

**بررسی تجربی و عددی چین خوردگی فلنجی ورق‌ها در کشش عمیق دوفلزی\***رحمن سیفی<sup>(۱)</sup>زهرا عباسی<sup>(۲)</sup>

**چکیده** در این مقاله، ایجاد چین خوردگی در فرآیند کشش عمیق دوفلزی با روش تحلیلی و استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود شبیه‌سازی شده و نتایج آن با نمونه‌های تجربی مقایسه شده است. تأثیر پارامترهای پهنای فلنج، شعاع لبه‌ی ماتریس، شعاع لبه‌ی سنبه، اندازه لقی ورقگیر، شرایط تماس و ضخامت نسبی ورق‌ها بر تعداد و ارتفاع چین خوردگی‌ها و تغییرات نیروی سنبه در طول کورس مورد بررسی قرار گرفته است. دو پارامتر میزان لقی ورقگیر و شرایط تماس ورق‌ها بیش‌ترین تأثیر را بر تعداد چین خوردگی‌ها دارند و تنها پارامتر تأثیرگذار بر ارتفاع چین‌ها، اندازه‌ی لقی ورقگیر است. با افزایش اندازه‌ی شعاع لبه‌ی سنبه و ضخامت نسبی فلز سخت‌تر، نیروی شکل‌دهی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. تغییرات میزان لقی ورقگیر و شعاع لبه‌ی ماتریس تأثیر کمی در تغییر نیروی سنبه دارند.

**واژه‌های کلیدی** کشش عمیق دوفلزی، اصطکاک، چین خوردگی، روش اجزای محدود.

### Experimental and Numerical Analysis of Flange Wrinkling of Bimetal Sheets in Deep Drawing Process

R. Seifi

Z. Abbasi

**Abstract** In this paper, formation of wrinkling in bimetal deep drawing process has been investigated by the analytical, numerical and experimental methods. The effects of width of flange, fillet radii of matrix and punch, clearance of blank holder, contact conditions and relative thickness of two sheets on the number and height of wrinkle waves are studied. Clearance and contact conditions have the greatest impact on the number of waves while only clearance has significant effects on the height of waves. Increasing of the mandrel edge radius and relative thickness of tougher metal increase significantly the forming force. Variation of holder's clearance and matrix edge radius have a little effects on the punching force.

**Key Words** bimetal deep drawing; friction; wrinkling; finite element method.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۳/۱۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۸/۷ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول: دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

(۲) کارشناس، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

## مقدمه

شکل دهی فلز به فرآیند ساختی اطلاق می شود که در آن شکل معلوم و مشخص یک قطعه فلز جامد بدون آن که تغییری در جرم و یا ترکیب مادی آن رخ دهد، به طور دائم تغییر کند. کشش عمیق، فرآیند شکل دهی عمیق است که برای تبدیل ورق های صاف به محصولات حجیم استوانه ای، جعبه ای و اشکال دیگر به کار می رود.

در انواع فرآیندهای شکل دهی ورق، عیوبی همچون گود شدن و چین خوردگی به علت وجود تنش های فشاری و یا پدیده ی گلوبی شدن ورق به علت تنش های کششی دیده می شوند.

به ورق هایی متشکل از اتصال دو یا چند لایه از جنس متفاوت که به هر شکل یا روشی به هم چسبیده باشند، ورق چند لایه می گویند. با پیشرفت علم در زمینه های مختلف مهندسی، کاربرد ورق های چند لایه نیز افزایش یافته است. استفاده از ورق های دولایه با لایه ی پلیمری (چسب) برای کاهش انتقال ارتعاش و صدا در صنایع اتومبیل سازی، کشتی سازی و هوافضا توسعه ی زیادی داشته است. در مخازن تحت فشار با سیال خورنده می توان از این نوع ورق ها استفاده نمود. در مورد فرآیند کشش عمیق دوفلزی مطالعاتی انجام شده است که هر یک به نحوی ارائه دهنده ی مطالبی تازه بوده اند. در ادامه تعدادی از این پژوهش ها که مرتبط با تحقیق پیش رو بودند، مورد بررسی قرار گرفته است.

روش تولید ورق چند لایه به سال ۱۸۲۹ برمی گردد. والسون [1]، قطعات پلاتین اسفنجی را با فشردن در حالت سرد و چکش کاری به یکدیگر اتصال داد.

مواد مرکب به علت ساخته شدن از چندین ماده ی مختلف، دارای ترکیبی از خواص این مواد هستند، به طوری که با تغییر مقدار هر یک از اجزای تشکیل دهنده و تغییر در چگونگی ترکیب این قسمت ها،

می توان خواص مورد نظر را برای ماده ی مرکب حاصل ایجاد نمود که هر یک از اجزا به تنهایی فاقد آن خاصیت می باشند. این ویژگی منحصر به فرد مواد مرکب است که امروزه موجب کاربرد بیش از پیش این مواد در صنایع مختلف گردیده است. با گسترش و کاربرد شدن این مواد، بررسی روش های ساخت و شکل دهی این نوع محصولات نیز بسیار لازم و ضروری به نظر می رسد. با استفاده از فرآیندهای مختلف شکل دهی، تولید انواع مواد مرکب ساخته شده از فلزات مختلف امکان پذیر می گردد [1,2].

یاماموتو و همکاران [3] به بررسی شکل پذیری ورق های مرکب آلومینیومی تقویت شده توسط ذرات کاربید سیلیسیم پرداختند. چراوت و بیلوت [4] ساخت ورق های مرکب با روش ترکیبی کشش عمیق و لایه گذاری را بررسی کردند. لیم و همکاران [5] نیز به بررسی بهینه سازی این نوع ورق ها پرداختند.

گو-یی و مینگ-نان [6] تحقیقی در مورد فرآیند نورد ورق های چند فلزی ارائه کردند. در این پژوهش مدلی تحلیلی با در نظر گیری اصطکاک ترکیبی در بررسی فرآیند نورد سرد ورق های دولایه ای کاملاً مقید نشده بررسی شده است. صیدی و حبیبی [7] به بررسی آزمایشگاهی اثر ضخامت و قطر گرده، نیروی ورق گیر و جنس ورق های مرکب بر کیفیت و فرم نهایی محصول پرداختند. در همین راستا فرشته صنیعی و عطریانی [8] اثر ضریب اصطکاک بین دو فلز و نیز ابزار و فلز و نیروی ورق گیر بر نیروی شکل دهی و کرنش ضخامتی را با کمک شبیه سازی به روش اجزای محدود و آزمایش نمونه های تجربی تعیین نمودند. کدخدایان و رجبی [9] کشش عمیق ورق های چند لایه ی فلزی با هسته ی پلیمری (چسب) را به روش شبیه سازی رایانه ای و تجربی بررسی نمودند.

در سال ۱۹۵۲ چین خوردگی فلنجی در کشش عمیق فنجان به صورت تحلیلی بررسی گردید. احتمال

کرنش با حذف مؤلفه‌های غیرخطی با نتیجه‌ی تئوری تغییرشکل‌های کوچک یکسان است [14].

نتایج تحقیق چنگ و همکاران [15] نشان داد که چین‌خوردگی در ورق مرکب با هسته‌ی پلیمری (چسب) و پوسته‌ی فلزی مشابه رفتار فقط یکی از آن‌ها می‌باشد در حالی که توزیع کرنش مشابه حالت ورق کامل بدون لایه‌ی پلیمری است. در تحقیقی دیگر رفتار ورق مرکب با دو لایه‌ی غیرهمجنس (آلومنیوم- فولاد) به روش تحلیلی، شبیه‌سازی رایانه‌ای و تجربی بررسی شده است [16]. هدف از این مطالعه تعیین حداقل مقدار نیروی ورقگیر برای جلوگیری از چین‌خوردگی است. نشان داده شد که چیدمان ورق‌ها در چین‌خوردگی تأثیر دارد. حداقل نیروی لازم در ورقگیر برای جلوگیری از ایجاد چین بر حسب تغییر پارامترهای مختلف شکل‌دهی تعیین شده است. در پژوهشی دیگر، مروتی و همکاران [17] اثرات تغییر نیروی ورقگیر بر وقوع چین‌خوردگی یا شکست (پارگی) را در کشش عمیق دوفلزی با کمک روش المان محدود و انجام آزمایش بررسی کردند. لی و همکاران [18] به بررسی عددی و تجربی پدیده‌ی تورق (لایه‌لایه‌شدگی) در کشش عمیق دوفلزی پرداختند. آن‌ها از رفتار ویسکوالاستیک برای خواص مکانیکی چسب و المان‌های چسبان برای مدل‌سازی آن استفاده کردند. بر اساس نتایج این تحقیق، چین‌خوردگی باعث تورق ورق دوفلزی می‌شود.

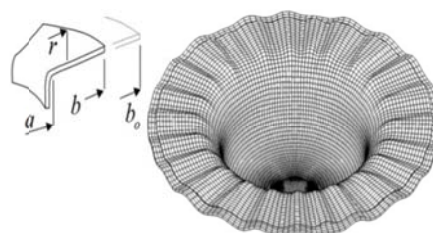
در مقاله‌ی حاضر به بررسی چین‌خوردگی در کشش عمیق دوفلزی پرداخته شده است. علاوه بر حالت بررسی شده در مرجع [16] (حالت کاملاً چسبان دو ورق) شرایط دیگر حاکم بر تماس دو ورق نیز مطالعه شده است. اثر عوامل مختلف مانند تغییرات لقی ورقگیر، شعاع لبه‌ی ماتریس و سنبه، نحوه‌ی اتصال دوفلز و ضخامت نسبی آن‌ها بر تعداد و ارتفاع چین‌ها و نیز نیروی شکل بررسی شده است.

