



## بررسی تجربی و عددی طراحی پیش فرم در کشش عمیق چند مرحله‌ای ورق‌های نازک فولادی استحکام بالا

اکبر زمانی علیشاه<sup>۱</sup>، مهدی تاجداری<sup>۲\*</sup>، جعفر اسکندری جم<sup>۳</sup>، جمال صیدی<sup>۴</sup>

\* نویسنده مسئول: Tajdari@yahoo.com

### واژه‌های کلیدی

شبیه‌سازی، نسبت کشش‌حدی، روش اجزاء محدود، فرآیند کشش عمیق، فولاد ۴۱۳۰-AISI.

### چکیده

در این مقاله نتایج حاصل از آزمایش تجربی فرآیند کشش عمیق در تولید یک استوانه‌ای سرکروی از جنس نوعی فولاد استحکام بالا با نتایج شبیه‌سازی آن و سه نوع طراحی پیش‌فرم پیشنهادی (ارائه شده) مقایسه گردید، تا ضمن سنجش میزان صحت نتایج و دقت نرم‌افزار اجزاء محدود در پیش‌بینی فرآیند کشش عمیق چند مرحله‌ای در ورق‌های نازک فولادی استحکام بالا، مقادیر نسبت کشش‌حدی مراحل مختلف کشش و بازکشش آزمون تجربی نیز بهبود یابند. برای شبیه‌سازی، از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس نسخه ۳-۹-۶ استفاده گردید. در این تحقیق، ماده اولیه، یک لوح دایروی از ورق فولادی ۴۱۳۰-AISI آنیل شده با ضخامت ۲ mm می‌باشد که در بررسی تجربی طی یک مرحله کشش، سه مرحله بازکشش و دو مرحله عملیات حرارتی آنیل به استوانه‌ای با سرکروی تبدیل شد. برای معرفی خواص مکانیکی این فولاد آزمایش کشش تک محوری انجام و از نتایج آن استفاده گردید. مقایسه نتایج توزیع ضخامت در نرم‌افزار اجزاء محدود با ضخامت‌های اندازه‌گیری شده در پیرامون قطعات تولیدی در مراحل مختلف کشش و بازکشش صورت گرفت و از دقت خوبی برخوردار بود (حدوداً ۲/۵۵ درصد خطا) و بر همین اساس طراحی‌های پیشنهادی نیز شبیه‌سازی شد تا ویژگی‌های مناسب‌ترین طرح معرفی گردد.

- ۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک (ساخت و تولید)، دانشگاه آزاد اسلامی واحد هشتگرد
- ۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات کرمانشاه
- ۳- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات کرمانشاه
- ۴- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ایلام

## ۱- مقدمه

فرآیندهای شکل‌دهی فلزات<sup>۱</sup> نقشی حیاتی در دنیای صنعتی امروز ایفا می‌کنند. برتری این روش‌ها نسبت به روش‌های دیگر تولید همچون براده‌برداری از جهت هزینه و صرفه‌جویی در مواد اولیه، زمان و کیفیت محصول باعث شده است که به این روش‌ها توجه بیشتری معطوف گردد. از میان روش‌های گوناگون شکل‌دهی فلزات، کشش-عمیق<sup>۲</sup> را می‌توان به عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌های شکل‌دهی در نظر گرفت.

کشش عمیق، فرآیند شکل‌دهی سرد یک ورق فلزی تخت به درون یک محفظه‌ی سوراخ‌دار (ماتریس) است بدون آن‌که پدیده‌ی چروکیدگی بیش از حد، نازک شدن یا شکست در ورق رخ دهد[۱]. در تعاریف مربوط به فرآیند کشش عمیق، به تبدیل یک ورق به یک پوسته‌ی توخالی اصطلاحاً کشش و همچنین به تبدیل پوسته‌ی توخالی به یک پوسته با ابعاد کوچک‌تر بازکشش<sup>۳</sup> یا کشش مجدد گفته می‌شود[۲].

در سال‌های اخیر رایانه‌ها و نرم‌افزارهای مهندسی (طراحی به کمک رایانه<sup>۴</sup>، تولید به کمک رایانه<sup>۵</sup>، و مهندسی به کمک رایانه<sup>۶</sup>) به وسیله‌ای ضروری برای طراحی و محاسبات مهندسی در تمام زمینه‌ها تبدیل شده‌اند. در این میان، نرم‌افزارهای اجزاء محدود جایگاه ویژه‌ای در میان محققان کسب کرده‌اند و در حال حاضر به سرعت در جهت بهره‌گیری صنعتی نیز پیش می‌روند. نرم‌افزارهای اجزاء محدود توانایی بالایی در تحلیل مسائل پیچیده سازه‌های مکانیکی، شکل‌دهی فلزات، انتقال حرارت، ارتعاشات، بارگذاری‌های دینامیک، برق، مغناطیس و غیره دارند[۳].

از آنجائی که در طول فرآیند کشش عمیق عوامل زیادی از جمله خواص ماده (نسبت کشش حدی<sup>۷</sup> و ناهمسانگردی)،

هندسه‌ی سنبه و ماتریس و ... مؤثر هستند، لذا کیفیت محصول تولید شده بستگی به تجربه، مهارت و دانش طراح دارد که اساساً متکی بر سعی و خطا بوده (در محاسبه تعداد مراحل کشش و سایر متغیرها) و با صرف هزینه و زمان بسیار امکان‌پذیر می‌گردد. یکی از روش‌هایی که به منظور کاهش هزینه همواره مورد توجه محققین قرار گرفته، استفاده از روش اجزاء محدود<sup>۸</sup> در پیش‌بینی فرآیند کشش عمیق بوده است.

در مراجع و منابع خواص فلزات و هندبوک‌های شکل‌دهی فلزات جداول متعددی حاوی اطلاعات مربوط به شکل‌پذیری در فرآیند کشش عمیق وجود دارد؛ لیکن این اطلاعات عمدتاً مربوط به گروه فولادها و فلزات پرمصرف در زمینه شکل‌دهی می‌باشد و اطلاعات چندانی از فولاد AISI-۴۱۳۰ در دسترس نیست. اما از آن‌جا که این فولاد دارای نسبت استحکام به وزن بالائی بوده و از این منظر حائز اهمیت بالائی است لزوم پرداختن به این مسئله احساس می‌شود. فولاد AISI-۴۱۳۰ برای ساخت قطعات تحت تنش بالا، مثل قطعات سیستم تعلیق، مفتول‌ها<sup>۹</sup> و دسته‌موتورها، به ویژه در خودروهای مسابقه به کار می‌رود. مصارف دیگر آن در خطوط انتقال گاز، مخازن گاز طبیعی فشرده<sup>۱۰</sup>، لوله بدنه دوچرخه، دیسک و صفحه کلاچ و چرخ طیار<sup>۱۱</sup> خودرو می‌باشد. در مجموع این گروه از فولادها (فولادهای کروم-مولیبدن‌دار) ماده‌ای عالی جهت ساخت چرخنده، گژن‌پین<sup>۱۲</sup> و میل‌لنگ<sup>۱۳</sup> می‌باشد[۸]. عیب عمده‌ی کار با فولاد AISI-۴۱۳۰ این است که این آلیاژ به دلیل استحکام بالا نسبت به فولادهای دیگر، قالب‌ها، ابزارهای برش و تیغه‌ها را بسیار کند می‌کند. ضمناً مقاومت این آلیاژ در برابر خوردگی کم‌تر از فولادهای زنگ‌نزن می‌باشد که از این حیث مصرفشان تحت‌الشعاع قرار می‌گیرد[۸].

8- Finite Element Method

9- Bars

10- C.N.G (Compressed Natural Gas)

11- Fly Wheel

12- Piston Pin

13- Cranck Shaft

1- Metal forming processes

2- Deep drawing

3- Redrawing

4- CAD (Computer Aided Design)

5- CAM (Computer Aided Manufacturing)

6- CAE (Computer Aided Engineering)

7- LDR (Limiting Drawing Ratio)

