

## تحلیل فرآیندهای آهنگری به کمک روش حد بالای اجزایی (UBET)

### کارن ابری نیا

استاد یار گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

### طاهر زمانی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۷۹/۱۲/۶، تاریخ تصویب ۸۲/۷/۱۲)

### چکیده

تحلیل فرآیندهای آهنگری به کمک روش حد بالای اجزایی برای حل مسائل پیچیده آهنگری بخصوص آهنگری با قالب بسته بسیار مناسب است. تحلیل فرآیند با تقسیم سطح قطعه به المانهای استاندارد از پیش تعیین شده و میدان های سرعت معین کلی مربوط به آنها با استفاده از تئوری حد بالا انجام گرفت. با استفاده از تئوری ارائه شده هر دو دسته مسائل کرنش مسطح و تقارن محوری حل شده اند و مثالهایی برای هر دو ارائه شده است. برای حالت کرنش مسطح از المان های مستطیلی و ذوزنقه ای شکل و برای مسائل محور متقارن از المان های رینگ با مقاطع مثلثی و مربع شکل استفاده شده است. میدان های سرعت برای هر المان شکل کلی استاندارد دارند که با بکارگیری آنها در کنار هم می توان شکل خاص میدان سرعت را برای هر مسئله بدست آورد. در این مقاله میدان های سرعت المانها با بهینه سازی ثابت های آنها نسبت به کارهای قبلی بهبود یافته اند. میدان سرعت در هر المان بر اساس فرض تراکم ناپذیری ماده بدست آمده است. با استفاده از روابط حاصل از میدان های سرعت مؤلفه های مختلف مربوط به توان حد بالا بدست آمده و بهینه می شوند. محاسبه نیروی لازم و تغییر شکل در حین فرآیند با استفاده از این روش ارائه می گردند. به وسیله برنامه کامپیوتری تدوین شده، تغییر شکل قطعه در مراحل مختلف فرآیند را می توان بدست آورد و بدین ترتیب شبیه سازی کامپیوتری فرآیند امکان پذیر می گردد. تاثیر عوامل مختلف از قبیل ابعاد قالب، پلیسه، شرایط اصطکاکی و... بر فرآیند بررسی و مورد تحلیل و مشاهده قرار گرفتند. نتایج بدست آمده از این تئوری با نتایج تئوری و تجربی دیگران مقایسه و بهبود خوبی مشاهده شده است.

**واژه های کلیدی:** آهنگری، حد بالا، حد بالای اجزایی، کرنش مسطح، تقارن محوری، میدان سرعت - المان

### مقدمه

بسیاری جواب های نسبتاً قابل قبولی می دهد. مزیت این روش روابط و تئوری ساده تر نسبت به حالت سه بعدی و هزینه و زمان کمتر نسبت به تحلیل های سه بعدی است. همچنین بسیاری از قطعاتی که تقارن محوری ندارند و تحلیل آنها بصورت سه بعدی پیچیده است، با روش کرنش صفحه ای قابل تحلیل هستند.

از طرف دیگر بسیاری از قطعات در صنعت دارای تقارن محوری هستند و وجود یک تئوری تحلیلی برای چنین قطعاتی بسیار سودمند است.

روش حد بالای اجزایی (UBET) که در این مقاله ارائه شده است در واقع همان روش حد بالا است که برای یک سلسله مناطق از پیش تعریف شده که آن ها را المان می نامیم، بکار گرفته شده است. این المان ها بصورت المان های استاندارد برای حل مسائل بکار می روند.

پیش بینی جریان مواد و بار لازم برای فرآیند آهنگری در افزایش قدرت طراحی قالب ها و عملیات آهنگری از اهمیت بالایی برخوردار است. آگاهی از مقدار بار لازم برای انجام فرآیند طراح را در انتخاب مناسب پرس و طراحی فرآیند یاری می کند. اما مهمتر این است که پیش بینی جریان مواد طراح را قادر می سازد تا تعداد مراحل آهنگری و شکل صحیح و بهینه قالب ها و ابزار را با کمترین هزینه و زمان وبدون نیاز به سعی و خطا های مکرر و نهایتاً با رسیدن به یک محصول بدون عیب و نقص، بدست آورد.

