

حساسیت سنجی اثر شکل هندسی سنبه در عملیات کشش عمیق

در مقایسه با دیگر عوامل مؤثر بر فرایند

غلامحسین محمدی^۱، کارن ابرینی^۲ و ناصر سلطانی^۳

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۳/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۷/۱)

چکیده

پژوهش‌های متعددی با استفاده از روش‌های آماری پیرامون بررسی آثار عوامل گوناگون بر کیفیت نهایی قطعات تولید شده در فرایند کشش عمیق صورت گرفته است. اما تاکنون تحقیقات مشخصی پیرامون اثرگذاری عوامل مؤثر بر عملیات در هندسه‌های گوناگون، اعم از متقارن، نامتقارن، دارای انحنا، صاف و یا گوشه‌دار و تبیین ملزومات طراحی با کیفیت این عوامل با توجه به هندسه محصول، صورت نگرفته است. عموم پژوهش‌های انجام شده پیرامون عوامل مؤثر بر عملیات کشش عمیق و کیفیت محصولات، تاکنون محدود به هندسه‌های خاص بوده است و اطلاعات مناسبی پیرامون مکانیک شکل‌گیری ورق، چگونگی و شدت اثرگذاری این عوامل در دیگر هندسه‌ها موجود نمی‌باشد. در پژوهش حاضر تلاش شده است با استفاده از روش تاگوچی در طراحی آزمایش‌ها (DOE)، اثرگذاری و درجه اهمیت شش عامل متفاوت بر کمترین ضخامت نهایی قطعات تولید شده در عملیات کشش عمیق با استفاده از سنبه‌هایی با هندسه‌های متقارن و نامتقارن بررسی شود. عوامل مورد مطالعه شامل بخشی از مهم‌ترین ویژگی‌های مکانیکی بلانک، ابزار شکل‌دهی و فرایند کشش عمیق می‌باشند. نتایج آزمایش‌ها با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار Abaqus6.7 به دست آمده‌اند و با آزمایش‌های تجربی صحت‌سنجی شده‌اند. نتایج حاصله مؤید آن است که طراحی عملیات کشش عمیق بستگی عمیقی به سه دسته عوامل تأثیرگذار یعنی ویژگی‌های ورق، فرایند و ابزار شکل‌دهی دارد. از مقایسه تطبیقی نتایج اثرگذاری عوامل نسبت کرنش پلاستیک، ضریب اصطکاک سطوح درگیر و شعاع راکورد ماتریس بر مشخصه کیفیت مشخص گردید اثرگذاری این عوامل در هندسه‌های متفاوت تحت تأثیر وجود دیواره‌های صاف، منحنی و شعاع انحنا سنبه می‌باشند و با ضریبی به نام شدت انحنا مرتبط است.

واژه‌های کلیدی: کشش عمیق، راهبرد تاگوچی، روش المان محدود، آنالیز واریانس، طراحی آزمایش‌ها

The Assessment of the Effect of Geometrical Shape of Punch Through the Deep Drawing Operation in Comparison to Other Factors

Gh. Mohammadi, C. Abrinia and N.Soltani

Mechanical Engineering Department

Tehran University

(Received: 21/April/2011; Accepted: 23/September/2013)

ABSTRACT

Deep drawing is one of the frequently applied methods in sheet metal forming. Optimizing the factors involved in this process is one of the most important research fields for decreasing production costs of this method. To reach optimal values of these factors, the effectiveness of each of the factors involved has to be studied by analytical, numerical, an experimental methods. Vast research has been done on the effective factors (friction, punch and die radii, blank-holder force, sheet metal substance, etc.) and the amount of effect each factor has on the deep drawing process, but there hasn't been mentionable research done on the effectiveness of geometrical symmetry and shape of the pieces produced and other effective factors on the whole process. In this article, we have used the FEM and the process simulation method (ABAQUS commercial software) and the Taguchi technique in the design of experiments (DOE) and have finally analyzed the results based on variance (ANOVA), to study the effectiveness of geometrical symmetry and shape of the pieces on the deep drawing process and the possible changes they impose on the other effective factors on the process (mechanical properties of sheet, punch and die radii, friction, blank-holder force).

Keywords: Deep Drawing, Taguchi Method, Finite Element Method (FEM), Analysis of Variance (ANOVA), Design of Experiment (DOE)

۱- کارشناسی ارشد: ghm624@yahoo.com

۲- استاد (نویسنده پاسخگو): cabrinia@ut.ac.ir

۳- استاد: nsoltani@ut.ac.ir

نیروی ورق گیر
وارینانس داده‌ها

 F_{bl}, BHF
 V

۱- مقدمه

عموماً کیفیت نهایی قطعات تولید شده توسط عملیات کشش عمیق را بر مبنای ضخامت نهایی دیواره قطعه و عاری بودن آن از آسیب‌های رایج از جمله چروکیدگی و پارگی بررسی می‌نمایند [۱]. از این رو عمده پژوهش‌های اخیر انجام شده پیرامون بهبود کیفیت نهایی محصولات تولیدی با استفاده از روش‌های المان محدود و بهینه‌سازی، بر تکنیک‌های رفع و کاهش این آسیب‌ها با استفاده از کنترل عوامل اثرگذار و یا بازطراحی عملیات کشش عمیق متمرکز شده است. در سال‌های اخیر، توجه به طراحی مناسب عملیات کشش عمیق به جهت گسترش کاربرد این صنعت و تنوع محصولات تولیدی، افزایش روز افزونی یافته است. عوامل مؤثر بر عملیات شکل‌دهی ورق‌های فلزی و کیفیت نهایی قطعات تولیدی در برخی از منابع تا ۲۵ عنوان، بیان شده است [۲]. گرانوستانجسکی بر مبنای روش‌های نوین طراحی بهینه و مدل‌سازی و با توجه به عامل‌های اثرگذار در عملیات کشش عمیق یک الگوریتم مبتنی بر به‌کارگیری روش المان محدود برای طراحی این عملیات پیشنهاد داده است [۳]. وی تعیین معادلات ریاضی حاکم بر عملیات، ویژگی‌های تولید، هندسه مدل، عوامل مؤثر بر فرایند، ویژگی‌های مکانیکی ورق و معیارهای سنجش کیفیت را از جمله بخش‌های لاینفک یک طراحی بهینه می‌داند.

استفاده از روش‌های آماری در سنجش کیفیت محصولات کشش عمیق به دلیل تعداد زیاد عوامل مؤثر بر عملیات، رهیافت مناسبی برای افزایش سرعت، دقت و گستردگی پژوهش‌ها در این زمینه بوده است. پیش از این پژوهش‌های متعددی با استفاده از روش‌های آماری پیرامون بررسی آثار عوامل گوناگون بر کیفیت نهایی قطعات تولید شده در فرایند کشش عمیق صورت گرفته است. کلگان با طرح‌ریزی آزمایشات بر مبنای روش تاگوچی و به کمک تحلیل المان محدود و انجام آزمایشات تجربی، اثر ۷ عامل مختلف را بر تغییرات ضخامت دیواره محصول عملیات کشش عمیق دایروی بررسی نموده است [۴]. نتایج حاصله حاکی از اثرگذاری قابل توجه شعاع لبه سنبه و ماتریس و عدم اثرگذاری محسوس عوامل دیگر فرایند کشش (محل و نوع روانکار، سرعت سنبه، عمق کشش و نیروی ورق‌گیر) در ضخامت نهایی دیواره می‌باشد. در این پژوهش خصوصیات ورق خام به‌عنوان عامل اثرگذار بر عملیات در نظر

فهرست علائم و اختصارات (در صورت لزوم)

آرایه عوامل کنترل‌پذیر	CFA
آرایه عوامل اغتشاش	NFA
آنالیز واریانس داده‌ها	ANOVA
انحراف میانگین مربعات	MSD
باقیمانده جمع مربعات	RSS
تنش حقیقی	σ_T
جمع مربعات خالص	Sprime
جمع مربعات آثار عامل F	SS(F), S(F)
چگالی	ρ
حد نسبت کشش	LDR, β_{Max}
درجه آزادی عامل	Dof
درصد کاهش	P.R.
شعاع لبه (راکورد) ماتریس	R_D
شعاع لبه (راکورد) سمبه	R_P
شعاع مؤثر بلانک	R_e
شعاع گوشه در اشکال گوشه‌دار	r_c
شدت انحنای	SR
ضریب اصطکاک	μ
ضریب کرنش سختی	n
ضریب تنزیل	$\beta(\hat{L})$
ضریب استحکام	K
ضخامت اولیه ورق	t_0
عمق کشش	h
فشار مخصوص ورق‌گیر	P_{bl}
قطر سمبه	d
قطر لوح (بلانک)	D
قطر داخلی ماتریس	d_d
کرنش ناشی از سردکاری اولیه	ε_0
ماکزیمم نیروی کشش	$F_{d,max}$
مساحت درگیر ورق‌گیر	A_{bl}
مقدار لقی بین سمبه و ماتریس	u_D
مقدار کارایی بهینه و تابع هدف محیط	η
متوسط شعاع انحنای	S
ناهمسانگردی صفحه‌ای ورق	ρ_{ave}
نسبت کرنش پلاستیک	Δr
نسبت کشش	r
نسبت پیام به اغتشاش	β
نسبت واریانس	SNR
	F

عملیات کشش عمیق بر کیفیت نهایی قطعات تولیدی نسبت به دیگر متغیرهای اثرگذار است.

۲- الگوی طراحی مقاوم با استفاده از راهبرد تاگوچی

طراحی مقاوم یک روش مهندسی برای بهبود نتیجه‌بخشی پژوهش به کمک تعیین شرایط بهینه متغیرهای کنترل فرایند می‌باشد، به طوری که فرایند نسبت به اغتشاشات غیرحساس شود. این راهبرد از سه مرحله اصلی تشکیل شده است: [۹و۱۰]

۱- طرح ریزی آزمایش‌ها،

۲- اجرای آزمایش‌ها و

۳- تحلیل و صحت‌سنجی نتایج.

مرحله اول یعنی «طرح‌ریزی آزمایشات» بر مبنای شناسایی توابع اصلی فرایند است. متغیرهای کنترلی^۴ (متغیرهایی که به سادگی قابل کنترل هستند)، متغیرهای اغتشاشگر^۵ (متغیرهایی که کنترل آنها دشوار و هزینه‌بر است)، شرایط آزمایش، مشخصه کیفیت^۶ (مشخصه تعیین‌کننده کیفیت نتایج خروجی)، انواع عیوب و نقایص و در نهایت بهینه‌سازی تابع هدف^۷، در این بخش قرار می‌گیرند. شرایط آزمایش باید به گونه‌ای انتخاب شود که آثار اغتشاشات مهم دیده شود. دو عامل که بر مشخصه کیفیت اثرگذار می‌باشند؛ بدین ترتیب هستند: ۱- متغیرهای اغتشاشگر، ۲- متغیرهای کنترلی.