تحقیقات بسیاری توسط محققین به منظور دستیابی به دانش طراحی پیش‌فرم‌های بین مراحل در فرآیند کشش عمیق انجام گرفته است و در اغلب موارد سعی بر این بوده است که با مرتب کردن دانش مربوطه در قالب یک برنامه‌ی کامپیوتری، کار طراحی پیش‌فرم‌ها به صورت خودکار انجام گیرد. برای انجام این کار محققانی از جمله آلتان<sup>۱</sup> و همکارانش [۴] نوعی سیستم طراحی فرآیند به کمک کامپیوتر ارائه کردند که علاوه بر طرح‌ریزی فرآیند کشش عمیق، عمل شبیه‌سازی فرآیند کشش عمیق را نیز تا یک مرحله کشش انجام می‌داد. کار مشابهی توسط تیزا<sup>۲</sup> [۵] نیز انجام گرفته است. شبیه‌سازی فرآیند کشش عمیق به روش اجزاء محدود موجب می‌شود که بتوان با صرف زمان و هزینه‌ای ناچیز، از عیوب احتمالی قطعه در مراحل مختلف تولید و پیش از ساخت آن اطلاع حاصل کرد و با تغییر برخی پارامترها، تولید قطعه با کیفیت مطلوب میسر گردد. تحقیقات انجام شده در زمینه شبیه‌سازی فرآیند کشش عمیق بسیار زیاد است به طوری که هر کدام به بررسی یک یا چند پارامتر خاص از این فرآیند پیچیده پرداخته و آن را مورد مطالعه‌ی دقیق قرار داده‌اند. اما بدون شک یکی از برجسته‌ترین فعالیت‌های تحقیقی در زمینه‌ی طراحی و شبیه‌سازی پیش‌فرم‌های بین مراحل در فرآیند کشش عمیق (که در واقع پاسخی به نیاز صنعت امروز نیز هست)، کار انجام شده توسط چوی و همکارانش [۶] می‌باشد. آنها یک نرم‌افزار هوشمند برای طراحی و شبیه‌سازی مراحل کشش قطعات متقارن محوری ارائه کردند که می‌توانست شکل نهایی قطعه را مدل‌سازی کرده و سپس با تعیین پارامترهای مربوط به جنس ورق و انتخاب روش تولید، پیش‌فرم‌های مربوط به مراحل مختلف کشش از مرحله‌ی محاسبه‌ی ابعاد لوح اولیه تا رسیدن به شکل نهایی محصول را ارائه نماید. سپس این مراحل را به روش اجزاء محدود شبیه‌سازی کند و در صورت لزوم پیش‌فرم‌های مربوطه را اصلاح نموده تا طرح نهایی مربوط به فرآیند تولید به دست آید. از دیگر

تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر در ارتباط با این موضوع، می‌توان به مقاله‌ی تحقیقی شنگ<sup>۳</sup> [۷] اشاره کرد. وی در مقاله‌ی تحقیقی خود به بررسی مراحل کشش یک قطعه‌ی خاص در یک قالب مرحله‌ای پرداخته و به کمک شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود، عیوب حاصل از این طراحی را پیش‌گویی کرده است. سپس با اصلاح طراحی اولیه، طراحی نهایی مراحل مختلف کشش را انجام داده و پس از آن با ساخت قالب‌های مربوطه و تولید قطعه‌ی موردنظر و مقایسه‌ی نتایج حاصل از آن با نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود، صحت طراحی به روش اجزاء محدود را مورد تأیید قرار داده است.

## ۲- ماده‌اولیه

در این آزمایش ماده‌اولیه یک لوح دایروی از ورق فولادی AISI-۴۱۳۰ آیل شده با سختی اولیه‌ی HV ۱۶۰-۱۵۵ می‌باشد. این فولاد از دسته فولادهای آلیاژی کرم-مولیبدن‌دار است. وجود این دو عنصر باعث افزایش کربن معادل و سختی‌پذیری آن می‌گردد [۸]. درصد عناصر موجود در فولاد AISI-۴۱۳۰ به شرح جدول (۱) می‌باشد.

جدول (۱) درصد عناصر آلیاژی فولاد AISI-۴۱۳۰ [۹]

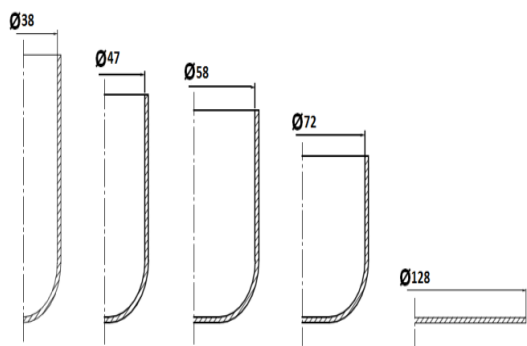
وزن (%)	نام عنصر
۰/۲۸-۰/۳۳	C
۰/۴-۰/۶	Mn
۰/۳۵ (max)	P
۰/۰۴ (max)	S
۰/۱۵-۰/۳	Si
۰/۸-۱/۱	Cr
۰/۱۵-۰/۲۵	Mo

مزیت اصلی این فولاد استحکام بسیار زیاد آن است. به دلیل این مزیت می‌توان ورق نازک‌تری انتخاب کرد تا وزن قطعه کاهش یابد بدون آن که در استحکام قطعه خللی وارد شود. این ویژگی باعث می‌شود تا آلیاژی برگزیده برای ساخت خودروهای مسابقه یا هواپیما باشد. زیرا در این موارد باید بدون اضافه شدن وزن، استحکام تا حد امکان افزایش

1- Altan

2- Tisza

3- Z.Q. Sheng



شکل (۲) مشخصات ابعادی قطعات در مراحل تولید (اندازه ها به mm) مراحل تولید این قطعه به شرح جدول (۳) می‌باشد.

جدول (۳) خصوصیات مراحل مختلف تولید در آزمون تجربی

ردیف	نام مرحله	قطر اولیه (mm)	قطر ثانویه (mm)
۱	کشش	۱۲۸	۷۲
۲	آئیل	۷۲	۷۲
۳	بازکشش اول	۷۲	۵۸
۴	بازکشش دوم	۵۸	۴۷
۵	آئیل	۴۷	۴۷
۶	بازکشش سوم	۴۷	۳۸

#### ۴- طراحی پیش فرم بین مراحل

در این بخش با استفاده از قوانین موجود، به بیان روش طراحی پیش فرم‌های بین مراحل قطعه‌ی مورد نظر پرداخته می‌شود. روند کلی طراحی پیش فرم‌های یک قطعه به این صورت است که:

۱- با استفاده از قوانین طراحی اولیه موجود، یک طراحی مقدماتی با در نظر گرفتن شکل هندسی محصول نهایی ارائه می‌شود.

۲- این طراحی توسط قوانین کنترلی موجود از لحاظ قابلیت شکل‌پذیری ورق مورد بررسی دقیق‌تر قرار می‌گیرد.

۳- در صورت وجود خطا و عیب توسط این قوانین، با کمک قوانین دیگر اصلاحات صورت می‌گیرد تا در نهایت، مراحل تولید یک قطعه مشخص گردد.

#### ۴-۱- طراحی مقدماتی فرآیند

آنچه در این مرحله مورد بررسی قرار می‌گیرد شکل هندسی قطعه‌ی نهایی است. لذا با استفاده از آن می‌توان

یابد [۸]. خصوصیات مکانیکی فولاد AISI-۴۱۳۰ به شرح جدول (۲) می‌باشد که از آزمایش کشش تک محوری آن به دست آمده است.

جدول (۲) خصوصیات مکانیکی فولاد AISI-۴۱۳۰

مدول الاستیسیته	تنش تسلیم	تنش نهایی
۲۰۷ (GPa)	۶۹۲ (MPa)	۷۹۳ (MPa)

#### ۳- آزمون تجربی

در این آزمایش ماده اولیه یک لوح دایروی به قطر ۱۲۸ mm با ضخامت ۲ mm می‌باشد که در چهار مرحله کشش (یک مرحله کشش و سه مرحله بازکشش) به استوانه‌ای سرکروی با قطر داخلی ۳۸ mm تبدیل شد. مراحل تولید این قطعه به کمک عملیات کشش عمیق، در شکل (۱) نشان داده شده‌اند.



شکل (۱) مراحل تولید قطعه‌ی صنعتی به کمک فرآیند کشش عمیق

در شکل (۲) ابعاد و اندازه‌های قطعات تولیدی در هر مرحله از کشش و بازکشش ارائه شده‌اند.

نسبت کشش از روابط زیر به دست آمده است [۱۰]:

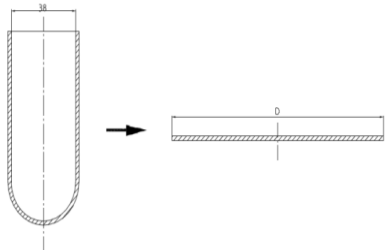
$$\beta_1 = \frac{D}{d_1} = \frac{128}{72} = 1.78 \quad (1)$$

$$\beta_{2anl} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{72}{58} = 1.24 \quad (2)$$

$$\beta_3 = \frac{d_2}{d_3} = \frac{58}{47} = 1.23 \quad (3)$$

$$\beta_{4anl} = \frac{d_3}{d_4} = \frac{47}{38} = 1.24 \quad (4)$$

نخواهد بود و می توان شعاع سر سنبه را به نحوی در نظر گرفت تا این هدف محقق گردد (گونه ی سوم). به عبارت دیگر می توان در یک مرحله به شکل نهایی دست یافت. (شکل ۳)



شکل (۳) پیش بینی تغییر شکل بدون مرحله ی میانی (گونه ی سوم)

قطر لوح اولیه (D) از رابطه زیر به دست می آید [۱۰].

