مدلسازي هندسي، تحليل كرانه فوقاني و شبيه سازي جريان فلز در فورجينگ دقيق چرخ دنده هاي ساده

سجاد رسايي[i]، حشمت اله حقيقت[ii]

چكيده

اين مقاله به تشريح مدلسازي پارامتريک چرخ دنده ساده، اجزاء قالب فورجينگ دقيق آن و تخمين نيروي شكل دهي به روش كرانه فوقاني مي‌پردازد. با وارد كردن مشخصات هندسي چرخ دنده ساده شامل مدول، تعداد دندانه، زاويه فشار، عرض چرخ دنده و شعاع سوراخ داخلي به برنامه كامپيوتري نوشته شده به زبان Visual Basic، مدل توپر آن در محيط نرم افزارSolidWorks ايجاد مي‌شود. پس از آن ابعاد بيلت و اجزاء قالب فورجينگ دقيق به طور خودكار طراحي شده و مدل سه بعدي آنها ايجاد مي‌شوند. براي تحليل كرانه فوقاني يک نيم دندانه با پروفيل اينولوت مد نظر قرار گرفته و منطقه تغيير شكل به شش ناحيه تقسيم شده است. با استفاده از ميدان سرعت جديدي كه در اين مقاله ارايه شده و در آن پديده بشكه‌اي شدن دندانه لحاظ شده منحني تغييرات نيروي شكل دهي بر حسب درصد كاهش ارتفاع بيلت با استفاده از برنامه كامپيوتري نوشته شده به زبان MATLAB بدست آمده است. در انتها نيز نتايج حاصل از تحليل كرانه فوقاني با نتايج بدست آمده از شبيه سازي به روش حجم محدود (نرم افزار SuperForge) و همچنين نتايج تئوري و آزمايشهاي انجام شده توسط ساير محققين مقايسه شده‌اند.

كلمات كليدي

فورجينگ دقيق- چرخ دنده ساده- مدلسازي هندسي- كرانه فوقاني- بشكه‌اي شدن- حجم محدود.

Geometric Modeling, Upper Bound Analysis and Finite Volume Metal Simulation of Spur Gear Precision Forging

S. Rasaee; H. Haghighat

ABSTRACT

Parametric geometric modeling of spur gears, precision forging die set modeling and upper bound analysis were studied in this paper. Module, teeth number, pressure angle, gear width and bore radius of the spur gear were input to a computer program, written with Visual Basic in SolidWorks, and then solid model of that was constructed in SolidWorks. Then billet and precision forging die set were designed and modeled. For upper bound analyze, half pitch of a tooth with involute curve has been divided into six deformation zones. A new kinematically admissible velocity field that includes bulging of the tooth has been proposed. Forging load obtained using the upper bound were compared with theoretical and experimental results carried out in literature and also using SuperForge of FVM simulation package.

KEYWORDS

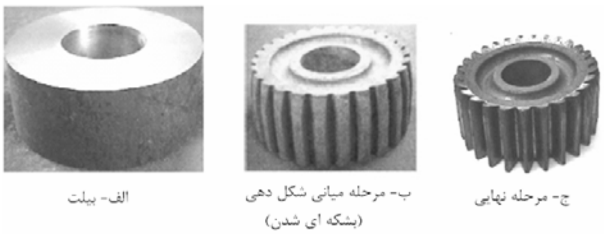
[i] دانشجوي كارشناسي ارشد، گروه مهندسي مكانيک، دانشگاه رازي كرمانشاه: Email: srasaee@gmail.com
[ii] استاديار، گروه مهندسي مكانيک، دانشگاه رازي كرمانشاه: Email: hhaghighat@razi.ac.ir

Precision forging, spur gear, geometric modeling, upper bound, bulge, finite volume.

۱- مقدمه

شكل دهي چرخ دنده‌ها با روش فورجينگ دقيق سبب كاهش اتلاف ماده خام، كاهش اتلاف انرژي حرارتي، كاهش عمليات ماشينكاري و بهبود خواص مكانيكي چرخ دنده مي‌شود [۱]. در شكل دهي چرخ دنده‌هاي ساده با اين روش، طراحي بيلت، طراحي حفره قالب و پرشدن كامل آن توسط ماده خام مهمترين مسأله در رسيدن به دقت ابعادي مورد نظر مي‌باشد. براي اين منظور پيش بيني نيروي شكل دهي و شبيه سازي جريان فلز بسيار حايز اهميت است. يكي از روش‌هاي تخمين ميزان نيروي شكل دهي روش كرانه فوقاني مي‌باشد. نيروي محاسبه شده با اين روش بيش از نيروي شكل دهي واقعي مي باشد. لذا در اين زمينه تاكنون تلاش‌هاي زيادي صورت گرفته است. در سال ۱۹۸۱، Rahman و Dean كيفيت سطح و دقت ابعادي چرخ دنده‌هاي ساده شكل داده شده به روش فورجينگ داغ را با انجام آزمايش مورد بررسي قراردادند[۲]. پس ازآن Abdul وDean درمقاله‌اي به تحليل فرايند فورجينگ دقيق چرخ دنده‌هاي ساده با روش كرانه فوقاني پرداختند[۳]. آنها پروفيل دندانه را به صورت يک خط موازي با خط تقارن دندانه فرض كردند. Choi در مقاله‌اي به تحليل فورجينگ دقيق چرخ دنده ساده با لحاظ منحني دندانه اينولوت پرداخت[۴]. وي با ارايه يک ميدان سرعت يكنواخت فرايند را تحليل كرد. Chitkara و Bhutta با فرض پروفيل خطي براي دندانه به تحليل فرايند با روش كرانه فوقاني و روش تعادل نيروها پرداختند [۵]، [۶]. Hsu در مقاله‌اي كه در سال ۲۰۰۲ منتشر كرد به تحليل فرايند فورجينگ دقيق چرخ دنده ساده به روش كرانه فوقاني پرداخت[۷]. وي در تحليل خود پديده بشكه اي شدن بيلت در طول فرايند شكل دهي را لحاظ كرد اما پروفيل دندانه را به صورت خط راست تقريب زد. در سال ۲۰۰۳، Sadeghi با فرض پروفيل خطي براي منحني دندانه به تشريح حل كرانه فوقاني اين فرايند پرداخت[۸]. وي نيز پديده بشكه‌اي شدن را در تحليل كرانه فوقاني درنظرگرفته بود اما پروفيل دندانه با خط راست تقريب زده شده بود. Chengliang و همكاران در مقاله‌اي به بررسي پر شدن كامل حفره قالب با روش المانهاي محدود پرداختند[۹]. Kang و همكاران نيز در مقاله خود در سال ۲۰۰۷ به لحاظ تغيير شكل الاستيک قالب و دقت ابعادي دندانه شكل داده شده به روش فورجينگ دقيق پرداختند[۱۰].