روش طراحی مقاوم با بیشینه ساختن نسبت سیگنال به اغتشاش (S/N) که تابع هدف را شکل می‌دهد، در نهایت حساسیت مدل را نسبت به متغیرهای اغتشاشگر کمینه می‌سازد. از تابع اتلاف درجه دوم^۸ به دست می‌آید. فرم‌های معمول نسبت (S/N)، به صورت زیر می‌باشد:

۱- الگوی مقدار اسمی به‌عنوان «بهترین»^۹: در این الگو تابع هدف برای کسب یک مقدار غیر صفر متناهی هدف‌گذاری می‌شود.

$$\eta = 10 \log \frac{\left(\frac{1}{n} \sum y_i \right)^2}{\frac{1}{n-1} \sum \left(y_i - \left(\frac{1}{n} \sum y_i \right) \right)^2} = 10 \log \frac{T^2}{\sigma^2} \quad (1)$$

۲- الگوی مقدار کمتر به‌عنوان «بهتر»^{۱۰}: در بعضی از مسائل، مقدار صفر به‌عنوان مقدار مطلوب تابع تلقی می‌شود.

گرفته نشده است. برون با طرح‌ریزی آزمایش‌ها بر مبنای روش جایگزینی کامل^۱، اثر ۷ عامل، شامل خصوصیات ابزار شکل‌دهی و فرایند را بر روی نحوه توزیع ضخامت دیواره در کشش عمیق دایروی بررسی نموده است [۵]. در این پژوهش نیروی ورق‌گیر، نیروی سنبه و سرعت سنبه به‌عنوان عوامل مؤثر اصلی شناخته شده‌اند. جاییسینگ و همکاران با به‌کارگیری روش تاگوچی در طراحی آزمایش‌ها و بر مبنای چهار عامل ضریب کرنش سختی، نسبت کرنش پلاستیک، ضریب اصطکاک و نیروی ورق‌گیر به بررسی کرنش نازک‌شدگی در دیواره محصول نهایی پرداخته است [۶]. در این پژوهش، عملیات کشش عمیق، متقارن فرض شده است و در چهار عمق کشش متفاوت با استفاده از روش المان محدود آزمایش‌ها انجام شده است. تحلیل واریانس نتایج نشان می‌دهد نیروی ورق‌گیر در این عملیات بیشترین تأثیر را در کرنش نازک‌شدگی ایفا نموده است. دیگر عوامل اثرگذار به ترتیب ضریب اصطکاک، نسبت کرنش پلاستیک و ضریب کرنش سختی هستند. پادمانابهان و همکاران نیز در پژوهشی بر مبنای روش تاگوچی به بررسی اثر شعاع لبه ماتریس، نیروی ورق‌گیر و ضریب اصطکاک بر ضخامت نهایی دیواره محصول پرداخته‌اند [۷]. تحلیل واریانس نتایج حاکی از اثر بسیار زیاد شعاع لبه ماتریس نسبت به دیگر عوامل بر ضخامت نهایی قطعه می‌باشد. در پژوهشی دیگر ژانگ برای طراحی بهینه یک عملیات کشش عمیق با هندسه نامتقارن و جهت کاهش ریسک چروکیدگی و نازکی دیواره به بررسی آثار عوامل مختلف بر ضخامت نهایی دیواره قطعات کشیده شده پرداخته است [۸]. نتایج حاصل از تحلیل واریانس، بر مبنای آزمایش‌های طرح‌ریزی شده با استفاده از روش باکس-بنکهن^۲، بیشترین اثرگذاری را از جانب روانکار و بعد از آن نیروی ورق‌گیر نشان می‌دهد. البته در این پژوهش عوامل مرتبط با ابزار شکل‌دهی لحاظ نشده‌اند.

در پژوهش حاضر با استفاده از یک طراحی مقاوم^۳ مبتنی بر روش تاگوچی، اثرگذاری و درجه اهمیت شش متغیر متفاوت بر کمترین ضخامت نهایی قطعات تولیدشده در عملیات کشش عمیق با به‌کارگیری پنج هندسه متفاوت سنبه؛ بررسی شده است. متغیرهای مورد مطالعه شامل بخشی از خصوصیات ماده خام اولیه، ابزار شکل‌دهی و فرایند کشش عمیق می‌باشند. هدف از پژوهش، بررسی اثر تقارن و شکل هندسی سنبه در

4- Control Factor

5- Noise factor

6- Quality Characteristic

7- Ibjective Function

8- Quadratic Loss Function

9- Nominal the Best

10- Smaller the Better

1- Full Factorial Method

2- Box-Benkhen

3- Robust Design

متعددی دارد. اول اینکه نتایج از تعدادی آزمایش به دست می‌آید که در یک ناحیه کامل از آزمایش‌ها- محدود شده توسط متغیرهای کنترل- موجود هستند. دوم اینکه، یک صرفه‌جویی قابل توجه در انجام آزمایش‌ها، صورت می‌گیرد و سوم اینکه تحلیل نتایج بسیار ساده خواهد بود.

یک آرایه متعامد برای یک پروژه طراحی مقاوم خاص، می‌تواند با دانستن تعداد متغیرهای کنترل، سطوح آنها و برهم‌کنش متغیرهای مطلوب ساخته شود. تاگوچی، ۱۸ آرایه متعامد معروف به آرایه‌های متعامد استاندارد را جدول‌بندی و فهرست نمود [۱۱]. تعداد ردیف‌های یک آرایه متعامد نشانگر تعداد آزمایش‌ها است و تعداد ستون‌های یک آرایه نشانگر حداکثر متغیرهایی است که می‌تواند با استفاده از یک آرایه بررسی شود. پس از تشکیل آرایه متعامد با کمک متغیرهای کنترل و سطوح پیش‌بینی شده و انجام آزمایش‌ها طبق جدول، نتایج با استفاده از مشخصه کیفیت و به‌کارگیری الگوی مقدار بیشتر به‌عنوان «بهتر»، تحلیل می‌گردند و شرایط بهینه متغیرهای کنترل مشخص می‌گردد.

به‌کمک راهبرد تاگوچی می‌توان از میان عوامل متعدد اثرگذار بر یک سیستم، تعدادی را انتخاب کرد و عملیات را نسبت به این عوامل حساسیت‌سنجی نمود. در راهبرد تاگوچی عدم انتخاب یک عامل به‌عنوان عامل کنترلی در آزمایش‌ها، به معنای عدم تأثیر این عامل در فرایند حساسیت‌سنجی برای دستیابی به طراحی مقاوم نخواهد بود [۱۰]. لذا مطمئناً در هر عملیات مؤثر از عوامل کنترلی متعدد تا زمانی که همه عوامل در آزمایش‌ها لحاظ نشوند، امکان بروز خطا وجود دارد. به این ترتیب کاهش و یا افزایش خطا در تحلیل نهایی نیز مستقیماً به جامعیت آزمایش‌های طراحی شده از نظر عوامل کنترلی و سطوح اثرگذار آنها بستگی خواهد داشت [۶].

به‌عنوان مثال، اگر تعداد عوامل اثرگذار بر عملیات کشش عمیق را حدود ۲۰ عامل فرض نماییم، یک دسته آزمایش طراحی شده که از میان این ۲۰ عامل ۱۰ عامل را به‌عنوان عامل کنترلی انتخاب می‌نماید مطمئناً نسبت به دسته‌ای که تنها ۳ عامل را انتخاب می‌نماید، از جامعیت بیشتر، دقت بالاتر و خطایی کمتر در نتایج نهایی برخوردار است [۹].

علاوه بر این سطوح اثرگذار عوامل کنترلی نیز در ایجاد خطا در تحلیل نتایج مؤثر است. با انتخاب بازه‌های بسیار بزرگ و یا بسیار کوچک برای سطوح یک عامل کنترلی نسبت به دیگر عوامل کنترلی در یک دسته آزمایش‌های طراحی شده، مستقیماً نتایج آزمایش‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرند. این تغییرات از دو جهت حادث می‌گردند. اول آنکه بازه‌های بزرگ و

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum y_i^2 \right). \quad (2)$$

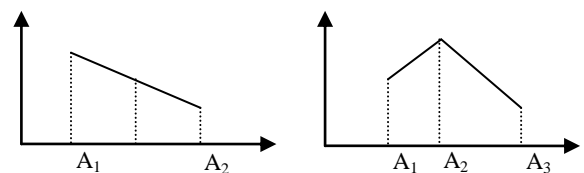
۳- الگوی مقدار بیشتر به‌عنوان «بهتر»^۱: در این الگو تابع مطلوب تا حد امکان مقدار بزرگتر را کسب می‌کند.

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2} \right). \quad (3)$$

تابع هدف، η ، برای هر یک از راهبردهای فوق و متغیرها، با مدل خطی زیر مرتبط است [۱۰].

$$\eta(A_i, B_j, C_k, D_l, E_m, F_n) = T + \beta_a a_i + \beta_b b_j + \beta_c c_k + \beta_d d_l + \beta_e e_m + \beta_f f_n. \quad (4)$$

در این رابطه، T میانگین کل - برابر با مقدار میانگین η برای کلیه آزمایشات - می‌باشد. $a_i, b_j, c_k, d_l, e_m, f_n$ به ترتیب مقدار انحراف از T به دلیل قرار دادن متغیر A در سطح A_i ، B در سطح B_j ، C در سطح C_k ، D در سطح D_l ، E در سطح E_m و F در سطح F_n می‌باشد، مقادیر β ، ضریب تنزیل بر مبنای نسبت واریانس متغیرها، VR می‌باشد. به‌علاوه در تمامی معادلات بالا y_i ، مقدار مشخصه کیفیت و n تعداد مشاهدات در وضعیت‌های متفاوت اغتشاش است. در این پژوهش تمامی تحلیل‌ها بر مبنای الگوی مقدار بیشتر به‌عنوان «بهتر» انجام گرفته است. این بسیار مهم است که متغیرهای کنترلی به‌نحوی انتخاب شوند که نشانگر تأثیر قابل تشخیص پدیده بر مشخصه کیفیت باشند. برای هر متغیر عموماً ۲ یا ۳ سطح مجزا به‌طوری که یک ناحیه مناسب را پوشش دهد، انتخاب می‌گردد. انتخاب ۳ سطح باعث کاهش اثر انحنای بر نتایج می‌گردد و بنابراین بر انتخاب ۲ سطح تقدم دارد (شکل ۱).