ایجاد چین، تعداد و دامنه‌ی آن‌ها بر اساس رفتار مواد فلزی و هندسه فلنج تعیین گردید [10]. نیروی لازم برای چین‌خوردگی بر اساس روش انرژی به‌دست آمد و با نتایج تجربی مقایسه گردید. محدودده‌ی مقدار نیروی لازم و تعداد چین‌ها بر اساس رفتار ماده و مشخصات فلنج مشخص شد. بر پایه‌ی این تحقیق، چو و ژو [11] با در نظر گرفتن رفتار الاستوپلاستیک مواد رابطه‌ی دقیق‌تری برای تنش محیطی در لحظه‌ی شروع چین‌خوردگی و تعداد آن‌ها به‌دست آوردند. آن‌ها نشان دادند که مقدار تنش برشی در شروع چین‌خوردگی تأثیر زیادی بر تنش محیطی بحرانی دارد.

در پژوهشی دیگر چین‌خوردگی فلنجی با راه حل تئوری ناپایداری دو شاخه‌ای شدن (انعشابی) از معادلات حاکم بر مسأله‌ی کشش عمیق در موقعیت فلنج مسطح به‌دست آمده است [12]. از معیار انشعاب هیل برای پیش‌بینی شروع چین‌خوردگی استفاده می‌شود. حداکثر ارتفاع فنجان که می‌تواند بدون شروع چین در فلنج کشیده شود بر اساس پارامترهای فرآیند با روش المان محدود بر اساس روش لاگرانژ به‌روز شده (لحظه‌ای) پیش‌بینی شده است. شکل‌گیری چین در فلنج ورق با روش تحلیلی و با استفاده از معیار انشعاب هیل توسط هوچینسن و نیل [13] در صفحات و پوسته‌های نازک و کم‌عمق به‌کار رفته است. بر اساس مدل دو بعدی تنش صفحه‌ای برای چین‌خوردگی صفحه‌ی حلقوی الاستوپلاستیک و معیار انشعاب هیل، شرایط بحرانی برای شروع چین‌خوردگی در فلنج دایروی در کشش عمیق به‌دست آمده است. این روش برای بهبود بخشیدن به نتایج قبلی در پیش‌بینی هندسه‌ی چین و تعداد موج تولیدشده، توسعه داده شده است. بر اساس معیار تسلیم ترسکا و فرض رفتار کاملاً پلاستیک در میدان تنش پلاستیک و تئوری تغییر شکل‌های بزرگ نشان داده شده است که نتایج استفاده از تئوری تغییر شکل‌های بزرگ برای تانسور

### تحلیل تقریبی کشش عمیق دوفلزی

در صورت ایجاد چین خوردگی در کشش عمیق دوفلزی، تغییر شکلی را می توان به صورت موج های سینوسی در جهت محیطی در نظر گرفت.



شکل ۱ چین خوردگی سینوسی در کشش عمیق دوفلزی

همان گونه که به صورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است، تغییر مکان عمودی را می توان به صورت رابطه ی (۱) تقریب زد:

$$w(r, \theta) = C(r-a)(1 + \cos n\theta) \quad (1)$$

که در آن  $w$  تغییر مکان در جهت عمود بر سطح افقی ماتریس (قالب)،  $a$  مجموع شعاع ماتریس و پروفیل آن،  $r$  فاصله از مرکز ماتریس،  $n$  تعداد موج های چین و  $C$  ثابت است.

با فرض ایجاد کمانش موضعی در لحظه ی شروع چین خوردگی می توان روابطی برای محاسبه ی تعداد چین ها، توزیع تنش ها و محاسبه ی حداقل نیروی ورقگیر به دست آورد. در حالتی که ورقگیر موجود نیست، کمانش زمانی اتفاق می افتد که کار انجام شده توسط نیروهای غشایی در فلنج با انرژی کرنشی خمشی آن برابر گردد. با استفاده از معیار تسلیم ترسکا، امکان ایجاد چین خوردگی پلاستیک در حالت بدون ورقگیر از رابطه ی زیر تعیین می گردد [۱۶]:

$$\psi = \frac{4D_{11}}{b^2(t_1 Y_1 + t_2 Y_2)} - \frac{G(\rho, n)}{H(\rho, n)} \quad (2)$$

به ازای  $\psi$  مثبت، چین خوردگی اتفاق نمی افتد. توابع  $G(\rho, n)$  و  $H(\rho, n)$  عبارتند از:

$$G(\rho, n) = \quad (3)$$

$$H(\rho, n) = n^2(1-\rho^2)(n^2/2 + 2D_{66}/D_{11}) \quad (4)$$

$$-2n^2(n^2-1)(1-\rho) - (2+(n^2-1)^2)\ln\rho$$

مقادیر مؤلفه های سختی  $D_{66}$  و  $D_{11}$  با فرض آن که فلز شماره یک بالای فلز شماره دو باشد عبارتند از:

$$D_{11} = \frac{1}{24} \left[ \frac{E_1((\Sigma t)^3 + (\Delta t)^3)}{1-\nu_1^2} + \frac{E_2((\Sigma t)^3 - (\Delta t)^3)}{1-\nu_2^2} \right] \quad (5)$$

$$D_{66} = \frac{1}{48} \left[ \frac{E_1((\Sigma t)^3 + (\Delta t)^3)}{1+\nu_1} + \frac{E_2((\Sigma t)^3 - (\Delta t)^3)}{1+\nu_2} \right] \quad (6)$$

که در این روابط  $\Sigma t = t_1 + t_2$ ،  $\Delta t = t_1 - t_2$ ،  $E = 4E_e E_p / (\sqrt{E_e} + \sqrt{E_p})^2$  مدول الاستیک معادل،  $E_e$  مدول الاستیک،  $E_p = d\sigma/d\varepsilon$  شیب ناحیه ی پلاستیک منحنی تنش-کرنش،  $\nu$  ضریب پواسون،  $Y$  تنش تسلیم ماده و  $\rho = a/b$  است. توزیع تنش نیز از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$\sigma_{r1} = Y_1 \ln(b/r) + (b-r)\tau_1/t_1, \quad \sigma_{\theta 1} = Y_1(\ln(b/r)-1) + (b-r)\tau_1/t_1 \quad (7)$$

$$\sigma_{r2} = Y_2 \ln(b/r) - (b-r)\tau_2/t_2, \quad \sigma_{\theta 2} = Y_2(\ln(b/r)-1) - (b-r)\tau_2/t_2 \quad (8)$$

اگر ورقگیر وجود داشته باشد و نیروی یکنواختی بر کل سطح فلنجی ورق با مقدار ثابت  $F$  وارد کند و از طرف دیگر  $\mu$  ضریب اصطکاک ورق با ورقگیر و

ماتریس باشد، حداقل مقدار نیروی ورقگیر برای ممانعت از چین خوردگی عبارتست از [16]:

$$L_w = b \int_0^{2\pi} \sqrt{1 + \lambda \sin^2 \varphi} d\varphi \quad (14)$$

$$= (4b\sqrt{\lambda+1}) E(\sqrt{\lambda/\lambda+1})$$

که در آن  $E(\kappa) = \int_0^1 \frac{\sqrt{1-\kappa^2 t^2}}{\sqrt{1-t^2}} dt$  انتگرال بیضوی کامل نوع دوم است. البته می‌توان طول چین را با تقریب مناسب از رابطه‌ی زیر به دست آورد:

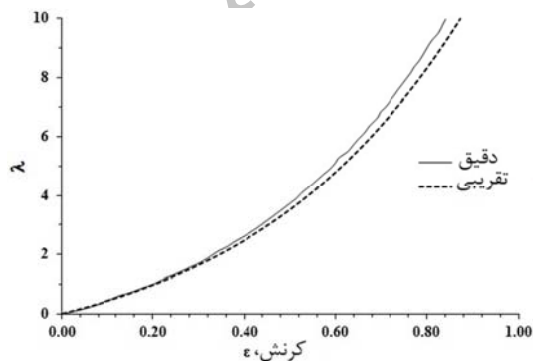
$$L_w = \frac{b\pi}{5} \sum_{m=0}^9 \sqrt{1 + \lambda \sin^2 \left( \frac{2m+1}{2} \frac{\pi}{5} \right)} \quad (15)$$

با جای‌گذاری روابط (۱۴ و ۱۵) در  $\varepsilon_0^b = \ln(L_w / 2\pi b)$  و ساده‌سازی می‌توان نوشت:

$$e^{\varepsilon_0^b} = \frac{2}{\pi} \sqrt{\lambda+1} E(\sqrt{\lambda/\lambda+1}) \quad (16)$$

$$\approx \frac{1}{10} \sum_{m=0}^9 \sqrt{1 + \lambda \sin^2 \left( \frac{2m+1}{2} \frac{\pi}{5} \right)}$$

با معلوم بودن مقادیر  $\varepsilon_0^b$  و  $b$ ، از این رابطه مقدار  $\lambda$  و  $w_{max}$  به تقریب برای هر  $n$  به دست می‌آید. تغییرات  $\lambda$  بر حسب  $\varepsilon_0^b$  در شکل (۲) آورده شده است.