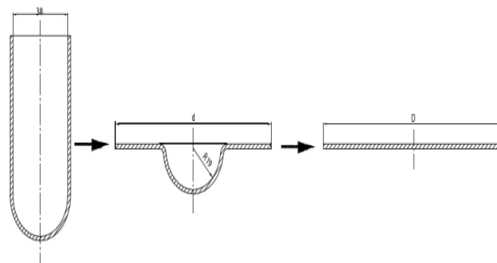
$$D = 1.414 \cdot \sqrt{(d^2 + 2dh)} = 119.9 \approx 120 \text{ mm} \quad (5)$$

مقدار محاسبه شده برای قطر لوح اولیه بدون در نظر گرفتن مقدار اضافه برش می باشد. اگر این مقدار به اندازه لوح اولیه افزوده شود (برای حصول اطمینان و در نظر گرفتن افزایش برش می بایست به قطر اولیه دو برابر ضخامت ورق نیز اضافه گردد [۲]) آنگاه قطر لوح اولیه برابر با مقدار زیر خواهد شد.

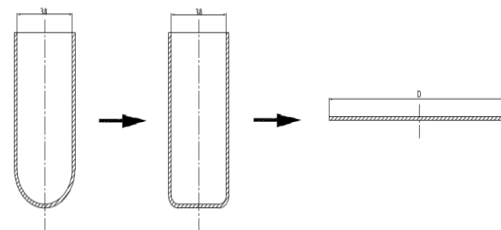
$$D_B = D + 2t_0 = 120 + (2 \times 2) = 124 \approx 125 \text{ mm (For Safty)} \quad (6)$$

با توجه به مطالب فوق، طراحی اولیه ی پیش فرم های بین مراحل این قطعه مطابق با شکل (۴) خواهد بود که در آن یک مرحله کشش برای رسیدن به فرم نهایی قطعه لازم می باشد. در مرحله ی بعد، از این گونه طراحی جهت بررسی امکان پذیر بودن فرآیند تولید استفاده می شود. بدین ترتیب که بایستی شکل پذیری ورق مورد بررسی قرار گیرد که در صورت اعلام شکست توسط قوانین کنترلی، این طرح اصلاح خواهد شد.

یک طرح مقدماتی از مراحل تغییر شکل قطعه ی صنعتی به دست آورد. با کمک گرفتن از قوانین طراحی اولیه و در نظر گرفتن شکل محصول نهایی، مراحل تغییر شکل قطعه به دو صورت شکل (۲) (گونه ی اول) و شکل (۴) (گونه ی دوم) پیش بینی می شود.



شکل (۲) پیش بینی تغییر شکل (گونه ی اول)



شکل (۴) پیش بینی تغییر شکل (گونه ی دوم)

طراحی مقدماتی بیان می کند که برای تولید این قطعه می توان به دو صورت اقدام کرد که در هر کدام دو مرحله تغییر شکل مورد نیاز می باشد. در پیش فرم گونه ی اول در مرحله ی اول، لوح اولیه با قطر D به یک گرده با یک ناف (گودی) کروی شکل در مرکز تبدیل و سپس در مرحله ی دوم دیواره های آن کشیده می شود. در پیش فرم گونه ی دوم در مرحله ی اول، لوح اولیه با قطر D به یک استوانه با قطر مورد نظر تبدیل شده و سپس در مرحله ی دوم قسمت تحتانی آن به حالت نیم کروی در می آید. پیش فرم گونه ی اول به دلیل مغایرت با قانون "اگر منطقه تغییر شکل یافته از پیش فرم مرحله قبل طراحی می شود، آنگاه این منطقه بایستی به صورت یک فنجان ساده بدون فلنج باشد یا از یک لوح اولیه [۲]، مردود است و می بایست از طراحی گونه ی دوم استفاده شود. لیکن با اندکی تأمل می توان متوجه شد که برای تبدیل استوانه ساده به یک استوانه سر کروی نیاز به مرحله ی میانی

مقادیر به ازای هر مرحله آنیل به اندازه ۲۰٪ افزایش می‌یابند: [۲]

$$LDR_{2ant} = 1.56 \quad (10)$$

$$LDR_{3ant} = 1.44 \quad (11)$$

برای آنیل می‌بایست قطعات در کوره خلأ در دمای ۶۸۰ درجه سانتیگراد به مدت دو ساعت نگه داشته و سپس با یک نرخ سرد کردن پائین در کوره خنک شوند.

با نگاهی سریع به مقادیر پارامترهای مختلف و مقایسه آن‌ها با مقادیر حدی‌شان مشخص می‌شود که کشش در مرحله اول امکان‌پذیر نمی‌باشد؛ زیرا مقدار نسبت کشش کل ( $\beta_{tot}$ ) از مقدار حدی کشش بیشتر است. لذا این مرحله از فرآیند کشش با شکست مواجه شده، نیازمند بازکشش بوده و عملیات اصلاحی می‌بایست صورت گیرد.

$$\beta_{tot} = \frac{D}{d} = \frac{125}{38} = 3.29 > LDR_1 = 1.8 \quad (12)$$

#### ۳-۴- اصلاح طراحی مقدماتی

به منظور اصلاح طراحی مقدماتی، از قوانین موجود استفاده می‌شود. این قوانین بیان می‌کنند که کشش مرحله-ی اول نیاز به افزودن پیش‌فرم‌های اضافی دارد و این پیش‌فرم‌ها باید به گونه‌ای طراحی شوند که در آنها از مقادیر کم‌تری نسبت به کشش حدی یا بازکشش حدی استفاده گردد. در آخر این مرحله، سایر متغیرهای مورد نیاز نیز تعیین می‌گردند.

در این راستا با در نظر گرفتن اثرات آنیل، سه نوع طراحی پیش‌فرم به شرح ذیل حاصل می‌شود:

۱- نوع اول: بدون آنیل (شکل ۷)

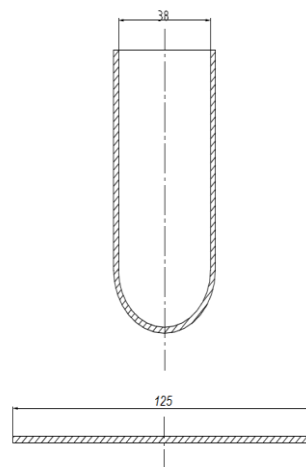
۲- نوع دوم: با آنیل پیش از بازکشش مرحله‌ی اول (شکل ۸)

۳- نوع سوم: با آنیل پیش از بازکشش مرحله‌ی دوم (شکل ۹)

۱) نوع اول: بدون آنیل

$$\beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot \beta_4 = 1.8 \times 1.3 \times 1.2 \times 1.2 \quad (13)$$

$$= 3.37 > 3.29$$



شکل (۴) طراحی مقدماتی

#### ۲-۴- کنترل طراحی مقدماتی

در این مرحله، طراحی هندسی ارائه شده در مرحله‌ی قبل، از لحاظ شکل‌پذیری ورق، ایجاد عیوب احتمالی ... با استفاده از قوانین کنترلی طراحی مقدماتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در صورتی که در یک قسمت از طراحی، یک شکست یا عیب توسط این قوانین پیش‌بینی شود آنگاه این طرح مورد بازبینی قرار می‌گیرد و در قسمت‌هایی که لازم باشد تغییرات لازم توسط قوانین "اصلاح طراحی مقدماتی" انجام خواهد شد.

نسبت کشش ( $\beta_1$ ) و نسبت بازکشش ( $\beta_n$ ) در مقایسه با نسبت کشش و بازکشش حدی (LDR)، درصد کاهش قطر و نسبت ارتفاع به قطر فنجان گنبدی<sup>۱</sup> (LHR) شکل از جمله مواردی هستند که می‌توانند در ابتدا مورد بررسی قرار گیرند تا مشخص شود که آیا انجام این فرآیند در یک مرحله عملیات کشش امکان‌پذیر است یا نه. این مقادیر به کمک روابط عمومی موجود قابل محاسبه می‌باشد.

مقادیر عمومی نسبت‌های کشش حدی عبارتند از: [۱۱]

$$LDR_1 = 1.8 \quad (7)$$

$$LDR_2 = 1.3 \quad (8)$$

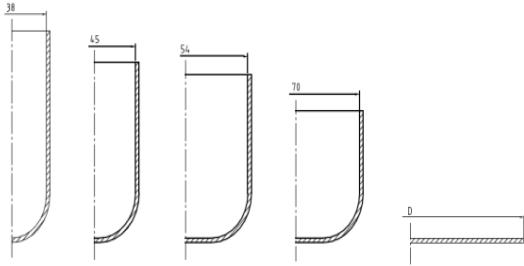
$$LDR_3 = 1.2 \quad (9)$$

بنابراین

$$\beta_3 = 1.2 \quad (24)$$

و

$$\beta_{4_{true}} = \frac{d_3}{d_4} = \frac{45}{38} = 1.18 \quad (25)$$



شکل (۷) مراحل تغییر شکل طراحی نوع اول.

مراحل تولید طراحی نوع اول به ترتیب جدول (۴) است.