(ب) با استفاده از ۲ نقطه تنها می‌توان یک خط مستقیم رسم

(الف) با استفاده از ۳ نقطه می‌توان اثر انحنای فرض نموده و بنابراین حداکثر مقدار را شناسایی نمود.

شکل (۱): اثر خطی و غیر خطی یک متغیر.

طراحی آزمایش‌ها می‌تواند با استفاده از راهی کارآمد به نحوی صورت پذیرد که امکان بررسی هم‌زمان چندین متغیر کنترلی با کمک آرایه‌های متعامد فراهم شود. این راهبرد مزایای

۳- طراحی آزمایش‌ها

۱- هندسه و شکل قطعات: در این پژوهش هدف مشخص نمودن اثر تقارن و شکل هندسی سنبه (یا قطعات تولیدی) در عملیات کشش عمیق، بر کاهش یا افزایش اثرگذاری متغیرهای فرایند، ابزار شکل‌دهی و ماده خام اولیه می‌باشد. انتخاب چند شکل با هندسه و درجه تقارن متفاوت و طراحی آزمایش‌ها بر مبنای روش تاگوچی برای هر یک از اشکال، روند پژوهش در دستیابی به نتایج را تسهیل می‌نماید. در شکل (۲: a-e) پنج هندسه متفاوت (نمای روبه‌رو) برای سنبه در فرایند کشش عمیق به ترتیب کاهش تقارن نشان داده شده است (جهت سهولت، این اشکال در ادامه مقاله با نام a-e خوانده می‌شوند). مساحت سطح درگیر در تمامی اشکال برابر انتخاب شده و آزمایش‌ها نیز در یک عمق کشش واحد انجام گرفته است. در تمام آزمایش‌ها ضخامت ورق استفاده شده برابر ۱ میلی‌متر، محیط اولیه ورق به صورت دایروی و با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و لقی بین سنبه و ماتریس ۱/۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

۲- مشخصه کیفیت و تابع هدف: مشخصه کیفیت در این پژوهش «کمترین ضخامت دیواره» قطعه تولید شده در عملیات کشش عمیق می‌باشد. از آن جهت که هر چه این مقدار بیشتر باشد، مطلوب‌تر است، بنابراین تابع هدف مورد استفاده

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{(\text{min. thickness})^2} \right)$$
 خواهد بود.

۳- متغیرهای کنترل و سطوح هر یک: همان‌گونه که پیش از این بیان شد، متغیرهای متعددی بر عملیات کشش عمیق مؤثرند. شعاع لبه سنبه و ماتریس، لقی بین سنبه و ماتریس، صافی سطح سنبه و ماتریس، ضریب کرنش سختی، نسبت کرنش پلاستیک، سرعت سنبه، نیروی ورق‌گیر، اصطکاک، نوع ماده روانکار و محل استفاده آن و نیروی سنبه از جمله متغیرهای اثرگذار هستند. شش متغیری که در این پژوهش به‌عنوان متغیرهای کنترل در نظر گرفته شده‌اند، از میان خصوصیات ماده اولیه، دو متغیر ضریب کرنش سختی (n) و نسبت کرنش پلاستیک یا ناهمسانگردی ($\bar{\epsilon}$)، از میان خصوصیات ابزار شکل‌دهی شعاع لبه سنبه (R_{punch}) و شعاع لبه ماتریس (R_{matrix}) و از میان خصوصیات فرایند، ضریب اصطکاک بین ورق‌گیر و ماتریس (μ) و نیروی ورق‌گیر (BHF) می‌باشند. جدول ۱ فهرست متغیرهای کنترل و سطوح هر یک را نشان می‌دهد.

یا کوچک سطوح یک عامل کنترلی سبب بزرگنمایی و یا کوچک‌نمایی اثرگذاری سطوح آن عامل خواهند شد و دوم آنکه اثرگذاری دیگر عوامل کنترلی نسبت به عامل مذکور کاهش یا افزایش می‌یابند که در نهایت به کاهش یا افزایش کلیت اثرگذاری عوامل بر مشخصه کیفیت می‌انجامد [۵۶].

به‌عنوان مثال، اگر در پژوهشی، سطوح نیروی ورق‌گیر در عملیات کشش عمیق در یک بازه بسیار گسترده نسبت به دیگر عوامل انتخاب شود (این انتخاب می‌تواند بر اساس ملزومات طراحی عملیات و یا جهت بررسی شدت اثرگذاری عامل صورت گیرد) نتایج گویای اثرگذاری قدرتمند نیروی ورق‌گیر بر مشخصه کیفیت خواهند بود [۶]. اما اگر همین عامل کنترلی در پژوهشی دیگر در بازه‌ای کوچکتر انتخاب شود، نتایج گویای اثر قابل اغماض این عامل کنترلی بر مشخصه کیفیت خواهد بود [۷].

بنابراین، جهت تفسیر نهایی نتایج حاصله از آنالیز واریانس داده‌های یک سیستم خاص، باید به این نکته توجه داشت که نتایج حاصل از آنالیز واریانس یک سلسله آزمایش‌های طرح‌ریزی شده برای حساسیت‌سنجی عوامل مؤثر بر این سیستم، لزوماً قابل تعمیم به کلیت بازه‌های طراحی موجود در سیستم نخواهد بود و تنها در بازه طراحی مورد نظر قابل تفسیر است. با این فرض برای تعمیم نتایج حاصل از پژوهش، عموماً تلاش می‌گردد طراحی آزمایش‌ها بر مبنای خصوصیات یک سیستم ایده‌آل که در آن عوامل کنترل‌پذیر و سطوح اثرگذار به صورت استاندارد انتخاب می‌شوند، انجام پذیرد [۱۰].

با فاصله گرفتن از این شرایط ایده‌آل در جداول آنالیز واریانس، مقدار خطا و یا باقیمانده جمع مربعات افزایش می‌یابد که به معنای وجود عوامل کنترل‌ناپذیر، عوامل کنترل‌پذیر فرض نشده و یا سطوح غیر استاندارد و خارج از شرایط مناسب طراحی می‌باشد. صحت نتایج حاصل از مدل با آزمایش تأییدی بر مبنای بازه اطمینان - که مستقیماً با مقدار خطا مرتبط است - سنجیده می‌شود [۹، ۱۰].

پس از مشخص شدن شرایط بهینه و پیش‌بینی پاسخ بر طبق این شرایط با استفاده از تابع هدف (۴)، لازم است یک آزمایش تأییدکننده اجرا گردد. پاسخ حاصل از پیش‌بینی مقدار η با پاسخ مشاهده شده در این آزمایش، مقایسه می‌شود. اگر مشاهدات قویاً با پاسخ پیش‌بینی شده تفاوت داشته باشند نشانگر آن است که مدل ساخته شده توسط متغیرهای کنترل برای سیستم مورد مطالعه قابل قبول نیست و در نتیجه بین پارامترهای دیگری از این سیستم برهم کنش وجود دارد.

پوشش داده می‌شوند [۶]. سطح میانی این دو عامل میانگین ابتدا و انتهای این دو بازه خواهند بود.

جدول (۲) مقادیر n و \bar{r} برای چند نمونه ورق پر کاربرد در

صنایع شکل‌دهی ورق [۱۲].

ماده	n	\bar{r}
Aluminum-killed drawing quality steel	۰/۲۲	۱/۸
Interstitial-free steel	۰/۲۳	۱/۹
Rimmed steel	۰/۲۰	۱/۱
High-strength low-alloy steel	۰/۱۸	۱/۲
Dual-phase steel	۰/۱۶	۱/۰
301 stainless steel	۰/۴۸	۱/۰
409 stainless steel	۰/۲۰	۱/۲
3003-O aluminum	۰/۲۴	۰/۶
6009-T4 aluminum	۰/۲۳	۰/۶
30-70 brass	۰/۵۶	۰/۹

نیروی ورق‌گیر در مقدار حداقلی خود به‌گونه‌ای انتخاب شده است که لبه‌های ورق در مرز ایجاد چروکیدگی قرار نداشته باشند و در مقدار حداکثری به‌گونه‌ای انتخاب شده است که فرایند کشش عمیق در مرز تبدیل به فرایند اتساع قرار نگیرد. سطح دوم نیروی ورق‌گیر بین این دو سطح تعریف شده است [۵۶]. با استفاده از رابطه $F_{bl} = A_{bl} \times P_{bl}$ و با احتساب لقی ۱/۲۵ میلی‌متر از رابطه اوهرل و کیسر و با توجه به خصوصیات چند نمونه ورق پر کاربرد در صنایع شکل‌دهی ورق از ماخذ [۱۲]، نیروی ورق‌گیر بین ۱۵ الی ۲۲/۵ کیلو نیوتن محاسبه می‌شود.

با نگاهی به جداول تعیین ضریب اصطکاک بین فلزات به سادگی می‌توان بازه مناسبی برای ضریب اصطکاک در شرایط مختلف معین نمود [۱۲]. بازه ۰/۵ الی ۰/۲۵ بازه مناسبی از ضرایب اصطکاک است که عموماً در فرایندهای کشش عمیق دیده می‌شوند [۱۲ و ۱۴]. این بازه با فرض استفاده از روانکار و مستقل از دیگر عوامل مورد مطالعه تعیین شده است.

طراحی ماتریس آزمایشات: با توجه به اینکه در این پژوهش ۶ متغیر کنترل با سه سطح استفاده شده است، آرایه متعامد $L_{18}(2^1, 3^7)$ انتخاب می‌شود. این آرایه متعامد با ۱۸ سطر (آزمایش)، گنجایش ۷ متغیر با سه سطح و یک متغیر با دو سطح را دارد. آرایه متعامد $L_{18}(2^1, 3^7)$ برای ۶ متغیر ۳ سطحی R_{matrix} و R_{punc} و n و \bar{r} و BHF و μ در جدول ۱ طرح‌ریزی شده است و مانند جدول ۳ قابل نمایش است [۱۱].

جدول (۱): فهرست و سطوح متغیرهای کنترل.