شکل ۲ تغییرات  $\lambda$  بر حسب کرنش پلاستیک  $\varepsilon_0^b$

ماتریس باشد، حداقل مقدار نیروی ورقگیر برای ممانعت از چین خوردگی عبارتست از [16]:

$$F = \psi \pi (t_1 Y_1 + t_2 Y_2) H(\rho, n) \quad (9)$$

$$/ (4\mu I(\rho, n) / b - 16(1-\rho)^2 / w_{max})$$

که در آن

$$I(\rho, n) = -(1+3\rho^2)n^2 / 2 - 3(1-\rho^2) \quad (10)$$

$$/ 2 + n^2(2\rho + \rho^2 \ln \rho)$$

توزیع تنش نیز به صورت زیر خواهد بود:

$$\sigma_{r1} = Y_1 \ln(b/r) + (b-r)\tau_1 / t_1 \quad (11)$$

$$+ (\mu F + \tau_1 A) / (2\pi b t_1),$$

$$\sigma_{o1} = Y_1 (\ln(b/r) - 1) + (b-r)\tau_1 / t_1$$

$$+ (\mu F + \tau_1 A) / (2\pi b t_1)$$

$$\sigma_{r2} = Y_2 \ln(b/r) - (b-r)\tau_2 / t_2 \quad (12)$$

$$+ (\mu F - \tau_2 A) / (2\pi b t_2),$$

$$\sigma_{o2} = Y_2 (\ln(b/r) - 1) - (b-r)\tau_2 / t_2$$

$$+ (\mu F - \tau_2 A) / (2\pi b t_2)$$

در این معادله  $A = \pi(b^2 - a^2)$  سطح فلنجی ورق و  $\tau_1$  و  $\tau_2$  تنش برشی روی سطوح تماسی دو ورق می‌باشد و  $w_{max} = 2Cb(1-\rho)$  که مقدار آن بر اساس کرنش محیطی قابل محاسبه می‌باشد. کرنش محیطی پلاستیک در  $r = b$  برابر  $\varepsilon_0^b = \ln(L_w / 2\pi b)$  می‌باشد که در آن  $L_w$  طول لبه‌ی چین خورده کرده است. طول هر چین  $L_w / n$  در  $r = b$  بر اساس معادله‌ی (۱) از روابط زیر استخراج می‌شود:

$$r = b \Rightarrow w = w_{max} (1 + \cos n\theta) / 2 \quad (13)$$

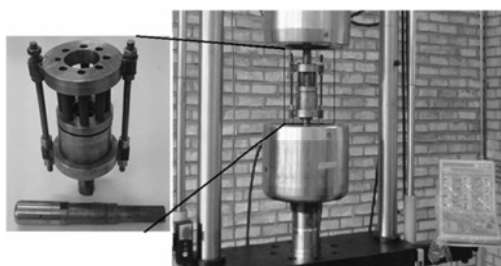
$$= w_{max} (1 + \cos(ny / b)) / 2$$

$$L_w / n = \int_0^{2\pi b/n} \sqrt{1 + (\partial w / \partial y)^2} dy$$

$$= \int_0^{2\pi b/n} \sqrt{1 + (w_{max} n / 4b)^2 \sin^2(ny / b)} dy$$

که در آن  $y = b\theta$  است. با تغییر متغیر

دانشگاه بوعلی سینا طراحی و ساخته شد [۱۹]. این قالب و مونتاژ شده‌ی آن در دستگاه اینسترون ۶۰ تنی مدل ۸۵۰۳ موجود در آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشگاه بوعلی سینا در شکل (۴) نشان داده شده است. اندازه‌ی قسمت‌های مختلف قالب در جدول (۱) و ضرایب اصطکاک خشک ورق‌ها با مجموعه‌ی قالب کشش عمیق که با روش آزمایش حلقه تعیین شده‌اند در جدول (۲) مشخص گردیده است [۱۹].



شکل ۴ قالب کشش عمیق، مونتاژ شده به اینسترون [۱۹]

جدول ۱ اندازه‌ی قسمت‌های مختلف قالب [۱۹]

پارامتر	مقدار (mm)
قطر سنبه	۴۶
شعاع لیه‌ی سنبه	۱۰
قطر ماتریس	۴۸/۵
شعاع پروفیل ماتریس	۸
قطر بیرونی ورقگیر	۱۰۰
قطر درونی ورقگیر	۴۹/۵
لقی بین سنبه و ماتریس	۱/۲۵

جدول ۲ ضرایب اصطکاک خشک ورق‌ها با مجموعه‌ی قالب

[۱۹]

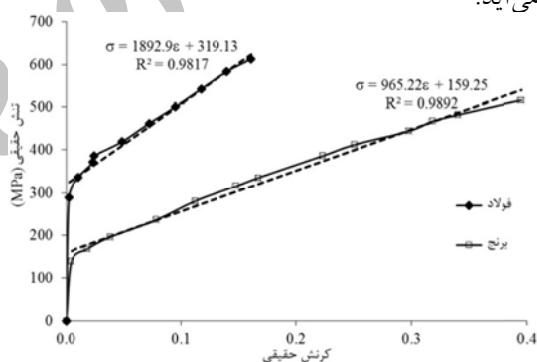
سنبه و ورق فولادی	ورقگیر و ورق فولادی	ماتریس و ورق برنجی
۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۳۱

مقدار جابه‌جایی (کورس) سنبه برابر 20mm انتخاب گردید و سرعت انجام فرآیند (سرعت سنبه) نیز روی مقدار 0.5mm/s تنظیم شد. پس از انجام

در حالتی که دو صفحه کاملاً به هم چسبیده باشند  $\tau_1 = \tau_2$  و اگر ضریب اصطکاک بین دو صفحه  $\mu_p$  باشد در این حالت رابطه‌ی  $\tau_1 A = \tau_2 A = \mu_p F$  برقرار خواهد بود.

### مواد و نمونه‌ها

در این تحقیق از دو فلز فولاد و برنج استفاده شده است. مدول الاستیک،  $E_p$  فولاد و برنج به ترتیب 207 و 105GPa و ضریب پواسون آن‌ها 0.28 و 0.31 می‌باشد. منحنی تنش-کرنش واقعی آن‌ها در شکل (۲) آورده شده است. تنش تسلیم،  $Y$  به ترتیب 290 و 140MPa و نیز با توجه به شکل (۳) مقدار  $E_p$  برابر 1.893 و 0.965GPa است. با این داده‌ها، مدول الاستیک معادل برابر 6.308 و 3.214GPa به دست می‌آید.

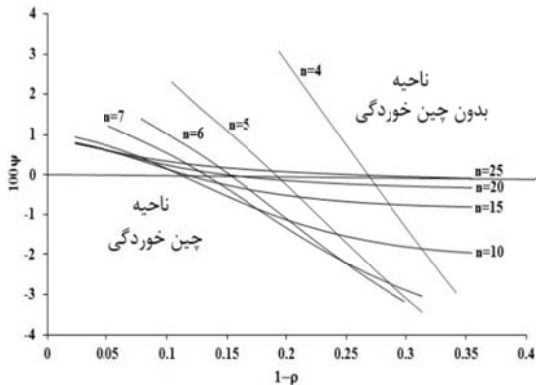


شکل ۳ منحنی تنش-کرنش واقعی فولاد و برنج مورد استفاده

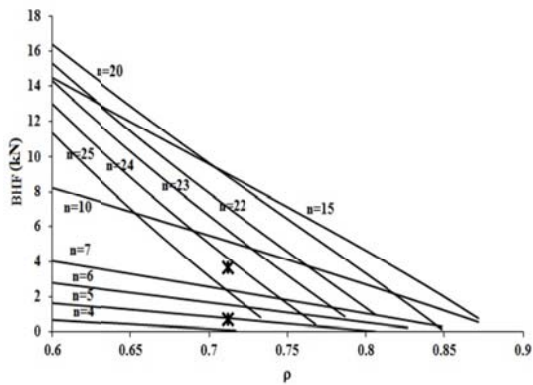
قطر گردی هر دو ورق در تمامی نمونه‌ها 100mm در نظر گرفته شده است. ضخامت ورق فولادی و برنجی به ترتیب 0.39 و 0.62mm می‌باشد، تنها در یک نمونه اندازه‌ی ضخامت‌ها جابه‌جا شده است. اصطکاک خشک (بدون استفاده از هیچ‌گونه روانکار)، استفاده از روانکاری مانند گریس و اصطکاک چسبیده (استفاده از چسب بین دو لایه) سه حالت مختلف اصطکاک‌ی اعمال شده بین دو لایه‌ی ورق می‌باشد.

قالب خاصی در آزمایشگاه شکل‌دهی فلزات

می‌افتد. با افزایش  $1-\rho$ ، پهنای فلنج و با توجه به شکل (۶) امکان چین خوردگی نیز افزایش می‌یابد. در این حالت، احتمال ایجاد چین خوردگی با تعداد متوسط بالاتر است. البته تعداد چین‌ها به مقدار مطلق انرژی کرنشی خمشی و نیروهای غشایی وابسته است.



شکل ۶ تغییرات  $\Psi$  بر حسب تغییرات  $1-\rho$  در حالت بدون ورقگیر



شکل ۷ حداقل نیروی ورقگیر برای جلوگیری از چین خوردگی

در شکل (۷) مقدار نیروی ورقگیر (BHF) برای ایجاد تعداد معینی چین بر حسب تغییرات  $\rho$  نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود مقدار نیروی ورقگیر به صورت تقریباً خطی با افزایش  $\rho$  کاهش می‌یابد ولی با تغییرات  $n$  به صورت غیرخطی رفتار می‌کند. برای کشش عمیق دوفلزی فولاد و برنج با مشخصات گفته شده، تا حدود ۲۰ چین با افزایش  $n$

فرآیند مجموعه از گریپرها جدا می‌گردد و نمونه از قالب بیرون آورده می‌شود. بسته به مقدار فشردگی فنرهای ورقگیر، تعداد و ارتفاع چین خوردگی در نمونه‌ها متفاوت است. به‌عنوان مثال دو نمونه در شکل (۵) آورده شده است.