تا كنون هيچگونه تحليل كرانه فوقاني براي محاسبه نيروي شكل دهي بر اساس منحني واقعي چرخ دنده (اينولوت) با لحاظ پديده بشكه‌اي شدن صورت نپذيرفته است. اين پديده كه بر اثر اصطكاک بين سطح بالايي و پاييني قالب با بيلت بوجود مي‌آيد سبب مي‌شود كه تغيير شكل بيلت به صورت يكنواخت نباشد. بشكه‌اي شدن بيلت طي فرايند فورجينگ دقيق در شكل ۱ نشان داده شده و براي تحليل دقيق فرايند بايد لحاظ شود.



شكل(۱): بشكه اي شدن در فورجينگ دقيق چرخ دنده ساده [۱۱]

اين مقاله داراي سه بخش مي‌باشد. بخش اول به مدلسازي هندسي شامل مدلسازي پروفيل نيم دندانه با منحني اينولوت، چرخ دنده كامل، بيلت و اجزاء قالب فورجينگ دقيق مي‌پردازد. بخش دوم به تشريح ميدان سرعت و تحليل فرايند با روش كرانه فوقاني مي‌پردازد. دربخش سوم شبيه سازي جريان فلز داخل حفره قالب و محاسبه نيروي شكل دهي به روش حجم محدود بيان شده است. در پايان نيز براي دو نمونه چرخ دنده ساده، مدل سه بعدي، ابعاد بيلت و اجزا قالب آن آورده شده و نتايج تحليل كرانه فوقاني با نتايج شبيه سازي به روش حجم محدود و همچنين نتايج تئوري و آزمايشهاي انجام شده توسط ساير محققين مقايسه شده‌اند.

۲- مدلسازي هندسي

۲-۱- پروفيل يک نيم دندانه

پروفيل يک نيم دندانه در شكل ۲ نشان داده شده است. در اين شكل، r_r شعاع دايره ريشه، r_b شعاع دايره مبنا، r_f شعاع فيلت پاي دندانه، r_t شعاع دايره سر دندانه و r_o شعاع دايره گام مي‌باشند. زاويه هاي نشان داده شده درشكل ۲ نيز از روابط ۱تا۵ محاسبه مي‌شوند كه ϕ_R زاويه فشار در شعاع R است.

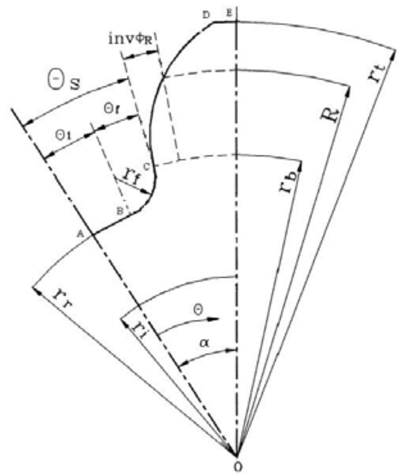
$$\alpha = \frac{\pi}{N} \quad (۱)$$

$$\theta_1 = \frac{\alpha}{2} + tan^{-1}\frac{\sqrt{r_o^2 - r_b^2}}{r_b} - \frac{\sqrt{r_o^2 - r_b^2}}{r_b} - cos^{-1}\frac{r_r^2 + 2r_r r_f + r_b^2}{2r_b(r_r + r_f)} \quad (۲)$$

$$\theta_f = \cos^{-1}\frac{r_r^2 + 2r_r r_f + r_b^2}{2r_b(r_r + r_f)} \qquad (۳)$$

$$\theta_s = \frac{\alpha}{2} + \tan^{-1}\frac{\sqrt{r_o^2 - r_b^2}}{r_b} - \frac{\sqrt{r_o^2 - r_b^2}}{r_b} \qquad (۴)$$

$$inv\phi_R = \tan^{-1}\frac{\sqrt{R^2 - r_b^2}}{r_b} - \frac{\sqrt{R^2 - r_b^2}}{r_b} \qquad (۵)$$