متغیر	واحد	سطوح		
		اول	دوم	سوم
شعاع لبه ماتریس (R_{matrix})	میلی‌متر	۴	۶	۸
شعاع لبه سنبه (R_{punch})	میلی‌متر	۴	۶	۸
ضریب کرنش سختی (n)	بدون واحد	۰/۱۵	۰/۳	۰/۴۵
ضریب ناهمسانگردی قائم (\bar{r})	بدون واحد	۰/۷۵	۱/۳۷۵	۲
نیروی ورق‌گیر (BHF)	کیلو نیوتن	۱۵	۱۸/۷۵	۲۲/۵
ضریب اصطکاک (μ)	بدون واحد	۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۲۵

در این فهرست کمترین شعاع لبه سنبه و ماتریس ۴ میلی‌متر انتخاب شده است که از کمترین شعاع به‌دست آمده از فرمول اوهرل و کیسر^۱ برای ورق با ضخامت ۱ میلی‌متر و قطر بلانک ۱۰۰ میلی‌متر بیشتر است [۱۲ و ۱۳]. برای معین نمودن ابعاد بلانک، ابتدا باید حداقل نسبت کشش را برای ورق‌های مورد استفاده در کشش عمیق انتخاب نموده، به‌طوری که هیچ‌یک از آزمایش‌ها به‌دلیل عبور از حد مجاز کشش دچار پارگی و آسیب نگردند. با رجوع به جدول تعیین نسبت کشش از ماخذ [۱۲] کمینه این مقادیر برابر با ۱/۵۵ می‌باشد که مربوط به فولاد ضدزنگ ۴۳۰ است. برای سنبه‌ای دایروی با قطر ۵۰ میلی‌متر، قطر بلانک به روش زیر قابل محاسبه است.

$$\left. \begin{array}{l} \beta \text{ of St14}=2 \\ \beta \text{ of St37}=1.8-2 \\ \beta \text{ of Stainless steel430}=1.55 \\ \beta \text{ of Stainless steel304}=2 \\ \beta \text{ of Al1050}=2.1 \\ \beta \text{ of Brass70}=1.7-2.2 \end{array} \right\} \Rightarrow \min. \beta = 1.55 \quad (5)$$

$$\min \beta = 1.55 \Rightarrow \beta = \frac{D_{blank}}{d_{punch}} \Rightarrow D_{blank} = \beta \times d_{punch} = 1.55 \times 50 = 77.5 \text{mm}$$

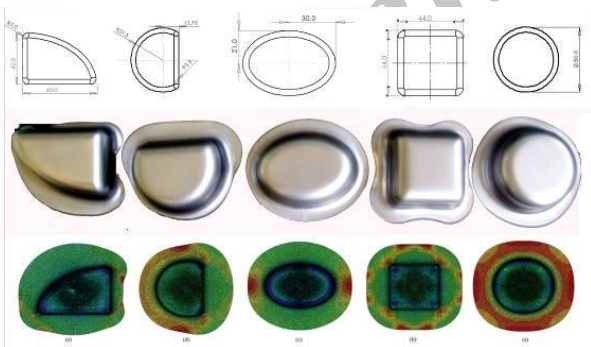
ابعاد بلانک برای مقاطع غیر دایروی نیز از همین روش قابل دستیابی است. بلانک برای هندسه مربع شکل دارای قطر ۹۶ میلی‌متر، برای هندسه بیضی شکل دارای قطر ۹۲ میلی‌متر و برای دو هندسه دیگر نیز دارای قطر ۸۶ و ۹۲ میلی‌متر خواهد بود. بنابراین با انتخاب قطری معادل ۱۰۰ میلی‌متر برای کلیه بلانک‌ها می‌توان از انجام یک عملیات کشش عمیق بدون ایجاد آسیب از جانب عدم تناسب نسبت کشش و با حفظ منطقه فلنج اطمینان یافت. با مراجعه به جدول ۲ مقادیر n و \bar{r} برای چند نمونه ورق پر کاربرد در صنایع شکل‌دهی ورق از ماخذ [۱۲]، با انتخاب ۰/۱۵ الی ۰/۴۵ به‌عنوان بازه مقادیر ضریب کرنش سختی و ۰/۷۵ الی ۲ به‌عنوان بازه مقادیر ناهمسانگردی، تقریباً تمامی آلیاژهای آلومینیوم، استیل و برنج در آزمایش‌ها

جدول (۳): آرایه متعامد L18 طرح ریزی شده برای ترکیب عوامل مؤثر بر عملیات کشش عمیق.

شماره آزمایش	عوامل							۸
	۱	R_D	R_P	n	\bar{r}	BHF	μ	
۱	۱	۴	۴	۰/۱۵	۰/۷۵	۱۵	۰/۰۵	۱
۲	۱	۴	۶	۰/۳	۱/۳۷۵	۱۸/۷۵	۰/۱۵	۲
۳	۱	۴	۸	۰/۴۵	۲	۲۲/۵	۰/۲۵	۳
۴	۱	۶	۴	۰/۱۵	۱/۳۷۵	۱۸/۷۵	۰/۲۵	۳
۵	۱	۶	۶	۰/۳	۲	۲۲/۵	۰/۰۵	۱
۶	۱	۶	۸	۰/۴۵	۰/۷۵	۱۵	۰/۱۵	۲
۷	۱	۸	۴	۰/۳	۰/۷۵	۲۲/۵	۰/۱۵	۳
۸	۱	۸	۶	۰/۴۵	۱/۳۷۵	۱۵	۰/۲۵	۱
۹	۱	۸	۸	۰/۱۵	۲	۱۸/۷۵	۰/۰۵	۲
۱۰	۲	۴	۴	۰/۴۵	۲	۱۸/۷۵	۰/۱۵	۱
۱۱	۲	۴	۶	۰/۱۵	۰/۷۵	۲۲/۵	۰/۲۵	۲
۱۲	۲	۴	۸	۰/۳	۱/۳۷۵	۱۵	۰/۰۵	۳
۱۳	۲	۶	۴	۰/۳	۲	۱۵	۰/۲۵	۲
۱۴	۲	۶	۶	۰/۴۵	۰/۷۵	۱۸/۷۵	۰/۰۵	۳
۱۵	۲	۶	۸	۰/۱۵	۱/۳۷۵	۲۲/۵	۰/۱۵	۱
۱۶	۲	۸	۴	۰/۴۵	۱/۳۷۵	۲۲/۵	۰/۰۵	۲
۱۷	۲	۸	۶	۰/۱۵	۲	۱۵	۰/۱۵	۳
۱۸	۲	۸	۸	۰/۳	۰/۷۵	۱۸/۷۵	۰/۲۵	۱

۴- اصطکاک بین سطوح (ورق گیر و ماتریس) با استفاده از مدل پنالتی شبیه سازی شده است. ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق گیر در تمامی آزمایشات ثابت و برابر با ۰/۱۲۵ می باشد.
 ۵- برای مش بندی ورق اولیه از المان پوسته ای S4R استفاده شده است. ضخامت ورق اولیه در کلیه سطوح یکنواخت می باشد.

۴- شرح مدل المان محدود و خصوصیات مدل
 در این پژوهش جهت انجام آزمایشات از نرم افزار ABAQUS6.7 استفاده شده است. قدرت بالای نرم افزار ABAQUS6.7 در تحلیل تغییر شکل های بزرگ با استفاده از روش المان محدود، استفاده از آن جهت مدل سازی فرایند کشش عمیق ورق های فلزی را تسهیل می نماید. با توجه به جدول آزمایش ها که در بخش های پیشین توصیف شد، ۹۰ آزمایش متفاوت در ۵ هندسه طرح ریزی گردید و در نرم افزار با استفاده از روش المان محدود صریح و در قالب یک مسئله دینامیک اجرا شد (شکل ۲).



شکل (۲): نمای روبروی ۵ هندسه متفاوت سنبه در عملیات کشش عمیق و تولیدات آزمایشی تجربی و نرم افزاری.

در مدل سازی صورت گرفته فرضیات ذیل لحاظ شده است:
 ۱- سنبه، ماتریس و ورق گیر کاملاً صلب در نظر گرفته شده اند،
 ۲- رفتار ماده (ورق) از رابطه $\sigma = K \epsilon^n$ پیروی می کند. در این رابطه n ضریب کارسختی و K ضریب استحکام ماده می باشد که با استفاده از آزمایشات تجربی برای مواد واقعی به دست می آیند و
 ۳- رفتار تغییر شکل ماده، غیرایزوتروپیک یا ناهمسانگرد می باشد. ناهمسانگردی قائم با استفاده از فرمول $\bar{r} = .25(r_0 + 2r_{45} + r_{90})$ بر مبنای ناهمسانگردی در ۳ امتداد $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ به دست می آید.

۵- آزمایش های تجربی و صحت سنجی نتایج
 جهت حصول اطمینان از انطباق نتایج المان محدود با شرایط واقعی باید صحت مدل المان محدود با آزمایش های تجربی بررسی شود. بدین منظور پنج آزمایش المان محدود توسط مدل ساخته شده در نرم افزار با ویژگی های آزمایش تجربی اجرا

با توجه به آزمایش سوئیفت^۱ قطر سنبه برابر با ۵۰ میلی‌متر می‌باشد که بنا به رابطه $LDR = \frac{D_{max}}{d} = \beta_{max}$ (در این رابطه β_{max} حداکثر نسبت کشش، D_{max} بزرگترین قطر لوح و d قطر سنبه است) و با فرض نسبت کشش ۱/۹، قطر بلانک برابر با ۱۰۰ میلی‌متر انتخاب می‌شود. با استفاده از رابطه $F_{bl} = A_{bl} \times P_{bl}$ و با احتساب لقی ۱/۲۵ میلی‌متر از رابطه اوهرل و کیسر^۲ و با توجه به خصوصیات فولاد St14، برابر ۱۳ کیلو نیوتن محاسبه می‌شود. نیروی مورد نظر برای پرس برابر با شش تن و سرعت پرس برای پرس‌های یک مرحله‌ای برابر با ۱۳ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب می‌گردد [۱۲].

با توجه به محاسبات انجام شده و فرضیات لحاظ شده در مراحل پیشین می‌توان با به‌کارگیری تکنیک‌های طراحی قالب‌های پرس و با استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی SolidWorks2007 به طراحی و مدل‌سازی اجزاء مختلف قالب کشش و مونتاژ آن پرداخت [۱۶]. در اینجا ذکر این نکته مهم است که در آزمایش استاندارد سوئیفت، در طی مرحله کشش عمیق یک نیروی ثابت توسط ورق‌گیر روی ورق عمل می‌کند [۱۵]. با توجه به اینکه پرس موجود در آزمایشگاه یک پرس یک مرحله‌ای است، بنابراین برای اینکه بتوان از این پرس برای انجام آزمایش‌های مطابق با شرایط آزمایش سوئیفت سود برد و یک نیروی ورق‌گیر ثابت را در طی مرحله کشش عمیق روی ورق قرار داد، برای ورق‌گیر مکانیزمی مشابه با پرس دو مرحله‌ای طراحی شده است. شکل (۳ تا ۷) نقشه مونتاژی، نماهای برش خورده، نقشه انفجاری، قالب نهایی و محصولات تولید شده را نشان می‌دهد.