تحلیل مسائل آهنگری به دو روش کرنش مسطح و تقارن محوری در این مقاله ارائه شده اند. تحلیل حالت کرنش مسطح برای آهنگری مقاطع مختلف اگر چه نسبت به حالت سه بعدی که در واقعیت رخ میدهد، یک تقریب می باشد اما در موارد

تحلیل قرار گرفته اند. از روش ارائه شده در مرجع (۷) برای مسائل کرنش صفحه ای و مرجع (۵) برای حالت تقارن محوری استفاده شده و با بهینه سازی ثابت های معادلات سرعت میدان های سرعت بهبود داده شده اند. برای فرایند کرنش مسطح آهنگری، یک قطعه با سطح مقطع مستطیل و برای فرایند محور متقارن، آهنگری یک قطعه با سطح مقطع جان-بال انتخاب شده اند.

### تئوری

در این پژوهش از روش حد بالای اجزائی که شکل توسعه یافته تئوری حد بالا است استفاده گردیده است. در تئوری حد بالا تنها به روابط سینماتیکی پرداخته می شود و روابط تعادل تنش به حساب نمی آیند. براساس میدان سرعتی که از لحاظ سینماتیکی مجاز می باشد نرخهای کرنش و براساس آنها مولفه های مختلف انرژی مربوط به تغییرشکل داخلی، انفصال سرعت ها و اصطکاک، با کمینه سازی تابع کل انرژی بدست می آیند.

### روش حد بالای اجزائی

در روش حد بالای اجزائی میدان تغییرشکل به نواحی ساده تر و قابل تعریف تری به نام المان تقسیم می گردند. این المانها شکل کلی داشته و تقریباً قابل استفاده در هر سطح مقطعی هستند. میدان سرعت مجاز برای هر المان بطور جداگانه و بشکل کلی تعریف می گردد. سپس با استفاده از این میدان سرعت حد بالا برروی بار یا فشار فرایند برای هر المان بدست می آید و از کنار هم قرار دادن این المانها در کنار هم حد بالای کل بدست می آید. برای تطبیق المانها برای یک مسئله خاص از شرایط مرزی آن مسئله استفاده می گردد. در این مقاله میدان های سرعت با تغییراتی در ثابت های آنها و بهینه سازی آنها بهبود یافته اند.

برای تحلیل مسائل کرنش مسطح از المان های دوزنعه ای و چهارگوش بلند و چهارگوش تخت و برای تحلیل مسائل محور متقارن از المان های رینگی با مقاطع مربع و مثلث استفاده می شود.

اولین کسی که ایده روش حد بالای فوقانی را مطرح کرد کودو [۱] بود. وی با معرفی نواحی سیلندر شکل برای تحلیل فرایند آهنگری- اکستروژن، فکر استفاده از این روش را ارائه داد. نتایج وی تشابه خوبی با نتایج تجربی داشت.

بعد ها کوبایاشی [۲] روش حد بالای المانی را توسعه داد و علاوه بر المان های معرفی شده از طرف کودو المان های دارای سطوح انحنا را مورد استفاده قرار داد. روش وی به علت پیچیدگی بیش از حد و فرضیات ساده کننده متعدد چندان موفق نبود. از آنجائیکه روش های فوق بطور کلی از لحاظ تقسیم بندی سطح مقطع قطعه کار دچار ضعف بودند، مکدرمت و براملی [۳] با معرفی هشت المان توانستند تقریباً کلیه شکلهای آهنگری را تقسیم بندی نمایند. نتایج بدست آمده از روش ایشان سازگاری خوبی با نتایج حاصل از آزمایش نشان نمی داد.

کرامپهورن و براملی [۴] با کاهش تعداد المان های مکدرمت به پنج المان چهارگوش و مثلثی و بهبود روش کمینه سازی تابع انرژی موفق شدند جوابهای مناسبتری بدست آورند.

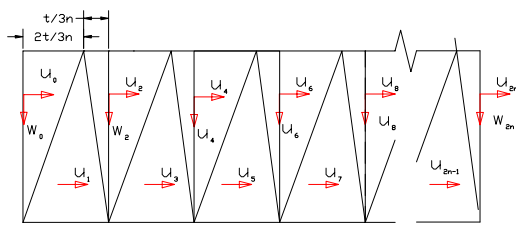
کیوچی و موراتا [۵] با استفاده از المانهای کرامپتون و براملی میدانهای سرعت کلی ارائه نموده و با سازگار کردن این میدانهای سرعت برای فرایند های مختلف جوابهای خوبی بدست آوردند.

