

## تحلیل فرآیند هیدروفرمینگ متقارن محوری ورق

حشمت اله حقیقت<sup>۱\*</sup> و کاوه امراه نژاد<sup>۲</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>واژگان کلیدی:</b> هیدروفرمینگ ورق، مقارن محوری، توزیع ضخامت، فشار شکل دهی.</p>	<p>این مقاله به تحلیل فرآیند هیدروفرمینگ متقارن محوری ورق با در نظر گرفتن شعاع گوشه قالب و ضخامت متغیر برای قسمت گنبدی شکل ورق، می پردازد. هدف از انجام این مطالعه، محاسبه توزیع ضخامت در ورق تغییرشکل یافته و همچنین محاسبه میزان فشار شکل دهی لازم در دو حالت نیروی ورق گیر زیاد و نیروی ورق گیر کم می باشد. برای تحلیل، ابتدا یک رابطه برای تغییرات ضخامت قسمت گنبدی شکل ورق پیشنهاد شده و با اعمال قانون تراکم ناپذیری در تغییرشکل پلاستیک، توزیع ضخامت به دست آمده است. سپس براساس توزیع ضخامت به دست آمده، کرنش ها و تنش ها در سراسر نقاط ورق و همچنین انرژی کرنشی ورق محاسبه شده اند. با مساوی قرار دادن انرژی کرنشی با کار انجام شده توسط فشار سیال، فشار شکل دهی لازم در هر مرحله تغییرشکل محاسبه شده است. به منظور اعتباردهی به تحلیل حاضر، نتایج به دست آمده با نتایج سایر محققان مقایسه شده است.</p>

## ۱- مقدمه

به کار رفته در موتور، باک سوخت و ... از هیدروفرمینگ استفاده می شود. زیرا این روش می تواند ضمن بالا بردن استحکام، وزن قطعه را کاهش داده و دور ریز مواد را به حداقل برساند. همچنین با حذف نقاط جوش به واسطه تولید قطعات یکپارچه، صلبیت قطعه افزایش می یابد.

تاکنون تحقیقات زیادی بر روی فرآیند هیدروفرمینگ ورق فلزات انجام شده است. در سال ۱۹۸۵ شانگ و همکاران به بررسی هیدروفرمینگ ورق متقارن محوری پرداختند و شرایط ورود ماده به داخل قالب را به دو صورت تحلیلی و تجربی بررسی کردند. آن ها در تحلیل خود ضخامت ورق تغییرشکل یافته را ثابت فرض کردند [۱]. یانگ و نه در سال ۱۹۸۷ یک تحلیل کران بالا برای فرآیند هیدرو فرمینگ ورق متقارن محوری ارائه و نشان دادند که تحلیل آن ها برای پیشگویی فشار و کرنش ها با

در فرآیند هیدروفرمینگ ورق، فشار سیال (آب، روغن و یا دیگر سیالات) به عنوان سنبه عمل می نماید. امروزه فرآیند هیدروفرمینگ به دلیل مزایایی که نسبت به دیگر روش های شکل دهی ورق فلزات دارد به صورت گسترده ای استفاده شده و به عنوان جایگزینی برای فرآیند کشش عمیق سنتی در شکل دهی قطعات مختلف مورد نیاز در صنعت به کار گرفته می شود. برای مثال در صنعت خودروسازی برای تولید قطعات به کار رفته در بدنه، درپوش موتور، قطعات شاسی خودرو، لوله آگزوز، قطعات

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: hhaghighat@razi.ac.ir

۱. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی

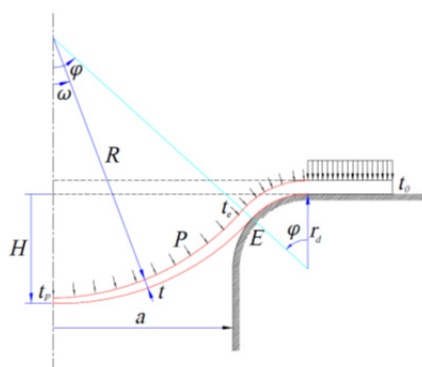
هیدروفرمینگ ورق متقارن محوری با لحاظ شعاع گوشه قالب و ضخامت متغییر برای ورق تغییرشکل یافته (قسمت گنبدی شکل) در دو حالت نیروی ورق گیر زیاد و نیروی ورق گیر کم تحلیل شده است.

