

فرایند کشش برخی ویژگیها را در فلز ایجاد می‌کند که بدون آنها، قطعات استحکام لازم را پیدا نمی‌کنند. این ویژگیها عبارت از سختی و استحکام حاصل از کار سخت فلز در فرایند کشش عمیق. در این سازوکار، تنش کششی شعاعی^۱، بلنک^۲ را به‌درون محفظه فشار جریان می‌دهد و تنش فشاری نرمال^۳ به‌وسیله نگه‌دارنده اعمال می‌شود. شکل ۱، تنشهای اعمال شده در زمان شکل‌دهی بر روی المانهای بلنک در سه نقطه را نشان می‌دهد [۹]. بخشی از ورق که زیر سنبه است، بر اثر فشار سرسنبه دچار تابیدگی شده و از ضخامت آن کمی کاسته می‌شود. فلز در این ناحیه، تحت تنش کششی دومحوری قرار دارد. دیوار فنجان که در حال شکل گرفتن است، تحت تأثیر تنش کششی طولی مطابق شکل ۱ قرار دارد. فلز در بخش بیرونی‌تر بلنک (در بخش لبه^۴) به‌صورت شعاعی به‌سمت سنبه کشیده می‌شود. هنگامی که بلنک کشیده می‌شود، محیط خارجی آن از اندازه اولیه به مقدار نهایی کاهش می‌یابد. این بدان معنا است که بلنک تحت تأثیر کرنش فشاری در جهت محیطی و همچنین کرنش کششی در جهت شعاعی قرار گرفته است [۲]. بر اثر

این دو کرنش اصلی، در هنگام کشیده شدن بلنک به‌طرف سنبه، ضخامت آن به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. پس از آن‌که فلز از لبه قالب عبور کرد، ابتدا خمیده شده و سپس صاف می‌شود و در همان لحظه تحت تنش کششی قرار دارد. خمش پلاستیک تحت کشش منجر به کاهش ضخامت قابل توجهی در بلنک شده که با چروک‌خوردگی^۵ محیطی ناشی از افزایش ضخامت اصلاح می‌شود. بین ناحیه کشیده شده داخلی و ناحیه چروک‌خورده بیرونی، حلقه باریکی از فلز وجود دارد که نه در اثر سنبه و نه بر اثر فشار محفظه دچار خمیدگی نشده و فلز در این ناحیه تحت بار کششی ساده در هنگام فرایند کشش قرار دارد.



شکل ۱ تنشهای وارد شونده بر المانها در کشش عمیق [۲، ۹]

کشش عمیق هیدروفرمینگ ورق در مقایسه با روش سنتی، فواید زیادی دارد؛ مانند: نرخ بالای کشش، سطح خوب نقاط شکل داده شده، دقت بالای اندازه نقاط شکل داده شده و قابلیت ایجاد شکلهای پیچیده [۱۰] تا [۱۲]. در روش کشش عمیق هیدروفرمینگ یک نیمه از ابزارهای صلب، سنبه یا ماتریس با فشار سیال جایگزین می‌شود. فشار سیال با یک بخش لاستیکی آب‌بند می‌شود. هیدروفرمینگ به‌عنوان روشی اقتصادی و ساده‌تر (در مقایسه با روش سنتی) برای ساخت قطعات پیچیده مطرح است. این روش، ساخت قطعات پیچیده در یک مرحله را امکان‌پذیر می‌سازد، در

1. Radial Tensile Stress
2. Blank
3. Normal Compressive Stress
4. Flange

5. Wrinkling

حالی که انجام این کار در روش سنتی باید در چند مرحله انجام شود. از میان مزایای این روش می توان به دقت و صافی سطح نام برد [۵، ۱۳، ۱۴]. در بسیاری از فرایندهای ساخت و تولید، با توجه به هزینه بالای طراحی و ساخت دستگاههای تولیدی، پیش بینی پارامترها و شرایط مناسب تولید امری بسیار ضروری است. این موضوع به ویژه در مورد فرایندهای شکل دهی با توجه به هزینه بالای قالبها برای پرهیز از دوباره کاری ها و تغییرات پرهزینه، گریزناپذیر است.

در بیشتر فرایندهای شکل دهی، معمولاً با ادامه فرایند، به دلیل افزایش تنشها و کرنشها و رخداد تغییر شکلهای ناخواسته، محدودیتهایی در تداوم فرایند روی می دهد. این محدودیتها، به ایرادهایی مانند چروکیدگی و گسیختگی در محصول می انجامد. به منظور شکل دهی موفق و بی نقص، فرایند باید پیش از پیدایش چنین ایرادهایی متوقف شود. کشش عمیق از چنین ویژگی مستثنا نیست. در این فرایند می توان دو نوع محدودیت پیش بینی کرد: معیار عمومی اول که در تمامی فرایندهای شکل دهی مطرح بوده و همان پدیده گسیختگی است. معیار دیگر، ویژه کشش عمیق بوده و همان کرنش ضخامت است.

با پیشرفت المان محدود و نرم افزارهای مربوط امکان شبیه سازی این گونه فرایندها فراهم شده است. با توجه به ماهیت نرم افزاری این روش، هزینه انجام آن نسبت به کار آزمایشگاهی بسیار پایین تر است.

۲- فرایند کشش عمیق هیدروفرمینگ

شکل ۲ ساختار و سازوکار فرایند کشش عمیق هیدروفرمینگ را نشان می دهد [۱۵] که شامل بخشهای زیر است:

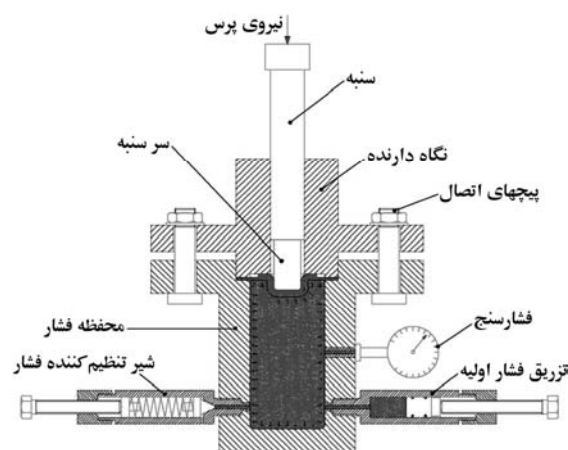
محفظه فشار^۱ که در این حالت جایگزین ماتریس شده است. نگاه دارنده^۲ که جایگزین ورقگیر در فرایند سنتی کشش عمیق شده و برای نگاه داشتن ورق در برابر فشار سیال در محفظه فشار به کار می رود. دیگر بخشها مانند فشارسنج و شیر کنترل فشار برای اندازه گیری و تنظیم فشار در محفظه به کار می روند. سنبه مانند روش سنتی عمل می کند. سنبه هم محور با نگاه دارنده به محفظه وارد می شود. دیافراگم لاستیکی بین سیال و ورق در ورودی محفظه فشار، کار آب بندی را انجام می دهد. برای آغاز فرایند محفظه تحت فشار باید پر از روغن شود و سپس دیافراگم لاستیکی در ورودی محفظه، روی سطح روغن قرار داده می شود. در حالی که سطح دیافراگم به روغن آغشته شده، ورق فلزی روی آن گذاشته می شود. نگاه دارنده نیز مطابق شکل بر روی مجموعه قرار می گیرد. سنبه نیز از درون سوراخ نگاه دارنده و هم محور با آن عبور می کند. سر سنبه مطابق با شکل دلخواه محصول می تواند تعویض شود. در حالی که سنبه به وسیله رم پرس و مماس با ورق نگاه داشته شده، یک فشار اولیه به وسیله شیر تنظیم کننده فشار اولیه^۳ به روغن در محفظه فشار وارد می شود. در این مرحله سنبه با نیروی پرس ورق را به محفظه فشار می راند که این موجب شکل دهی آن به وسیله فشار روغن می شود. همچنین با پایین آمدن سنبه، روغن اضافی به شیر تنظیم کننده فشار^۴ رانده می شود که این موجب افزایش تدریجی فشار در محفظه می شود. هنگامی که فشار به اندازه تنظیم شده رسید، روغن اضافی از شیر تخلیه شده و فشار به صفر می رسد. در طول فرایند فشار روغن و نیروی پرس اندازه گیری می شوند [۵].