لی، کیم و بائی [۶] از روش فوق برای طراحی فورج دقیق استفاده کردند. همچنین از این روش برای تحلیل فرایند های کرنش صفحه ای و سه بعدی استفاده شده است.

اودیین و راوالارد [۷] با معرفی المان های مستطیلی و دوزنعه ای مسائل کرنش صفحه ای را مورد تحلیل قرار دادند و جوابهای مناسبی بدست آوردند.

هو [۸] با استفاده از شیوه فوق به بررسی جریان مواد در آهنگری قالب بسته پرداخت. وی جریان مواد را در یک قالب آهنگری با حفره عمیق و بر روی مرزمنطقه مرده فلز در منطقه تغییر شکل با روش فوق مورد مطالعه قرار داد.

در این مقاله نتایج پژوهش برروی مسائل آهنگری کرنش مسطح و محور متقارن مورد مطالعه و



شکل ۳: نمونه ای از تقسیم المان تخت به سلول ها و مثلث های صلب (کرنش مسطح).

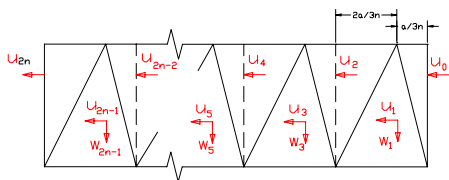
### المان چهارگوش بلند

در شکل (۴) یک نمونه از انواع المان های چهارگوش بلند ارائه شده است. میدان های سرعت برای این المان عبارتند از:

$$u_{2j-1} = (1 - \frac{j}{n})V \dots \dots \dots j = 0, 1, \dots, n$$

$$u_{2k-1} = (1 - \frac{3k-2}{3n})V \dots \dots \dots k = 1, 2, \dots, n$$

$$w_{2k-1} = \frac{t}{a}V$$



شکل ۴: نمونه ای از المان چهارگوش بلند و تقسیم آن به سلول ها و مثلث های صلب (کرنش مسطح).

### المان دوزنقه ای

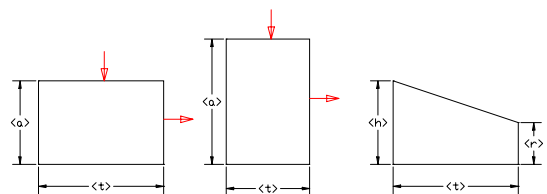
در این قسمت روابط مربوط به میدان های سرعت و انرژی تغییر شکل داخلی برای المان دوزنقه ای در یک حالت از تقسیم بندی به سلولها و مثلثهای صلب ارائه شده است (شکل ۵). میدان های سرعت عبارتند از:

$$u_j = \frac{1}{k^{(j)}}V$$

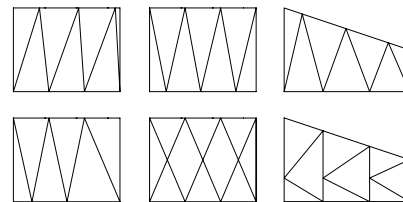
$$w_j = \frac{\tan \alpha}{k^{(j)}}V \dots \dots j = 0, 1, 2, \dots, n$$

### المان های کرنش مسطح

شکل کلی المان ها یی که برای تحلیل فرآیند های کرنش مسطح بکار می روند در شکل (۱) ارائه شده است. برای بدست آوردن میدانهای سرعت و روابط اتلاف انرژی با الهام گیری از میدان خطوط لغزش، المان ها به سلول های کوچکتری تقسیم می شوند که هر کدام از این سلولها از چند مثلث صلب تشکیل شده اند که می توانند در امتداد مشترک به روی هم بلغزند (شکل ۲). میدانهای سرعت و پس از آن توابع انرژی با استفاده از روابط حجم ثابت بدست می آیند.



شکل ۱: المان های مورد استفاده برای فرآیند آهنگری (کرنش مسطح).



شکل ۲: سلول ها و مثلث های صلب تشکیل دهنده المان (کرنش مسطح).