## ۲- تحلیل فرآیند هیدروفرمینگ ورق در

### حالت نیروی ورق گیر زیاد

#### ۱-۲- ناحیه‌های تغییرشکل و توزیع ضخامت

شکل ۱ مقطع عرضی ورق را قبل و بعد از اعمال فشار نشان می‌دهد. در این شکل شعاع قالب و شعاع گوشه قالب می‌باشند. در حالت اولیه و قبل از اعمال فشار، تماس ورق با قالب در روی قسمت صاف قالب می‌باشد. با افزایش فشار شکل‌دهی، ورق داخل قالب کشیده شده و تماس ورق با گوشه قالب افزایش می‌یابد. اگر نیروی ورق گیر زیاد باشد آن قسمت از ورق که بین قالب و ورق گیر قرار دارد بدون تغییرشکل می‌ماند. همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده دو ناحیه تغییرشکل وجود دارد: ناحیه اول که روی گوشه قالب قرار دارد و ناحیه دوم که به صورت گنبدی شکل می‌باشد. به منظور تحلیل فرآیند، قسمت گنبدی شکل به صورت کره با ضخامت متغیر در نظر گرفته شده است. هر مقدار که فشار افزایش داده شود زاویه تماس ورق با گوشه قالب، زاویه  $\varphi$  نشان داده شده در شکل ۱، افزایش یافته و شعاع انحنا ورق در قسمت گنبدی شکل کاهش می‌یابد.



شکل ۱- فرآیند هیدروفرمینگ ورق در حالت نیروی ورق گیر زیاد، ورق در حالت اولیه (خط چین) و ورق تغییرشکل یافته (خط پر)

نتایج تجربی سازگار بوده و زمان محاسبات را نسبت روش‌های عددی کاهش می‌دهد [۲]. آن‌ها گوشه قالب را تیز فرض نمودند و تحلیل در حالت نیروی ورق گیر زیاد انجام شد که در این حالت آن بخش ورق که بین قالب و ورق گیر قرار دارد قادر به حرکت نیست. در سال ۱۹۹۳ ژانگ و همکاران در مورد فرآیند ساخت مخازن کروی با استفاده از هیدروفرمینگ مطالعه و یک راه‌کار عملی برای ساخت مخازن کروی ارایه و نشان دادند که با استفاده از روش آن‌ها نیازی به پرس‌های سنگین نیست، زمان فرآیند کوتاه‌تر، هزینه‌ها کاهش و تنش پسماند کم می‌شود [۳]. لو و گروه‌شان یک تحلیل کران بالا-کران پایین برای فرآیند هیدروفرمینگ با پانچ کروی ارایه و یک رابطه بین حرکت پانچ و فشار سیال به دست آورده و تاثیرات هیدروفرمینگ با فشار ثابت پرداخته و به بررسی وجود خطاهای ممکن در این فرآیند پرداختند [۵]. در سال ۲۰۰۳ کندیل یک مطالعه تجربی بر روی فرآیند هیدروفرمینگ با کشش عمیق پرداخت و پارامترهای مهم در انجام این فرآیند که شامل فشار، ضخامت ورق، جنس ورق، هندسه پانچ، نیروی پانچ و نرخ ورود ورق به قالب بود را مورد بررسی قرار داد [۶]. در سال ۲۰۰۹ عاصمپور یک تحلیل کران بالا برای فرآیند هیدروفرمینگ ورق دوگانه در حالت کلی ارایه داد. وی ضخامت ورق تغییرشکل یافته را ثابت و گوشه‌های قالب را نیز به صورت تیز فرض نمود [۷]. در سال ۲۰۱۱ موعامر کوچ و همکاران آزمایش تورم هیدرولیکی ورق را برای مقایسه تنش سیلان در کرنش‌های بالا با آزمایش کشش دو محوری معمولی استفاده کردند. آن‌ها روش‌ها و تخمین‌های گوناگونی که برای این آزمایش وجود دارد را بررسی کردند تا بهترین نمودار تنش سیلان ماده در دمای اتاق و دمای بالاتر برای دو ماده سبک و کاربردی به دست آید [۸].

همان‌گونه که ذکر شد در کارهای تحقیقاتی صورت گرفته گوشه قالب تیز و ضخامت ورق تغییرشکل یافته در امتداد محیط آن ثابت فرض شده‌اند. در این مقاله، فرآیند

## ۲-۲- انرژی کرنشی

برای محاسبه انرژی کرنشی در ناحیه اول تغییرشکل از دستگاه مختصات استوانه‌ای استفاده شده و کرنش در راستای شعاعی به صورت زیر است:

$$\varepsilon_r = \ln \frac{r_i}{r_{i-1}} \quad (۸)$$

در این رابطه  $i$  مرحله فعلی و  $i-1$  مرحله قبلی تغییرشکل است.