ساخت سنبه و ماتریس کشش معمولاً با استفاده از تراشکاری، فرزکاری، صفحه تراشی، سنگ زنی، اسپارک و یا ترکیبی از این روش‌ها انجام می‌شود. شکل‌های درون ماتریس‌های کشش، شعاع لبه‌های ماتریس و همچنین سطوح لغزشی سنبه، ماتریس و ورق‌گیر باید از دقت بالایی برخوردار باشند و کاملاً پرداخت شوند. در غیر این صورت عملیات کشش با موفقیت انجام نمی‌شود [۱۶]. به همین دلیل در مواردی ممکن است نیاز به استفاده از دستگاه‌های تراش CNC که از دقت بالایی برخوردارند، باشد. عموم سنبه و ماتریس‌های نامتقارن در آزمایش‌های تجربی با این دستگاه ساخته شده‌اند.

می‌گردند و نتایج حاصله جهت صحت‌سنجی مدل مقایسه می‌گردند.

برای تعیین مشخصه کیفیت در یک عملیات کشش عمیق با استفاده از روش‌های تجربی، نیاز به ساخت یک قالب کامل عملیات کشش عمیق در کارگاه و نصب بر دستگاه پرس مناسب می‌باشد. پس از ساخت قالب و به‌کارگیری آن جهت تولید قطعات مهندسی معین، با تعیین شرایط عامل‌های کنترلی در هر آزمایش، می‌توان محصولات کشش عمیق تولید شده در کارگاه را بر اساس مشخصه کیفیت مطلوب، سنجید و با نتایج شبیه‌سازی مقایسه نمود. فرضیات لحاظ شده در طراحی و آزمایش آزمایش‌های تجربی به شرح ذیل می‌باشد.

۱- بر مبنای پنج هندسه تعیین شده در این پژوهش، پنج قالب (سنبه، ماتریس و ورق‌گیر) کشش عمیق طراحی و ساخته می‌شود و به ازای هر قالب یک آزمایش با عوامل کنترلی مشخص تعریف و سه بار تکرار می‌شود.

۲- شعاع لبه سنبه و ماتریس در کلیه قالب‌ها ثابت و برابر با هشت میلی‌متر انتخاب می‌گردد. بلانک از ورق فولادی St14 بریده می‌شود و بنابراین در آزمایش‌های تجربی مقادیر ضریب کرنش سختی و ناهمسانگردی بر مبنای خصوصیات این فولاد تعیین می‌شود. جهت تعیین خواص ورق از آزمایش کشش تک محوری استفاده می‌شود [۱۵].

۳- ضریب اصطکاک بین ورق‌گیر و قالب با استفاده از روانکار روغن هیدرولیک برابر با ۰/۱ تنظیم می‌گردد [۱۶].

۴- نیروی ورق‌گیر بر مبنای خصوصیات مکانیکی فولاد St14 محاسبه می‌شود. مقدار عمق کشش و قطر بلانک اولیه با حفظ دیگر شرایط هندسی اشکال بر مبنای نسبت کشش ۱/۹ و با فرض وجود فلنج برای اولین کشش محاسبه می‌گردد. این مقدار از نسبت کشش حداکثری فولاد St14 در اولین کشش کمتر است [۱۲].

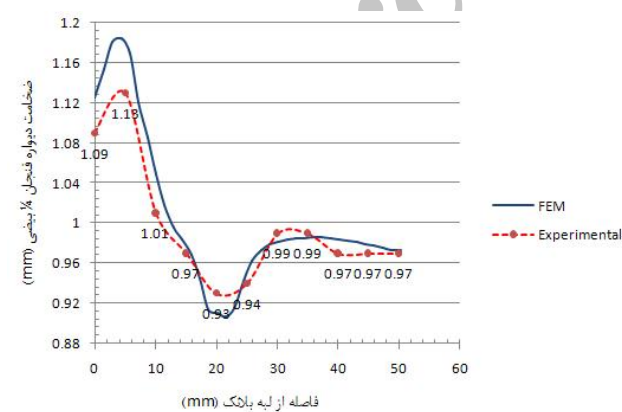
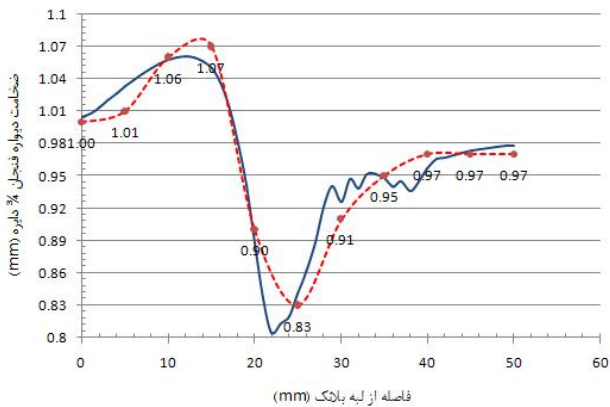
۵- پرس مورد استفاده در آزمایش‌ها، پرس آزمایشگاهی ۳۰ تن Instron (مجهز به سیستم حرکتی Ball-Screw)، مستقر در آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تهران می‌باشد و

۶- در این پژوهش، ورق‌گیر به گونه‌ای طراحی شده است که در طول عملیات کشش عمیق نیروی ورق‌گیر به وسیله تعدادی فنر ثابت نگاه داشته شود. برخی دیگر از مختصات قالب به شرح ذیل طراحی شده است.

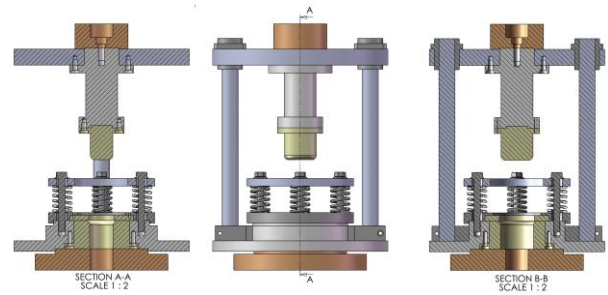


شکل (۷): تصویر اجزای قالب کشش عمیق.

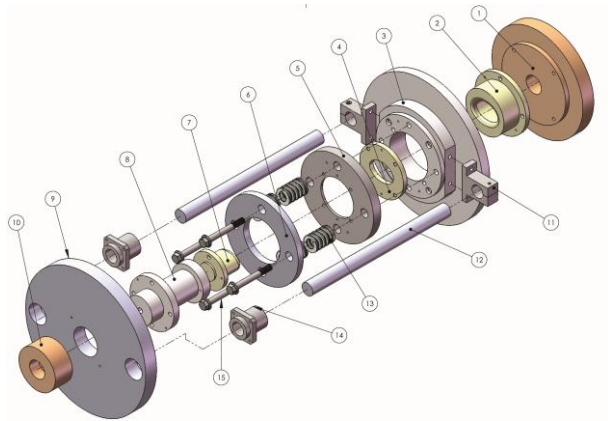
در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نمودارهای موجود نتایج حاصل از نرم‌افزار برای مقاطع مشخص و نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضخامت در نقاط تعیین شده بر نمونه‌های تجربی را نشان می‌دهند. در تمامی نمونه‌ها مقایسه واریانس نتایج آزمایش‌های تجربی و تحلیل‌های عددی حاصل از نرم‌افزار اختلاف معناداری را گزارش نداده‌اند و همان‌طور که مشاهده می‌شود پروفایل تغییرات ضخامت عددی و تجربی در کلیه هندسه‌ها بیش از ۹۰ درصد هارمونی دارند.



شکل (۸): نمودار مقایسه‌ای نتایج تجربی و عددی ضخامت دیواره در هندسه‌های متفاوت.



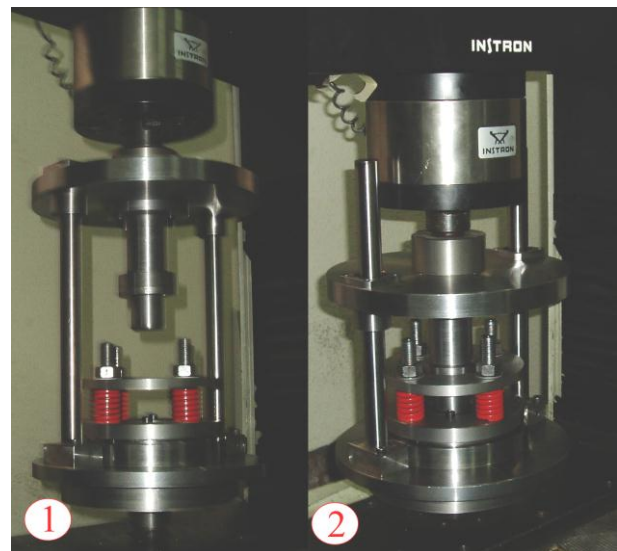
شکل (۳): نمای مونتاژی و برش خورده قالب کشش عمیق.



شکل (۴): نقشه انفجاری قالب.



شکل (۵): محصولات تولید شده با استفاده از قالب کشش عمیق آزمایشگاهی.



شکل (۶): (۱) نمای نهایی قالب پس از مونتاژ. (۲) نمای قالب در حین انجام عملیات کشش عمیق.