### المان چهارگوش تخت

در شکل (۳) یک حالت از تقسیم المان تخت به سلول ها و مثلث های صلب نشان داده شده است. روابط میدان سرعت برای المان به صورت زیر می باشد.

$$u_{2j} = j \cdot \frac{t}{n}V \dots \dots \dots j = 0, 1, 2, \dots, n$$

$$w_{2j} = V \dots \dots \dots j = 0, 1, 2, \dots, n$$

$$u_{2j-1} = [\frac{2}{3n} + \frac{j-1}{n}] \frac{t}{a}V \dots \dots j = 1, 2, \dots, n$$

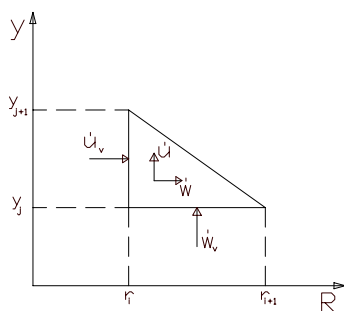
### المان رینگی مثلثی

این المان در شکل (۷) نشان داده شده است. با فرض اینکه توزیع مؤلفه سرعت در راستای عمود بر سطح روی سطوح قائمه المان یکنواخت و ثابت بوده و المان در امتداد وتر خود با سطح قالب یا ابزار در تماس است. میدان سرعت پیشنهادی برای این المان به شکل زیر است:

$$u = [(w_{die} - w_v) \frac{l}{2h}] - [(w_{die} - w_v) \frac{l}{2R} - u_v] \frac{r_i}{R}$$

$$w = [(w_{die} - w_v) \frac{l}{2h}] \frac{y - y_j}{R} + w_v + w_v$$

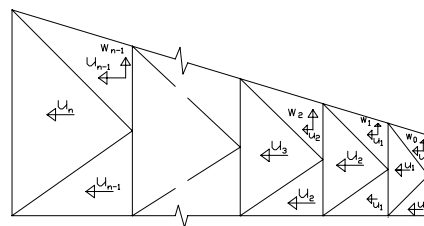
که در آن  $w_{die}$  سرعت حرکت قالب،  $l = r_{i+1} - r_i$  و  $h = y_{j+1} - y_j$  است.



شکل ۷: المان رینگی مثلثی (محور متقارن).

### المان بندی قطعه کار

نکته مهمی که در تقسیم بندی سطح مقطع به المانهای استاندارد باید مورد توجه قرار گیرد اینست که المان بندی باید بگونه ای باشد که المان ها روی هر مرز خود فقط یک سرعت ورودی و یا خروجی داشته باشند. برای حصول چنین هدفی از تمامی نقاط شکست قالب و سطح آزاد قطعه خطوطی به موازات و در امتداد عمود بر محور تقارن رسم می شود. هرگاه این خطوط سطح قالب را در نقطه ای غیر از یک نقطه شکست قطع کند، این نقطه نیز بعنوان یک محل شکست در نظر گرفته می شود. (استفاده از مفهوم انعکاس، شکل ۸). با این روش تمامی سطح مقطع قطعه به المانهای مثلثی و چهارگوش تقسیم می شود. حاصل المان بندی سطح مقطع مورد تحلیل در این مقاله در شکل (۹) ارائه شده است.



شکل ۵: نمونه ای از المان دوزنقه ای و تقسیم آن به سلول ها

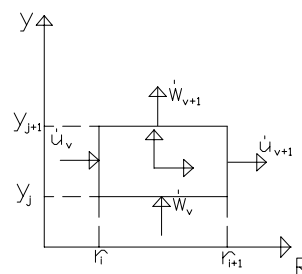
و  
مثلث های صلب (گرنش مسطح).

### المانهای محور متقارن

برای تحلیل فرایندهای تقارن محوری از المانهای استاندارد رینگی مثلثی و چهارگوش استفاده شده است. برای اختصار در اینجا تنها به دو نوع از آنها اشاره می شود و میدانهای سرعت نیز ارائه می شوند.

### المانهای رینگی چهار گوش

این المان در شکل (۶) نشان داده شده است. فرض می شود که توزیع سرعت روی سطوح المان و در راستای عمود بر آنها یکنواخت و ثابت است.



شکل ۶: المان رینگی چهارگوش (محور متقارن).