جدول (۴) خصوصیات مراحل مختلف تولید در طراحی نوع اول.

ردیف	نام مرحله	قطر اولیه (mm)	قطر ثانویه (mm)
۱	کشش	۱۲۵	۷۰
۲	بازکشش اول	۷۰	۵۴
۳	بازکشش دوم	۵۴	۴۵
۴	بازکشش سوم	۴۵	۳۸

(۲) طراحی نوع دوم:

$$d_1 = \frac{D}{\beta_1} = \frac{125}{1.8} = 69.5 \approx 70mm \quad (26)$$

پس

$$\beta_1 = 1.786 \quad (27)$$

$$d_2 = \frac{d_1}{\beta_2} = \frac{70}{1.56} = 44.87 \approx 45mm \quad (28)$$

پس

$$\beta_2 = 1.556 \quad (29)$$

و

$$\beta_{3_{true}} = \frac{d_2}{d_3} = \frac{45}{38} = 1.18 \quad (30)$$

که

$$\beta_{4_{true}} = \frac{3.29}{1.8 \times 1.3 \times 1.2} = 1.17 \quad (14)$$

(۲) نوع دوم: با آنیل پیش از بازکشش مرحله‌ی اول

$$\begin{aligned} \beta_1 \cdot \beta_{2_{anl}} \cdot \beta_3 &= 1.8 \times 1.56 \times 1.2 \\ &= 3.37 > 3.29 \end{aligned} \quad (15)$$

که

$$\beta_{3_{true}} = \frac{3.29}{1.8 \times 1.56} = 1.17 \quad (16)$$

(۳) نوع سوم: با آنیل پیش از بازکشش مرحله‌ی دوم

$$\beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_{3_{anl}} = 1.8 \times 1.3 \times 1.44 \quad (17)$$

$$= 3.37 > 3.29$$

که

$$\beta_{3_{true}} = \frac{3.29}{1.8 \times 1.3} = 1.41 \quad (18)$$

در کشش مرحله‌ی آخر می‌توان نسبت کشش واقعی را به‌دست آورد که برای دو طراحی نوع اول و دوم برابر ۱/۱۷ و در نوع سوم برابر ۱/۴۱ می‌باشد.

برای گرد کردن اندازه قطر سنبه‌های مراحل مختلف به صورت زیر عمل می‌شود:

(۱) طراحی نوع اول:

$$d_1 = \frac{D}{\beta_1} = \frac{125}{1.8} = 69.5 \approx 70mm \quad (19)$$

پس

$$\beta_1 = 1.786 \quad (20)$$

$$d_2 = \frac{d_1}{\beta_2} = \frac{70}{1.3} = 53.85 \approx 54mm \quad (21)$$

پس

$$\beta_2 = 1.296 \quad (22)$$

$$d_3 = \frac{d_2}{\beta_3} = \frac{54}{1.2} = 45 \quad (23)$$

در جدول (۶) مراحل تولید طراحی نوع سوم آمده است.

جدول (۶) خصوصیات مراحل مختلف تولید در طراحی نوع سوم.

ردیف	نام مرحله	قطر اولیه (mm)	قطر ثانویه (mm)
۱	کشش	۱۲۵	۷۰
۲	بازکشش اول	۷۰	۵۴
۳	آبیل	۵۴	۵۴
۴	بازکشش دوم	۵۴	۳۸

شعاع لبه‌ی سنبه‌ها نیز از رابطه زیر به دست آمده است: [۲]

$$4 \cdot th \leq R_p \leq 10 \cdot th \quad (36)$$

$$8mm \leq R_p \leq 20mm \quad (37)$$

همچنین بهتر است که شعاع لبه‌ی سنبه در طی مراحل سیر نزولی داشته باشد [۲]. لذا در کلیه مراحل کشش به جز مرحله‌ی آخر، شعاع آن ۲۰ mm و در مرحله آخر ۱۹ mm در نظر گرفته می‌شود.

در این تحقیق نسبت حدی ارتفاع به قطر فنجان گنبدی شکل (LHR) نیز کنترل شد و تمام نسبت‌های به دست آمده در محدوده مجاز این معیار قرار داشتند.

نسبت ارتفاع به قطر فنجان گنبدی شکل از رابطه‌ی ذیل قابل محاسبه است [۲]:

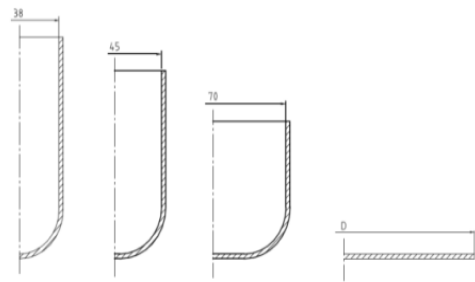
$$HR_{Hemispherical} = \frac{h_{dome}}{d_{dome}} \quad (38)$$

نسبت حدی ارتفاع به قطر فنجان گنبدی شکل [۲]:

$$LHR_n = \frac{1}{2} \cdot LDR_n \quad (39)$$

### ۵- شبیه‌سازی عددی

برای پیش‌بینی فرآیندهای شکل‌دهی فلزات از روش‌های تحلیلی مختلفی استفاده شده است. از جمله می‌توان به روش‌هایی مانند تحلیل قاچی<sup>۱</sup>، میدان خط لغزش<sup>۲</sup>، روش حد بالا<sup>۳</sup> و حد پایین<sup>۴</sup> اشاره کرد. این روش‌ها امکان پیش‌بینی تغییر شکل عمومی را فراهم آورده ولی عموماً به هندسه‌های نسبتاً ساده محدود می‌شوند و غالباً دارای محدودیت‌های زیادی در فرضیاتشان می‌باشند. با معرفی روش اجزاء محدود در دهه ۱۹۶۰ این روش امکان پیش-



شکل (۸) مراحل تغییر شکل طراحی نوع دوم

مراحل تولید طراحی نوع دوم در جدول (۵) آمده است.

جدول (۵) خصوصیات مراحل مختلف تولید در طراحی نوع دوم.

ردیف	نام مرحله	قطر اولیه (mm)	قطر ثانویه (mm)
۱	کشش	۱۲۵	۷۰
۲	آبیل	۷۰	۷۰
۳	بازکشش اول	۷۰	۴۵
۴	بازکشش دوم	۴۵	۳۸

### ۳) طراحی نوع سوم:

$$d_1 = \frac{D}{\beta_1} = \frac{125}{1.8} = 69.5 \approx 70mm \quad (31)$$

پس

$$\beta_1 = 1.786 \quad (32)$$

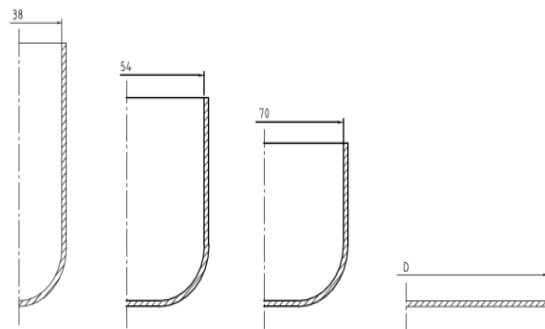
$$d_2 = \frac{d_1}{\beta_2} = \frac{70}{1.3} = 53.85 \approx 54mm \quad (33)$$

پس

$$\beta_2 = 1.296 \quad (34)$$

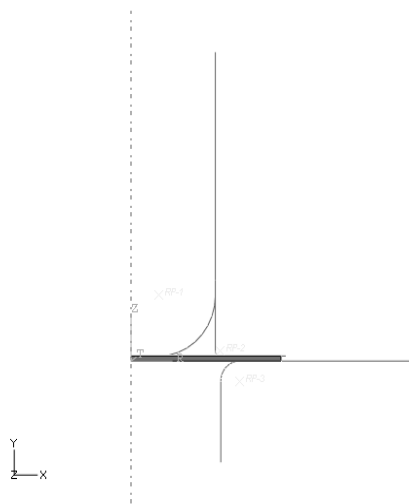
و

$$\beta_{3_{true}} = \frac{d_2}{d_3} = \frac{54}{38} = 1.421 \quad (35)$$



شکل (۹) مراحل تغییر شکل طراحی نوع سوم





شکل (۵) مدل ابزارهای صلب و ورق تغییر شکل پذیر در نرم افزار.

جهت تعیین مدت زمان حرکت سنبه در طول کورس از تحلیل فرکانسی ورق بهره گرفته شد [۲].

برای تعریف رفتار تماسی سطوح مختلف قالب از قانون اصطکاک کولومب استفاده می شود. با توجه به توصیه های ارائه شده در مقالات، می توان از یک حالت عمومی جهت اعمال تقریبی مقدار ضریب اصطکاک استفاده کرد. بر این اساس مقدار ضریب اصطکاک بین ورق با سنبه برابر  $0.2$  و تماس ورق با اجزای دیگر برابر  $0.15$  فرض می شود [۲].