1. Pressure Container
2. Cover Plate
3. Initial Pressere Feeder
4. Relief Valve

الاستوپلاستیک استفاده شده است. در تحلیل با نرم افزار ABAQUS حالت حل سریع^۱ به کار رفته است. برای کاهش زمان پردازش با کمترین افت دقت، می توان دو روش را به کار برد. نخست استفاده از مقیاس بزرگ^۲ که اندازه بهینه آن با توجه به کمک کاربری نرم افزار برابر ۱۰ است. دوم اینکه می توان زمان فرایند را کاهش داد. در اینجا برای تعریف جابه جایی سنبه، برای آن سرعت و برای فرایند زمان تعریف می شود. با کاهش زمان فرایند افزایش سرعت سنبه، زمان پردازش کاهش و با کاهش بیش از حد زمان فرایند، دقت نتایج کاهش می یابد. بنابراین باید اندازه بهینه ای برای آن تعریف شود. با توجه به بررسیهای انجام شده و مقایسه نتایج سرعتهای گوناگون سنبه، سرعت ۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. توضیح این نکته مهم ضروری است که با توجه به خواص مکانیکی تعریف شده برای ماده، سرعت جابه جایی سنبه یا نرخ کرنش ایجاد شده ناشی از آن، تأثیری بر نتایج به دست آمده از شبیه سازی ندارد. زیرا اولاً نرخ کرنش در فرایند گرم کاری اهمیت بیشتری پیدا می کند در حالی که در اینجا شکل دهی سرد مدنظر است. دوم اینکه ویژگیهای مکانیکی ماده و روابط تنش - کرنش ($\sigma = k\epsilon^n$) مورد استفاده، در گسترده مشخصی از نرخ کرنش (یا سرعت جابه جایی سنبه) معتبر است [۹]. برای تعریف تماس سطوح نیز از تماسهای مماسی حالت پنالتی^۳ استفاده شده است.

۳-۱- ویژگیهای مکانیکی مواد

ماده به کار رفته آلومینیم است که ویژگیهای مکانیکی آن از رابطه (۱) پیروی می کند:



شکل ۲ سازوکار فرایند کشش عمیق هیدروفرمینگ [۱۵]

۳-۲ روش تحقیق

در این پژوهش، شبیه سازی کشش عمیق هیدروفرمینگ با نرم افزار ABAQUS انجام شده است. ابتدا برای اطمینان از صحت شبیه سازی، نتایج حاصل از تحلیل المان محدود با نتایج به دست آمده از کار آزمایشگاهی که در این زمینه انجام شد، مقایسه شده است. برای این منظور نتایج به دست آمده از کار آزمایشگاهی انورکاندیل [۱۵] با نتایج به دست آمده از شبیه سازی المان محدود مقایسه شده است. در این آزمایشها ورقهایی از جنس آلومینیم با ابعاد مختلف به روش هیدروفرمینگ در حالت جایگزینی ماتریس با فشار سیال، شکل دهی شده است. سپس با هدف بهینه سازی، تأثیر پارامترهای فرایند بر محصولات کشش بررسی شده است. با استفاده از دو معیار گسیختگی و کرنش ضخامت، سه روش کشش عمیق با هم مقایسه شده و در نهایت روش مناسب برای دستیابی به بیشترین نسبت کشش پیشنهاد شده است.

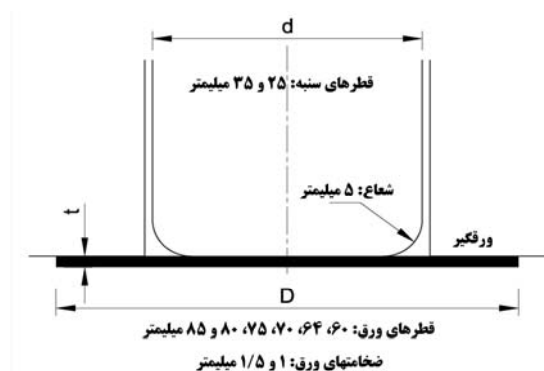
برای شبیه سازی به علت متقارن بودن قطعه، از تقارن محوری استفاده شده است. با توجه به این که تحلیل از نوع غیرخطی بوده و در آن تغییر شکلهای بزرگ روی می دهد، در تعریف ویژگیهای مکانیکی از حالت

1. Explicit
2. Mass Scale
3. Penalty

برای دو ورق با قطر کوچکتر ۲۵mm و برای سایر ورقها برابر ۳۵mm است [۱۵].

۳-۳- بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی ورق

شکل ۳ طرحواره قالب کشش عمیق را نشان می‌دهد. شرایط تکیه‌گاهی بدین گونه است که نگاه‌دارنده در جای خود ثابت است. بارگذاری نیز به وسیله فشار سیال در محفظه فشار که برای هر یک از ورقها مطابق نمودار شکل ۴ تغییر می‌کند، اعمال می‌شود. برای شکل دهی، سنبه نیز فاصله مشخصی را می‌پیماید. اندازه این فاصله در نمودارهای شکل ۴ برای هر یک از ورقها نشان داده شده است [۱۵].



شکل ۳ طرحواره سنبه، ورق و ورقگیر در کشش عمیق هیدروفورمینگ

۳-۴- حانتهای شکست

شکست در فرایند کشش عمیق شامل دو حالت است: چروکیدگی زیاد و پارگی یا گسیختگی. گسیختگی مشتمل است بر: گسیختگی آغازین که در ابتدای پیشروی سنبه روی می‌دهد، گسیختگی میانی نیز در میانه‌های پیشروی و گسیختگی نهایی در مراحل پایانی پیشروی سنبه روی می‌دهد [۱۶]. برخی از این حالتها در ادامه بررسی و مقایسه شده است.

$$\sigma = k\varepsilon^n \quad (۱)$$

ثابتهای رابطه بالا از آزمون کششی با توجه به استاندارد ASTM E.8.81 تعیین شده است. نسبت ناهمسانگردی^۱ در آزمایشی از استاندارد ASTM S17-81 به دست آمده است. ویژگیهای مکانیکی ورق آلومینیوم به طور کامل در جدول ۱ آورده شده است [۱۵].

ضریب اصطکاک سطوح ورق با قالب به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$\mu = 0.03 \quad \text{اصطکاک قطعه و نگاه‌دارنده (ورقگیر)},$$

$$\mu = 0.1 \quad \text{اصطکاک قطعه و سنبه}$$

جدول ۱ خواص مکانیکی ورق آلومینیوم [۱۵]

خواص	آلومینیوم
مقاومت تسلیم (MPa)	۲۵
مقاومت نهایی کششی (MPa)	۸۰
سختی (HB)	۲۳
تغییر طول (%)	۳۵
ضریب مقاومت K (MPa)	۱۸۰
توان کرنش سختی n	۰/۲
میانگین نسبت ناهمسانگردی R	۰/۶۵

۳-۲- ابعاد ورق

اجزایی که برای شبیه‌سازی طراحی شده شامل سه قطعه ورقگیر، ورق و سنبه است. ابعاد هندسی بلنک به ترتیب: ۶۰mm، ۶۴، ۷۰، ۷۵، ۸۰ و ۸۵ و ضخامت ورقها برابر ۱ و ۱/۵mm است. سنبه و ورقگیر نیز صلب در نظر گرفته شده است. همچنین قطر سنبه‌ها

معیار فردنتال

این معیار شکست را با فراتر رفتن کار مومسانی بر واحد حجم یا چگالی انرژی در طول فرایند شکل‌دهی از یک اندازه ثابت پیش‌بینی می‌کند.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} = c_1 \quad (2)$$

معیار کوک روفت ولاتام

برای هر ماده مشخص، گسیختگی هنگامی روی می‌دهد که حاصل انتگرالی زیر به اندازه ثابت c_2 برسد:

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \bar{\sigma}_\theta d\bar{\epsilon} = c_2 \quad (3)$$

معیار oh

این معیار گسیختگی را با تحقق شرایط زیر پیش‌بینی می‌کند:

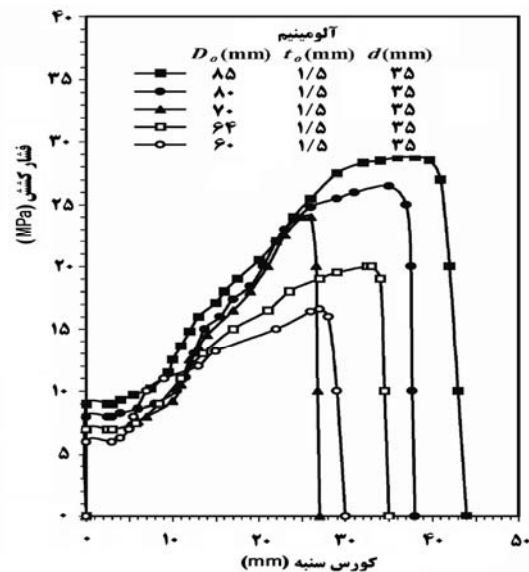
$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_\theta}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = c_3 \quad (4)$$

در این روابط σ_θ برابر تنش کششی است. معیارهای دیگری نیز در دسترس است، اما در این مقاله اولین معیار یعنی معیار چگالی انرژی برای پیش‌بینی شکست به‌کار رفته است. این معیار برای هر ماده دارای شرایط مرزی است که در ابتدا باید محاسبه شود و سپس می‌توان آن را در ارزیابی فرایند به‌کار برد.