شکل(۲): پروفیل یک نیم دندانه

پروفیل یک نیم دندانه (شکل ۲) از چهار تکه منحني تشکيل شده است: منحني AB، منحني BC، منحني CD و منحني DE. منحني AB به صورت کماني از دايره است و بخش ريشه دندانه را تشکيل مي‌دهد، با محاسبه ابتدا و انتهاي اين کمان، مي‌توان اين قسمت از نيم دندانه را ترسيم کرد. منحنيBC فيلت پاي دندانه مي باشد و با محاسبه مکان نقاط B وC و مرکز فيلت مي‌توان منحني BC را ترسيم کرد. منحني DE هم کماني از يک دايره هم مرکز با چرخ دنده است که با توجه به مشخص بودن ابتدا، انتها و مرکز آن ترسيم مي‌شود. منحني CD منحني اينولوت مي‌باشد. ابتدا با داشتن پارامترهاي چرخ دنده (مدول و تعداد دندانه) نقاط متعددي از منحني اينولوت رسم مي شود و با گذراندن يک منحني اسپيلاين از آنها، منحني اينولوت مدل مي شود.

۲-۲- مدلسازي چرخ دنده

پس از مدلسازي پروفيل يک نيم دندانه، با انعکاس آن نسبت به خط تقارن دندانه، نيمه ديگر دندانه رسم شده و پس از آن با چيدمان شعاعي هر دندانه حول مرکز چرخ دنده به تعداد دندانه هاي چرخ دنده و به اندازه زاويه‌اي که هر دندانه به خود اختصاص مي‌دهد مدل دو بعدي چرخ دنده بدست مي‌آيد. با ايجاد مدل دوبعدي چرخ دنده و امتداد دادن آن در راستاي عمود به اندازه عرض چرخ دنده، مدل سه بعدي آن به دست مي‌آيد.

۲-۳- مدلسازي بيلت

در فرآيند فورجينگ دقيق چرخ دنده، حجم بيلت با حجم چرخ دنده برابر مي‌باشد، در اين فرآيند بيلت به صورت يک استوانه توخالي بوده که شعاع خارجي آن برابر با شعاع دايره ريشه بوده وشعاع داخلي آن برابر شعاع سوراخ داخلي چرخ دنده مي‌باشد. ارتفاع بيلت نيز از تقسيم حجم چرخ دنده بر مساحت مقطع آن به دست مي‌آيد. اگر چرخ دنده بدون سوراخ داخلي باشد بيلت به شکل استوانه توپر خواهد بود.

۲-۴- مدلسازي اجزاء قالب

اجزاء قالب فورجينگ دقيق چرخ دنده، شامل پانچ (با مندرل)، حفره قالب و بيرون انداز مي‌باشد که با استفاده از مدل توپر چرخ دنده بدست مي آيند. اگر چرخ دنده بدون سوراخ داخلي باشد، مندرل حذف شده و پانچ به صورت تخت خواهد بود.

۳- تحليل کرانه فوقاني

براي تحليل از سيستم مختصات استوانه‌اي (r,θ,z) استفاده و مبدا دستگاه مختصات در وسط ارتفاع بيلت قرار داده شده است.

۳-۱- ميدان سرعت براي نواحي مختلف

براي تحليل کرانه فوقاني فورجينگ دقيق چرخ دنده ساده‌اي با N دندانه، چرخ دنده به 2N قسمت تقسيم شده و سپس هر قسمت (نيم دندانه) به شش ناحيه مجزا مطابق شکل ۳ تقسيم شده است و فرض مي‌شود که پانچ با سرعت $u/2$ به سمت پايين و بيرون انداز با سرعت $u/2$ به سمت بالا حرکت مي‌نمايد.

براي تحليل کرانه فوقاني ابتدا بايد ميدانهاي سرعت در هر ناحيه مشخص شوند. ميدان سرعتي مجاز است که شرايط مرزي و شرط ثابت ماندن حجم را برآورده سازد. شرايط مرزي براي هر ناحيه متفاوت مي‌باشد، ازجمله اينکه در جهت عمود بر سطح قالب در محل‌هاي تماس قالب با قطعه کار، جريان ماده وجود نخواهد داشت. شرط ثابت ماندن حجم نيزبه صورت رابطه ٦ اعمال مي‌شود:

$$\dot{\varepsilon}_{rr}+\dot{\varepsilon}_{zz}+\dot{\varepsilon}_{\theta\theta}=0 \qquad (۶)$$

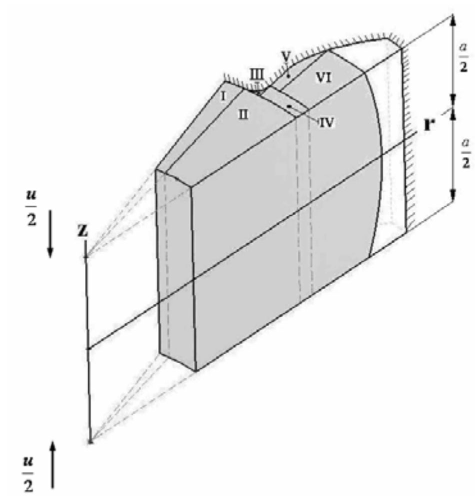
مولفه‌هاي سرعت در هر ناحيه به شرح ذيل مي‌باشند:

- ناحيه I $\left(0\le\theta\le\theta_1,\ r_i\le r\le r_r\right)$

ميدان سرعت براي اين ناحيه به صورت رابطه ۷ است:

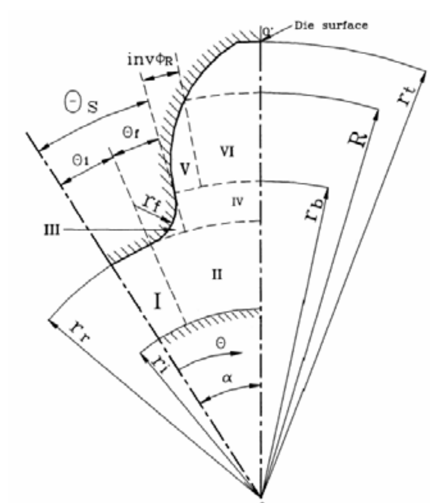
$$U_r=0$$
$$U_\theta=\frac{ur}{a}\theta \qquad (۷)$$
$$U_z=-\frac{u}{a}z$$

که a نشان دهنده ارتفاع لحظه‌اي بيلت است.



(الف): دستگاه مختصات و نواحي تغييرشکل

براي يک نيم دندانه



(ب): نماي بالاي نواحي تغييرشکل

شکل(۳): (الف) دستگاه مختصات و نواحي تغييرشکل

براي يک نيم دندانه

(ب) نماي بالاي نواحي تغييرشکل

- ناحيه II $\left(\theta_1\le\theta\le\alpha,\ r_i\le r\le r_r\right)$

ميدان سرعت براي اين ناحيه به صورت رابطه ۸ است:

$$U_r=\frac{ur}{2a}\left[1+\frac{\theta_1}{\alpha-\theta_1}\right]+\frac{C_2}{r}$$
$$U_\theta=\frac{u\theta_1}{a(\alpha-\theta_1)}r(\alpha-\theta) \qquad (۸)$$
$$U_z=-\frac{u}{a}z$$

که

$$C_2=-\frac{ur_i^2}{2a}\left[1+\frac{\theta_1}{\alpha-\theta_1}\right] \qquad (۹)$$

- ناحيه III $\left(\theta_1\le\theta\le\theta_s,\ r_r\le r\le r_b\right)$

ميدان سرعت براي اين ناحيه به صورت رابطه ۱۲ است:

$$U_r=\frac{ur}{2a}+\frac{C_3}{r}$$
$$U_\theta=\left(\frac{ur}{2a}+\frac{C_3}{r}\right)\tan\psi \qquad (۱۰)$$
$$U_z=-\frac{u}{a}z$$

که

$$C_3=C_2+\frac{ur_r^{\,2}}{2a}\left(\frac{\theta_1}{\alpha-\theta_1}\right) \qquad (۱۱)$$

- ناحيه IV $\left(\theta_s\le\theta\le\alpha,\ r_r\le r\le r_b\right)$

ميدان سرعت براي اين ناحيه به صورت رابطه ۱۲ است:

$$U_r=\frac{ur}{2a}+\frac{u}{4a(\alpha-\theta_s)}\frac{M}{r}+\frac{ur_f^2}{2a(\alpha-\theta_s)}\frac{N}{r}+\frac{C_3}{2(\alpha-\theta_s)}\left(\frac{N-D}{r}\right)+\frac{C_4}{r}$$
$$U_\theta=\left(\frac{ur}{2a}+\frac{C_3}{r}\right)\left(\frac{\alpha-\theta}{\alpha-\theta_s}\right)\tan\psi \qquad (۱۲)$$
$$U_z=-\frac{u}{a}z$$

که

$$M = \sqrt{(r^2 - r_r^2)[(r_r + 2r_f)^2 - r^2]}$$

$$N = \sin^{-1}\left[\frac{-r^2 + (r_r + r_f)^2 + r_f^2}{2r_f(r_r + r_f)}\right]$$

$$D = \tan^{-1}\left[\frac{r_r^4 + 4r_r^3 r_f + 4r_r^2 r_f^2 - r^2 r_r^2 - 2r^2 r_r r_f - 2r_f^2 r^2}{r_r(r_r + 2r_f)\sqrt{(r^2 - r_r^2)[(r_r + 2r_f)^2 - r^2]}}\right] \qquad (۱۳)$$

$$C_4 = C_2 + \frac{u}{2a}\left[\frac{\theta_1}{\alpha - \theta_1} r_r^2 - \frac{\pi}{2(\alpha - \theta_s)} r_f^2\right]$$

- ناحيه V $\left(\theta_s \le \theta \le \theta_s + inv\phi_R,\ \ r_b \le r \le R\right)$

میدان سرعت براي اين ناحيه به صورت رابطه ١٤ است:

$$U_r = \frac{Kr}{2}\left(1 - Bz^2\right) + \frac{C_5}{r}$$

$$U_\theta = \left[\frac{Kr}{2}\left(1 - Bz^2\right) + \frac{C_5}{r}\right]\tan\varphi \qquad (۱۴)$$

$$U_z = -K\left(1 - B\frac{z^2}{3}\right)z$$

B پارامتري است که شدت بشکه‌اي شدن را نشان مي‌دهد. اگر B مساوي صفر باشد، ميدان سرعت به يک ميدان سرعت يکنواخت تبديل مي‌شود.