با مرور مقالاتی در زمینه شبیه سازی کشش عمیق و اتوکاری<sup>۱</sup> می توان فهمید که مناسب ترین نوع المان شبیه سازی این نوع فرآیندها، استفاده از المان های حجمی<sup>۲</sup> است. این نوع المان ها امکان مدل کردن فشردگی ورق در مراحل انتهای کشش (مانند زمانی که ضخامت لبه ورق از ضخامت لقی بین سنبه و ماتریس بیشتر می شود) را فراهم می کنند [۲]. به همین جهت در این پژوهش از نوع المان حجمی متقارن محوری با ۴ گره به نام CAX4R استفاده می شود. با توجه به انتخاب ابزارها از نوع مدل صلب گسسته باید برای این ابزارها نیز المان مناسب انتخاب می شد. در تحلیل حاضر، از المان های صلب متقارن محوری با دو گره به نام RAX2 استفاده شده است.

نتایج اصلی این شبیه سازی شامل تغییر شکل ورق، کرنش پلاستیک معادل، تنش موثر و ضخامت مقاطع مختلف

گویی دقیق میزان کرنش ها و رفتار شکست ماده در فرآیندهای پیچیده شکل دهی را فراهم آورد. به طوری که در طول چند دهه ی اخیر، استفاده از روش اجزاء محدود جهت پیش بینی فرآیندهای شکل دهی افزایش چشم گیری داشته است [۲].

در این تحقیق برای شبیه سازی، از نرم افزار اجزاء محدود آباکوس نسخه ۳-۹-۶ استفاده گردید. در تعریف مسائل مختلف داخل نرم افزارهای اجزاء محدود معمولاً فقط به مدل سازی اجزایی پرداخته خواهد شد که در انجام فرآیند تاثیر گذار باشند. با توجه به ماهیت مسأله کشش، مدل شامل یک ورق تغییر شکل پذیر و چند ابزار شامل سنبه، قالب و ورق گیر می باشد. به عبارتی فقط ورق و سطوح ابزارهایی که در تماس مستقیم با ورق هستند جهت مدل سازی مورد نیاز است. ابزارها می توانند به عنوان سطوح صلب مدل شوند زیرا بسیار سخت تر از ورق می باشند [۱۲]. شکل (۵) اجزای مونتاژ شده ی یک قالب کشش را در محیط نرم افزار نشان می دهد.

در جدول (۷) با معرفی ۴۰ نقطه از منحنی رفتار پلاستیک ماده به تعریف رفتار پلاستیک آن در نرم افزار اجزاء محدود پرداخته شده است.

جدول (۷) مقادیر متناظر تنش و کرنش پلاستیک.

ردیف	تنش (MPa)	کرنش پلاستیک (%)
۱	۶۹۲/۰۴۴	۰
۲	۶۹۲/۸۶۵	۰/۰۰۱۹۱۱۳۴۷
۳	۶۹۵/۴۷۲	۰/۰۰۶۲۸۶۰۶۷
.	.	.
.	.	.
.	.	.
۳۹	۶۵۸/۴۹۴	۰/۱۹۴۱۹۵۹۳۶
۴۰	۶۱۲/۶۳۴	۰/۲۰۰۳۹۲۱۷۱

برای تحلیل مسئله از یک مدل دو بعدی متقارن محوری، جهت فراهم نمودن تحلیل ساده عددی و کاهش زمان تحلیل استفاده می شود [۱۳].

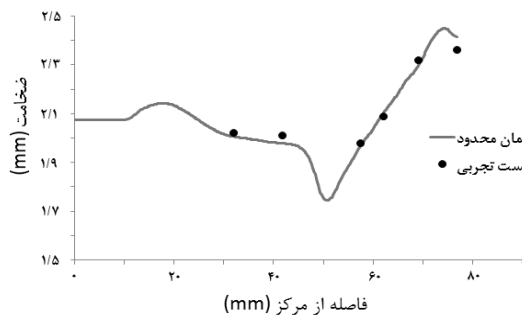
1- Ironing

2- Solid

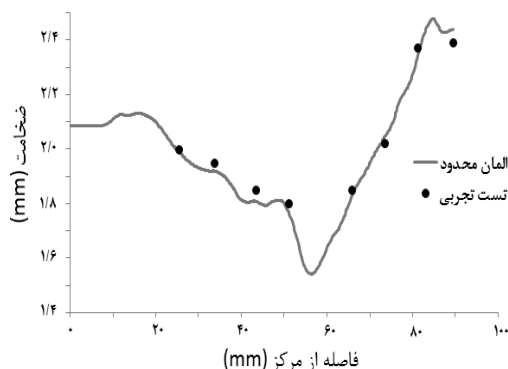
پس از انجام مراحل شبیه‌سازی‌های عددی قطعه صنعتی، نتایج حاصل از این تحلیل‌ها به صورت منحنی تغییرات ضخامتی (با عنوان منحنی اجزاء محدود) استخراج گردیده و با نتایج حاصل از تولید عملی قطعه مقایسه شده‌اند. این مقایسه‌ها در اشکال (۸ تا ۱۱) نشان داده شده است.

مقدار متوسط ضخامت‌های اندازه‌گیری شده در جداری قطعه، به صورت دایره‌های سیاه‌رنگ در اطراف منحنی توزیع ضخامت حاصل از شبیه‌سازی هر مرحله از کشش و بازکشش‌ها قابل مشاهده است.

مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج به دست آمده از تولید عملی که منحصراً بر اساس توزیع تغییرات ضخامتی در قطعات می‌باشد بیانگر عملکرد بسیار مطلوب تحلیل عددی در پیش‌بینی نتایج می‌باشد و حداکثر خطای آن در پیش‌بینی توزیع ضخامت دیواره‌ی قطعات، در حدود ۲/۵۵ درصد بوده است.



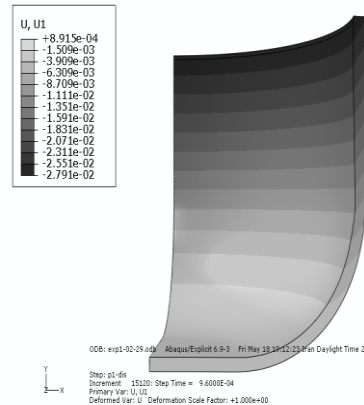
شکل (۸) مقایسه‌ی توزیع ضخامت مرحله‌ی کشش در شبیه‌سازی عددی و قطعه‌ی تولیدی.



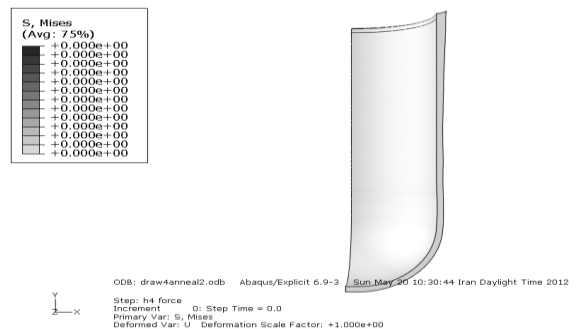
شکل (۹) مقایسه‌ی توزیع ضخامت مرحله‌ی اول بازکشش در شبیه‌سازی عددی و قطعه‌ی تولیدی.

قطعه کار می‌باشد. نتایج خروجی را می‌توان به دو صورت عمده‌ی طیف‌های رنگی و یا نمودار رویت کرد. شکل (۶) نتایج حاصل از تغییر شکل ورق در مرحله کشش قطعه‌ی صنعتی را به صورت طیف‌های رنگی نشان می‌دهد.

پس از انجام مراحل شبیه‌سازی عددی کشش قطعه، تحلیل بازگشت فنی انجام و مجدداً شبیه‌سازی بازکشش‌ها صورت گرفت.



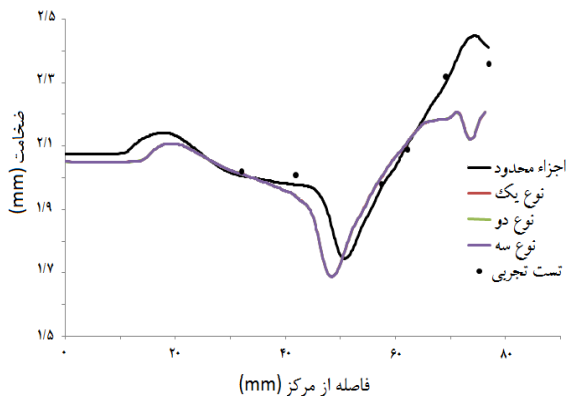
شکل (۶) تغییر شکل مرحله‌ی کشش قطعه به صورت طیف‌های رنگی. پس از مرحله‌ی کشش و مرحله دوم بازکشش، دو مرحله شبیه‌سازی آنیل صورت پذیرفت. شکل (۷) تخلیه (صفر شدن) تنش‌های پس ماند در شبیه‌سازی آنیل انجام شده پس از بازکشش مرحله‌ی دوم را نشان می‌دهد.