۴- نتایج، مقایسه و بحث

۴-۱- درستی سنجی

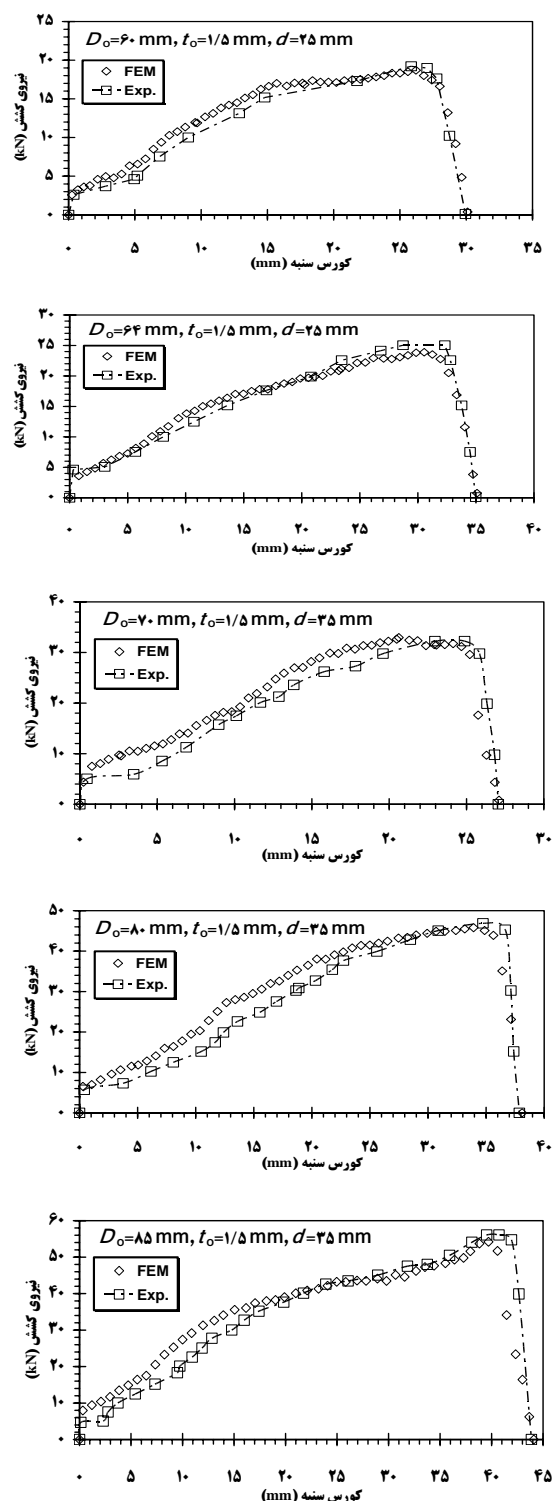
نتایج به‌دست آمده در شبیه‌سازی برای انجام مقایسه با کار آزمایشگاهی، دو نوع است. نوع اول نتایج عددی مانند نیروی کشش و کرنش ضخامت و نوع دوم نتایج شهودی که به‌گونه‌ای نشان‌دهنده حلالتهای پدیده گوشه‌ای، چروک‌خوردگی ورق و پارگی بوده است.



شکل ۴ نمودار تغییرات فشار درون محفظه به جابه‌جایی سنبه [۱۵]

۳-۵- معیارهای گسیختگی

یکی از پارامترهای مهمی که برای مقایسه روشهای کشش عمیق در این مقاله بررسی می‌شود، شرایط گسیختگی است. با استفاده از روش المان محدود، بسیاری از نتایج با بررسی شهودی فرایند مشخص نمی‌شوند. به‌بیان دیگر برای ارزیابی بسیاری از نتایج، به مطالعه عددی پارامترها نیاز است. یکی از این گونه نتایج پدیده گسیختگی است. در شبیه‌سازی با المان محدود برای مشخص شدن این پدیده به یک معیار عددی نیاز است. چندین معیار برای گسیختگی پیشنهاد شده است که در هر یک از این معیارها براساس نتایج عددی شبیه‌سازی، گسیختگی به‌نوعی پیش‌بینی می‌شود. در این معیارها به ثابتهایی برای پیش‌بینی گسیختگی نیاز است که برای به‌دست آوردن آنها به انجام آزمایشهایی نیاز است. برخی از معیارهای شکست که در شبیه‌سازی با المان محدود براساس بررسیها در مقیاسهای بزرگ (نه در مقیاس ریزساختار) تهیه شده عبارتند از [۱۷]:



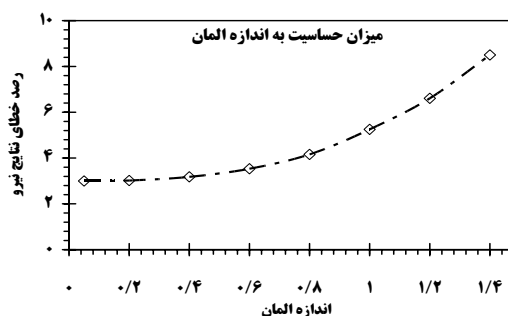
شکل ۶ مقایسه نمودارهای نیروی به دست آمده از آزمایش [۱۵] و

شبیه سازی [۱۸، ۱۹] برای ورقهایی با قطرهای مختلف

در این کار، چندین شبیه سازی روی ورقهایی با قطرهای گوناگون انجام شده است. برخی حالتها نشان از شکست فرایند داشته و در برخی دیگر، شبیه سازی موفقیت کار را نشان می دهد. نتایج شبیه سازی نشان داده است که فشار محفظه، تأثیر مهمی بر شکست یا موفقیت فرایند دارد. در ادامه این تأثیرها همراه با نتایج دیگر بررسی شده است. قبل از بررسی موارد ذکر شده، نخست تأثیر اندازه المان در شبیه سازی نسبت به نتایج آن در مقایسه با کار آزمایشگاهی ارزیابی شده است.

۴-۱-۱- تأثیر اندازه المان در نتایج به دست آمده از شبیه سازی

اندازه المان در شبیه سازی مهم بوده و نتایج حاصل به آن وابسته است. بنابراین باید اندازه بهینه برای المان تعیین شود. برای تعیین اندازه مناسب المان چندین شبیه سازی با المانهایی در اندازه های گوناگون انجام شد. در شکل ۵ منحنی حساسیت به اندازه المان نسبت به درصد خطای نتایج برای نیروی لازم در شکل دهی نشان داده شده است. با توجه به زمان پردازش و نتایج به دست آمده، اندازه مناسب المان در گستره ۰/۴ تا ۰/۶ میلی متر است. اندازه بیش از ۰/۶ باعث ایجاد خطا در نتایج شده و اندازه کمتر از ۰/۴ تأثیر چندانی بر نتایج ندارد. بنابراین در شبیه سازی از اندازه ۰/۵ برای المان استفاده شده است.



شکل ۵ نمودار حساسیت به اندازه المان

۴-۱-۲- نمودار نیرو - جابه‌جایی برای قطرهای گوناگون

نمودارهای شکل ۶ نشان‌دهنده تغییرات نیروی سنبه با جابه‌جایی (نیرو - جابه‌جایی) برای چند نمونه ورق اولیه ذکر شده است. این نمودارها مقایسه‌ای میان نتایج کار آزمایشگاهی [۱۵] و شبیه‌سازی [۱۸، ۱۹] انجام شده است که سازگاری خوبی را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودارها، برای نیروی بیشینه سنبه در حدود ۹۰ درصد پیشروی سنبه روی می‌دهد. در جدول ۲ بیشترین نیروی به‌دست آمده از شبیه‌سازی، کار آزمایشگاهی [۱۵] و درصد خطا نسبت به‌روش آزمایشگاهی نشان داده شده است. این مقایسه‌ها نیز همخوانی شبیه‌سازی و کار آزمایشگاهی را نشان می‌دهند.