- ناحيهVI $\left(\theta_s + inv\phi_R \le \theta \le \alpha,\ \ r_b \le r \le R\right)$

میدان سرعت براي اين ناحيه به صورت رابطه ١٥ است:

$$U_r = \left[\frac{K}{r}\frac{(r^2 - r_b^2)^{\frac{3}{2}}}{r_b}(1 - Bz^2)\right]\frac{1}{\alpha - (\theta_s + inv\phi_R)}$$
$$+ \left[\frac{C_5}{r}\frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r_b}\right]\frac{1}{\alpha - (\theta_s + inv\phi_R)}$$
$$+ \left[\frac{C_5}{r}\arctan\left(\frac{r_b}{\sqrt{r^2 - r_b^2}}\right)\right]\frac{1}{\alpha - (\theta_s + inv\phi_R)}$$
$$+ \frac{Kr}{2}(1 - Bz^2) + \frac{C_6}{r} \qquad (۱۵)$$

$$U_\theta = \frac{Kr}{2}\frac{(\alpha - \theta_s)(1 - B\ z^2)}{\alpha - (\theta_s + inv\phi_R)}\frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r_b}$$
$$+ \frac{C_5}{r}\frac{\alpha - \theta_s}{\alpha - (\theta_s + inv\phi_R)}\frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r_b}$$

$$U_z = -K\left(1 - B\frac{z^2}{3}\right)z$$

که:

$$C_6 = \frac{ur_b^2}{2a}\left[\frac{u}{4a(\alpha - \theta_s)}\right](M|_{r=r_b}) + C_4$$
$$+ \left[\frac{ur_f^2}{2a} + \frac{C_3}{2}\right]\left[\frac{N|_{r=r_b}}{(\alpha - \theta_s)}\right] - \frac{C_3(D|_{r=r_b})}{2(\alpha - \theta_s)} \qquad (۱۶)$$
$$- \frac{\pi C_5}{2[\alpha - (\theta_s + inv\phi_R)]}$$

۳-۲- محاسبه توان داخلي

مولفه هاي نرخ کرنشها ازرابطه‌هاي ١٧ محاسبه مي‌شوند:

$$\dot{\varepsilon}_{rr} = \frac{\partial U_r}{\partial r}$$
$$\dot{\varepsilon}_{\theta\theta} = \frac{1}{r}\left(\frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + U_r\right) \qquad (۱۷)$$
$$\dot{\varepsilon}_{zz} = \frac{\partial U_z}{\partial z}$$

با استفاده از روابط فوق نرخ کرنش موثر، $\dot{\bar{\varepsilon}}$ از رابطه ١٨ قابل محاسبه است:

$$\dot{\bar{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3}}\sqrt{\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}} \qquad (۱۸)$$

و توان داخلي از رابطه ١٩ بدست مي‌آيد:

$$\dot{W}_i = \int_V \bar{\sigma}_f \dot{\bar{\varepsilon}} dV \qquad (۱۹)$$

توان داخلي کل براي يک نيم دندانه از رابطه ٢٠ محاسبه مي شود:

$$\sum \dot{W}_i = \dot{W}_{iI} + \dot{W}_{iII} + \dot{W}_{iIII} + \dot{W}_{iIV} + \dot{W}_{iV} + \dot{W}_{iVI} \qquad (۲۰)$$

به عنوان نمونه $\dot{W}_{iI}$ به صورت زير محاسبه مي‌شود:

$$\dot{W}_{iI} = \frac{2\bar{\sigma}_f}{\sqrt{3}}\int_{r_i}^{r_r}\int_0^a\int_0^{\theta_s}\frac{u}{a}d\theta\ dz\ dr \qquad (۲۱)$$

در مورد ساير نواحي رابطه‌اي مشابه رابطه فوق مي‌توان بدست آورد.

۳-۳- محاسبه توان برشي

اين عبارت در سطوحي که ناپيوستگي سرعت وجود دارد (مرز نواحي تغيير شکل) در نظرگرفته مي‌شود و به صورت رابطه ٢٢ قابل محاسبه است:

$$\dot{W}_s = \frac{\bar{\sigma}_f}{\sqrt{3}}\int_S |\Delta V| dS \qquad (۲۲)$$

که $|\Delta V|$ مقدار ناپيوستگي سرعت و dS المان سطح بر روي سطوح ناپيوستگي سرعت است. توان برشي کل براي يک نيم دندانه از رابطه ٢٣ محاسبه مي‌شود:

$$\sum \dot{W}_s = \dot{W}_{sI-II} + \dot{W}_{sII-III} + \dot{W}_{sII-IV} + \dot{W}_{sIV-V} + \dot{W}_{sIV-VI} + \dot{W}_{sV-VI} \quad (۲۳)$$

به عنوان نمونه در سطح مشترک ناحیه‌هاي I و II :

$$\dot{W}_{sI-II} = \frac{\overline{\sigma}_f}{\sqrt{3}} \int_0^a \int_{r_i}^{r_r} |\Delta V| dr\, dz$$
$$|\Delta V| = \frac{ur}{2a}\left[1 + \frac{\theta_1}{(\alpha - \theta_1)}\right] + \frac{C_2}{r} \quad (۲۴)$$

در مورد سایر سطوح مشترک رابطه‌اي مشابه رابطه فوق مي‌توان بدست آورد.