۶- تحلیل و بررسی نتایج حاصل از آزمایشات

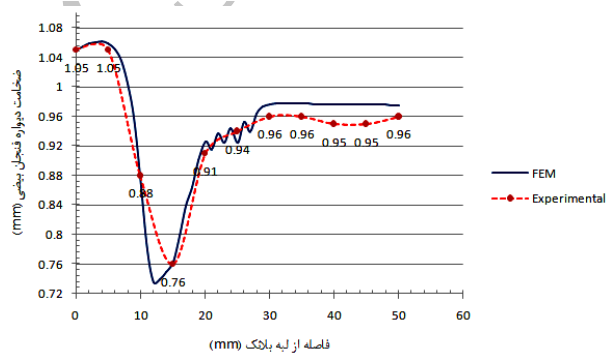
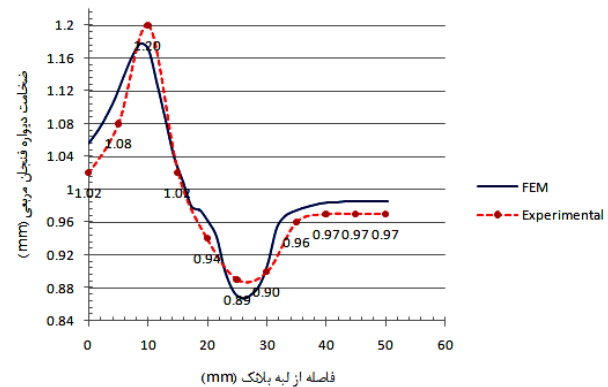
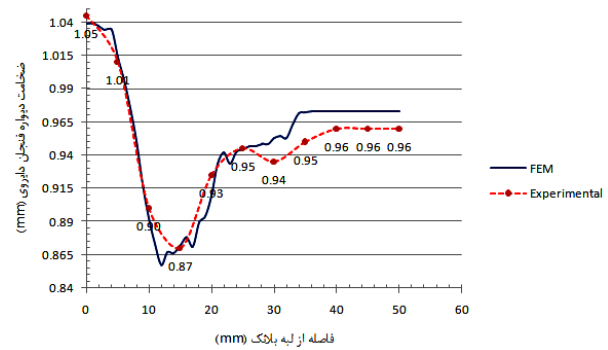
آنالیز واریانس نتایج برای ۵ هندسه مورد مطالعه در جدول‌های (۴-۸) نشان داده شده است. در این جدول‌ها میانگین اثرگذاری هر متغیر در سه سطح بر مبنای شاخص تعیین شده ارائه شده است.

مقدار مانده جمع مربعات^۱ (RSS) نتایج که به‌عنوان خطا نیز معرفی می‌شود برابر با اختلاف جمع مربعات کل^۲ (TSS) و جمع مربعات آثار متغیرها می‌باشد. در این جدول‌ها dof درجه آزادی هر متغیر، S جمع مربعات آثار هر متغیر، MS واریانس یا معدل جمع مربعات، VR نسبت واریانس، S prime جمع مربعات پس از کسر خطا و P درصد اثرگذاری^۳ هر متغیر بر فرایند می‌باشد. جزئیات پروسه آنالیز واریانس در منبع [۹] موجود است.

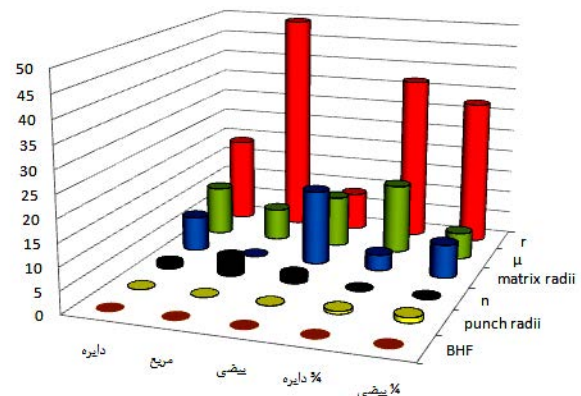
در جدول‌های ANOVA باید توجه داشت اگر مقدار نسبت واریانس (VR) بیشتر از چهار باشد، نشانگر اثر قدرتمند متغیر مورد مطالعه بر شاخص کیفیت انتخاب شده می‌باشد و اگر مقدار این نسبت کمتر از یک باشد نشانگر آن است که متغیر اثر ناچیزی بر مشخصه کیفیت دارد و می‌توان از آن صرف‌نظر نمود.

جدول ۹ ترتیب اثرگذاری متغیرها را بر مشخصه کیفیت و در هندسه‌های متفاوت نشان می‌دهد. این جدول بر مبنای آنالیز واریانس نتایج به‌دست آمده است. در این جدول از متغیرهای بی‌اثر صرف‌نظر شده و تنها متغیرهای اثربخش در هر هندسه نشان داده شده است.

در مقاله حاضر اثرگذاری شش عامل ناهمسانگردی قائم \bar{F} ، ضریب کرنش سختی n ، شعاع لبه سنجه RP، شعاع لبه ماتریس RD، نیروی ورق‌گیر BHF و ضریب اصطکاک μ بر مشخصه کیفیت (کمترین ضخامت دیواره محصول) در عملیات کشش عمیق و در پنج هندسه متفاوت دایره، مربع، بیضی، $\frac{3}{4}$ دایره، $\frac{1}{4}$ بیضی بررسی گردید. عوامل \bar{F} ، μ و RD در سطوح ۱، ۳ و ۳ به ترتیب سه عامل اصلی دارای متوسط بیشترین اثرگذاری بر مشخصه کیفیت در میان عوامل انتخاب شده در کلیه هندسه‌ها می‌باشند. اثرگذاری سه عامل \bar{F} ، μ و RD بر مشخصه کیفیت بسیار محسوس می‌باشد و به شدت تحت تأثیر شکل هندسی سنجه‌ها در عملیات کشش عمیق است. اثرگذاری دو عامل RP،



شکل (۹): نمودار مقایسه‌ای نتایج تجربی و عددی ضخامت دیواره در هندسه‌های متفاوت.



شکل (۱۰): نمودار مقایسه‌ای درصد اثرگذاری عوامل کنترلی بر مشخصه کیفیت در هندسه‌های متفاوت.

1- Residual Sum of Square

2- Total Sum of Square

3- Percent Contribution

این دو پارامتر است بیشتر باشد، محصول نهایی از ضخامت دیواره بیشتر و شکل بهینه‌تری برخوردار خواهد بود. نتایج حاصله از پژوهش‌های پیشین، موید این نتیجه می‌باشد [۱۷]. در این پژوهش از آن جهت که حداقل نیروی ورق‌گیر در کلیه آزمایش‌ها از نیروی کمانش پلاستیک ورق که سبب چروکیدگی فلنج می‌گردد بیشتر است، مشخصاً با افزایش و کاهش ضریب اصطکاک، تنش در ناحیه فلنج بدون ایجاد چروکیدگی، افزایش و کاهش می‌یابد [۱۵ و ۱۶]. لذا از این طریق مشخصه کیفیت (کمترین ضخامت دیواره) به شدت از ضریب اصطکاک تأثیر می‌پذیرد. ضریب اصطکاک تقریباً دومین عامل اثرگذار بر مشخصه کیفیت می‌باشد که در سطح اول (کمترین مقدار) سبب افزایش ضخامت نهایی دیواره خواهد شد. نتایج حاصله از پژوهش‌های پیشین، موید این نتیجه است [۱۷ و ۱۶].

n بر مشخصه کیفیت محسوس می‌باشد و اندکی تحت تأثیر شکل هندسی سنبه‌ها در عملیات کشش عمیق است. البته این تأثیرات نسبت به تأثیرات سه عامل پیشین بسیار کمتر و در برخی موارد قابل اغماض می‌باشد. در بازه تعیین شده برای سطوح نیروی ورق‌گیر، اثرگذاری BHF بر مشخصه کیفیت غیر محسوس و مستقل از شکل هندسی سنبه‌ها می‌باشد. یک تحلیل ساده با استفاده از مفهوم نسبت کرنش پلاستیک، این واقعیت را تأیید می‌نماید که مهم‌ترین عامل اثرگذار بر مشخصه کیفیت (کمترین ضخامت دیواره) ناهمسانگردی قائم فلز خواهد بود [۱۵ و ۱۶]. در فرایند کشش عمیق داشتن حداکثر جریان ماده در سطح ورق به همراه بیشترین مقاومت برای جریان ماده در جهت ضخامت ورق موردنظر می‌باشد. لذا هر اندازه مقدار ناهمسانگردی ماده $(r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t})$ که معرف نسبت

جدول (۴): آنالیز واریانس نتایج حاصله از کشش عمیق برای هندسه (a).

factors	average η by factor level			Dof	S	MS	VR	S prime	P
	1	2	3						
die radius	-۱/۵۷۳	-۰/۹۵۹	-۰/۸۱	۲	۱/۹۷۸	۰/۹۸۹	۱/۹۷	۰/۹۷۲	۷/۷۶۴
punch radius	-۰/۹۸	-۱/۳۶	-۰/۹۹	۲	۰/۵۶۴	۰/۲۸۲	۰/۵۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
n	-۱/۴۵	-۱/۰۴	-۰/۸۵	۲	۱/۱۴۸	۰/۵۷۴	۱/۱۴	۰/۱۴۲	۱/۱۳۵
r	-۱/۶۷	-۱/۰۶	-۰/۶۱	۲	۳/۳۸۶	۱/۶۹۳	۳/۳۷	۲/۳۸۰	۱۹/۰۱۲
BHF	-۰/۹۵	-۱/۰۳	-۱/۳۶	۲	۰/۵۵۸	۰/۲۷۹	۰/۵۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
μ	-۰/۸۳	-۰/۸۸	-۱/۶۳	۲	۲/۳۷۰	۱/۱۸۵	۲/۳۶	۱/۳۶۴	۱۰/۸۹۹
residual				۵	۲/۵۱۴	۰/۵۰۳			
Total				۱۷	۱۲/۵۱۸				

جدول (۵): آنالیز واریانس نتایج حاصله از کشش عمیق برای هندسه (b).

factors	average η by factor level			Dof	S	MS	VR	S prime	P
	1	2	3						
die radius	-۱/۰۷۲	-۱/۲۳۴	-۱/۱۸	۲	۰/۰۸۲	۰/۰۴۱	۰/۴۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
punch radius	-۱/۲۰	-۱/۲۰	-۱/۰۸	۲	۰/۰۵۵	۰/۰۲۸	۰/۲۹	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
n	-۰/۹۷	-۱/۲۷	-۱/۲۵	۲	۰/۳۲۷	۰/۱۶۳	۱/۷۱	۰/۱۳۵	۴/۱۳۲
r	-۱/۶۱	-۱/۰۰	-۰/۸۸	۲	۱/۸۱۸	۰/۹۰۹	۹/۵۱	۱/۶۲۷	۴۶/۶۱۴
BHF	-۱/۱۹	-۱/۲۴	-۱/۰۶	۲	۰/۰۹۶	۰/۰۴۸	۰/۵۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
μ	-۰/۹۵	-۱/۲۵	-۱/۲۹	۲	۰/۴۲۴	۰/۲۱۲	۲/۲۲	۰/۲۳۳	۷/۰۹۱
residual				۵	۰/۴۷۸	۰/۰۹۶			
Total				۱۷	۳/۲۷۹				