جدول ۲ مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی [۱۵] برای بیشترین نیروی به‌دست آمده

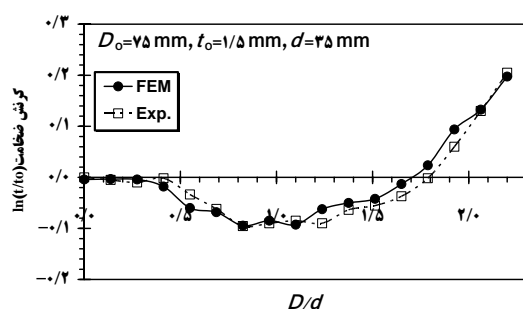
قطر بلنک (mm)	۶۰	۶۴	۷۰	۸۰	۸۵
شبیه‌سازی (kN)	۱۸/۵	۲۳/۵	۳۴	۴۴	۴۹/۵
آزمایشگاهی (kN)	۱۹	۲۵	۳۳	۴۶	۵۶
خطا (%)	۳	۶	۳	۴/۳	۱۲

۴-۱-۳- نمودار فاصله از مرکز - کرنش ضخامت

در فرایندهای کشش عمیق در ضخامت ورق تغییراتی پدید می‌آید. این دگرگونیها در برخی جاها به کاهش ضخامت و در نواحی دیگری از فنجان به افزایش ضخامت منجر می‌شود. تغییرات ضخامت در کشش عمیق بسیار مهم است، زیرا بر کیفیت قطعه تأثیرگذار بوده و کاهش بیش از حد آن باعث پدیده گلویی می‌شود.

در شبیه‌سازی کشش عمیق پارامتر کرنش ضخامت به‌خوبی گویای تغییرات است. بنابراین پیش‌بینی درست آن از اهمیت بسیاری برخوردار است. در شکل ۷ تغییرات کرنش ضخامت به‌دست آمده از کار آزمایشگاهی [۱۵] و

شبیه‌سازی [۱۸، ۱۹] با یکدیگر مقایسه شده است. همخوانی نتایج به‌دست آمده در شبیه‌سازی با کار آزمایشگاهی نشان‌دهنده درستی شبیه‌سازی است.



شکل ۷ نمودار تغییرات کرنش ضخامت برحسب فاصله از مرکز و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی [۱۸، ۱۵]

۴-۲- تأثیر پارامترهای مؤثر بر کشش عمیق هیدروفورمینگ

۴-۲-۱- بررسی تأثیر فشار اولیه بر موفقیت فرایند

شبیه‌سازی و کار آزمایشگاهی نشان داده است که فشار اولیه درون محفظه تأثیر زیادی بر شکست یا موفقیت فرایند دارند. بر پایه این بررسیها برای افزایش فشار محدودیت وجود داشته و پدیده گسیختگی روی می‌دهد. با کاهش فشار نیز بر همین اساس، پدیده چروکیدگی روی می‌دهد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که در فرایند هیدروفورمینگ، فشار محفظه دارای حد پایینی و حد بالایی است. حد بالایی باعث پدیده گلویی و پارگی می‌شود که معادل نیروی ورقگیر زیاد است و حد پایینی باعث چروکیدگی می‌شود و معادل نیروی کم ورقگیر در روش سنتی است.

چروکیدگی^۱

در کشش ورق با فشار اولیه ۳MPa درون محفظه، کار آزمایشگاهی چروکیدگی ورق را نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی

1. Wrinkling

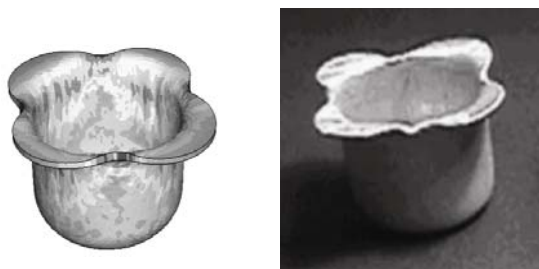
نتایج شبیه‌سازی با کار آزمایشگاهی همخوانی داشته (شکل ۹) و پارگی ورق را در ناحیه یاد شده نشان می‌دهد. در این شکل می‌توان با دانستن اینکه کرنش ضخامت به حدود ۰/۹ رسیده، پدیده گلویی را در گوشه‌های محل تماس سنبه بر روی بلنک تشخیص داد. ابعاد و اندازه‌های ورق به صورت زیر است:

$$D_o = 80 \text{ mm}, t_o = 1/5 \text{ mm}, d = 35 \text{ mm}$$

پدیده گوشه‌ای

ناهمسانگردی ماده به کار رفته در کشش عمیق باعث شکل یافتن نایک‌نواخت ورق در جهت‌های گوناگون می‌شود که پدیده گوشه‌ای یا گوشدار شدن نامیده می‌شود. در شکل ۱۰ نتایج حاصل از آزمایش [۱۵] و شبیه‌سازی با هم مقایسه شده است. اثر یاد شده به درستی در شبیه‌سازی نیز آشکار شده است. ابعاد ورق و شرایط کشش مانند دو حالت قبل است، با این تفاوت که فشار اولیه درون محفظه برابر ۷MPa بوده است. در این حالت به خلاف حالت‌های پیشین، کشش موفقیت‌آمیز است. ابعاد و اندازه‌های ورق به قرار زیر است:

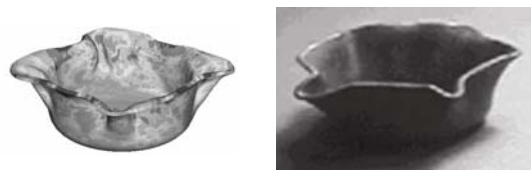
$$D_o = 80 \text{ mm}, t_o = 1/5 \text{ mm}, d = 35 \text{ mm}$$



شکل ۱۰ پدیده گوشه‌ای در اثر ناهمسانگردی ویژگی‌های مکانیکی ماده بلنک آزمایشگاهی (راست) [۱۵] و شبیه‌سازی (چپ)

مطابق شکل ۸ چپ، چین و چروک ورق نشانه ناموفق بودن فرایند کشش است. در شکل ۸ سمت راست نیز نتیجه کار آزمایشگاهی [۱۵] درستی شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. ابعاد و اندازه‌های ورق به قرار زیر است [۱۵]:

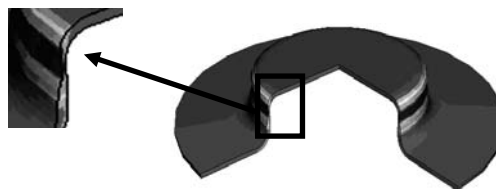
$$D_o = 70 \text{ mm}, t_o = 1/5 \text{ mm}, d = 35 \text{ mm}$$



شکل ۸ مقایسه چروکیدگی ورق در کار آزمایشگاهی (راست) [۱۵] و شبیه‌سازی (چپ)

گسیختگی

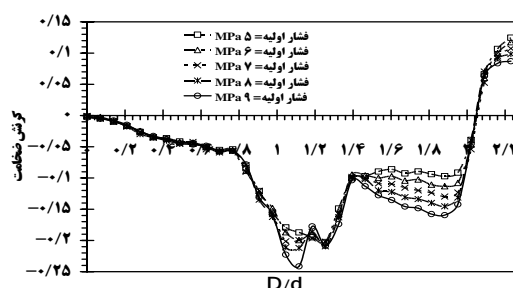
شکل ۹ نمونه‌ای را از گسیختگی اولیه نشان می‌دهد. این گسیختگی در آغاز فرایند و روی گوشه‌های سنبه روی داده است. در کشش عمیق هیدروفرمینگ مطابق مشخصات ورق آلومینمی که در بخش پیش گفته شد، با شرایطی که فشار اولیه درون محفظه برابر ۱۲MPa و فشار بیشینه برابر ۳۲MPa است، کار آزمایشگاهی ناموفق بودن کشش و پارگی ورق را در گوشه سنبه نشان می‌دهد [۱۵].