٤-٣- محاسبه توان اصطکاکي

توان اصطکاکي به صورت رابطه ۲۵ قابل محاسبه است:

$$\dot{W}_f = \frac{m\overline{\sigma}_f}{\sqrt{3}} \int_S |\Delta V| dA \quad (۲۵)$$

که dA المان سطح بر رروي سطوح تماس قطعه با دیواره‌هاي قالب، m ثابت اصطکاک و $|\Delta V|$ مقدار ناپیوستگي سرعت بر روي سطح تماس قطعه کار با دیواره قالب است. توان اصطکاکي در سطوح تماسي بیلت و قالب، بیلت و پانچ و بیلت و مندرل وجود دارد و باید براي این نواحي محاسبه شود. توان اصطکاکي براي یک نیم دندانه از رابطه ۲۶ محاسبه مي‌شود:

$$\sum \dot{W}_f = 2\dot{W}_{fI,II,III,IV,V,VI-Punch} + \dot{W}_{fI-Die} + \dot{W}_{fIII-Die} + \dot{W}_{fV-Die} + \dot{W}_{fI-Mandrel} + \dot{W}_{fII-Mandrel} \quad (۲۶)$$

به طور نمونه توان اصطکاکي در سطح تماس پانچ با قطعه کار در ناحیه I از رابطه ۲۷ محاسبه مي‌شود:

$$\dot{W}_{fI-Punch} = \frac{m\overline{\sigma}_f}{\sqrt{3}} \int_0^a \int_0^{\theta_s} r_i |\Delta V| d\theta\, dz \quad (۲۷)$$

که در رابطه فوق:

$$|\Delta V| = \sqrt{U_\theta^2 + U_z{}^2} = \frac{u}{a}\sqrt{z^2 + r^2\theta^2} \quad (۲۸)$$

توان خارجي لازم براي شکل دهي یک چرخ دنده با N دندانه از رابطه ۲۹ و نیرو از رابطه ۳۰ به دست مي‌آید:

$$\dot{W}_{total} = 2N\dot{W} \quad (۲۹)$$

$$F_{ave} = \frac{\dot{W}_{total}}{u} \quad (۳۰)$$

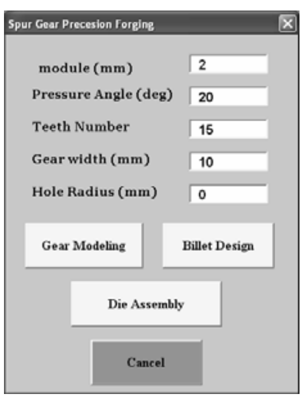
که F_{ave} نیروي متوسط شکل دهي مي‌باشد.

٤- اجراي برنامه ها براي دو نمونه چرخ دنده ساده

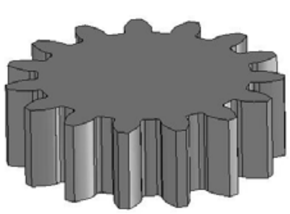
برنامه‌هاي کامپیوتري براي مدلسازي هندسي در محیط نرم افزارSolidWorks و به زبان Visual Basic نوشته شده و برنامه‌هاي کامپیوتري براي تحلیل کرانه فوقاني در محیط نرم افزار MATLAB نوشته شده‌اند. این برنامه‌ها براي دو نمونه چرخ دنده ساده اجرا شده‌اند. با اجراي برنامه مدلسازي هندسي، فرم نشان داده شده در شکل ۴ ظاهر شده و کاربر بایستي مشخصات هندسي چرخ دنده (مدول، زاویه فشار، تعداد دندانه، پهناي چرخ دنده و شعاع سوراخ داخلي) را وارد کند. مشخصات نمونه اول در شکل ۴ نشان داده شده است. پس از آن با اجراي دستورات نشان داده شده در این فرم، بیلت و اجزاء قالب فورجینگ دقیق آن در محیط نرم افزار SolidWorks مدل مي شوند. در شکل ۵ مدل چرخ دنده، در شکل ۶ بیلت طراحي شده براي نمونه اول و در شکل ۷ اجزاء قالب فورجینگ دقیق آن نشان داده شده است. نمونه اول بدون سوراخ داخلي است و بنابراین بیلت نیز بدون سوراخ بوده، مندرل حذف شده و پانچ تخت مي‌باشد.

مشخصات ابعادي چرخ دنده نمونه دوم مشابه نمونه اول بوده ولي این نمونه داراي سوراخ داخلي با شعاع برابر ۵ میلیمتر مي‌باشد.

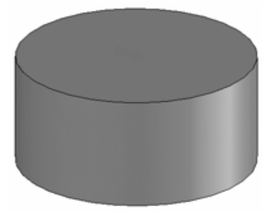
در شکل‌هاي ۸ و ۹ مدل سه بعدي چرخ دنده وبیلت و درشکل ۱۰ اجزاء قالب فورجینگ دقیق آن آورده شده است.



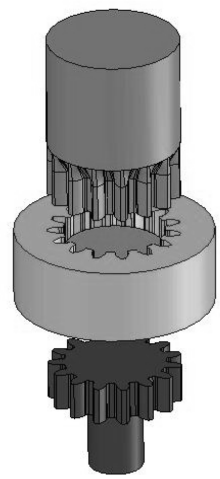
شکل(٤): وارد کردن مشخصات هندسي نمونه اول



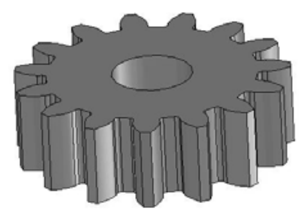
شکل(٥): مدل سه بعدي نمونه اول
(اجراي دستور Gear Modeling)



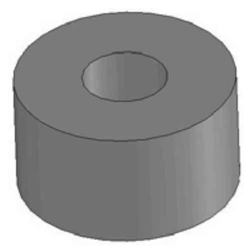
شکل(٦): مدل سه بعدي بيلت (اجراي دستور Billet Design)