کرنش محیطی برابر است با:

$$\varepsilon_\theta = \ln \frac{2\pi r_i}{2\pi r_{i-1}} \quad (۹)$$

با استفاده از رابطه تراکم ناپذیری:

$$\varepsilon_t = -\varepsilon_\theta - \varepsilon_r \quad (۱۰)$$

با محاسبه سه مولفه کرنش ذکر شده کرنش مؤثر محاسبه شده و با فرض قانون توانی برای رابطه تنش مؤثر و کرنش مؤثر:

$$\bar{\sigma} = K \bar{\varepsilon}^n \quad (۱۱)$$

انرژی کرنشی در واحد حجم برابر است با:

$$u = \int \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} = \int K \bar{\varepsilon}^n d\bar{\varepsilon} = \frac{K \bar{\varepsilon}^{n+1}}{n+1} \quad (۱۲)$$

انرژی کرنشی کل برای ناحیه اول نیز از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$U = \int u dV_1 \quad (۱۳)$$

که

$$dV_1 = 2\pi r r_d d\varphi \quad (۱۴)$$

که پارامتر  $r$  بر حسب زاویه  $\varphi$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$r = a + r_d (1 - \sin \varphi) \quad (۱۵)$$

در این صورت انرژی کرنشی این ناحیه برابر است با:

$$U_1 = \int_0^\varphi \frac{K \bar{\varepsilon}^{n+1}}{n+1} (2\pi r r_d d\varphi) \quad (۱۶)$$

برای محاسبه تغییرات انرژی کرنشی در ناحیه اول کافی است که انرژی کرنش در قسمت حجم ماده اضافه شده به مرحله قبل محاسبه شود:

در ناحیه تماس ورق با گوشه قالب، ناحیه اول، فرض شده که شرایط اصطکاک چسبنده حاکم باشد و ورق به محض تماس با قالب به آن می‌چسبد. ضخامت ورق در این ناحیه، از ضخامت اولیه ورق شروع، به تدریج کاهش و در نقطه E که نقطه جدایی بین ورق و گوشه قالب است به مقدار  $t_e$  می‌رسد. حجم این ناحیه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_1 = \int_0^\varphi 2\pi [a + r_d (1 - \sin \omega)] t r_d d\omega \quad (۱)$$

در ناحیه دوم تغییرشکل، همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده، ضخامت ورق در نقطه E برابر با مقدار  $t_e$  و در پایین‌ترین نقطه که قطب نامیده می‌شود برابر با  $t_p$  است. در این ناحیه فرض شده که بین ضخامت ورق در هر نقطه و ضخامت ورق در نقطه جدایش و پایین‌ترین نقطه (قطب) رابطه زیر برقرار باشد:

$$t = t_p + \frac{\sin \omega}{\sin \varphi} (t_e - t_p) \quad (۲)$$

که زاویه هر نقطه نسبت به محور قائم،  $t$  ضخامت ورق در زاویه  $\omega$ ،  $t_e$  و  $t_p$  (شکل ۱) به ترتیب ضخامت در نقطه E ( $\omega = \varphi$ ) و ضخامت در قطب ( $\omega = 0$ ) می‌باشند. شعاع و ارتفاع گنبد نیز به ترتیب از رابطه‌های زیر بر حسب زاویه  $\varphi$  به دست می‌آیند:

$$R = \frac{a + r_d}{\sin \varphi} - r_d \quad (۳)$$

$$H = R (1 - \cos \varphi) + r_d \quad (۴)$$

باتوجه به هندسه و رابطه توزیع ضخامت فرض شده، حجم این ناحیه برابر است با:

$$V_2 = \int_0^\varphi 2\pi R^2 \sin \omega [t_p + \frac{\sin \omega}{\sin \varphi} (t_e - t_p)] d\omega \quad (۵)$$

باتوجه به تراکم ناپذیری و نواحی شکل‌دهی می‌توان رابطه

$$V_0 = V_1 + V_2 \quad (۶)$$

که  $V_0$  حجم اولیه ورق بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V_0 = \pi (r_d + a)^2 t_0 \quad (۷)$$

که  $t_0$  ضخامت اولیه ورق می‌باشد.

## ۳-۲- فشار شکل دهی

انرژی کرنشی ورق با کار حاصل از نیروهای خارجی برابر است. از آنجا که تنها بار خارجی که کار انجام می‌دهد فشار سیال است، انرژی کرنشی ورق با کار انجام شده توسط فشار سیال باید برابر باشد:

$$W_p = P \Delta V_f \quad (28)$$

که  $\Delta V_f$  برابر اختلاف حجم سیال از مرحله  $i-1$  به مرحله  $i$  بوده و برابر است با:

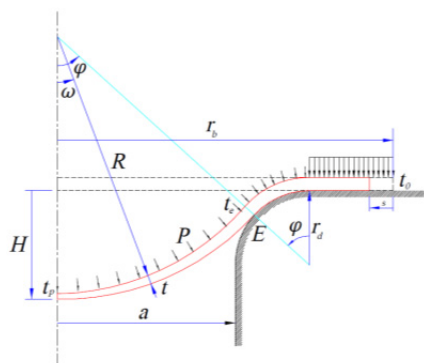
$$\Delta V_f = V_{f,i} - V_{f,i-1} \quad (29)$$