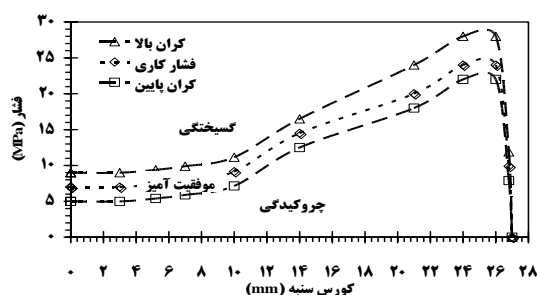
شکل ۹ گسیختگی اولیه در مقایسه میان کار آزمایشگاهی (بالایی) [۱۵] و شبیه‌سازی (پایینی)

۴-۲-۲- تأثیر فشار اولیه بر کرنش ضخامت

کرنش ضخامت یکی از معیارهای مهم برای پیش‌بینی پدیده گلوپی و پارگی ورق و همچنین برای محاسبه نسبت کشش بیشینه (LDR) است، زیرا کرنش ضخامت بحرانی تعیین‌کننده نسبت کشش بیشینه است [۱۵، ۲۰]. شکل ۱۱ مقایسه‌ای است میان کرنش ضخامت فنجانهایی که با فشار اولیه متفاوت به‌دست آمده‌اند. از این شکل می‌توان دریافت که با افزایش فشار اولیه، کرنش ضخامت در نواحی گوشه و دیوار فنجان افزایش می‌یابد. این شرایط امکان پارگی را به‌ویژه در گوشه‌های سنبه افزایش می‌دهد. همچنین با توجه به اینکه با افزایش فشار، ضخامت کاهش می‌یابد، نسبت کشش نیز محدودتر می‌شود. با توجه به اثر فشار اولیه بر پدیده‌هایی مانند چروکیدگی و گسیختگی، می‌توان این اثر را در طول فرایند نیز تعمیم داد. شکل ۱۲ با انجام چندین شبیه‌سازی، تأثیر فشار محفظه بر شکست یا موفقیت فرایند کشش عمیق هیدروفرمینگ را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ تأثیر فشار اولیه بر تغییرات کرنش ضخامت



شکل ۱۲ نمودار کران بالا و پایین فشار محفظه

برای هر نسبت کشش معین، این نمودار دارای سه بخش است:

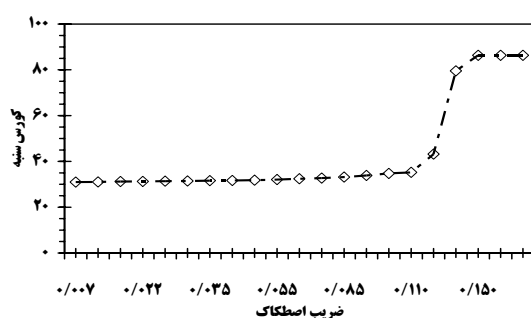
- ۱- گستره پایینی که در آن چروکیدگی روی می‌دهد.
- ۲- گستره میانی که نشان‌دهنده دامنه فشار برای انجام موفقیت‌آمیز فرایند است.
- ۳- گستره بالایی که نشان‌دهنده پدیده گسیختگی در فشارهای بالای محفظه است.

بنابراین برای هر فرایند معین می‌توان نمودارهای کران پایین و بالا را یافت، به‌گونه‌ای که در هر لحظه از فرایند، کاهش فشار از نمودار کران پایین سبب آغاز چروکیدگی می‌شود و با فراتر رفتن فشار از نمودار کران بالا، گسیختگی روی می‌دهد. با توجه به اینکه این نمودار نشان‌دهنده تغییرات فشار با پیشروی سنبه است آن را PD-PT نامگذاری می‌کنیم. از سوی دیگر با توجه به نتایج شکل ۱۱ با افزایش فشار حتی اگر از دامنه یاد شده فراتر نرود، باعث افزایش کرنش ضخامت در نواحی گوشه‌ها و دیوار محصول می‌شود که این افت کیفیت و کاهش نسبت کشش را در پی دارد. عکس آن نیز صادق است، یعنی با کاهش فشار می‌توان نسبت کشش را افزایش داد. بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که نمودار بهینه تغییرات فشار، کران پایین آن است و بیشترین نسبت کشش نیز در این شرایط به‌دست می‌آید.

۴-۲-۳- تغییرات فشار اولیه مورد نیاز با نسبت کشش

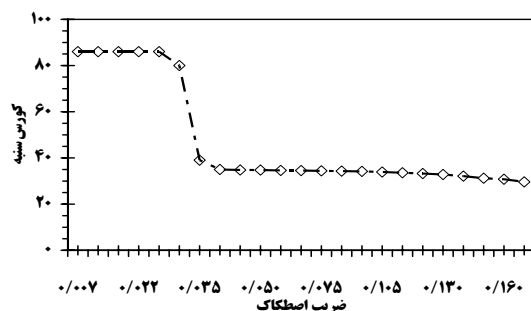
شکل ۱۳ تغییرات فشار اولیه مورد نیاز را با افزایش نسبت کشش نشان می‌دهد. در این شکل، اندازه فشار در واقع همان فشار اولیه در نمودار PD-PT است. در اینجا نیز به‌دست آوردن گستره فشار مورد نیاز در حالت‌های گوناگون نسبت کشش برای انجام کشش موفق مهم است. این دامنه در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به اینکه این نمودار نشان‌دهنده تغییرات فشار اولیه با نسبت

داشت. در اینجا جهش در حدود ضریب اصطکاک ۰/۱۲ روی می‌دهد. نکته دیگری که می‌توان از نمودار دریافت این است که با ادامه روند افزایش ضریب اصطکاک از اندازه یاد شده، تأثیری در شرایط گسیختگی (نهایی) روی نمی‌دهد. بنابراین نگاه داشتن ضریب اصطکاک در محدوده کمی بالاتر از این اندازه (در حدود ۰/۱۳)، ضمن اینکه شرایط مناسب تولید را فراهم می‌سازد (پرهیز از گسیختگی اولیه)، ما را از صرف هزینه غیرضروری افزایش ضریب اصطکاک بی‌نیاز می‌کند.



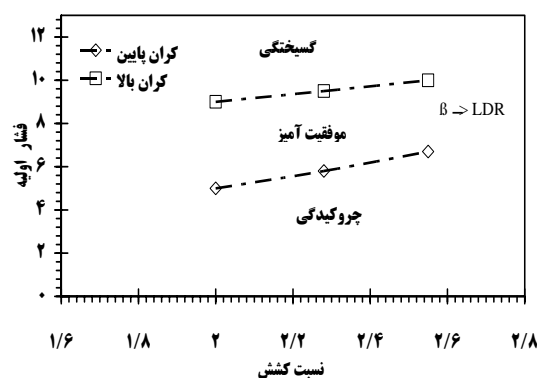
شکل ۱۴ تأثیر اصطکاک میان ورق و سنبه بر زمان گسیختگی

ضریب اصطکاک میان ورق و نگاه‌دارنده نیز مانند اصطکاک سنبه تأثیری مشابه دارد، با این تفاوت که جهش ناگهانی با کاهش ضریب اصطکاک از یک اندازه خاص روی می‌دهد. شکل ۱۵ که از شبیه‌سازی به‌دست آمده این موضوع را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵ تأثیر اصطکاک میان ورق و نگاه‌دارنده بر زمان گسیختگی

کشش است، آن را (IP-DR) نامگذاری می‌کنیم. از این نمودار همچنین می‌توان نسبت کشش بیشینه (LDR) را به‌دست آورد. مهمترین معیاری که می‌توان برای حد بالای این نمودار در نظر گرفت، کرنش ضخامت بحرانی است که حتی پیش از رسیدن به شکست روی می‌دهد. اگر در این شکل، نمودار کران پایین فشار را در نظر بگیریم، در اندازه حدی این نمودار به سمت LDR میل می‌کند.