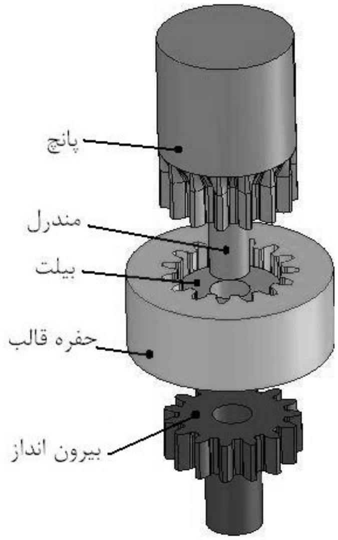
شکل(٧): اجزاء قالب فورجينگ دقيق نمونه اول (اجراي دستور Die Assembly)



شکل(٨): مدل سه بعدي نمونه دوم (اجراي دستور Gear Modeling)



شکل(٩): مدل سه بعدي بيلت (اجراي دستور Billet Design)

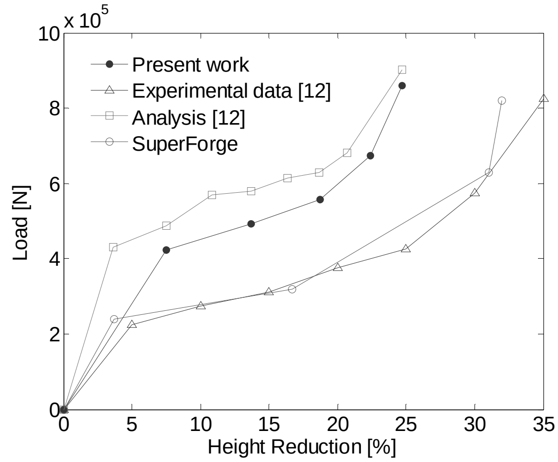


شکل(١٠): اجزاء قالب فورجينگ دقيق نمونه دوم (اجراي دستور Die Assembly)

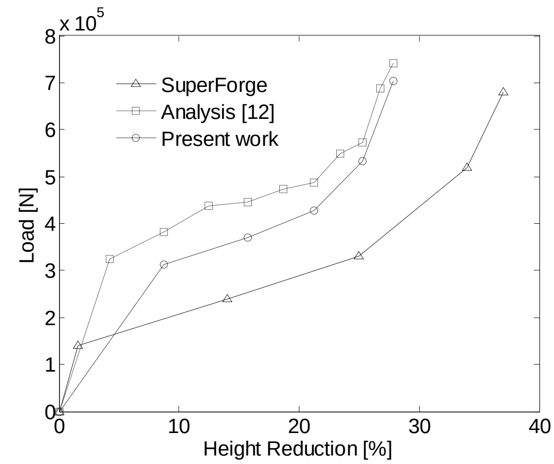
به دليل وجود سوراخ داخلي در اين نمونه، بيلت داراي سوراخ داخلي و پانچ با مندرل متصل به آن مي‌باشد.

٥- بحث و بررسي نتايج

براي شبيه سازي فرايند فورجينگ از نرم افزار SuperForge استفاده شده است. مدل سه بعدي بيلت و اجزا قالب نمونه‌هاي اول و دوم به محيط اين نرم افزار وارد شدند. بيلت از جنس Al 2024 بوده و رفتار تنش موثر بر حسب کرنش موثر آن به صورت $\overline{\sigma} = 358\overline{\varepsilon}^{0.156}$ مي‌باشد[١٢]. با فرض ثابت اصطکاک برشي ($m = 0.1$) منحني تغييرات نيروي شکل دهي نسبت به درصد کاهش ارتفاع بيلت براي هر دو نمونه ترسيم شد. نتايج تحليل کرانه فوقاني براي نمونه اول (بدون سوراخ داخلي) با لحاظ بشکه‌اي شدن، شبيه سازي به روش حجم محدود (نرم افزار SuperForge) و نتايج تئوري و آزمايش اخذ شده از مرجع [١٢] در شکل ١١ نشان داده شده است. نتايج تحليل کرانه فوقاني با لحاظ بشکه‌اي شدن براي نمونه دوم (با سوراخ داخلي)، شبيه سازي به روش حجم محدود و نتايج تئوري اخذ شده از مرجع [١٢] در شکل ١٢ مقايسه شده‌اند.



شكل(۱۱): مقايسه منحني هاي نيروي شكل دهي بر حسب درصد كاهش ارتفاع بيلت براي تحليل كرانه فوقاني با لحاظ پديده بشكه اي شدن(كار حاضر)، شبيه سازي حجم محدود، نتايج آزمايش و نتايج تئوري مرجع [۱۲] براي نمونه اول



شكل(۱۲): مقايسه منحني هاي نيروي شكل دهي بر حسب درصد كاهش ارتفاع بيلت براي تحليل كرانه فوقاني با لحاظ بشكه اي شدن (كار حاضر)، شبيه سازي حجم محدود و نتايج تئوري مرجع [۱۲] براي نمونه دوم

همانگونه كه در شكل ۱۱ ديده مي‌شود، پديده بشكه‌اي شدن سبب مي‌شود كه نتايج ارايه شده نسبت به نتايج تئوري مرجع [۱۲] به نتايج آزمايش نزديكتر شوند. همچنين نتايج شبيه سازي به ميزان قابل قبولي با نتايج آزمايش برابر بوده و بنابراين مي‌توان به نتايج نرم افزارSuperForge استنادكرد.