## ۳- تحلیل فرآیند هیدروفورمینگ ورق در

## حالت نیروی ورق گیر کم

## ۳-۱- ناحیه‌های تغییر شکل و توزیع ضخامت

شکل ۲ مقطع عرضی ورق درون قالب قبل و بعد از اعمال فشار را نشان می‌دهد. در این شکل  $r_b$  شعاع اولیه ورق می‌باشد. از آنجا که در این حالت نیروی وارد به ورق گیر به میزانی است که ورق از قسمت صاف قالب می‌تواند به داخل قالب بلغزد. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده سه ناحیه تغییر شکل وجود دارد: یکی بخشی از ورق که زیر ورق گیر قرار داشته و ضخامت آن ثابت است، این ناحیه بر اثر تنش کششی که سیال به ورق وارد می‌کند به داخل قالب کشیده و با افزایش فشار حجم آن کاهش می‌یابد، ناحیه دوم که روی گوشه قالب قرار دارد و ناحیه سوم، قسمت گنبدی شکل ورق می‌باشد.



شکل ۲- فرآیند هیدروفورمینگ ورق در حالت نیروی ورق گیر کم، ورق در حالت اولیه (خط چین) و ورق تغییر شکل یافته (خط پر)

$$\Delta U_1 = \int_{\varphi-\Delta\varphi}^{\varphi} \frac{K \bar{\varepsilon}^{n+1}}{n+1} (2\pi r t r_d d\varphi) \quad (17)$$

از آنجایی که ضخامت ورق در مقابل ابعاد دیگر آن بسیار کم می‌باشد می‌توان فرآیند تغییر شکل در قسمت گنبدی شکل ورق را تنش صفحه‌ای فرض نمود،  $\sigma_r = 0$ . همچنین می‌توان آن را مانند یک مخزن کروی تحت فشار داخلی در نظر گرفت. با این فرض‌ها می‌توان نوشت:

$$\sigma_\theta = \sigma_\varphi \quad (18)$$

با استفاده از قانون جریان [۹]:

$$\frac{\varepsilon_r}{\sigma'_r} = \frac{\varepsilon_\theta}{\sigma'_\theta} = \frac{\varepsilon_\varphi}{\sigma'_\varphi} \quad (19)$$

که با استفاده از این رابطه و قانون تراکم ناپذیری:

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_\varphi = -\frac{1}{2} \varepsilon_r \quad (20)$$

کرنش در راستای ضخامت نیز برابر است با:

$$\varepsilon_t = \ln \frac{t_i}{t_{i-1}} \quad (21)$$

رابطه محاسبه کرنش موثر به صورت زیر می‌باشد [۹]:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_\varphi - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_t - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_\varphi)^2} \quad (22)$$

با قراردادن معادله ۲۰ در رابطه فوق، تنش مؤثر برابر است با:

$$\bar{\varepsilon} = |\varepsilon_r| \quad (23)$$

تنش مؤثر مطابق رابطه ون مایسز از رابطه زیر به دست می‌آید [۹]:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2} \quad (24)$$

و تنش مؤثر برای هر نقطه ورق برابر است با انرژی کرنشی ناحیه دو از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\bar{\sigma} = \sigma_\theta \quad (25)$$

$$U_2 = \int_0^\varphi \frac{K \bar{\varepsilon}^{n+1}}{n+1} (2\pi R t \sin \omega d\omega) \quad (26)$$

و انرژی کرنشی کل در حالت نیروی ورق گیر زیاد برابر است با:

$$U = U_1 + U_2 \quad (27)$$

برای محاسبه مقدار شعاع در مرحله قبل به این صورت عمل می‌شود که با دانستن مقدار شعاع فعلی و مقدار  $s$ ، حجم جابه‌جا شده ورق محاسبه می‌شود:

$$V_m = \pi[r_b^2 - (r_b - s)^2]t_0 \quad (36)$$

که این حجم جابه‌جا شده از نقطه  $r_{i-1}$  به نقطه  $r_i$  رسیده که رابطه این نقاط به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$V_m = \pi[r_{i-1}^2 - r_i^2]t_0 \quad (37)$$

و بنابراین:

$$r_{i-1} = \sqrt{\frac{V_m}{\pi t_0} + r_i^2} \quad (38)$$

و انرژی کرنشی این ناحیه برابر است با:

$$U_1 = \int_{a+r_d}^{r_b-s} \frac{K \bar{\epsilon}^{n+1}}{n+1} (2\pi r t_0 dr) \quad (39)$$

در ناحیه دوم تغییر نیز از دستگاه مختصات استوانه‌ای استفاده شده است. مقادیر کرنش در راستای شعاعی، محیطی و ضخامتی به ترتیب از رابطه‌های ۸، ۹ و ۱۰ به دست می‌آیند. در این ناحیه المان حجم برابر است با:

$$dV_1 = 2\pi r t_0 d\varphi \quad (40)$$

که در این رابطه پارامتر  $r$  برحسب زاویه  $\varphi$  از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود. انرژی کرنشی در این ناحیه برابر است با:

$$U_2 = \int_0^\varphi \frac{K \bar{\epsilon}^{n+1}}{n+1} (2\pi r t_0 d\varphi) \quad (41)$$

انرژی کرنشی ناحیه سوم نیز از رابطه (۲۵) قابل محاسبه است.