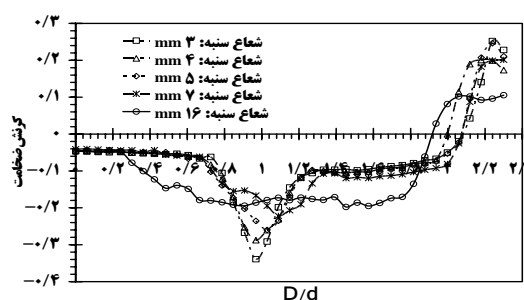
شکل ۱۳ نمودار کران پایین فشار اولیه برای نسبت‌های گوناگون کشش

۴-۲-۴- تأثیر اصطکاک

با توجه به اینکه اعمال شرایط ویژه اصطکاکی نیازمند صرف هزینه است، هر اندازه ضریب اصطکاک افزایش یابد، هزینه کار بالاتر می‌رود. در شکل ۱۴ تأثیر ضریب اصطکاک میان ورق و سنبه بر زمان گسیختگی بررسی شده است. این نمودار گویای آن است که با افزایش ضریب اصطکاک میان ورق و نگاه‌دارنده، پارگی به تأخیر می‌افتد. اما با فراتر رفتن ضریب اصطکاک از یک اندازه خاص، در این تأثیر یک جهش ناگهانی روی داده و گسیختگی به پایان فرایند منتقل می‌شود. این دگرگونی، ویژگی مفیدی است، زیرا می‌توان با تغییر کمی در ضریب اصطکاک، یک جهش ناگهانی در پرهیز از شکست

۴-۲-۵- تأثیر شعاع سنبه

شعاع گوشه سنبه تأثیر مهمی بر فرایند دارد [۲]. برای بررسی تأثیر این پارامتر، شبیه‌سازی در چندین حالت با شعاعهای گوناگون (گوشه سنبه) و با شرایط پایه انجام شده است. در شکل ۱۶ تأثیر این عامل بر پارامترهای مهمی مانند کرنش ضخامت بررسی شده است. این نمودار نشان می‌دهد که با کاهش شعاع گوشه‌های سنبه، کرنش ضخامت افزایش می‌یابد. این تغییر دو نتیجه را در بردارد: یکی اینکه احتمال پارگی افزایش می‌یابد، دوم اینکه کاهش ضخامت نسبت به دیگر نواحی کشش، باعث کاهش کیفیت محصول می‌شود.



شکل ۱۶ تأثیر شعاع سنبه نسبت به کرنش ضخامت

۴-۳- مقایسه سه روش کشش عمیق

روشهای کشش عمیق که در اینجا مقایسه و بررسی می‌شوند شامل روش سنتی [۲] و دو روش هیدروفرمینگ است. روش اول هیدروفرمینگ مربوط به حالتی است که سنبه با فشار سیال جایگزین شده و در روش دوم هیدروفرمینگ، جایگزینی با ماتریس انجام شده است.

برای مقایسه سه روش یاد شده، باید پارامترهای مهم و تأثیرگذار در موفقیت فرایند و کیفیت محصولات آن بررسی شود. برای این مقایسه‌ها هر یک از روشها با شرایط یکسانی شبیه‌سازی شده است. در جدول ۳ ابعاد و شرایط کشش ورق آلومینیومی که در شبیه‌سازی هر یک از روشهای کشش عمیق به کار رفته، نمایش داده شده است.

جدول ۳ شرایط کشش ورق

۰/۱	اصطکاک ورق با ورقگیر و ماتریس
۲/۵	اصطکاک ورق و سنبه
۵۸mm	قطر ورق اولیه
۱mm	ضخامت
۲۹mm	قطر سنبه

۴-۳-۱- محاسبه شرایط گسیختگی

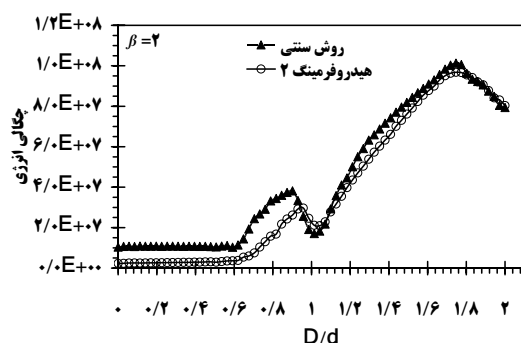
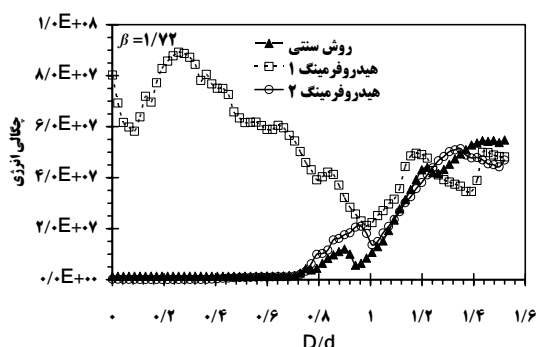
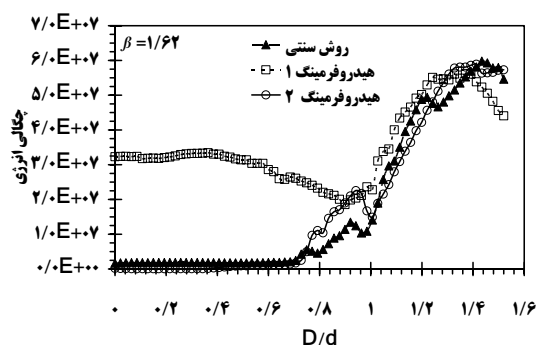
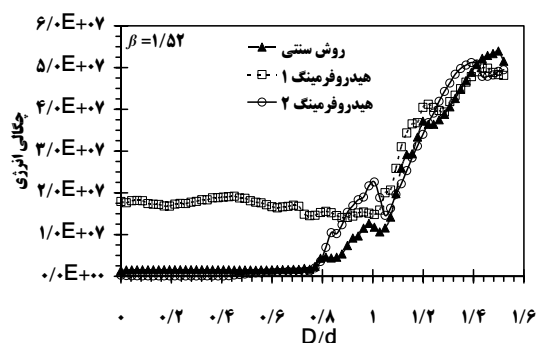
در بررسی فرایندهای شکل‌دهی به‌ویژه کشش عمیق، با توجه به پیچیده بودن معادلات و روابط میان پارامترهای گوناگون و وجود تنشها و کرنشهای سه‌بُعدی به یک معیار عمومی (که در حالت‌های دو‌بُعدی و سه‌بُعدی قابل اطمینان باشد) برای پیش‌بینی گسیختگی نیاز داریم. با توجه به اینکه بسیاری از نرم‌افزارهای المان محدود در نمایشهای گرافیکی، گسیختگی را نشان نمی‌دهند، این معیار باید بدون توجه به شرایط هندسی قطعه بتواند گسیختگی را با بررسیهای عددی پیش‌بینی کند.

یکی از مهمترین معیارهایی که معمولاً برای پیش‌بینی پارگی و شکست فرایند بررسی شد، معیار فردنتال است. در این معیار، پارگی بر این اساس تعریف می‌شود که چگالی انرژی شکل‌دهی در طول فرایند به اندازه مشخصی برسد. اما همه معیارهای گسیختگی از جمله معیار نامبرده دارای تعدادی از ثابتهای یا شرایط مرزی می‌باشند که باید محاسبه شود.

برای این منظور در تست کشش با توجه به آزمون استاندارد ASTM به شماره E.8.81 در شرایط زیر نمونه آلومینیومی پاره می‌شود [۹، ۲۱]:

(۵)

$$e = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = 0.35 \Rightarrow \varepsilon = \ln \frac{l_1}{l_0} = \ln \frac{A_0}{A_1} = \ln 1.35 = 0.3$$



شکل ۱۷ تغییرات چگالی انرژی برای روشهای مختلف کشش عمیق در نسبتهای گوناگون کشش

ثابت c_1 با توجه به رابطه (۲)، از محاسبه سطح زیر نمودار تنش- کرنش ماده آلومینیم به دست آمده است:

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} = c_1 = 91/000/000 \frac{J}{m^3} \quad (6)$$

۴-۳-۲- چگالی انرژی

چگالی انرژی شکل دهی برابر مقدار انرژی است که یک جزء کوچک (یک المان) به نسبت حجم آن در طول فرایند جذب می کند. همانگونه که گفته شد این پارامتر به عنوان نوعی معیار گسیختگی مطرح است. برای مقایسه میان شرایط گسیختگی و نسبت کشش در سه روش کشش عمیق می توان تغییرات این پارامتر را در محصول بررسی کرد. نمودارهای شکل ۱۷ تغییرات چگالی انرژی را در طول فرایند برای چند نسبت کشش و برای هر یک از روشهای مذکور نشان می دهد.