جدول (۶): آنالیز واریانس نتایج حاصله از کشش عمیق برای هندسه (c).

factors	average η by factor level			Dof	S	MS	VR	S prime	P
	1	2	3						
die radius	-۱/۹۸۲	-۱/۱۰۷	-۰/۷۵	۲	۴/۸۳۴	۲/۴۱۷	۳/۰۶	۳/۲۵۶	۱۶/۵۶۱
punch radius	-۱/۲۷	-۱/۵۶	-۱/۰۱	۲	۰/۸۹۹	۰/۴۵۰	۰/۵۷	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
n	-۱/۷۴	-۱/۰۴	-۱/۰۵	۲	۱/۹۴۲	۰/۹۷۱	۱/۲۳	۰/۳۶۴	۱/۸۵۱
r	-۱/۸۴	-۱/۱۹	-۰/۸۱	۲	۳/۲۴۹	۱/۶۲۴	۲/۰۶	۱/۶۷۱	۸/۴۹۸
BHF	-۰/۹۷	-۱/۳۲	-۱/۵۴	۲	۰/۹۷۵	۰/۴۸۸	۰/۶۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
μ	-۰/۸۰	-۱/۱۳	-۱/۹۰	۲	۳/۸۱۴	۱/۹۰۷	۲/۴۲	۲/۲۳۵	۱۱/۳۷۰
residual				۵	۳/۹۴۶	۰/۷۸۹			
Total				۱۷	۱۹/۶۶۰				

جدول (۷): آنالیز واریانس نتایج حاصله از کشش عمیق برای هندسه (d).

factors	average η by factor level			Dof	S	MS	VR	S prime	P
	1	2	3						
die radius	-۲/۰۱۳	-۱/۵۷۴	-۱/۴۴	۲	۱/۰۷۱	۰/۵۳۶	۱/۸۳	۰/۴۸۷	۳/۵۸۰
punch radius	-۱/۴۱	-۱/۷۷	-۱/۸۶	۲	۰/۶۷۲	۰/۳۳۶	۱/۱۵	۰/۰۸۸	۰/۶۴۵
n	-۱/۷۵	-۱/۴۲	-۱/۸۷	۲	۰/۶۵۸	۰/۳۲۹	۱/۱۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
r	-۲/۴۵	-۱/۴۱	-۱/۱۷	۲	۵/۵۹۹	۲/۸۰۰	۹/۵۹	۵/۰۱۵	۳۶/۸۷۵
BHF	-۱/۵۱	-۱/۴۴	-۲/۰۸	۲	۱/۴۵۳	۰/۷۲۷	۲/۴۹	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
μ	-۱/۲۴	-۱/۶۰	-۲/۱۸	۲	۲/۶۸۷	۱/۳۴۴	۴/۶۰	۲/۱۰۳	۱۵/۴۶۳
residual				۵	۱/۴۶۰	۰/۲۹۲			
Total				۱۷	۱۳/۶۰۱				

جدول (۸): آنالیز واریانس نتایج حاصله از کشش عمیق برای هندسه (e).

factors	average η by factor level			Dof	S	MS	VR	S prime	P
	1	2	3						
die radius	-۲/۰۸۸	-۱/۵۹۴	-۱/۲۶	۲	۲/۰۷۳	۱/۰۳۷	۲/۰۹	۱/۰۷۹	۷/۴۳۹
punch radius	-۱/۴۵	-۲/۰۱	-۱/۴۹	۲	۱/۱۶۲	۰/۵۸۱	۱/۱۷	۰/۱۶۸	۱/۱۵۷
n	-۱/۶۲	-۱/۸۷	-۱/۴۴	۲	۰/۵۵۹	۰/۲۸۰	۰/۵۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
r	-۲/۱۲	-۱/۹۷	-۰/۸۶	۲	۵/۷۱۷	۲/۸۵۹	۵/۷۵	۴/۷۲۳	۳۲/۵۴۹
BHF	-۱/۴۵	-۱/۹۱	-۱/۵۸	۲	۰/۶۷۲	۰/۳۳۶	۰/۶۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
μ	-۱/۲۶	-۱/۶۴	-۲/۰۵	۲	۱/۸۴۲	۰/۹۲۱	۱/۸۵	۰/۸۴۸	۵/۸۴۳
residual				۵	۲/۴۸۵	۰/۴۹۷			
Total				۱۷	۱۴/۵۱۱				

جدول (۹): ترتیب اثرگذاری عوامل کنترلی بر مشخصه کیفیت.

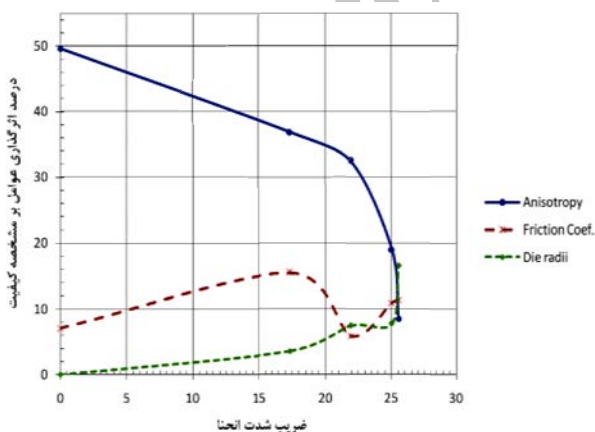
ترتیب اثرگذاری عوامل	هندسه سنیه				
	دایره	مربع	بیضی	سه چهارم دایره	یک چهارم بیضی
۱	r	r	R_D	r	r
۲	μ	μ	μ	μ	R_D
۳	R_D	n	r	R_D	μ
۴	n	-	n	R_P	R_P

کمترین ضخامت نهایی دیواره را تایید نمود. نتایج پژوهشهای پیشین موید این نتیجه می‌باشد [۵].

تحلیل جریان فلزی عملیات کشش عمیق با سنبه‌های متفاوت موید اثرپذیری بالای مشخصه کیفیت از دیواره‌های منحنی، دیواره‌های صاف و گوشه‌ها می‌باشد. حداکثر کرنش پلاستیک در عملیات در تمامی هندسه‌ها در لبه ماتریس و در محل شعاع کوچکتر و یا گوشه‌ها رخ می‌دهد. کمترین ضخامت دیواره نیز در دیواره‌های نزدیک به کف فنجان و در همین محل رخ می‌دهد. از مقایسه تطبیقی نتایج اثرگذاری عامل \bar{r} بر مشخصه کیفیت مشخص گردید اثرگذاری این عامل در هندسه‌های متفاوت تحت تأثیر وجود دیواره‌های صاف، منحنی و شعاع انحنا می‌باشد و با ضریبی به نام شدت انحنا مرتبط است. ضریب شدت انحنا با عبارت «درصد محیط انحنا \times شعاع انحنا» و با نشانه‌گذاری ذیل تعریف می‌گردد.

$$SR = \frac{S_c}{S} \times \rho_{\alpha\epsilon} \quad (6)$$

ضریب شدت انحنا در هندسه مربع از مقدار صفر آغاز می‌شود و به ترتیب در هندسه‌های $\frac{3}{4}$ دایره، $\frac{1}{4}$ بیضی، دایره و بیضی به صورت صعودی افزایش می‌یابد (شکل ۱۱). همان‌طور که در نمودار مشخص است، شدت اثرگذاری عامل \bar{r} بر مشخصه کیفیت در عملیات کشش عمیق با افزایش شدت انحنا در هندسه سنبه کاهش می‌یابد.



شکل (۱۱): درصد اثرگذاری عوامل بر مشخصه کیفیت بر اساس ضریب شدت انحنا.

از مقایسه تطبیقی نتایج اثرگذاری عامل RD بر مشخصه کیفیت مشخص گردید اثرگذاری این عامل در هندسه‌های

با افزایش شعاع لبه ماتریس مقدار نیروی سنبه برای کشیدن ورق به درون ماتریس و نیروی لازم برای خمش و صاف‌شدگی کاهش می‌یابد و بنابراین ورق تحت تنش کمتری قرار می‌گیرد. تنش کمتر در ورق به معنای افزایش ضخامت نهایی دیواره محصول و کاهش ریسک پارگیست. در اینجا شعاع لبه ماتریس به‌عنوان عامل اثرگذار، در سطح سوم (بیشترین مقدار) سبب افزایش ضخامت نهایی دیواره می‌شود. در این مورد نیز نتایج حاصله از پژوهش‌های پیشین، موید این نتیجه است [۵، ۷، ۱۲، ۱۵].

اگر هندسه اشکال در فرایند کشش عمیق به اتساع نزدیک شود، مقدار بالای ضریب کرنش سختی سبب افزایش ضخامت نهایی محصول خواهد شد. با افزایش شعاع سنبه در کشش فنجانی، عملیات تا حدودی به عملیات اتساع نزدیک می‌شود و بنابراین اثرگذاری ضریب کرنش سختی در سطح سوم (مقدار بیشتر) افزایش می‌یابد [۱۳]. در این مورد نیز نتایج حاصله از پژوهش‌های پیشین، موید این نتیجه می‌باشد [۶ و ۱۶].

وظیفه اصلی ورق‌گیر کنترل جریان فلزی و جلوگیری از چین‌خوردگی است. اگر نیروی ورق‌گیر خیلی زیاد باشد، در مرحله اصطکاک از جریان ماده در ناحیه فلانچ جلوگیری می‌کند و باعث ایجاد پارگی در قطعه می‌شود. اما زمانی که این نیرو در بازه‌ای مناسب طراحی شده باشد (بیشتر از نیروی کماتش پلاستیک برای جلوگیری از چروکیدگی و کمتر از نیروی عملیات اتساع) و علاوه بر این ضریب اصطکاک که تعیین‌کننده نیروی اصطکاک نهایی است نیز قابل تنظیم باشد، نیروی ورق‌گیر نقش اصلی خود در تعیین اصطکاک روی فلنچ را از دست خواهد داد و ضریب اصطکاک در این حالت عامل اثرگذار مسلط خواهد شد [۱۵]. نتایج حاصله از پژوهش‌ها موید این نتیجه می‌باشد [۷].