### ۳-۳- محاسبه انرژی اتلافی بر اثر اصطکاک

چون ورق بین سطوح قالب و ورق‌گیر می‌غزد مقداری انرژی در این سطوح اتلاف می‌شود. برای محاسبه این انرژی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$W = \sum f \delta \quad (42)$$

که  $\delta$  تغییر مکان شعاعی نقطه و نیرو به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f = mK \quad (43)$$

حجم ناحیه اول تغییرشکل برابر است با:

$$V_1 = 2\pi t_0 [(r_b - s)^2 - (a + r_d)^2] \quad (30)$$

با افزایش حرکت شعاعی ورق به میزان  $s$ ، مقدار حجم این ناحیه کاهش و حجم دو ناحیه تغییرشکل دیگر افزوده می‌شود. این وجه تمایز بین این حالت و حالت بررسی شده در قسمت قبل (نیروی ورق‌گیر زیاد) است.

در ناحیه دوم ضخامت ورق متغیر می‌باشد. ضخامت از نقطه با زاویه  $\varphi = 0$  که فصل مشترک ناحیه اول و دوم است برابر ضخامت اولیه ورق است به تدریج کاهش و در نقطه که نقطه E جدایی ورق و قالب است ضخامت آن به مقدار  $t_e$  می‌رسد. حجم این ناحیه نیز به صورت زیر به دست می‌آید:

$$V_2 = \int_0^\varphi 2\pi [a + r_d (1 - \sin \varphi)] t r_d d\varphi \quad (31)$$

با افزایش فشار زاویه  $\varphi$  افزایش یافته و حجم ناحیه دوم نیز افزایش می‌یابد. ناحیه سوم قسمت گنبدی شکل است که حجم آن از رابطه (۶) محاسبه می‌شود. با توجه به نواحی تغییرشکل در این حالت می‌توان رابطه زیر را نوشت:

$$V_0 = V_1 + V_2 + V_3 \quad (32)$$

که  $V_0$  حجم اولیه ورق بوده و برابر است با:

$$V_0 = \pi r_b^2 t_0 \quad (33)$$

### ۳-۲- انرژی کرنشی

برای محاسبه کرنش‌ها و انرژی کرنشی در ناحیه اول از دستگاه مختصات استوانه‌ای استفاده شده است. چون در این ناحیه ضخامت ثابت فرض شده کرنش در راستای ضخامت برابر صفر بوده و کرنش مؤثر برابر است با:

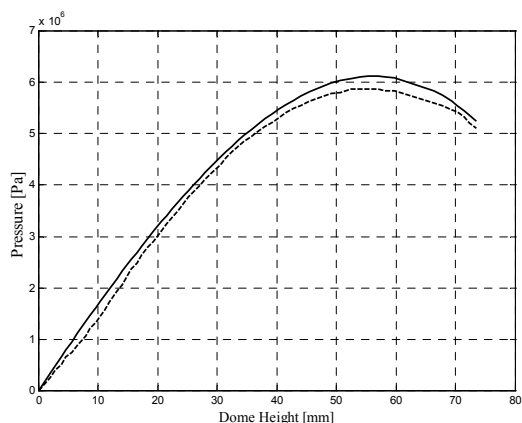
$$\bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} |\epsilon_r| \quad (34)$$

که در این رابطه کرنش شعاعی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\epsilon_r = \ln \frac{r_i}{r_{i-1}} \quad (35)$$

به دست می‌آیند. با مساوی قرار دادن انرژی کرنشی و کار انجام شده توسط سیال، مقدار فشار شکل‌دهی در هر مرحله تغییر شکل (در هر ارتفاع گنبد) به دست می‌آیند. به منظور اعتباردهی به تحلیل انجام شده، نتایج تحلیل حاضر با نتایج مرجع [۷] مقایسه شده‌اند. ورق از جنس آلومینیوم و تنش سیلان آن از رابطه  $\bar{\sigma} = 750\bar{\epsilon}^{0.4}$  مگاپاسکال تبعیت می‌کند. در این مرجع، شعاع اولیه ورق  $r_b = 20$  میلی‌متر، شعاع داخلی قالب  $a = 82$  میلی‌متر، شعاع گوشه قالب  $r_d = 7$  میلی‌متر وضخامت اولیه ورق نیز  $t_0 = 1.125$  میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند [۷].