شکل ۵ دو نمونه کشش عمیق با تعداد و ارتفاع چین خوردگی مختلف

### بررسی ایجاد چین خوردگی

روش تحلیلی. بر اساس معادلات (۹ و ۲) می‌توان شرایط ایجاد چین خوردگی در حالت‌های وجود یا عدم وجود ورقگیر را تعیین کرد. با توجه به اطلاعات ارائه شده، ثوابت موجود در این دو رابطه به صورت زیر به دست می‌آیند. اندیس ۱ برای فلز برنج و اندیس ۲ برای فولاد است.

$$\begin{aligned} t_1 &= 0.62\text{mm}, \quad t_2 = 0.39\text{mm}, \\ Y_1 &= 140\text{MPa}, \quad Y_2 = 290\text{MPa}, \\ E_1 &= 3.214\text{GPa}, \quad E_2 = 6.308\text{GPa}, \\ \nu_1 &= 0.31, \quad \nu_2 = 0.28, \\ a &= 32.25\text{mm}, \quad b_0 = 50\text{mm}, \\ D_{11} &= 444.81\text{Nmm}, \quad D_{66} = 157.81\text{Nmm} \end{aligned} \quad (17)$$

بر اساس این داده‌ها تغییرات پارامتر  $\Psi$  بر حسب تغییرات پهنای فلنج،  $1-\rho$  در حالت بدون ورقگیر در شکل (۶) آورده شده است.

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، در حالت بدون ورقگیر به‌ازای مقادیر منفی  $\Psi$  چین خوردگی اتفاق

در شبیه‌سازی رایانه‌ای با روش المان محدود، ورق‌ها به صورت تغییرشکل‌پذیر و سایر اجزا یعنی ورقگیر، ماتریس و سنبه به صورت جسم صلب مدل‌سازی شده‌اند. رفتار ورق‌ها به شکل الاستیک-پلاستیک (شکل ۳) در نظر گرفته شده است. نوع تحلیل نیز به صورت صریح می‌باشد.

برای تعریف تماس ورق‌ها با وجود ورقگیر نیرویی، اصطکاک چسبان و در مدل‌سازی با ورقگیر دارای لقی، اصطکاک کلمبی و رفتار کاملاً زبر و چسبان استفاده شده است. اندازه‌ی ضریب اصطکاک برای سطوح تماس در اصطکاک کلمبی مشخص شده است. در تماس کاملاً زبر هیچ‌گونه لغزشی بین ورق‌ها وجود ندارد و ضریب اصطکاک بی‌نهایت فرض می‌شود. اصطکاک ورق‌ها با مجموعه‌ی قالب، اصطکاک خشک (بدون روانکار) در نظر گرفته شده است. ضرایب اصطکاک مورد نیاز در جدول (۲) آورده شده‌اند.

در ماژول بارگذاری، سرعت حرکت سنبه ۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه تعیین شده است. همچنین در المان‌بندی نمونه‌های تغییرشکل‌پذیر از المان سه‌بعدی مکعبی با هشت گره و نقاط انتگرالگیری کاهیده (C3D8R در نرم‌افزار المان محدود اباکوس) استفاده شد. مجموع تعداد المان ورق‌ها حدود ۲۰ هزار و تعداد گره‌ها در حدود ۲۵ هزار می‌باشد. در مجموع، بیست و یک حالت مختلف مدل‌سازی گردید. در مدل‌سازی مربوط به ورقگیر با لقی، تأثیر پارامترهای لقی ورقگیر (C)، شعاع لبه‌ی ماتریس ( $R_d$ )، شعاع لبه‌ی سنبه ( $R_p$ )، شرایط تماس ورق‌ها و ضخامت نسبی ورق‌ها بر اساس جدول (۳) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

مقدار نیروی ورقگیر لازم برای جلوگیری از چین خوردگی، افزایش می‌یابد و مجدداً مقدار نیرو برای مقادیر بالاتر از آن کاهش می‌یابد.

**روش تجربی و شبیه‌سازی رایانه‌ای.** با توجه به نتایج قسمت قبل دیده می‌شود که برای ایجاد محصول سالم می‌توان مقدار نیروی ورقگیر را تغییر داد. این موضوع با انجام چند آزمایش تجربی بررسی شده است. تأثیر نیروی ورقگیر برای دو نمونه با شرایط یکسان و با نیروی ورقگیر ۴/۶۵ و ۰/۷۱ کیلونیوتن در شکل (۸) نشان داده شده است. در این نمونه‌ها از گریس با ضریب اصطکاک ۰/۲۲ بین دو لایه استفاده شده است. همان‌گونه که مشخص است نیروی ورقگیر بزرگ‌تر، مانع از ایجاد چین خوردگی در محصول شده است. با توجه به این‌که در انتهای کورس، لبه‌ی نمونه‌ها حدود ۴/۷ میلی‌متر به سمت داخل کشیده شده است و نیز با توجه به شکل (۱) که مقدار  $a$  برابر ۳۲/۲۵ میلی‌متر است، لذا مقدار  $\rho$  حدود ۰/۷۱۲ به دست می‌آید. به این ترتیب دو نقطه در شکل (۷) به دست می‌آید که برای حدود ۲۴ چین نتایج قابل قبولی خواهد بود.



شکل ۸ مقایسه‌ی نمونه‌ی سالم (نیروی ورقگیر 4.65kN) و چین خورده (نیروی ورقگیر 0.71kN)



جدول ۳ مقادیر یا حالات پارامترهای مختلف در مدل سازی

نسبت ضخامت ورق فولادی به ورق برنجی	شعاع لبه ماتریس (mm)	شعاع لبه سنبه (mm)	ورقگیر لقی (mm)	شرایط تماس ورقها
$0.73 (T_s / T_b)_1$	6 (R <sub>d1</sub> )	8 (Rp <sub>1</sub> )	0.4 (C <sub>1</sub> )	اصطکاک کلمب با ضریب اصطکاک 0.1 (μ <sub>1</sub> )
	8 (R <sub>d2</sub> )	10 (Rp <sub>2</sub> )	0.7 (C <sub>2</sub> )	اصطکاک کلمب با ضریب اصطکاک 0.1 (μ <sub>2</sub> )
$1/59 (T_s / T_b)_2$	10 (R <sub>d3</sub> )	12 (Rp <sub>3</sub> )	1/0 (C <sub>3</sub> )	رفتار اصطکاکی کاملاً زبر (rough)
			1/2 (C <sub>4</sub> )	اصطکاک چسبان (adhesive)

نتایج حاصل از فرآیند کشش عمیق با استفاده از ورقگیر نیرویی. با توجه به اطلاعات تجربی ارائه شده، در این قسمت نتایج شبیه سازی رایانه ای با نتایج آزمایش های انجام شده مقایسه گردیده است. در جدول (۵) تعداد و ارتفاع چین خوردگی ها و حداکثر نیروی سنبه در شبیه سازی فرآیند کشش عمیق با ورقگیر نیرویی با نمونه ی تجربی مشابه مقایسه شده است. همان گونه که ملاحظه می شود نتایج، هم خوانی مطلوبی دارند و خطای قابل ملاحظه ای بین نتایج تجربی و شبیه سازی رایانه ای وجود ندارد. در نمونه ی تجربی برای اتصال ورقها به یکدیگر از چسب استفاده شده است. در نمونه ی شبیه سازی نیز از اصطکاک چسبان استفاده شده است. نیروی ورقگیر ۷۱۲ نیوتن می باشد. برای این نمونه، تغییرات نیروی سنبه بر حسب کورس آن در شکل (۹) نمایش داده شده است.

جدول ۵ مقایسه ی نتایج شبیه سازی رایانه ای و نمونه ی تجربی مشابه (شماره ۱۲)

نمونه ی تجربی	تعداد چین خوردگی	ارتفاع چین خوردگی (mm)	حداکثر نیروی سنبه (kN)
نمونه ی تجربی	۲۴	۵	۴۱/۶
شبیه سازی رایانه ای	۲۲	۴/۷	۴۰/۹

با توجه به جدول (۳) و بر اساس میزان اهمیت عاملها، بیست و یک ترکیب مختلف تعیین گردید که در جدول (۴) طرح آنها آورده شده است.