شکل (۷) شبیه‌سازی آنیل پس از بازکشش مرحله‌ی دوم قطعه‌ی صنعتی.

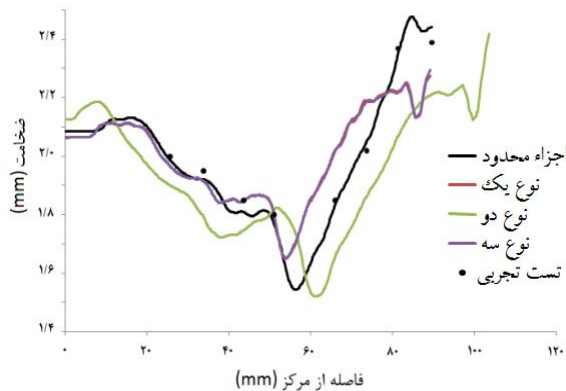
## ۶- مقایسه نتایج

در این بخش نتایج حاصل از تحلیل عددی قطعه‌ی صنعتی، با نتایج به دست آمده از تولید قطعه‌ی صنعتی مقایسه شده‌اند تا بدین ترتیب صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود مورد تأیید قرار گیرد.

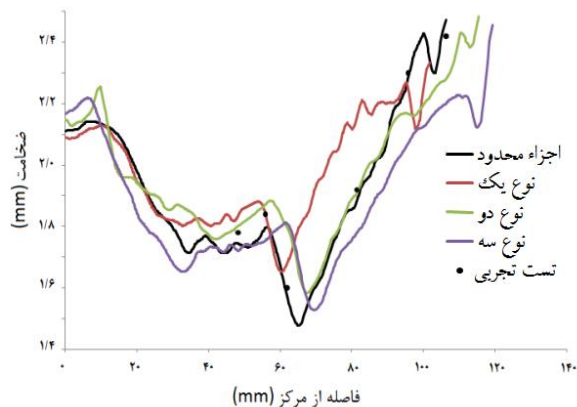


شکل (۱۲) تغییرات ضخامت مرحله‌ی کشش طراحی‌های مختلف.

در شکل (۱۳) با توجه به اینکه کلیه ویژگی‌های پیش‌فرم مرحله‌ی کشش و بازکشش اول در طراحی‌های نوع یک و سه یکسان می‌باشد، نمودار تغییرات ضخامتی آن‌ها در این مرحله بر هم منطبق شده است.

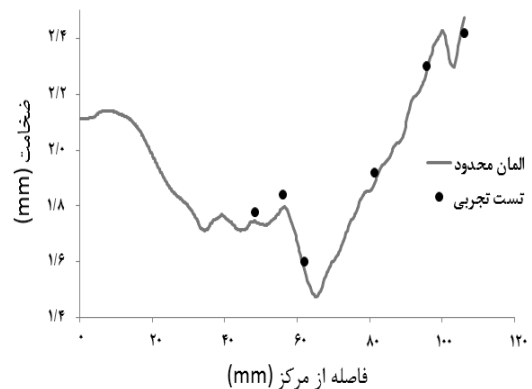


شکل (۱۳) تغییرات ضخامت مرحله اول بازکشش طراحی‌های مختلف.

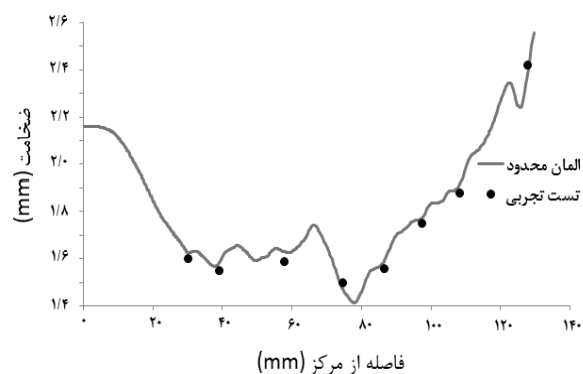


شکل (۱۴) تغییرات ضخامت مرحله دوم بازکشش طراحی‌های مختلف.

در مرحله‌ی دوم بازکشش، هریک از طراحی‌ها از شرایط جداگانه‌ای برخوردارند و به همین دلیل نمودارهای جداگانه‌ای حاصل شده است. (شکل ۱۴)



شکل (۱۰) مقایسه‌ی توزیع ضخامت مرحله دوم بازکشش در شبیه‌سازی عددی و قطعه تولیدی.



شکل (۱۱) مقایسه توزیع ضخامت مرحله‌ی سوم بازکشش در شبیه‌سازی عددی و قطعه تولیدی.

پس از حصول اطمینان از عملکرد صحیح تحلیل عددی انجام گرفته برای قطعه صنعتی، تحلیل‌های عددی مشابهی برای طراحی‌های ارائه شده انجام گردیده و نتایج حاصل از این تحلیل‌ها نیز در قالب نمودارهای تغییرات ضخامتی و تغییرات تنش ارائه شده‌اند. با مقایسه‌ی این نتایج برای طراحی‌های فوق‌الذکر، بهترین طراحی از بین آنها انتخاب خواهد شد.

در اشکال (۱۷ تا ۲۱) نمودار تغییرات ضخامتی برای هر یک از پیش‌فرم‌های مراحل اول تا آخر که مربوط به طراحی‌های مختلف می‌باشد، ارائه شده‌اند.

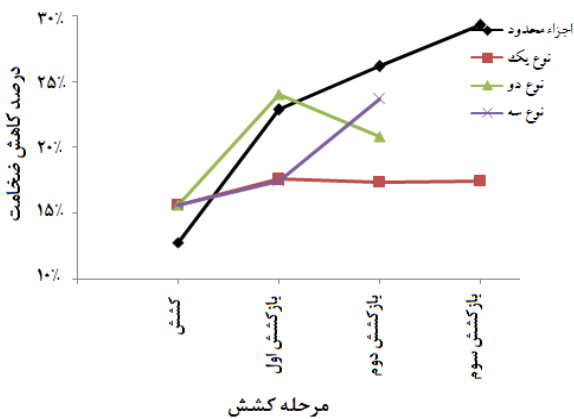
با توجه به اینکه کلیه ویژگی‌های پیش‌فرم مرحله‌ی کشش در طراحی‌های نوع یک، دو و سه یکسان می‌باشد، نمودار تغییرات ضخامتی آن‌ها بر هم منطبق شده است. (شکل ۱۲)

کاهش و افزایش ضخامت به ترتیب  $0.42\text{ mm}$  و  $0.48\text{ mm}$  به دست آمده است.

در طراحی نوع سه نیز که دارای یک مرحله کشش، دو مرحله بازکشش و یک مرحله آنبیل بعد از مرحله‌ی اول بازکشش می‌باشد، حداکثر کاهش و حداکثر افزایش ضخامت به ترتیب  $0.47\text{ mm}$  و  $0.46\text{ mm}$  می‌باشند.

با جمع کردن مقادیر کاهش و افزایش ضخامت میزان اختلاف ضخامت در هر کدام از طراحی‌ها قابل محاسبه است.

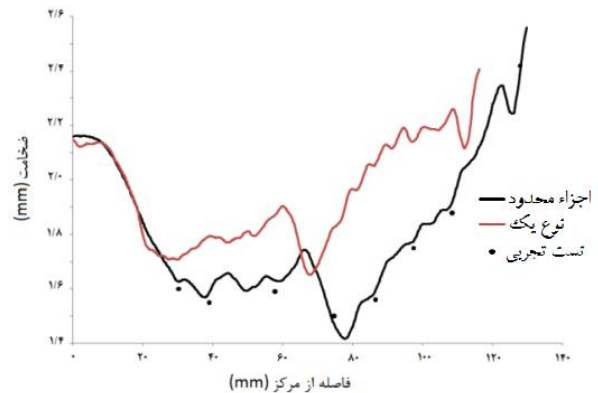
در اشکال (۱۷ و ۱۸) نیز به ترتیب مقایسه‌ای بین طراحی‌های مختلف از لحاظ بیشترین مقدار کاهش و افزایش ضخامت صورت گرفته است.



شکل (۱۷) بیشترین کاهش ضخامت کلیه مراحل کشش در طراحی‌های مختلف.

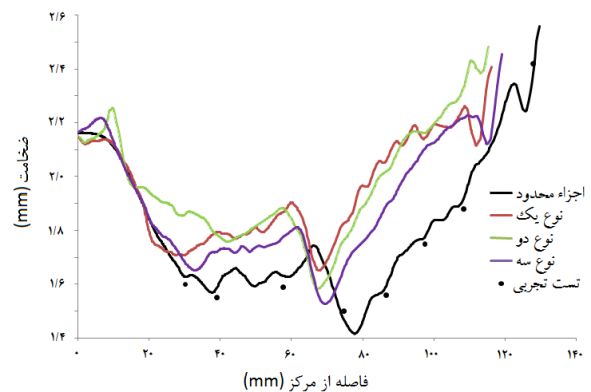
در اشکال (۱۷ و ۱۸) مشخص است که کم‌ترین کاهش ضخامت مربوط به طراحی نوع یک می‌باشد و بزرگ‌ترین آن متعلق به طراحی صنعتی است، همچنین کم‌ترین افزایش ضخامت نیز مربوط به طراحی نوع یک و بزرگ‌ترین آن در طراحی صنعتی پدید آمده است. ضمناً منحنی تغییرات ضخامت طراحی نوع یک یکنواخت‌تر و دارای شیب کم‌تری نسبت به بقیه است.