در شکل ۳ تغییر فشار شکل‌دهی برحسب ارتفاع گنبد (خطوط پیوسته) با نتایج مرجع [۷] (خط چین) برای حالت نیروی ورق گیر زیاد مقایسه شده‌اند. ارتفاع گنبد در ابتدا صفر بوده و با افزایش فشار زیاد می‌شود. در این حالت فشار تا جایی اعمال می‌شود که ورق دچار ناپایداری پلاستیکی نشود یعنی کرنش موثر در آن از مقدار ضریب کار سختی  $n = 0.4$  کمتر باشد. در این حالت ارتفاع گنبد برابر ۵۶ میلی‌متر و فشار ناپایداری نظیر آن  $6/1$  مگاپاسکال می‌باشد. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده انطباق مناسبی بین نتایج تحلیل حاضر با نتایج مرجع [۷] وجود دارد.



شکل ۳- تغییر فشار شکل‌دهی برحسب ارتفاع گنبد (منحنی خط چین نتایج مربوط به مرجع [۷] و خطوط پیوسته مربوط به تحلیل حاضر برای حالت نیروی ورق گیر زیاد)

که  $m$  ثابت اصطکاک و  $K$  تنش سیلان برشی بوده و برابر است با

$$K = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (44)$$

### ۳-۴- انرژی کرنشی کل

برای به دست آوردن انرژی کرنشی کل ورق انرژی‌های به دست آمده از قسمت‌های قبل را با هم جمع و انرژی کرنش ورق به دست می‌آید.

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + W \quad (45)$$

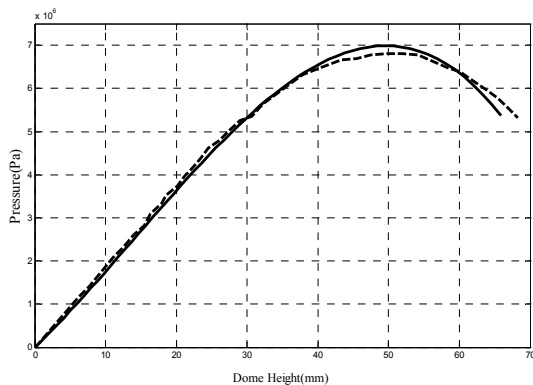
### ۳-۵- تعیین فشار شکل‌دهی

برای به دست آوردن تغییرات ضخامت در هر مرحله فرآیند و در هر زاویه  $\varphi$ ، مقادیر مختلفی برای جابه‌جایی شعاعی  $s$  حدس زده می‌شود و به ازای هر کدام از آن‌ها یک انرژی به دست می‌آید. اما به منظور تعیین مقدار مناسب  $s$ ، از شرط حداقل بودن انرژی کرنشی ورق استفاده می‌شود. در محاسبه فشار از تغییرات انرژی کرنشی در مراحل مختلف استفاده شده‌است.

### ۴- نتایج و بحث

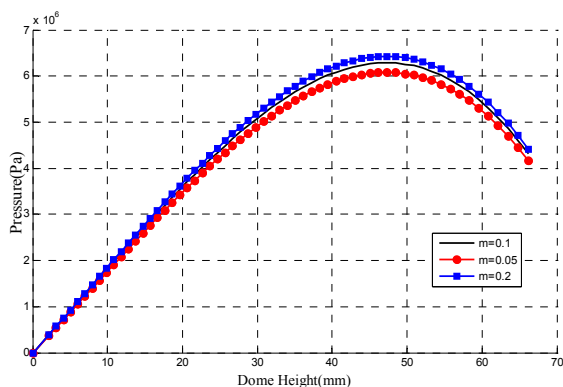
رابطه‌های بیان شده برای تحلیل فرآیند در دو حالت نیروی ورق گیر زیاد و نیروی ورق گیر کم تبدیل به برنامه کامپیوتری پارامتریک در محیط نرم‌افزار MATLAB شده‌اند. ورودی‌های برنامه شامل ضخامت و شعاع ورق اولیه، روند تحلیل به این صورت است که زاویه  $\varphi$  به عنوان ورودی به برنامه می‌باشد سپس مقدار شعاع قسمت کروی (شعاع گنبد) و مقدار ارتفاع گنبد محاسبه می‌شوند. براساس رابطه برای تغییرات ضخامت و استفاده از قانون بقای حجم توزیع ضخامت، مقادیر کرنش و مقادیر تنش در نقاط مختلف و انرژی کرنشی برای ورق

می‌باشد. علت این امر آن است که در حالت نیروی ورق گیر کم، ناحیه‌های تغییر شکل بیشتر می‌باشند.