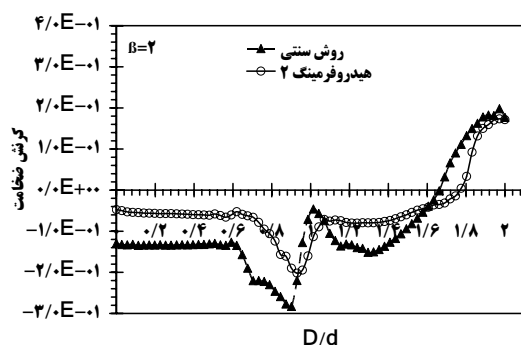
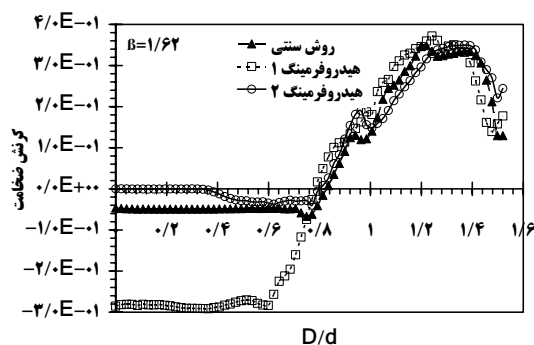
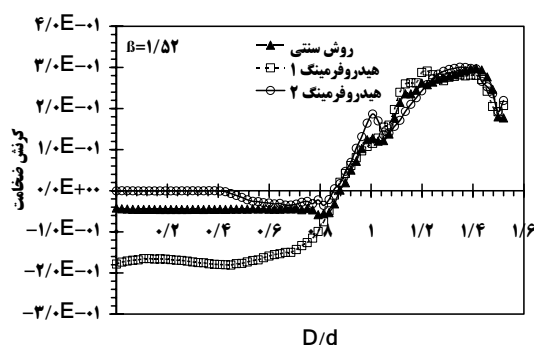
این نمودارها نشان می دهند که در هر یک از روشهای کشش، چگالی انرژی در نواحی خاصی تغییرات محسوسی دارد. برای هر یک از روشهای کشش این نواحی عبارتند از:

- در روش سنتی گوشه پایین و بالا و دیوار فنجان.
- در روش اول هیدروفورمینگ مرکز ورق و گوشه پایین فنجان.

• در روش دوم هیدروفورمینگ گوشه پایین و بالای فنجان. از بررسی این نمودارها می توان نکات زیر را دریافت:
- با نسبتهای کشش کمتر از ۱/۵۲ در هیدروفورمینگ نوع نخست، توزیع چگالی انرژی نسبت به روشهای دیگر از یکنواختی بیشتری برخوردار است.

- تغییرات این پارامتر در روش دوم هیدروفورمینگ و روش سنتی دارای اندازه و شیب بیشتری است. به گونه ای که در نواحی مرکزی این پارامتر ناچیز بوده و در ناحیه گوشه های سنبه دارای جهشی ناگهانی است. با پیشروی سنبه در میانه های فرایند، افزایش چگالی انرژی در این ناحیه متوقف می شود.

شکل ۱۸ تغییرات کرنش ضخامت پس از پایان کشش را برای سه روش کشش عمیق نشان می‌دهد. از این نمودارها نکات زیر را می‌توان دریافت:



شکل ۱۸ تغییرات کرنش ضخامت برای روشهای مختلف کشش عمیق در نسبتهای گوناگون کشش

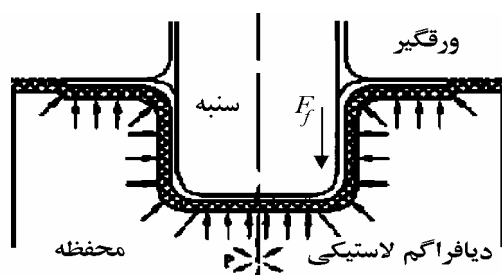
در تمامی این نمودارها، روش نخست هیدروفرمینگ در کف ظرف نازک‌شدگی بیشتری را نسبت به دیگر

با نسبتهای کشش ۱/۵۲ تا ۱/۷۲ دیده می‌شود که چگالی انرژی بیشینه در روش اول هیدروفرمینگ، جهشی ناگهانی داشته و در این روش نسبت به دو روش دیگر بالاتر می‌رود؛ در حالی که تغییرات چگالی انرژی در دیوار فنجان مانند دو روش دیگر است. جهش ناگهانی این پارامتر در ناحیه مرکزی ورق روی می‌دهد و این نشان‌دهنده نزدیک شدن به خطر گسیختگی و در نتیجه محدود شدن نسبت کشش است.

با فراتر رفتن نسبت کشش از ۱/۷۲ در روش اول هیدروفرمینگ گسیختگی روی می‌دهد. این موضوع با دانستن این که چگالی انرژی از $91000/000 J/m^2$ فراتر رفته است روشن می‌شود. روش سنتی و روش دوم هیدروفرمینگ، همچنان اندازه‌ای یکسان دارند. اما در نسبتهای کشش حدود ۲ به بالا، آن گونه که نمودار چهارم از شکل ۴ نشان می‌دهد، در روش سنتی نسبت به روش هیدروفرمینگ، چگالی انرژی در ناحیه گوشه سنبه افزایش بیشتری دارد. بنابراین در روش سنتی نسبت به روش هیدروفرمینگ، خطر پارگی بیشتر است.

۴-۳-۳- کرنش ضخامت

کرنش ضخامت یکی از پارامترهای مهم در کشش عمیق است و اهمیت آن از دو دلیل است. یکی اینکه معیاری برای پیش‌بینی نسبت کشش بیشینه [۲۰] و پدیده گلویی است و دوم اینکه می‌توان کیفیت قطعه را در زمینه تغییرات ضخامت بررسی کرد. تغییرات زیاد و ناگهانی ضخامت نشانه کاهش کیفیت محصول بوده و در شبیه‌سازی نیز آشکار می‌شود. با توجه به اهمیت کرنش ضخامت، در این بخش تغییرات پارامتر یاد شده برای هر سه روش بررسی شده است.



شکل ۱۹ نیروی اصطکاک در کشش عمیق هیدروفرمینگ

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش شبیه‌سازی فرایندهای کشش عمیق هیدروفرمینگ و سستی با روش المان محدود و به کمک نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است. با این روش می‌توان تأثیر پارامترهای بسیاری را که برای دست یافتن به آن به وقت و هزینه زیاد نیاز است با صرف کمترین وقت و هزینه، بررسی کرد. در روش کشش عمیق هیدروفرمینگ، بر اثر فشار سیال درون محفظه، ورق کاملاً به سنبه می‌چسبد و شکل آن را به خود می‌گیرد. در ابتدا برای بررسی درستی شبیه‌سازی، برخی از نتایج به دست آمده از این روش با نتایج حاصل از کار آزمایشگاهی [۱۵] که پیشتر انجام شده، مقایسه شد. این شبیه‌سازیها نشان داد که اندازه المان در محدوده مشخصی دارای خطای کمتری نسبت به کار آزمایشگاهی است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی شکل‌دهی ورق آلومینیم سازگاری خوبی با نتایج به دست آمده از کار آزمایشگاهی داشته است.

همچنین تأثیر پارامترهای مهم در هیدروفرمینگ کشش عمیق مانند فشار محفظه، ضریب اصطکاک و شعاع گوشه‌های سنبه بر محصولات فرایند ارزیابی شده است. شبیه‌سازی نشان داده است که فشار اولیه درون محفظه تأثیر مهمی بر شکست یا موفقیت فرایند دارد. مطابق بررسیهای انجام شده، موفقیت فرایند کشش عمیق هیدروفرمینگ

روشها پدید می‌آورد. با افزایش نسبت کشش (۱/۵۲ تا ۱/۷۲)، در روش نخست هیدروفرمینگ، در کف فنجان ضخامت ورق به شدت کاهش یافته و پدیده گلویی در این ناحیه روی می‌دهد. بنابراین گسیختگی رخ داده و نسبت کشش محدود می‌شود. اما در روش سستی و روش دوم هیدروفرمینگ که این ناحیه در زیر سنبه است، تغییر ضخامت اندکی یافته و تنها در ناحیه گوشه سنبه، نازک شدگی ضخامت به میزان کمی روی می‌دهد.

بر پایه پژوهشهای انجام شده، نسبت کشش با کرنش ضخامت محدود می‌شود [۱۵]. این محدودیت بر اثر کاهش ضخامت روی می‌دهد. با فراتر رفتن نسبت کشش از ۲ تفاوت میان روش دوم هیدروفرمینگ و روش سستی آشکار می‌شود (آخرین نمودار شکل ۱۸). در ناحیه گوشه سنبه، کرنش ضخامت نسبت به روش هیدروفرمینگ افزایش یافته و باعث محدودیت در نسبت کشش می‌شود. بنابراین برتری مهم روش دوم هیدروفرمینگ در مقایسه با روش سستی، افزایش نسبت کشش و همچنین کیفیت بهتر محصولات به دلیل یکنواختی بیشتر ضخامت آنها است. همچنین در فرایند سستی کششهای با نسبت کشش بالا را در چند مرحله انجام می‌دهند [۲۲]. در حالی که این کار در هیدروفرمینگ در یک مرحله انجام می‌شود.