با توجه به اینکه مرحله‌ی سوم بازکشش فقط در طراحی نوع یک لحاظ گردیده در نمودار شکل (۱۵) فقط نتیجه حاصل از آن قابل مشاهده است.



شکل (۱۵) تغییرات ضخامت مرحله سوم بازکشش در طراحی نوع یک و قطعه‌ی صنعتی.

مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته حاکی از برتری قابل ملاحظه طراحی‌های پیشنهادی نسبت به طراحی صنعتی انجام شده در توزیع یکنواخت‌تر ضخامت می‌باشد. (شکل ۱۶)

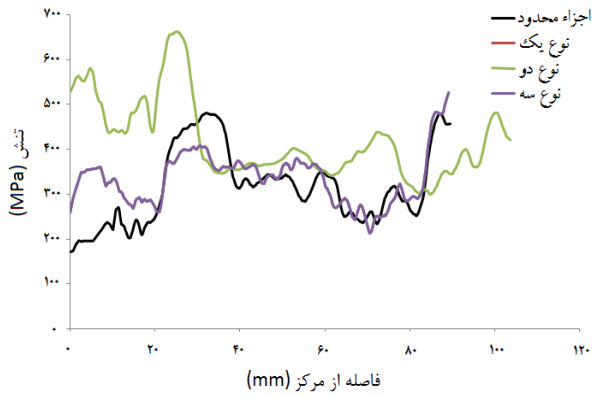


شکل (۱۶) تغییرات ضخامت مرحله‌ی آخر کشش در طراحی‌های مختلف.

در طراحی صنعتی حداکثر کاهش و حداکثر افزایش ضخامت بیش از  $0.6\text{ mm}$  به دست آمده است.

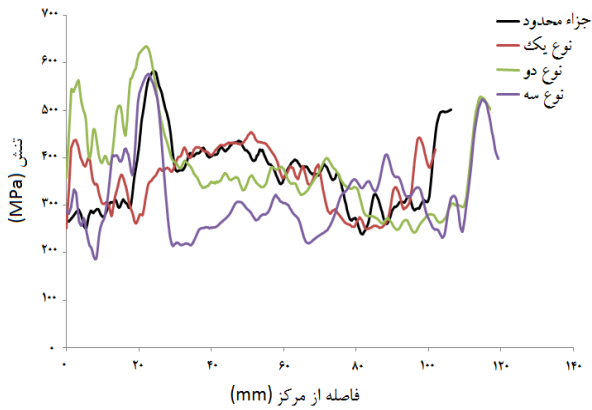
در طراحی نوع یک که دارای یک مرحله کشش، سه مرحله بازکشش و بدون آنبیل می‌باشد، حداکثر کاهش و حداکثر افزایش ضخامت به ترتیب  $0.35\text{ mm}$  و  $0.41\text{ mm}$  می‌باشند.

در طراحی نوع دو که دارای یک مرحله کشش، دو مرحله بازکشش و یک مرحله آنبیل بعد از مرحله‌ی کشش می‌باشد،



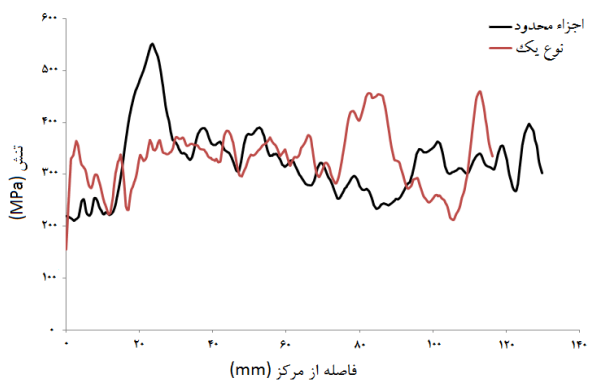
شکل (۲۰) توزیع تنش مؤثر مرحله اول بازکشی در طراحی های مختلف.

در مرحله دوم بازکشی، هریک از طراحی ها از شرایط جداگانه ای برخوردارند و به همین دلیل نمودارهای جداگانه ای حاصل شده است. (شکل ۲۱)

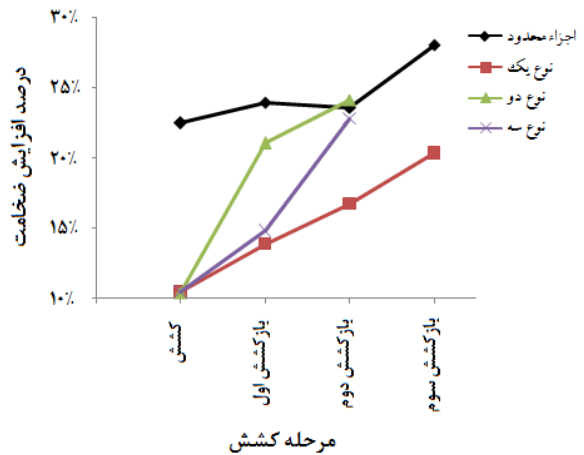


شکل (۲۱) توزیع تنش مؤثر مرحله دوم بازکشی در طراحی های مختلف.

با توجه به اینکه مرحله سوم بازکشی فقط در طراحی نوع یک لحاظ گردیده در نمودار شکل (۲۲) فقط نتیجه ای حاصل از آن قابل مشاهده است.



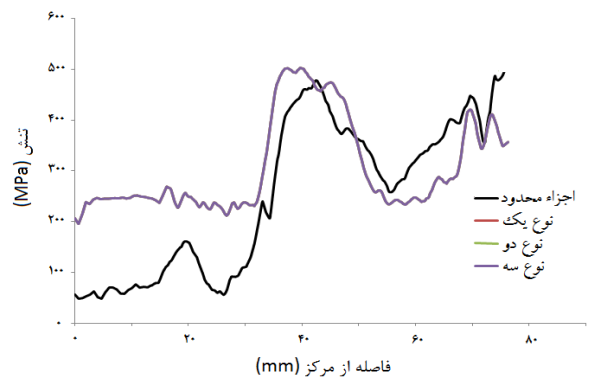
شکل (۲۲) توزیع تنش مؤثر مرحله سوم بازکشی در طراحی نوع یک و قطعه ای صنعتی.



شکل (۱۸) بیشترین افزایش ضخامت کلیه مراحل کشش در طراحی های مختلف.

پس از مقایسه منحنی های تغییرات ضخامت، میزان تنش های مؤثر در طراحی های ارائه شده بررسی می گردد. در شکل های (۲۴ تا ۲۸) نمودار تغییرات تنش مؤثر طراحی های مختلف ارائه شده اند. نمودارهای تنش مؤثر در پایان هر مرحله از فرآیند کشش و پس از انجام مرحله بازگشت فنی محاسبه و ترسیم شده اند و به نوعی بیانگر تنش های پس ماند موجود در قطعه در پایان هر مرحله کشش می باشند.

با توجه به اینکه کلیه ویژگی های پیش فرم مرحله کشش در طراحی های نوع یک، دو و سه یکسان می باشد، نمودار تنش مؤثر آن ها بر هم منطبق شده است. (شکل ۱۹)



شکل (۱۹) توزیع تنش مؤثر مرحله کشش در طراحی های مختلف.

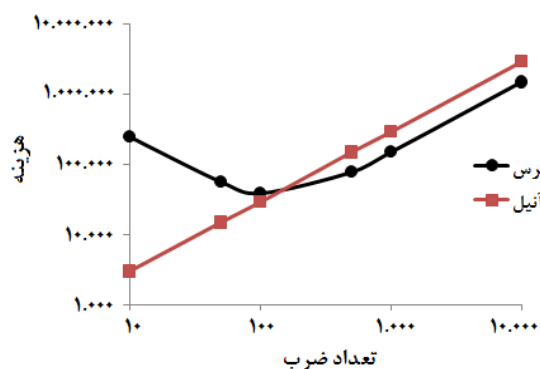
در شکل ۲۰ با توجه به اینکه کلیه ویژگی های پیش فرم مرحله کشش و بازکشی در طراحی های نوع یک و سه یکسان می باشد، نمودار تنش مؤثر آن ها در این مرحله بر هم منطبق شده است.

یک و سه) در ناحیه انتهایی استوانه می‌باشد که احتمالاً به دلیل شرایط اتوکاری پدید آمده است و پس از مرحله‌ی آخر، تراش کاری خواهد شد. (به دلیل سائز کردن طول استوانه) با این توضیحات می‌توان نتیجه گرفت که در این مرحله شرایط تنش مؤثر برتری را در طراحی‌های پیشنهادی نشان می‌دهد.