حين آزمايش و بر اثر فشار داخلي، حفره قالب دچار انبساط الاستيک مي‌شود. اين افزايش در ابعاد حفره و همچنين لقي بين پانچ و حفره قالب، سبب مي‌شود كه مقدار اندكي از ماده(حين تغيير شكل) از فضاي ايجاد شده بين ديواره قالب و پانچ به بيرون جريان پيدا نمايد. اما به دليل آنكه در تحليل قالبها صلب فرض شده‌اند مقدار كورس پانچ در تحليل تئوري كمتر از مقدار آزمايش مي‌باشد. از مقايسه نيروي مورد نياز براي شكل دهي كامل چرخ دنده بر روي نمودار حاصل از تحليل، با نقطه نظير آن بر روي نمودارهاي حاصل از آزمايش و شبيه سازي (در شكل هاي ۱۱ و ۱۲)، مي‌توان به نزديک بودن نيروهاي حاصل از تحليل، شبيه سازي و آزمايش پي برد. براي مثال، در نمونه اول مقدار نيروي لازم محاسبه از تحليل و با درنظر گرفتن بشكه اي شدن 85×10^5 نيوتن و مقدار همين نيرو از آزمايش 82×10^5 نيوتن محاسبه شده است كه بسيار با يكديگر همخواني داشته‌اند.

با مقايسه شكل‌هاي ۱۱ و ۱۲ نتيجه مي‌شود كه نيروي شكل دهي در نمونه دوم كمتر از نمونه اول مي‌باشد. زيرا با وجود سوراخ داخلي، سطحي از بيلت كه با پانچ در تماس است كاهش يافته و باعث كاهش توان اصطكاكي ناشي از تماس بيلت و پانچ مي شود، همچنين وجود سوراخ داخلي سبب كوچک شدن نواحي تغيير شكل خواهد شد كه كاهش توان داخلي و برشي را در پي خواهد داشت.

٦- نتايج

در پژوهش حاضر، فورجينگ دقيق چرخ دنده‌هاي ساده با روش كرانه فوقاني مورد تحقيق قرار گرفت. از مدلسازي هندسي و تحليل انجام شده، نتايج زير قابل بيان مي‌باشند:

۱- مدلسازي پارامتريک و سه بعدي، سبب مي‌شود كه برنامه‌هاي نوشته شده براي هر چرخ دنده ساده با ابعاد دلخواه قابل اجرا بوده و وروديهاي نرم افزار حجم محدود به طور خودكار و سريع آماده شوند.

۲- با افزايش درصد كاهش ارتفاع بيلت، نيروي شكل دهي افزايش مي يابد و نيروي شكل دهي لازم برابر مقدار نيرو در لحظه پر شدن حفره قالب مي‌باشد كه با داشتن بيشترين نيرو مي‌توان ظرفيت ماشين شكل دهي لازم را تعيين نمود.

۳- لحاظ نمودن پديده بشكه اي شدن در تحليل كرانه فوقاني سبب مي‌شود كه نتايج تحليل به مقادير واقعي نزديكتر شوند.

٤- با افزايش شعاع سوراخ داخلي نيروي شكل دهي كاهش مي‌يابد. بنابراين براي كاهش نيروي مورد نياز شكل دهي استفاده از بيلت با سوراخ داخلي توصيه مي شود.

۷- مراجع

[۱] Dean, T. A.; "The Net Shape Forming of Gears", Materials and Design, Vol. 21, No. 2, p.p. 271-278, 2000.

[۲] Abdel-Rahman, A. R. O.; Dean, T. A.; "The Quality of Hot Forged Spur Gear Forms, Part II: Tooth Form Accuracy", Int. J. Mach. Tools Des. Res., Vol. 21, No. 2, p.p. 129-141, 1981.

[۳] Abdul, N. A.; Dean, T. A.; "An Study of the Forging of Spur Gear Forms", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 26, No. 2, p.p. 113-123, 1986.

[۴] Choi, J. C.; Choi, Y.; "A Study on the Forging of External Spur Gears:Upper-Bound Analyses and Experiments", International Journal of Machine Tools and Manufactute, Vol. 38, p.p. 1193-1208, 1998.

[۵] Chitkara, N. R.; Bhutta, M. A.; "Forging and heading of hollow super gear forms: an analysis and some experiments", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 41, p.p. 1159–1189, 1999.

[۶] Chitkara, N. R.; Bhutta, M. A.; "Shape heading of splines and solid super gear forms: an analysis and some experiments", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 43, p.p. 1073–1106, 2001.

[۷] Hsu, H. H.; "A Study on Precision Forging of Spur Gear Forms and Spline by the Upper Bound Method", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 44, p.p. 1543–1558, 2002.

[۸] Sadeghi, M. H.; "Gear Forging: Mathematical Modeling and Experimental Validation", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 125, p.p. 753-762, 2003.

[۹] Chengliang, H.u.; Kesheng, W.; Quankun, L.; "Study on a new technological scheme for cold forging of spur gears", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 187–188, p.p. 600–603, 2007.

[۱۰] Kang, J. H.; Lee, K. O.; Je, J. S.; Kang, S. S.; " Spur gear forging tool manufacturing method considering elastic deformation due to shrink fitting", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 187–188, p.p. 14–18, 2007.

[۱۱] Cai, J.; Dean, T. A.; Hu, Z. M.; "Alternative die designs in net-shape forging of gears", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 150, Issues 1-2, p.p. 48-55, 2004.

[۱۲] Choi, J.; Cho, H. Y.; Jo, C. Y.; "An Upper-bound Analysis for the Forging of Spur Gears", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 104, p.p. 67-73, 2000.