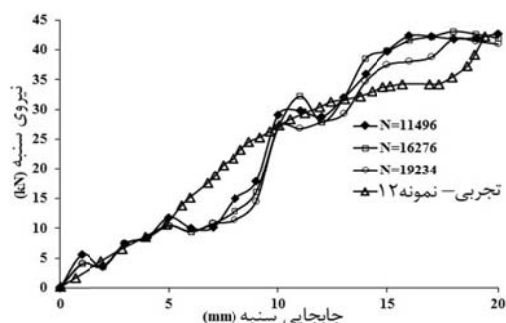
جدول ۴ طرح برای مدل سازی های انجام شده

sample					
1	R <sub>d1</sub>	C <sub>1</sub>	Rp <sub>2</sub>	μ <sub>2</sub>	$(T_s / T_b)_1$
2	R <sub>d2</sub>				
3	R <sub>d3</sub>				
4	R <sub>d1</sub>	C <sub>3</sub>	Rp <sub>2</sub>	μ <sub>2</sub>	$(T_s / T_b)_1$
5	R <sub>d2</sub>				
6	R <sub>d3</sub>				
7	Rp <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	R <sub>d2</sub>	μ <sub>2</sub>	$(T_s / T_b)_1$
8	Rp <sub>3</sub>				
9	Rp <sub>1</sub>				
10	Rp <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	R <sub>d2</sub>	μ <sub>2</sub>	$(T_s / T_b)_1$
11	μ <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	R <sub>d2</sub>	Rp <sub>2</sub>	$(T_s / T_b)_1$
12	adhesive				
13	rough				
14	μ <sub>1</sub>	C <sub>3</sub>	R <sub>d2</sub>	Rp <sub>2</sub>	$(T_s / T_b)_1$
15	adhesive				
16	rough				
17	$(T_s / T_b)_2$	C <sub>1</sub>	R <sub>d2</sub>	Rp <sub>2</sub>	μ <sub>2</sub>
18	$(T_s / T_b)_2$	C <sub>3</sub>	R <sub>d2</sub>	Rp <sub>2</sub>	μ <sub>2</sub>
19	C <sub>2</sub>	$(T_s / T_b)_1$	R <sub>d2</sub>	Rp <sub>2</sub>	μ <sub>2</sub>
20	C <sub>4</sub>	$(T_s / T_b)_1$	R <sub>d2</sub>	Rp <sub>2</sub>	μ <sub>2</sub>
21	without holder	$(T_s / T_b)_1$	R <sub>d2</sub>	Rp <sub>2</sub>	μ <sub>2</sub>

اثر تعداد المان بر نتایج شبیه سازی رایانه ای. یکی از موارد لازم در مورد اطمینان از نتایج تحلیل شبیه سازی رایانه ای، عدم وابستگی نتایج به نحوه و تعداد المان های مورد استفاده در مدل است. این مورد در مورد مدل شماره ۱۲ در جدول (۶) و شکل (۱۱) برای سه نوع المان بندی آورده شده است. دیده می شود که تعداد المان حدود ۲۰ هزار و حتی کمتر برای این نمونه مناسب است.

جدول ۶ مقایسه ی تعداد و ارتفاع چین ها و حداکثر نیروی سنبه با تغییر تعداد المان ها

تعداد المان	تعداد چین ها	ارتفاع چین (mm)	حداکثر نیروی سنبه (kN)
۱۱۴۹۶	۱۹	۵/۳۴	۴۲/۸
۱۶۲۷۶	۲۱	۴/۵۶	۴۲/۱
۱۹۲۳۴	۲۲	۴/۸	۴۰/۹

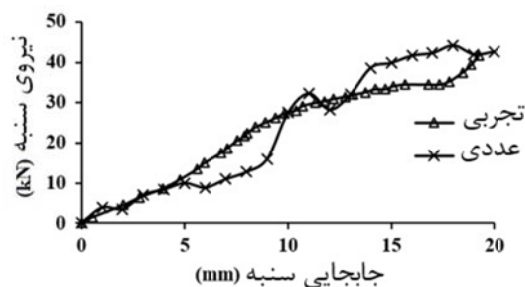


شکل ۱۰ مقایسه ی نتایج شبیه سازی رایانه ای و روش تجربی فرآیند کشش عمیق در نمونه ی شماره ۱۲

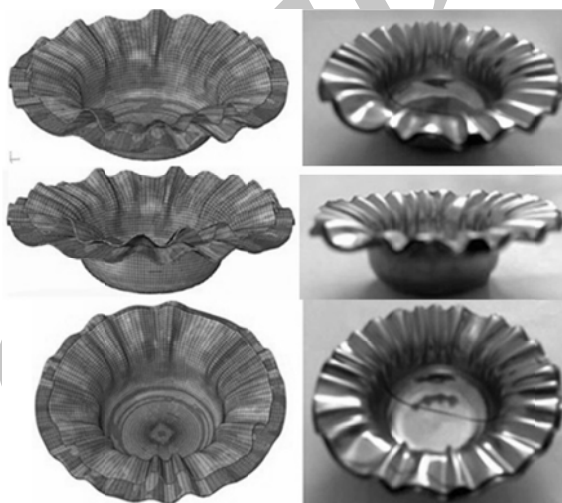
شکل ۱۱ تأثیر تغییر تعداد المان ورق ها بر منحنی نیرو-جابجایی سنبه

جدول ۷ مقایسه ی تعداد چین ها، ارتفاع چین و حداکثر نیروی سنبه با تغییر لقی ورق گیر

شماره ی مدل سازی	تعداد چین های بدقیق لایه ی	تعداد چین های ورق تجربی	ارتفاع چین (mm)	حداکثر نیروی سنبه (kN)
۲ (C=0.4 mm)	۲۷	۲۶	۰/۳۶	۶۷/۶
۱۹ (C=0.7 mm)	۲۴	۲۳	۰/۶۷	۶۷/۶
۵ (C=1 mm)	۲۴	۲۲	۰/۹۵	۷۲/۰
۲۰ (C=1.2 mm)	۲۳	۲۰	۱/۱۴	۶۷/۲
۲۱ (without holder)	۲۱	۱۹	۶/۳۵	۴۸/۸



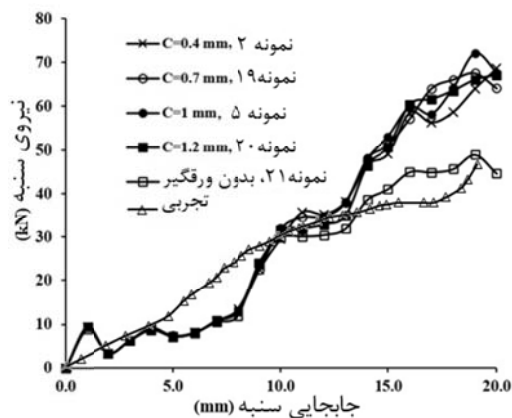
شکل ۹ مقایسه ی نتایج شبیه سازی رایانه ای (FEA) و تجربی (EXP) در اندازه گیری نیرو - جابجایی سنبه برای نمونه ی شماره ۱۲



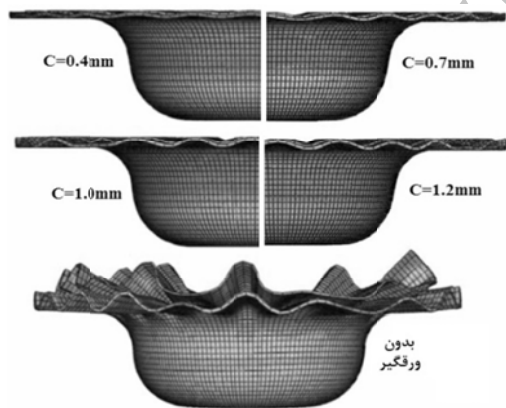
شکل ۱۱ مقایسه ی نتایج شبیه سازی رایانه ای و روش تجربی فرآیند کشش عمیق در نمونه ی شماره ۱۲

در شکل (۱۰) تغییر شکل های ایجاد شده و نیز چین خوردگی ها در نمونه ی شماره ۱۲ نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل دیده می شود چین خوردگی در نمونه ی شبیه سازی شده برای دو فلز به صورت تقریباً جداگانه اتفاق افتاده است در حالی که در نمونه ی تجربی این حالت کم تر مشاهده می شود. علت آن می تواند عدم مدل سازی دقیق رفتار چسب مورد استفاده باشد. در مدل رایانه ای، کماتش موضعی در فلنج سریعتر اتفاق می افتد و به همین خاطر تغییرات نیرو در شکل (۹) برای شبیه سازی رایانه ای بیش تر از اندازه گیری تجربی می باشد.

می‌یابد. به علت وجود تنش‌های محیطی فشاری در فلنج، در این نواحی ضخامت ورق‌ها افزایش می‌یابد. از این رو، لقی بین ورقگیر و ورق‌ها باید در نظر گرفته شود و از مقدار خاصی نباید کمتر باشد. در صورت کم بودن مقدار لقی، امکان گیر کردن ورق‌ها در بین ماتریس و ورقگیر و در نهایت پارگی آن‌ها وجود خواهد داشت.



شکل ۱۲ تأثیر تغییر لقی ورقگیر بر منحنی نیرو - جابه‌جایی سنبه



شکل ۱۳ اثر مقدار لقی ورقگیر بر تغییر فرم نمونه‌ها

**اثر شعاع لبه‌ی ماتریس.** برای بررسی اثر شعاع لبه‌ی ماتریس ( $R_d$ ) سه مقدار متفاوت ۶، ۸ و ۱۰ میلی‌متر به این پارامتر نسبت داده شده است. شش حالت مدل‌سازی و نتایج آن‌ها در جدول (۸) به همراه حالت بدون ورقگیر آورده شده است. در شکل (۱۴) نیز

**اثر لقی ورقگیر.** چهار مقدار متفاوت ۰/۴، ۰/۷، ۱ و ۱/۲ میلی‌متر برای لقی ورقگیر در مدل‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است. برای بررسی اثر لقی، سایر پارامترها ثابت نگه داشته شده‌اند. در جدول (۷) و شکل‌های (۱۲ و ۱۳) نتایج ارائه شده است. با مقایسه‌ی این نتایج دیده می‌شود که افزایش لقی ورقگیر موجب کاهش تعداد چین‌ها و افزایش ارتفاع آن‌ها می‌شود. با حذف ورقگیر به طور قابل ملاحظه‌ای تعداد چین‌ها کاهش و ارتفاع چین‌ها افزایش یافته است. تغییرات حداکثر نیروی سنبه با تغییر لقی ورقگیر در لقی‌های کم در حدود ۱ kN بوده است و با افزایش لقی ورقگیر تقریباً تا ۵ kN افزایش یافته است. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، بیش‌ترین نیروی سنبه در لقی ۱ mm و کمترین آن در لقی ۱/۲ mm است.