میدان های سرعت پیشنهادی برای این المان به شکل زیر می باشد:

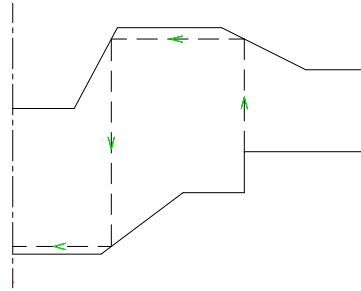
$$u = -\frac{1}{2} \left[ \frac{w_{v+1} - w_v}{h} \right] \left[ R - \frac{r_i^2}{R} \right] + \frac{u r_i}{R}$$

$$w = \frac{(w_{v+1} - w_v)(y - y_j)}{h} + w_v$$

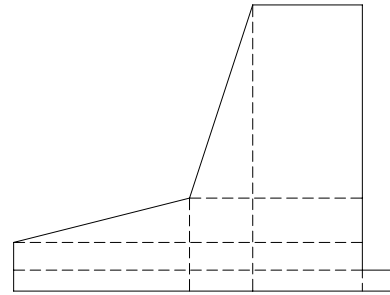
که در آن  $h = y_{j+1} - y_j$  است.

### تولید مجدد المان

در تحلیل حد بالای اجزایی به منظور برآورده شدن شرط تراکم ناپذیری، سرعت در امتداد عمود بر مرز مشترک دو المان مجاور ثابت و برابر فرض می شود. المانها از طریق سطوح برشی که به عبارت دیگر ناپیوستگی سرعت مماسی نامیده می شوند، با یکدیگر ارتباط دارند. به هنگام تغییر شکل المانها در امتداد این سطوح برشی بر روی هم می لغزند و به همین دلیل پس از هر گام از شبیه سازی فرآیند ممکن است در المان های تغییر شکل یافته مشکلاتی از قبیل نفوذ المان ها درون یکدیگر، عدم انطباق و یا ایجاد فضای خالی بین المانها بوجود آید (شکل ۱۰). این مشکل را می توان با اصلاح مرز آزاد المان تغییر شکل یافته و رو شکل (۱۰) تولید مجدد المان - شکل راست: بعد از تولید مجدد المان - شکل چپ: قبل از تولید مجدد



شکل (۸) استفاده از مفهوم انعکاس برای المان بندی قطعه .



شکل ۹: المان بندی سطح مقطع قطعه کار.

### روابط حد بالا

با توجه به اینکه جریان واقعی مواد در مسیرهایی صورت می گیرد که حداقل مصرف انرژی را داشته باشند به منظور بدست آوردن میدان سرعت، باید توان تغییر شکل کل کمینه شود. عبارت توان حد بالا دارای مؤلفه های زیر است:

$$J = \dot{W}_i + \dot{W}_s + \dot{W}_f$$

که  $\dot{W}_i$  توان تغییر شکل داخلی و عبارت است از:

$$\dot{W}_i = \int_V \bar{\sigma} \cdot \bar{\epsilon} \cdot dV$$

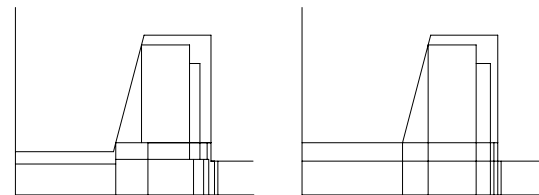
که  $\dot{W}_s$  توان مربوط به سطوح برشی و عبارت است از:

$$\dot{W}_s = k \int_{S_s} |\Delta u_s| ds$$

که  $\dot{W}_s$  توان انرژی اصطکاکی و عبارت است از:

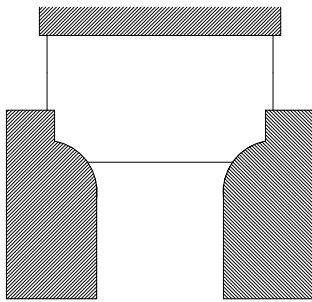
$$\dot{W}_f = mk \int_{S_f} |\Delta u_f| ds$$

در اینجا برای نمونه توابع انرژی برای المان رینگ چهار گوش بشرح ذیل می باشند:



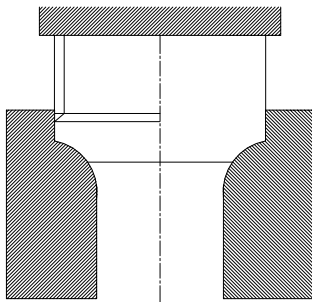
شکل ۱۰:

هم قراردادن نقاط المانهای مجاور حل کرد. البته لازم است تغییر حجم ناشی از اصلاح مرزها جبران گردد. مسئله مهمی که در المان بندی سطح مقطع توسط این المانها وجود دارد این است که هیچکدام از آنها دارای سطح انحناء دار نیستند. بنابراین در المان بندی مقاطعی که سطح انحناء دار دارند باید این سطوح با المانهای موجود پوشش داده شوند که این مسئله باعث ایجاد تقریب می شود. البته می توان با افزایش تعداد تقسیمات سطوح انحناء دار به خطوط مستقیم از این تقریب کاست اما این کار به دلیل افزایش تعداد المانها ممکن است باعث ایجاد انباشتگی خطا و کاهش دقت و افزایش زمان تحلیل شود. بنابراین باید بین تعداد تقسیمات و دقت تحلیل تعادل برقرار شود.