شکل ۵- تغییر فشار شکل‌دهی بر حسب ارتفاع گنبد (منحنی خط چین مربوط به مرجع [۷] و خطوط پیوسته مربوط به تحلیل حاضر برای حالت نیروی ورق گیر کم)

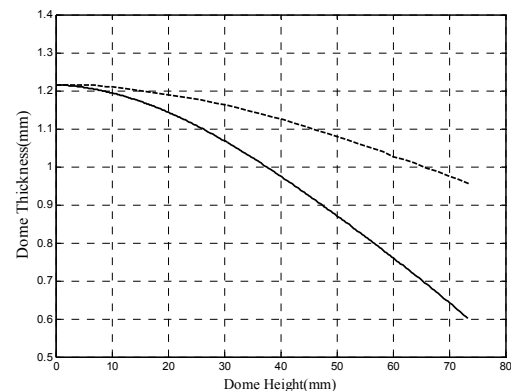
شکل ۶ تاثیر ضریب اصطکاک را بر تغییرات فشار شکل‌دهی بر حسب ارتفاع گنبد نشان می‌دهد. در آن ضرایب اصطکاک ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ در نظر گرفته شده‌اند. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد با افزایش ثابت اصطکاک برای رسیدن به یک ارتفاع گنبد نیروی بیشتری مورد نیاز است.



شکل ۶- تغییر فشار شکل‌دهی بر حسب ارتفاع گنبد و تاثیر ثابت اصطکاک بر آن

در شکل ۷ ضخامت نقطه قطب بر حسب ارتفاع گنبد در طول فرآیند برای حالت نیروی ورق گیر کم، نشان داده شده‌است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش ارتفاع

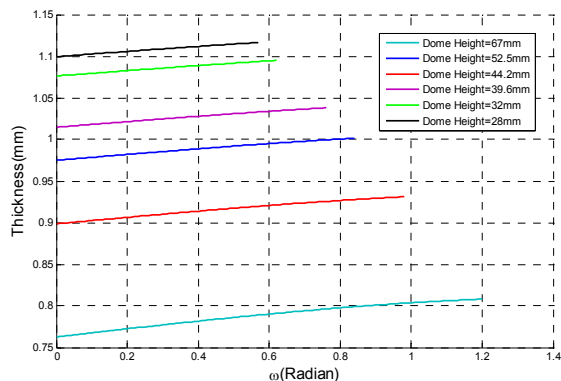
در شکل ۴ تغییر ضخامت قطب بر حسب ارتفاع گنبد برای حالت نیروی ورق گیر زیاد نشان داده شده‌است. در ابتدای فرآیند که ارتفاع گنبد صفر است ضخامت قطب برابر ضخامت اولیه ورق و ۱/۲۱۵ میلی‌متر است. با افزایش فشار شکل‌دهی و با افزایش ارتفاع گنبد ضخامت قطب کاهش می‌یابد. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده منحنی تغییر ضخامت قطب پایین‌تر از منحنی نتایج مرجع [۷] قرار دارد. دلیل این امر آن است که نتایج مرجع ذکر شده بر اساس فرض ضخامت یکنواخت برای ورق تغییر شکل یافته به دست آمده‌اند.



شکل ۴- تغییر ضخامت قطب بر حسب ارتفاع گنبد (منحنی خط چین نتایج مربوط به مرجع [۷] و خطوط پیوسته مربوط به تحلیل حاضر برای حالت نیروی ورق گیر زیاد)

در شکل ۵ فشار شکل‌دهی و ارتفاع گنبد برای حالت نیروی ورق گیر کم، با نتایجی که در مرجع [۷] به دست آمده‌اند و با خط‌چین نشان داده شده مقایسه شده‌اند. ثابت اصطکاک برابر  $m = 0.1$  در نظر گرفته شده‌است. در این حالت ارتفاع گنبد برابر ۵۰ میلی‌متر و فشار ناپایداری نظیر آن ۷ مگاپاسکال می‌باشد. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده انطباق مناسبی بین نتایج تحلیل حاضر با نتایج مرجع [۷] وجود دارد. مقایسه منحنی فشار شکل‌دهی بر حسب ارتفاع گنبد در این حالت با حالت نیروی ورق گیر زیاد، نشان داده شده در شکل ۴، نشان می‌دهد که در شرایط ارتفاع گنبد مساوی، در حالت نیروی ورق گیر کم به فشار شکل‌دهی بیشتری نیاز

می‌رسد. با افزایش ارتفاع گنبد (یعنی با افزایش زاویه  $\varphi$ ) تغییرات ضخامت در طول ورق افزایش و همچنین ضخامت ورق کاهش می‌یابد.