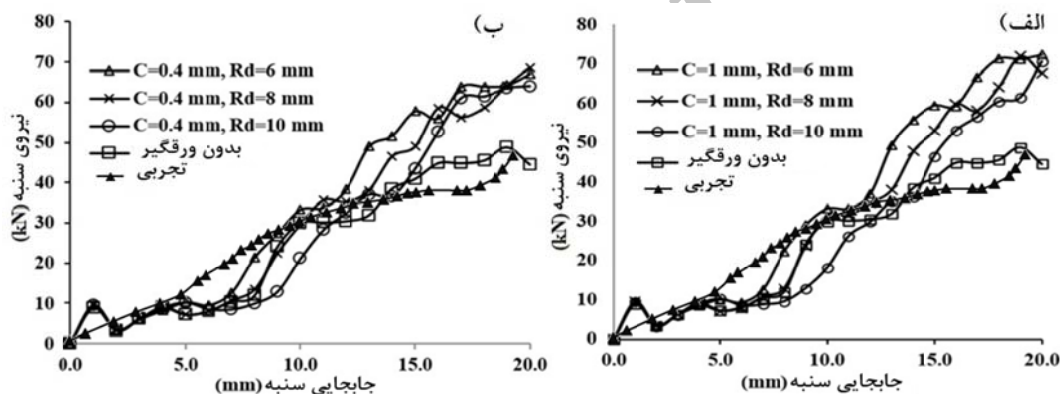
در شکل (۱۳)، تغییر فرم و ارتفاع چین‌ها در مدل‌های ۲، ۱۹، ۵ و ۲۰ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. تغییر فرم نمونه بدون ورقگیر (نمونه‌ی شماره‌ی ۲۱) نیز در این شکل آورده شده است.

با توجه به شکل (۱۲) تغییرات منحنی نیرو-جابه‌جایی سنبه با تغییر لقی ورقگیر کم می‌باشد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در ابتدا هر چهار منحنی بر یکدیگر منطبق هستند، زیرا اثر لقی ورقگیر زمانی نمایان می‌شود که تغییر شکل خارج صفحه‌ای ورق در قسمت‌های محیطی آن با شروع فرآیند کشش عمیق افزایش می‌یابد و ورق با ورقگیر تماس پیدا می‌کند. علت این امر آن است که با شروع فرآیند، ماده‌ای که در قسمت محیطی ورق و خارج از حفره‌ی ماتریس می‌باشد، تحت تنش کششی شعاعی به سمت داخل کشیده می‌شود. در اثر کاهش مداوم شعاع، در این منطقه تنش محیطی فشاری پدید می‌آید که کمانش موضعی قسمت فلنجی را به دنبال خواهد داشت. با توجه به شکل (۱۳) و جدول (۷)، هر چه میزان لقی بیشتر باشد، به علت وقوع کمانش دامنه‌ی چین‌ها نیز بزرگتر خواهد بود ولی تعداد آن‌ها کاهش

اثرات  $R_d$  بر تغییرات نیروی شکل دهی سنبه نشان داده شده است. شکل های (۱۴-الف و ب) به ترتیب تغییرات را به ازای لقی ورقگیر با مقادیر 1mm و 0.4mm نشان می دهند.

جدول ۸ مقایسه‌ی اثر تغییر شعاع لبه‌ی ماتریس و لقی ورقگیر بر تعداد و ارتفاع چین‌ها و حداکثر نیروی سنبه

شماره‌ی مدل‌سازی	تعداد چین‌های ورق فولادی	تعداد چین‌های ورق برنجی	ارتفاع چین (mm)	حداکثر نیروی سنبه (kN)
۱ (C=0.4 mm, $R_d$ =6 mm)	۲۷	۲۷	۰/۳۷	۶۷/۱
۲ (C=0.4 mm, $R_d$ =8 mm)	۲۷	۲۶	۰/۳۶	۶۸/۶
۳ (C=0.4 mm, $R_d$ =10 mm)	۲۸	۲۸	۰/۳۶	۶۴/۰
۴ (C=1 mm, $R_d$ =6 mm)	۲۴	۲۴	۰/۹۶	۷۲/۳
۵ (C=1 mm, $R_d$ =8 mm)	۲۴	۲۲	۰/۹۵	۶۷/۶
۶ (C=1 mm, $R_d$ =10 mm)	۲۶	۲۴	۰/۹۴	۷۰/۶
۲۱ (Without Holder)	۲۱	۱۹	۶/۳۵	۴۸/۸

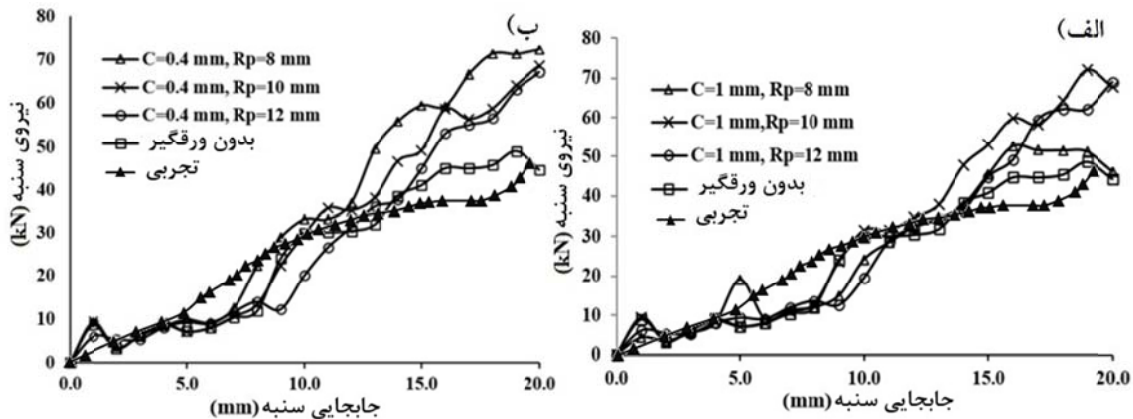


شکل ۱۴ تأثیر تغییر شعاع لبه‌ی ماتریس بر منحنی‌های نیرو-جابجایی سنبه با لقی ورقگیر،

الف) لقی 1mm، ب) لقی 0.4mm

جدول ۹ مقایسه‌ی تعداد چین‌ها، ارتفاع چین و حداکثر نیروی سنبه با تغییر دو پارامتر شعاع لبه‌ی سنبه و لقی ورقگیر

شماره‌ی مدل‌سازی	تعداد چین‌های ورق فولادی	تعداد چین‌های ورق برنجی	ارتفاع چین (mm)	حداکثر نیروی سنبه (kN)
۷ (C=0.4 mm, $R_p$ =8 mm)	۲۶	۲۵	۰/۳۷	۵۶/۸
۲ (C=0.4 mm, $R_p$ =10 mm)	۲۷	۲۶	۰/۳۶	۶۸/۶
۸ (C=0.4 mm, $R_p$ =12 mm)	۲۶	۲۶	۰/۳۶	۶۷/۲
۹ (C=1 mm, $R_p$ =8 mm)	۲۲	۲۲	۰/۹۷	۵۲/۷
۵ (C=1 mm, $R_p$ =10 mm)	۲۴	۲۲	۰/۹۵	۷۲/۰
۱۰ (C=1 mm, $R_p$ =12 mm)	۲۴	۲۴	۰/۹۵	۶۸/۸
۲۱ (Without Holder)	۲۱	۱۹	۶/۳۵	۴۸/۸



شکل ۱۵ تأثیر تغییر شعاع لبه‌ی سننه بر نیرو-جابجایی سننه با لقی ورقگیر، (الف) لقی 1mm، (ب) لقی 0.4mm

با افزایش لقی ورقگیر مشابه حالت قبل تعداد چین‌ها کاهش و ارتفاع چین‌ها افزایش یافته است. تغییرات حداکثر نیروی سننه با تغییر شعاع لبه‌ی سننه در مقایسه با پارامترهای دیگر بیش‌تر است. در  $R_p$  کم، تغییرات حداکثر نیروی سننه زیاد است و با افزایش  $R_p$  این تغییرات کمتر می‌شود.

**اثر شرایط تماس ورق‌ها.** همان‌گونه که قبلاً ذکر شد، شرط تماس ورق‌ها با یکدیگر یکی از چهار حالت زیر در نظر گرفته شده است:

- ۱- اصطکاک کلمبی با ضریب اصطکاک ۰/۰۱.
- ۲- اصطکاک کلمبی با ضریب اصطکاک ۰/۱.
- ۳- رفتار کاملاً زبر (rough).
- ۴- ورق‌ها کاملاً به هم چسبیده (adhesive).