در نمودار مرحله‌ی دوم بازکشش (شکل ۲۱) صرف نظر از طراحی نوع دو، منحنی‌های به دست آمده نشان‌گر بالاتر بودن مقدار حداکثر تنش مؤثر طراحی صنعتی نسبت به طراحی نوع یک و سه می‌باشد و مقدار ماکزیمم تنش مؤثر طراحی صنعتی و نوع سه همان گونه که از شکل پیداست در انتهای محدوده ناحیه کروی شکل می‌باشد و خطر گلوئی شدن در ناحیه شعاع سنبه را دارد. پائین بودن حداکثر تنش مؤثر طراحی نوع یک برتری این طراحی را بر سایر طراحی‌ها در این مرحله نشان می‌دهد.

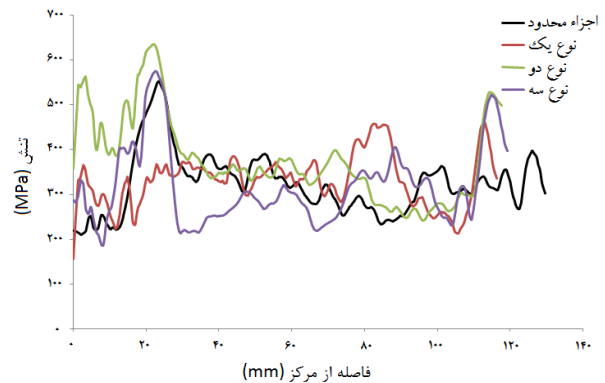
حال با دقت در نمودارهای مرحله‌ی آخر (شکل ۲۲ و ۲۳) نکات زیر نمایان می‌شود:

طراحی نوع سه و طراحی صنعتی در ناحیه انتهایی محدوده کروی شکل دارای حداکثر مقدار تنش مؤثر می‌باشند. طراحی نوع یک دارای کمترین مقدار در حداکثر تنش مؤثر می‌باشد. همچنین می‌توان از دو نمودار مذکور نتیجه گرفت که طراحی نوع یک دارای کمترین اضافه طول در استوانه بوده و نیاز به تراش کاری کمتری خواهد بود. از لحاظ اقتصادی نیز ساخت یک مرحله قالب بین مراحل، نسبت به آنیل برتری دارد. (شکل ۲۴)



شکل (۲۴) مقایسه هزینه‌ی تولید روش‌های تولید مختلف به صورت شماتیک.

مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در مرحله‌ی آخر حاکی از برتری قابل ملاحظه طراحی‌های پیشنهادی نسبت به طراحی صنعتی انجام شده در توزیع تنش می‌باشد. (شکل ۲۳)



شکل (۲۳) توزیع تنش مؤثر مرحله‌ی آخر کشش در طراحی‌های مختلف.

با دقت در نمودار شکل ۲۴ مشخص است که در مرحله‌ی کشش ماکزیمم تنش مؤثر طراحی صنعتی نسبت به طراحی‌های پیشنهادی کاهش ناچیزی در حد ۱۵ MPa وجود دارد.

در نمودار مرحله‌ی اول بازکشش بالا بودن مقدار حداکثر تنش مؤثر (۶۶۳ MPa) طراحی نوع دو به دلیل تغییر شکل شدید مشاهده می‌شود (شکل ۲۵)، که به علت نزدیک بودن به تنش تسلیم ماده اولیه (۶۹۲ MPa) می‌تواند در صورت بروز کوچک‌ترین خطائی در مرحله روان کاری منجر به شکستن قطعه در حین سرویس گردد. به همین سبب در این جا می‌توان این طراحی را مردود اعلام کرد. ضمناً مشاهده می‌شود که در طراحی صنعتی مقدار حداکثر تنش مؤثر نسبت به دو طراحی نوع یک و سه به صورت قابل ملاحظه‌ای از مقدار کمتری برخوردار است که به دلیل آنیل انجام شده و تغییر شکل کوچک‌تر آن می‌باشد و نشان‌گر بهینه نبودن آن است. چون پس از آنیل می‌توان به میزان ۲۰٪ تغییر شکل بزرگ‌تری انجام داد. ضمناً مقدار حداکثر آن در ناحیه انتهایی محدوده کروی شکل قطعه می‌باشد و در این محدوده تنش بسیار بیشتر از دو طراحی مذکور است و احتمال گلوئی شدن در ناحیه‌ی شعاع سنبه بیشتر است. مقدار حداکثر تنش در دو طراحی دیگر (نوع

## ۷- نتیجه گیری

نتایجی که از این تحقیق به دست آمد، به شرح زیر می باشد:

۱- استفاده از استراتژی ارائه شده در این تحقیق، موجب ایجاد نظم در طراحی پیش فرم های قطعات متقارن گردیده و فرآیند طراحی را سازمان یافته تر می کند.

۲- شبیه سازی انجام شده برای مراحل مختلف کشش و باز کشش، عملکرد بسیار مطلوبی داشته و حداکثر خطای آن در پیش گویی توزیع ضخامت دیواره ی قطعه ی صنعتی، در حدود ۲/۵۵ درصد بوده است.

۳- شبیه سازی ها نشان داد با این که آنیل کردن باعث افزایش قابلیت شکل پذیری می شود ولیکن احتمال باریک شدن (گلوئی شدن) و چروکیدگی را در قطعه بالا می برد.

۴- از لحاظ اقتصادی در مواقعی که تیراژ قطعه زیاد باشد، معمولاً ساخت یک قالب اضافه (افزودن یک پیش فرم بین مراحل) از آنیل کردن مقرون به صرفه تر است.

۵- نسبت کشش فولاد AISI-۴۱۳۰،  $\beta_1 = 1/79$  به دست آمد.

۶- نسبت باز کشش مرحله ی اول برای فولاد AISI-۴۱۳۰،  $\beta_2 = 1/3$  به دست آمد.

۷- نسبت باز کشش مرحله ی دوم و مراحل پس از آن برای فولاد AISI-۴۱۳۰،  $\beta_n = 1/2$  به دست آمد.

۸- برای تولید یک استوانه با سر کروی می بایست که شعاع مربوطه را در مرحله ی آخر اعمال نمود و در سایر مراحل می بایست برای جلوگیری از گلوئی شدن شعاع لبه ی سنبه بیش از آن باشد.

۹- در تولید استوانه سر کروی، با توجه به روابط مقدار جدا کثر شعاع سنبه، ضخامت ورق می بایست حداقل  $0.1$  قطر استوانه نهائی باشد ( $th \geq 0.1d$ ).

۱۰- در طراحی پیش فرم قطعات سر کروی نیازی به بررسی نسبت حدی ارتفاع به قطر فنجان گنبدی شکل (LHR) نمی باشد، زیرا همواره مقداری کم تر از نسبت حدی آن را دارا می باشد.

## فهرست علائم

$d$	قطر داخلی (mm)
$D$	قطر خارجی (mm)
$\beta$	نسبت کشش
$R$	شعاع (mm)
$h$	ارتفاع (mm)

## مراجع:

- [۱] طالبی خورزوقی، احمد، طراحی و ساخت ابزار و قالب فرآیند کشش عمیق به کمک رایانه، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۱، صفحه ۲.
- [۲] بابایی، بهروز، طراحی پریفورم بین مراحل در فرآیند کشش عمیق قطعات متقارن، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، ۱۳۸۹، صفحات ۱۱ تا ۵۹.
- [3] Moaveni S., Numerical experiments for a Mechanics of Materials course, *International Journal Engineering*, Vol. 14, No 2, 1998, pp. 122-129.
- [4] Altan T., Khamitkar S., Kinzel G. L. , and Esche S. K., Process and die design for multi-step forming of round parts from sheet metal, *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 59, 1996, pp. 24-33.
- [5] Tisza M., Integration of numerical modelling and knowledge based systems in metal forming, *6th ICTP Conference, Nürnberg*, 1999, pp.117-128.
- [6] Choi T.H. , Choi S., Na K.H. , Bae H.S. , Chung W.J., Application of intelligent design support system for multi-step deep drawing process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130-131, 2002, pp. 76-88.
- [7] Sheng Z. Q. , Taylor R. Strazzanti M., FEM-based progressive drawing process design, *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 36, 2008, pp. 226-236.
- [8] For bar products; plate, sheet and tubing may be slightly different, Central Steel & Wire Company Catalog, 2006-2008 ed, pp. 246.

- [9] <http://www.efunda.com>.
- [10] Schuler., Metal Forming Handbook, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998.
- [11] Ivana Suchy., Handbook of die design, 2nd Edition, McGraw Hill, 2006.
- [12] “ABAQUS/Standard example: forming a channel, ABAQUS, Getting Started with ABAQUS”, Version 6.8, 12.5.
- [13] Huang Y-M., Tsai Y-W., Li C-L., Analysis of forming limits in metal forming processes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 201, 2008, pp. 385–389.