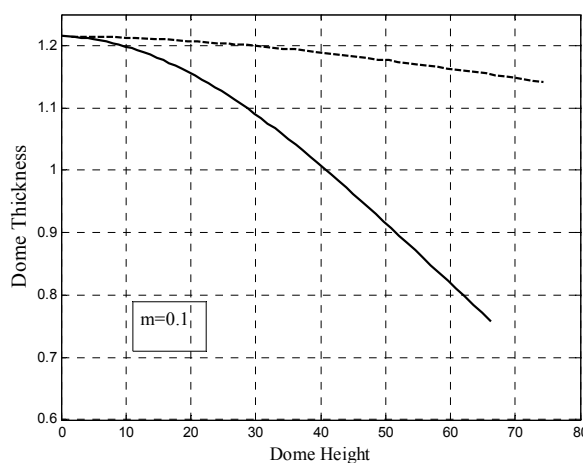
شکل ۸- توزیع ضخامت در قسمت گنبدی شکل بر حسب زاویه  $\omega$  در ارتفاع گنبد های مختلف برای حالت نیروی ورق گیر کم

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله فرآیند هیدروفرمینگ ورق متقارن محوری در دو حالت نیروی ورق گیر زیاد و نیروی ورق گیر کم، تحلیل و نتایج زیر حاصل شدند:

- انطباق مناسبی بین نتایج به دست آمده از تحلیل حاضر با نتایج سایر مراجع وجود دارد.
- در حالت نیروی ورق گیر کم، میزان نازک شدگی ورق در قطب کمتر می‌باشد.
- برای رسیدن به یک ارتفاع گنبد مشخص در حالت نیروی ورق گیر کم، فشار بیشتری نسبت به حالت نیروی ورق گیر زیاد دارد.
- در حالت نیروی ورق گیر کم، توزیع ضخامت یکنواخت‌تری نسبت به حالت نیروی ورق گیر زیاد دارد.
- افزایش ثابت اصطکاک سبب افزایش فشار شکل‌دهی می‌شود.

گنبد ضخامت در حال کاهش می‌باشد. ولی این کاهش ضخامت به علت ورود ورق از کناره‌ها کمتر از حالت قبل است. ضخامت ورق در ابتدای فرآیند ۱/۲۱۵ میلی‌متر بوده است. همان‌طور که مشخص است در این حالت نیز با افزایش فشار و با افزایش ارتفاع گنبد ضخامت گنبد کاهش می‌یابد ولی این کاهش از حالت نیروی ورق گیر زیاد کمتر است. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده منحنی تغییر ضخامت قطب پایین‌تر از منحنی نتایج مرجع [۷] قرار دارد. دلیل این امر آن است که نتایج مرجع ذکر شده در این حالت نیز براساس فرض ضخامت یکنواخت برای ورق تغییر شکل یافته به دست آمده‌اند. مقایسه منحنی تغییر ضخامت در این حالت با حالت نیروی ورق گیر زیاد، نشان داده شده در شکل ۴، نشان می‌دهد که در این حالت نیروی ورق میزان نازک‌شدگی ورق در قطب کمتر می‌باشد.



شکل ۷- تغییر ضخامت قطب بر حسب ارتفاع گنبد (منحنی خط چین نتایج مربوط به مرجع [۷] و خطوط پیوسته مربوط به تحلیل حاضر برای حالت نیروی ورق گیر کم)

در شکل ۸ توزیع ضخامت در ورق در قسمت گنبدی شکل برای ارتفاع گنبد های مختلف رسم شده‌است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده، ضخامت از نقطه با حداکثر زاویه  $\omega$  (نقطه جدایی ورق از گوشه قالب) شروع به کاهش و در نقطه قطب  $\omega = 0$  به حداقل مقدار خود



مراجع

- [1] Shang, H.M., Chau, F.S., Tay, C.J., Toh, S.L. (1985). "Hydroforming sheet metal into axisymmetrical shells with draw-in of flange permitted". Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry. Vol. 107, pp. 372-378.
- [2] Yang, D.Y., Noh, T.S. (1988). "An analysis of axisymmetric hydrostatic bulging by the upper-bound method". International Journal of Mechanical Sciences. Vol. 30, No. 1, pp. 43- 49.
- [3] Zhang, S., Wang, Z.R., Wang, T. (1990). "The Integrally hydroforming process of spherical vessels". Journal of Pressure Vessel & Piping. Vol. 42, pp. 111-120.
- [4] Lo, S.W., Hsu T.C., Wilson W.R.D. (1993). "An analysis of the hemispherical-punch hydroforming processes". Journal of Materials Processing Technology. pp. 225-239.
- [5] Thiruvarudchelvan, S., Lewis, W. (1999). "A note on hydroforming with constant fluid pressure". Journal of Materials Processing Technology. Vol. 88, pp. 51–56.
- [6] Kandil, A. (2003). "An experimental study of hydroforming deep drawing". Journal of Materials Processing Technology. pp. 70-80.
- [7] Assempour, A., Emami, M.R. (2009). "Pressure estimation in the hydroforming process of sheet metal pairs with the method of upper bound analysis". Journal of Materials Processing Technology. Vol. 209, pp. 2270–2276.
- [8] Koc, M., Billur, E., Cora, O.N. (2011). "An experimental study on the comparative assessment of hydraulic bulge test analysis methods". Materials and Design. Vol. 32, pp. 272–281.
- [9] Johnson, W., Mellor, P.B. (1983). "Engineering plasticity". John Willy & Sons, NY.