در حالت adhesive ورق‌ها کاملاً به یکدیگر چسبیده‌اند و در صورت باز شدن اتصال به حالت تماسی تبدیل می‌شود و لغزش نسبی وجود دارد. در این حالت برای تماس ورق‌ها، مقادیری برای استحکام عمودی (با یک مؤلفه) و استحکام برشی (با دو مؤلفه) اتصال در نظر گرفته می‌شود. زمانی که تنش‌های عمودی یا فشاری در سطح تماس برابر مقادیر استحکام می‌شوند، اجازه تغییر مکان عمودی نسبی (جدایش) یا مماسی نسبی (لغزش) در محل تماس

در جدول (۸) و شکل (۱۴) مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع لبه‌ی ماتریس تعداد چین‌ها افزایش یافته است ولی ارتفاع چین‌ها تغییر محسوسی ندارند. مقدار نیروی ماتریس در طول کورس کاهش می‌یابد هر چند که مقدار ماکزیمم نیرو تغییرات زیادی ندارد. در همه‌ی حالات مقدار نیروی لازم برای شکل‌دهی و تعداد چین‌ها نسبت به حالت بدون ورقگیر افزایش می‌یابد ولی ارتفاع چین‌ها کمتر است.

**اثر شعاع لبه‌ی سننه.** برای بررسی تأثیر شعاع لبه‌ی سننه سه مقدار متفاوت ۸، ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای بررسی اثر هم‌زمان لقی نیز دو مقدار ۰/۴ و ۱/۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. شش حالت مدل‌سازی براساس جدول (۴) برای نمونه‌های ۷، ۲، ۸، ۹، ۵ و ۱۰ انجام شده است. نتایج این مدل‌سازی به‌همراه نتایج حالت بدون ورقگیر در جدول (۹)، شکل (۱۵-الف) برای لقی 1mm و شکل (۱۵-ب) برای لقی 0.4mm آورده شده‌اند.

همان‌طور که در جدول و شکل مشاهده می‌شود تأثیر افزایش شعاع لبه‌ی سننه بر تعداد و دامنه‌ی چین‌خوردگی‌ها مشابه تأثیر افزایش شعاع لبه‌ی ماتریس بر روی این پارامترها می‌باشد. یعنی با افزایش شعاع لبه‌ی سننه، تعداد چین‌ها افزایش می‌یابد ولی تغییر محسوسی در ارتفاع آن‌ها مشاهده نمی‌شود. هم‌چنین

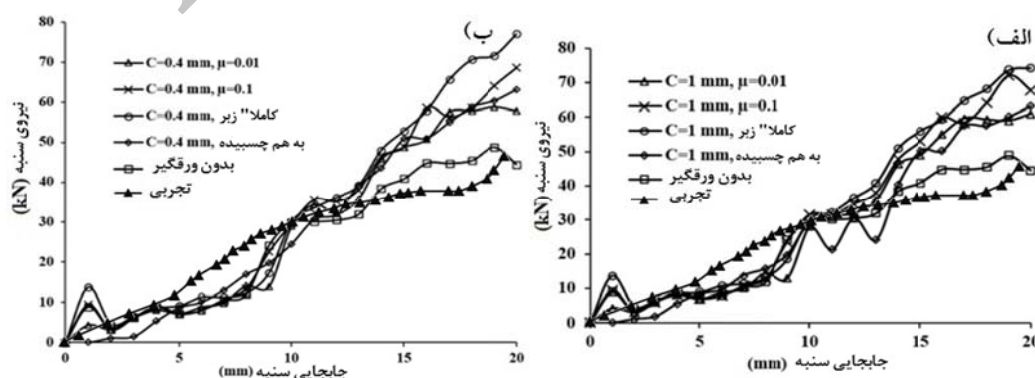
می توان نتیجه گرفت که با افزایش پیوستگی ورق ها به یکدیگر، تعداد چین ها کاهش می یابد ولی ارتفاع آن ها تقریباً تغییری نمی کند. تأثیر لقی نیز مانند قسمت های قبل می باشد. حداکثر نیروی سنبه با افزایش ضریب اصطکاک سطوح تماس ورق ها افزایش می یابد. در حالتی که ورق ها کاملاً به یکدیگر چسبیده اند، تغییرات لقی ورق گیر بر حداکثر نیروی سنبه تأثیری زیادی ندارد. به نظر می رسد در حالتی که ورق ها نسبت به هم لغزش نسبی ندارند (rough) نیروی لازم برای شکل دهی بزرگتر است و با وجود لقی کم بین ورق گیر و قطعه باز هم بیش تر افزایش می یابد. این وضعیت در مراحل پایانی کورس سنبه چشمگیرتر است.

داده می شود. در حالت rough ورق ها نسبت به هم لغزش نسبی ندارند و ضریب اصطکاک بی نهایت فرض می شود ولی اجزای تغییر مکان عمودی نسبی (جدایش) را در هر حال دارند و در حقیقت استحکام عمودی صفر است.

در جدول (۱۰) تعداد چین خوردگی ها و ارتفاع آن ها و نیز مقدار حداکثر نیروی سنبه برای چند حالت مدل سازی با یکدیگر مقایسه شده اند. در شکل های (۱۶-الف و ب) نیز تغییرات نیروی سنبه بر اثر تغییر اندازه اصطکاک و نوع تماس دو ورق فولادی و برنجی به ترتیب برای دو مقدار لقی ورق گیر 1mm و 0.4mm آورده شده است.

جدول ۱۰ مقایسه اثر شرایط تماس ورق ها و لقی ورق گیر بر تعداد چین ها، ارتفاع چین و حداکثر نیروی سنبه

شماره مدل سازی	تعداد چین های ورق فولادی	تعداد چین های ورق برنجی	ارتفاع چین (mm)	حداکثر نیروی سنبه (kN)
۱۱ (C=0.4 mm, $\mu=0.01$ )	۲۹	۲۷	۰/۳۷	۵۸/۸
۲ (C=0.4 mm, $\mu=0.1$ )	۲۷	۲۶	۰/۳۶	۶۸/۶
۱۲ (C=0.4 mm, adhesive)	۲۳	۲۳	۰/۳۶	۷۷/۰
۱۳ (C=0.4 mm, rough)	۱۶	۱۶	۰/۳۶	۶۳/۱
۱۴ (C=1 mm, $\mu=0.01$ )	۲۴	۲۴	۰/۹۶	۶۰/۹
۵ (C=1 mm, $\mu=0.1$ )	۲۴	۲۲	۰/۹۵	۷۲/۰
۱۵ (C=1 mm, adhesive)	۲۳	۲۲	۰/۹۸	۷۴/۳
۱۶ (C=1 mm, rough)	۱۲	۱۲	۰/۹۶	۶۳/۲
۲۱ (without holder)	۲۱	۱۹	۶/۳۵	۴۸/۸



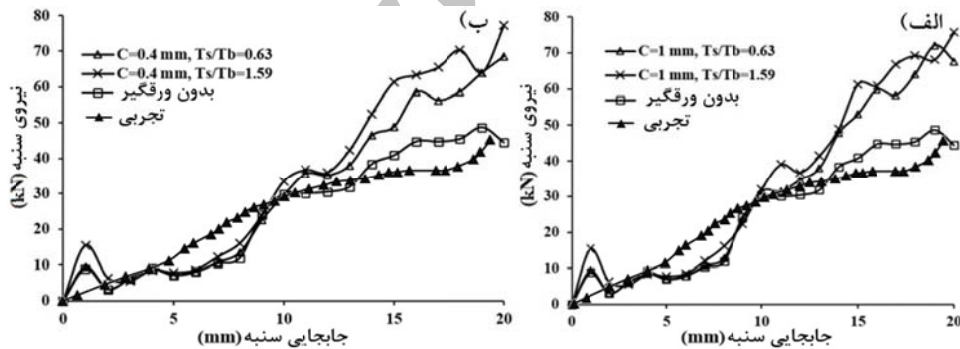
شکل ۱۶ تأثیر تغییر شرایط تماس ورق ها بر منحنی های نیرو-جابجایی سنبه، الف) لقی 1mm، ب) لقی 0.4mm

از نتایج جدول (۱۱) و شکل (۱۷) استنباط می‌شود که با افزایش ضخامت فولاد نسبت به برنج تعداد چین‌ها کاهش می‌یابد و ارتفاع چین‌ها تقریباً ثابت باقی می‌ماند. تأثیر افزایش لقی نیز مانند قسمت‌های قبل است. با افزایش ضخامت فولاد نسبت به برنج، حداکثر نیروی سنبه افزایش یافته است. در لقی کم اختلاف در طول کورس بیش‌تر است. در شکل (۱۸) تغییر شکل نهایی نمونه‌های کشش عمیق در مدل‌های شماره‌ی ۵ و ۱۸ مقایسه شده‌اند.

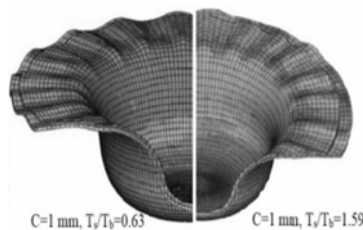
**اثر ضخامت نسبی ورق‌ها.** برای بررسی تأثیر ضخامت نسبی ورق‌ها از مدل‌سازی‌های شماره‌ی ۲، ۵، ۱۷ و ۱۸ بر اساس جدول (۴) استفاده شده است. در این مدل‌سازی‌ها مجموع ضخامت ورق‌ها ثابت می‌باشد و ضخامت نسبی آن‌ها تغییر داده شده است. در حالت دوم ضخامت ورق فولادی و برنجی به ترتیب ۰/۳۹ و ۰/۶۲ میلی‌متر می‌باشد. نتایج مقایسه‌ی اثر ضخامت نسبی ورق‌ها در جدول (۱۱)، شکل (۱۷-الف) برای لقی 1mm و شکل (۱۷-ب) برای لقی 0.4mm آورده شده است.