خم ایجاد شده کف قطعه، یکبار توسط شعاع لبه سنبه و ماتریس ایجاد می‌شود. تا انتهای عملیات خم اطراف سنبه نسبت به دیواره پوسته و سنبه ثابت باقی می‌ماند، این واقعیت گویای آن است که شعاع لبه سنبه در شکل‌دهی به نیروی خمش، صاف‌شدگی و کشش کمترین نقش را دارد. و بنابراین کمترین تنش را در دیواره محصول ایجاد نمود [۱۲]. با این توصیفات می‌توان عدم اثرگذاری معنادار شعاع لبه سنبه بر

سطوح تعریف شده برای هر یک از متغیرهای کنترلی می‌باشد حداکثر مقدار تابع هدف η را به دست می‌دهد. مقدار حداکثر تابع هدف برای هر هندسه مطابق با فرمول ۴ و شرایط بهینه پیش‌بینی شده و با استفاده از نرم‌افزار، آزمایش تأییدکننده انجام گرفته است. برای تأیید همخوانی نتایج آزمایش‌های بهینه انجام شده در نرم‌افزار با نتایج پیش‌بینی شده از تابع هدف، بازه اطمینان پاسخ بهینه از روابط تاگوچی قابل استخراج است. در جدول ۱۱ نتایج آزمایش‌های تأییدی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط تابع هدف برای کمترین ضخامت دیواره در پنج هندسه مشخص شده در عملیات کشش عمیق، طبق بازه‌های اطمینان موجود در جدول ۱۰ کاملاً هم‌خوانی دارند. بازه تعیین شده برای مقادیر بهینه مشخصه کیفیت به این معناست که با احتمال ۹۰ درصد نتایج حاصله از آزمایش‌های تأییدی باید در این بازه قرار گیرند.

متفاوت تحت تأثیر وجود دیواره‌های صاف، منحنی و شعاع انحنا می‌باشد و با ضریب شدت انحنا مرتبط است. شدت اثرگذاری عامل RD بر مشخصه کیفیت در عملیات کشش عمیق با افزایش شدت انحنا در هندسه سنبه، افزایش می‌یابد. همچنین از مقایسه تطبیقی نتایج اثرگذاری عامل μ بر مشخصه کیفیت مشخص گردید اثرگذاری این عامل در هندسه‌های متفاوت تحت تأثیر وجود گوشه‌ها، دیواره‌های منحنی و شعاع انحنا می‌باشد و با ضریب شدت انحنا مرتبط است. برای تحلیل دقیق‌تر چگونگی این رابطه نیاز به تحلیل اثرگذاری گوشه‌ها به صورت مجزا در هر هندسه می‌باشد. همچنین اثرگذاری شش عامل \bar{r} ، μ ، RD، n، BHF، RP بر مشخصه کیفیت تحت تأثیر تقارن هندسی شکل سنبه‌ها در عملیات کشش عمیق نمی‌باشد. مقدار بهینه متغیرهای کنترلی در ۵ هندسه تشریح شده در جدول ۹ مشاهده می‌شود. این مقادیر بهینه که متناظر با

جدول (۱۰): بازه اطمینان برای مقادیر پیش‌بینی شده توسط تابع هدف در هر هندسه.

هندسه سنبه	دایره	مربع	بیضی	$\frac{3}{4}$ دایره	$\frac{1}{4}$ بیضی
کمترین ضخامت دیواره (پیش‌بینی شده)	۰/۹۵۱	۰/۹۳۲	۰/۹۶۶	۰/۹۱۵	۰/۹۵۳
n_e	۴/۱۴۲	۳/۱۶۹	۳/۷۶۰	۳/۴۵۲	۳/۳۷۶
بازه اطمینان (بر اساس سنج کارایی)	$\pm 0/702$	$\pm 0/350$	$\pm 0/923$	$\pm 0/586$	$\pm 0/773$
حداقل «کمترین ضخامت دیواره» (میلی‌متر)	۰/۱۷۷	۰/۱۹۵	۰/۱۶۹	۰/۱۸۵۶	۰/۱۷۱
حداکثر «کمترین ضخامت دیواره» (میلی‌متر)	۱/۰۳۱	۰/۹۷۰	۱/۰۷۴	۰/۹۷۹	۱/۰۴۱

این مطابقت به معنای آن خواهد بود که نتایج حاصله از طراحی شده برای عامل‌های کنترلی و سطوح جهت انجام تحلیل‌های انجام شده در بخش پیشین صحت دارند و مدل تفاسیر بیشتر مناسب می‌باشند.

جدول (۱۱): مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده تابع هدف برای شرایط بهینه.

	optimum setting						Optimum (predicted)		Optimum (observed)	
	R_{matrix}	R_{punch}	n	r	BHF	μ	η	Min. thickness	η	Min. thickness
Fig(a)	۳	۳	۳	۳	۱	۱	-۰/۴۳۶	۰/۹۵۱	-۰/۳۷۳	۰/۹۵۸
Fig(b)	۳	۳	۱	۳	۳	۱	-۰/۶۱۲	۰/۹۳۲	-۰/۶۲۱	۰/۹۳۱
Fig(c)	۳	۳	۲	۳	۱	۱	-۰/۳۰۰	۰/۹۶۶	-۰/۳۸۲	۰/۹۵۷
Fig(d)	۳	۱	۲	۳	۲	۱	-۰/۷۷۲	۰/۹۱۵	-۰/۸۱۰	۰/۹۱۱
Fig(e)	۳	۱	۳	۳	۱	۱	-۰/۴۲۷	۰/۹۵۲	-۰/۹۶۹	۰/۹۲۳

2. Sirkirk, JF. "Process Variable Effects on Sheet Metal Quality". J. Appl Metalwork Am Soc Met, Vol. 31, pp. 262-269, 1986.
3. Gronostajski, J., Matuszak, A., Niechajowicz, A. and Zimniak, Z. "The System for Sheet Metal Forming Design of Complex Parts", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 142, pp. 157-158, 2004.
4. Colgan, M., Monaghan, J. "Deep Drawing Process: Analysis and Experiment". J. Materials Processing Technology, Vol. 132, pp. 35-41, 2003.
5. Browne, M.T. and Hillery, M.T. "Optimizing the Variables When Deep-Drawing C.R.1 Cups". J. Materials Processing Technology, Vol. 136, pp. 64-71, 2003.
6. Jaisingh, A., Narasimhan, K. and Date, P. "Sensitivity Analysis of a Deep Drawing Process for Miniaturized Products". J Materials Processing Technology, Vol. 147, pp. 321-327, 2004.
7. Padmanabhan, R., Oliveira, M. and Alves, J. "Influence of Process Parameters on the Deep Drawing of Stainless Steel". J. Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 43, pp. 1062-1067, 2007.
8. Zhang, W. and Shivpuri, R. "Probabilistic Design of Aluminum Sheet Drawing for Reduced Risk of Wrinkling and Fracture". Reliability Engineering and System Safety, Vol. 94, pp. 152-161, 2009.
9. Roy Ranjit, A. "Primer On the Taguchi Method", Society of Manufacturing Engineers, Dearborn (Michigan), pp.57-63, 1990.
10. Logothetis, N. and Wynn, H.P. "Quality Through Design: Experimental Design, Off-line Quality Control and Taguchi's Contributions." Oxford University Press, New York, pp.97-115, 1994.
11. Taguchi, G., "Jikken Keikakuho", Vols. 1 and 2, 3rd ed., Maruzen, Tokyo, Japan, 1977-1978 (in Japanese) English Translation: G.Taguchi, System of Experimental Design, Don Clausing, New York; UNIPUB/Kraus International Publication, Vols. 1 and 2, pp. 77-92, 1978.
12. Semiatin, S.L. "Metal Handbook", ASM International Handbook Committee, Ninth Edition, Vol. 14, pp.35-40, 1988.
13. Lange, K. "Handbook of Metal Forming", Mc-Graw Hill, pp.119-130, 1985.
14. Charls, W. "Tools and Manufacturing Engineer's Handbook", Fourth Edition, Vol. 11, pp.41-51, 1989.
15. William Johnson, Peter Bassindale Mellor, "Plasticity for Mechanical Engineers", the University of Michigan, pp. 72-93, 2007, (in Persian).
16. Eary, D. "Techniques of Press Working Sheet Metal", Vol. 1 and 2. Prentice-Hall, pp. 59-73, 1965, (In persian).
17. Park, K. and Kim, Y. "The Effect of Material and Process Variables on the Stamping Formability of Sheet Materials". Journal of Materials Processing Technology, Vol. 51, pp. 64-78, 1995.

۷- نتیجه گیری

شکل هندسی ابزار شکل دهی یعنی سنبه و ماتریس (دیواره‌ها، گوشه‌ها و راکورد) اثرگذاری بسیار محسوس بر کیفیت نهایی محصول دارند. زمانی که این پارامتر در کنار سایر پارامترهای مؤثر بر عملیات کشش عمیق با استفاده از روش های حساسیت سنجی بررسی شود، نتایج مهمی جهت چگونگی طراحی عملیات حاصل می‌شود. برخی از نتایج حاصله به شرح ذیل است:

۱- مشخص شد اثرگذاری عوامل بررسی شده در این پژوهش، به واسطه یک ضریب عددی به نام ضریب شدت انحنای با مشخصه کیفیت ارتباط دارند. این ضریب الگوی مناسبی جهت کمی سازی شکل هندسی ابزار شکل دهی می‌باشد و متناسب است با درصد محیط انحنای و شعاع انحنای.

۲- با مشخص شدن رابطه اثرگذاری \bar{r} بر مشخصه کیفیت با شکل هندسی سنبه، باید توجه داشت در تولید محصولات با شکل هندسی متفاوت، استفاده از ورق‌هایی با ویژگی‌های فلزی یکسان سبب ایجاد تغییرات در مشخصه کیفیت محصول خواهد شد. لذا در یک طراحی مقاوم جهت کاهش تغییرات مشخصه کیفیت محصولات، برای سنبه‌هایی با شدت انحنای کمتر استفاده از ورق‌های فلزی با متوسط نسبت کرنش پلاستیک بیشتر توصیه می‌شود.

۳- با مشخص شدن رابطه اثرگذاری RD بر مشخصه کیفیت با شکل هندسی سنبه، توصیه می‌شود در تولید محصولات با شکل هندسی متفاوت و شدت انحنای بالاتر، از شعاع راکورد ماتریس بزرگتری استفاده شود و

۴- با مشخص شدن رابطه اثرگذاری μ بر مشخصه کیفیت با شکل هندسی سنبه، پیشنهاد می‌شود در تولید محصولات با شکل هندسی متفاوت با توجه به شدت انحنای و شعاع انحنای گوشه‌ها روانکارهای متفاوتی مورد استفاده قرار گیرد.

۸- مراجع

1. Logue, B. and Dingle, M. "Side-Wall Thickness in Draw Die Forming". J Mater Process Technology, Vol. 4, pp. 182-191, 2007.