یکی از دلایل این تغییر در هیدروفرمینگ را می‌توان حذف اصطکاک میان ورق و ماتریس به عنوان یک عامل مزاحم در کشش عمیق دانست. عامل دیگر این است که به دلیل فشار در محفظه، ورق به دیوار سنبه می‌چسبد (شکل ۱۹) و نیروی اصطکاک حاصل از آن بخشی از نیروی کششی را در دیوار فنجان تحمل می‌کند، در حالی که در روش سستی چنین نیرویی تنها در گوشه‌های سنبه وجود دارد.

فهرست نمادها و نشانه‌ها			
k	ضریب مقاومت	c_3	ثابت oh
n	توان کرنش سختی	D	قطر بلنک
c_1	ثابت فردنتال	d	قطر سنبه
c_2	ثابت کوک روفت ولاتا	t	ضخامت بلنک
نمادهای یونانی			
ε	تنش کششی	μ	ضریب اصطکاک
σ	کرنش کششی		

۶- منابع

- [1] Meinders, T., Developments in Numerical Simulations of the Real Life Deep Drawing Process, Ph. D. Thesis, University of Twente, Enschede, Ponsen & Looijen Wageningen (publ.), 2000.
- [۲] جاهد مطلق، ح. ر. و غفوری آهنگر، ر.، تعیین تنشهای پسماند در پروسه کشش عمیق ورقهای آلایژ آلومینیوم به روش المان محدود، دوازدهمین کنفرانس سالانه و هشتمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، اردیبهشت ۱۳۸۳، صفحه ۲۶۴.
- [3] Nielsen, K. B., Jensen, M. R., and Danckert, J., Automatic process layout for the aquadraw process, In: Proceedings of the 19th Risø International Symposium on Materials Science, Denmark, 1998, p. 391.
- [4] Kang, D., Lang, L., Meng, X., and Xuan, J., Hydrodynamic deep drawing process, J. Mater. Process. Technol. 101 (1-3), 2000, pp. 21-24.

نیازمند این است که فشار اولیه در محدوده مشخصی قرار داشته باشد. فشار فراتر، باعث گسیختگی و کمتر از این دامنه باعث چروکیدگی ورق می‌شود. فشار درون محفظه نیز تأثیر مشابهی بر فرایند داشته و این تغییرات با افزایش فشار روی می‌دهد. همچنین فشار اولیه بر شکست یا موفقیت فرایند تأثیر کلیدی داشته و انجام موفقیت‌آمیز کشش در گستره‌ای از فشار اولیه روی می‌دهد (نمودار شکل‌های ۱۱ و ۱۲ یا PD-PT). بررسیها نشان داده است که با تغییر اصطکاک، در یک ضریب اصطکاک معین، یک جهش ناگهانی در پرهیز از گسیختگی روی داده و به‌کارگیری ضریب اصطکاک مناسب در این محدوده، ضمن دستیابی به این مهم، فرایند ساخت را از متحمل شدن هزینه‌های اعمال شرایط ویژه اصطکاکی بی‌نیاز می‌کند. این بررسیها نشان داده است که کاهش شعاع گوشه‌های سنبه به دلیل تغییرات زیاد در ضخامت، باعث افت کیفیت محصول و محدود شدن نسبت کشش می‌شود.

در روش هیدروفرمینگ نوع دوم، براساس شکل‌های ۱۷ و ۱۸، تغییرات چگالی انرژی و کرنش ضخامت و اندازه بیشینه آنها نسبت به روش سنتی کمتر بوده و در نتیجه ضخامت ورق شکل داده شده از یکنواختی بیشتری برخوردار خواهد بود. بنابراین در روش هیدروفرمینگ کشش عمیق، از لحاظ تغییرات در ضخامت و خطای هندسی و ابعادی، کیفیت محصول بهتر است. در کشش عمیق، نسبت کشش با کرنش ضخامت محدود می‌شود.

با توجه به مطالب گفته شده، نسبت کشش در روش اول یعنی جایگزینی سنبه با فشار سیال، کمتر از روش سنتی (کشش عمیق با قالب و سنبه) و روش سنتی نیز دارای نسبت کشش کمتری نسبت به روش دوم یعنی جایگزینی ماتریس با فشار سیال است و در کشش عمیق هیدروفرمینگ می‌توان به نسبت‌های کشش بالاتری دست یافت. رابطه زیر نتیجه‌گیری کلی را در زمینه نسبت کشش نشان می‌دهد: روش دوم < روش سنتی < روش اول.

- Hydromechanical deep-drawing of aluminum parabolic workpieces-experiments and numerical simulation, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 40 (10), 2000, pp. 1479–1492.
- [13] Lange, K., *Handbook of Metal Forming*, Second Printing, McGraw-Hill, New York, 1994.
- [14] Ohler, G., and Kaiser, F., *Sehnitt-Stanze-undZiehwerkeuge*, Springer, Berlin, 1973.
- [15] Kandil, A., An Experimental Study of Hydroforming Deep Drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, 134, 2003, pp. 70-80.
- [16] Lang, L., Danckert, J., and Nielsen, K. B., Investigation into Hydroforming Deep Drawing Assisted by Radial Pressure, Part I. Experimental Observations of the Forming Process of Aluminum Alloy, 148, 2004, pp. 119-131.
- [17] Narayana Murty, S. V. S., Nageswara Rao, B., and Kashyap, B. P., Improved ductile fracture criteriation for cold forming of spheroidised steel, *Indian institute of technology, Bombay, Mumbie, India*, 2003.
- [18] پاکباز، م.، غفوری آهنگر، ر. و جوانرودی، ف.، شبیه‌سازی کشش عمیق هیدروفرمینگ ورق‌های آلومینیوم به‌روش المان محدود، اولین کنفرانس شکل‌دهی فلزات انجمن مهندسان مکانیک ایران،
- [5] Thiruvardchelvan, S., and Lewis, W., A note on hydroforming with constant fluid pressure, *J. Mater. Process. Technol.* 88, 1999, pp. 51–56.
- [6] Amino, H., Nakamura, K., and Nakagawa, T., Counter-pressure deep drawing and its application in the forming of automobile parts, *J. Mater. Process. Technol.* 23, 1990, pp. 243–265.
- [7] Zhang, S. H., Zhou, L. X., Wang, Z. T., and Xu, Y., Technology of sheet hydroforming with a movable female die, *J. Mach. Tools Manuf.* 43 (8), 2003, pp. 781–785.
- [8] Raabe, D., Wang, Y., and Roters, F., Crystal plasticity simulation study on the influence of texture on earing in steel, *Computational Materials Science* 34, 2005, pp. 221–234.
- [9] Kalpakjian, S., *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Addison Wesley Longman, 1997, pp. 424-450.
- [10] Luke, H.U., Hartl, Ch., and Abbey, T., Hydroforming, *J. Mater. Process. Technol.* 115, 2001, pp. 87–91.
- [11] Siegert, K., Hohnhaus, J., and Wagner, S., Combination of hydraulic multipoint cushion system and segment-elastic blank holders, *SAE-Paper No.:* 980077, 1998.
- [12] Zhang, S. H., Lang, L. H., Kang, D. C., Danckert, J., and Nielsen, K. B.,

- [20] EL-Domiaty, A., Kandil, A., and Shaker, M., Deep drawing assisted by radial pressure-theoretical analysis, port-said sci. Eng. 3, 1991, pp. 48-59.
- [21] Dowling, N. E., Mechanical Behavior of Materials, Second Edition, Prentice-Hall, 1999.

[۲۲] مجله قالبسازان، اسفند ۱۳۸۳.

سالن همایشهای شرکت سایکو، تهران، ایران، دی ۱۳۸۵، صص ۴۰۲-۴۰۹.

[۱۹] پاکباز، م.، غفوری آهنگر، ر. و جوانرودی، ف.، بررسی پارامترهای مؤثر در فرایند کشش عمیق هیدروفرمینگ به روش المان محدود، سومین کنفرانس شکل دهی مواد و فلزات ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران، اردیبهشت ۱۳۸۵.