جدول ۱۱ اثر تغییر ضخامت نسبی ورق‌ها بر تعداد چین‌ها، ارتفاع چین و حد اکثر نیروی سنبه

شماره‌ی مدل‌سازی	تعداد چین‌های ورق فولادی	تعداد چین‌های ورق برنجی	ارتفاع چین (mm)	حد اکثر نیروی سنبه (kN)
۲ (C=0.4 mm, $T_s/T_b=0.63$ )	۲۷	۲۶	۰/۳۶	۶۸/۶
۱۷ (C=0.4 mm, $T_s/T_b=1.59$ )	۲۴	۲۴	۰/۳۶	۷۷/۳
۵ (C=1 mm, $T_s/T_b=0.63$ )	۲۴	۲۲	۰/۹۵	۷۲/۰
۱۸ (C=1 mm, $T_s/T_b=1.59$ )	۲۲	۲۰	۰/۹۶	۷۵/۷
۲۱ (Without Holder)	۲۱	۱۹	۶/۳۵	۴۸/۸



شکل ۱۷ تأثیر تغییر ضخامت نسبی ورق‌ها بر منحنی‌های نیرو-جابجایی سنبه، الف) لقی 1mm، ب) لقی 0.4mm



شکل ۱۸ مقایسه‌ی اثر تغییر ضخامت نسبی ورق‌ها بر تغییر نهایی در مدل‌های شماره‌ی ۵ و ۱۸

### نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی اثر پارامترهای مختلف بر رفتار کشش عمیق دوفلزی با روش‌های تحلیلی، شبیه‌سازی رایانه‌ای و تجربی پرداخته شد. اثر عوامل مختلف بر احتمال ایجاد چین خوردگی در قسمت فلنجی به صورت تحلیلی بررسی گردید. در قسمت شبیه‌سازی و تحلیلی به بررسی تعداد و ارتفاع چین‌ها و تغییرات نیروی سنبه در طول کورس آن پرداخته شد. بر اساس یافته‌ها، می‌توان نتیجه گرفت مقدار نیروی ورقگیر لازم برای جلوگیری از کمانش موضعی و ایجاد چین در قسمت فلنجی، به صورت تقریباً خطی با افزایش پهنای فلنج کاهش می‌یابد ولی با تغییرات تعداد چین‌ها به صورت غیرخطی رفتار می‌کند. برای کشش عمیق دوفلزی فولاد و برنج با مشخصات استفاده شده، تا حدود ۲۰ چین با افزایش تعداد چین‌ها، مقدار نیروی ورقگیر لازم برای جلوگیری از چین خوردگی، افزایش می‌یابد و مجدداً مقدار نیرو برای مقادیر بالاتر از آن کاهش می‌یابد.

دو پارامتر اندازه‌ی لقی و شرایط تماس ورق‌ها بیش‌ترین تأثیر را بر تعداد چین خوردگی‌ها دارند. تأثیر سایر پارامترها بر تعداد چین‌ها کمتر است. تنها پارامتری که به طور محسوس بر ارتفاع چین خوردگی‌ها تأثیر می‌گذارد میزان لقی ورقگیر است، بنابراین برای رسیدن به محصول مطلوب بایستی میزان لقی ورقگیر را دقیقتر از سایر متغیرها تنظیم نمود. همان‌طور که در نتایج مشاهده شد با حذف ورقگیر و در واقع حذف بزرگترین مانع افزایش ارتفاع چین خوردگی، بیش‌ترین ارتفاع چین خوردگی به وجود می‌آید. کمترین ارتفاع چین خوردگی مربوط به میزان لقی ۰/۴ است که در

مدل‌های ۲، ۳، ۸، ۱۲، ۱۳ و ۱۷ مشاهده می‌شود و بیش‌ترین ارتفاع چین خوردگی با صرف‌نظر از حالت بدون ورقگیر مربوط به لقی ۱/۲ یعنی مدل‌سازی شماره‌ی ۲۰ می‌باشد.

با مقایسه‌ی داده‌های ارائه شده در مورد تغییرات نیروی سنبه می‌توان به نتایج زیر رسید:

- تغییرات میزان لقی ورقگیر و شعاع لبه‌ی ماتریس نسبت به سایر پارامترها تأثیر کمی بر نیروی سنبه دارند.

- با افزایش اندازه‌ی شعاع لبه‌ی سنبه، نیروی سنبه به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

- با افزایش ضخامت فولاد نسبت به برنج، ماکزیمم نیروی سنبه نیز افزایش می‌یابد.

نیروی سنبه به شرایط تماس ورق‌ها بستگی دارد، به طوری که با افزایش ضریب اصطکاک سطوح تماس ورق‌ها نیروی سنبه نیز افزایش می‌یابد. بیش‌ترین نیروی سنبه در مدل‌سازی شماره‌ی ۱۲ مشاهده می‌شود. در حالتی که ورق‌ها کاملاً به یکدیگر چسبیده‌اند، ماکزیمم نیروی سنبه نسبت به حالت عدم لغزش نسبی کمتر می‌باشد و هم‌چنین مقدار آن با تغییر میزان لقی ورقگیر تغییر زیادی نمی‌کند.

### تقدیر و تشکر

از زحمات و کمک‌های مهندس امیر عطریان و سرپرستان محترم آزمایشگاه‌های شکل‌دهی و مقاومت مصالح دانشگاه بوعلی سینا بابت آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

### مراجع

- Hosford, W.F. and Caddell, R.M., "Metal Forming: Mechanics and Metallurgy", 4th Edition, Cambridge University Press, United Kingdom, (2011).



2. Marciniak, Z., Duncan, J.L. and Hu, S.J., "*Mechanics of sheet metal forming*", Butterworth-Heinemann, USA, (2002).
3. Yamamoto, H., Nishimura, H. and Miyazaki A., "Formability of superplastic aluminum alloy composites reinforced with Sic particles", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 101, pp. 198-208, (2000).
4. Cherouat, A. and Billoet J.L., "Mechanical and numerical modeling of composite manufacturing processes deep-drawing and laying-up of thin pre-impregnated woven fabrics", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 118, pp. 460-471, (2001).
5. Lim, T.C., Ramakrishna, S. and Shang, H.M., "Optimization of the formability of Knitted fabric composite sheet by means of combined deep drawing and stretch forming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 89-90, pp. 99-103, (1999).
6. Gow-Yi, T. and Ming-Nan, H., "Analytical modified model of the cold bound rolling of unbounded double-layers sheet considering hybrid friction", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, pp. 622-627, (2003).
7. صیدی، جمال و حبیبی، نبرد، "مطالعه تجربی اجزای دوفلزی فرآیند کشش عمیق"، دهمین کنگره سالانه انجمن مهندسين متالورژی ایران، شیراز، (۲۵ تا ۲۶ آبان ۱۳۸۵).
8. فرشته صنیعی، فرامرز و عطریانی، امیر، "بررسی تجربی و عددی اثر نیروی ورقگیر و اصطکاک در فرآیند کشش عمیق ورق‌های دوفلزی"، پانزدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، تهران، (۲۵ تا ۲۷ اردیبهشت ۱۳۸۶).
9. رجیبی، علی و کدخدایان، مهرا، "بررسی ورق‌های فلز-کامپوزیتی در فرآیند کشش عمیق و مقایسه آن با نتایج تجربی"، یازدهمین کنفرانس ساخت و تولید ایران، تبریز، (۲۷ تا ۲۹ مهر ۱۳۸۹).
10. Seior, B.W., "Flange wrinkling in deep-drawing operations", *Journal of the mechanics and physics of solids*, Vol. 4, pp. 235-246, (1956).
11. Chu, E. and Xu, Y., "An elastoplastic analysis of flange wrinkling in deep drawing process", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, pp. 1421-1440, (2001).
12. Saxena, R.K. and Dixit P.M., "Prediction of flange wrinkling in deep drawing process using bifurcation criterion", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 12, pp. 19-29, (2010).
13. Hutchinson, J.W. and Neale K.W., "Wrinkling of curved thin sheet metal", *International Symposium on plastic Instability*, Paris, pp. 71-78, 9-13 September, (1985).
14. Kadkhodayan, M. and Moayyedian, F., "Analytical elastic-plastic study on flange wrinkling in deep drawing process", *Scientia Iranica B*, Vol. 18(2), pp. 250-260, (2011).
15. Cheng, H.S., Cao, J., Yao, H., Liu, S.D. and Kinsey, B., "Wrinkling behavior of laminated steel sheets", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 151, pp. 133-140, (2004).
16. Morovvati, M.R., Mollaei-Dariani, B. and Asadian-Ardakani, M.H., "A theoretical, numerical, and experimental investigation of plastic wrinkling of circular two-layer sheet metal in the deep drawing", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, pp. 1738-1747, (2010).

17. Morovvati, M.R., Fatemi, A. and Sadighi, M., "Experimental and finite element investigation on wrinkling of circular single layer and two-layer sheet metals in deep drawing process", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 54, pp. 113-121, (2011).
18. Li, H., Chen, J. and Yang, J., "Experiment and numerical simulation on delamination during the laminated steel sheet forming processes", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 68, pp. 641-649, (2013).

۱۹. عطریان افیانی، امیر، "مطالعه‌ی عددی و آزمایشگاهی فرآیند کشش عمیق ورق‌های دو فلزی"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، (۱۳۸۶).

Archive of SID