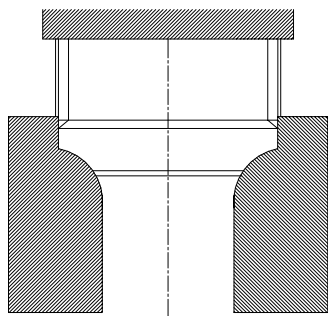
شکل ۱۱: آهنگری کرنش مسطح- فرآیند فورجینگ اکستروژن.

بخاطر اینکه قطعه دارای تقارن است لذا تنها نیمی از آن برای شبیه سازی المان بندی شده است (شکل (۱۲)).



شکل ۱۲: المان بندی نیمی از قطعه برای شبیه سازی.

در مرحله اول از شبیه سازی، سطح مقطع به چهار المان تقسیم شده است (شکل (۱۳)).



شکل ۱۳: مرحله ابتدایی شبیه سازی فرآیند آهنگری کرنش مسطح.

همانطوریکه در این شکل ملاحظه می شود جریان مواد بخوبی پیش بینی شده است. در این شکل به منظور در نظر گرفتن تأثیر دهانه قالب روی حرکت قطعه

$$\dot{W}_i = \pi \sigma_0 h C_1 \left[ \left[ \frac{4C_3^2}{3C_1^2} + r_{i+1}^4 \right]^{\frac{1}{2}} - \left[ \frac{4C_3^2}{3C_1^2} + r_i^4 \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{2C_3}{\sqrt{C_1}} \right. \\ \left. \times \ln \left[ \frac{r_i}{r_{i+1}} \right]^4 \frac{\sqrt{3C_1} + \left( \frac{4C_3^2}{3C_1^2} + r_{i+1}^4 \right)^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{3C_1} + \left( \frac{4C_3^2}{3C_1^2} + r_i^4 \right)^{\frac{1}{2}}} \right]$$

که در آن  $C_1 = \frac{W_{v+1} - W}{h}$  و

$$C_2 = u_v r_i + \left( \frac{W_{v+1} - W_v}{2h} \right) r_i \text{ است.}$$

اتلاف انرژی برشی در سطح مشترک افقی در المان چهارگوش عبارتست از:

$$\dot{W}_S = \frac{2\pi m \sigma_0}{\sqrt{3}} (R_2 - R_1) \left[ -\frac{1}{6} (C_1' - C_1'') (R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2) + (C_3' + C_3'') \right]$$

که  $l$  و  $u$  به ترتیب معرف المان بالائی و پائینی هستند. اتلاف انرژی اصطکاکی برای المان چهارگوش که از سمت راست با دیواره قالب در تماس است عبارتست از:

$$\dot{W}_f = \frac{2\pi m \sigma_0 r_0}{\sqrt{3}} \left[ \frac{C_1}{2} (y_1 + y_2) + (C_2 - W_{die}) (y_2 - y_1) \right]$$

لازم به ذکر است معادلات بالا به عنوان نمونه ارائه شده اند و تمامی معادلات در مرجع (۱۰) آمده اند. تابع انرژی کل با جمع کلیه توابع انرژی بدست می آید.

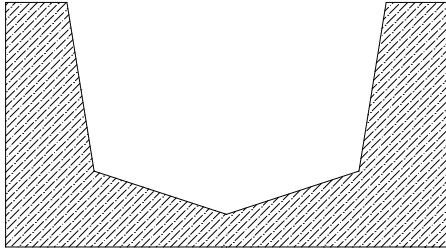
## بحث و بررسی نتایج

از آنجائیکه بطور کلی دو نوع مسئله کرنش مسطح و محور متقارن در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته اند لذا بطور جداگانه به بحث و بررسی پیرامون آنها می پردازیم:

## آهنگری کرنش مسطح

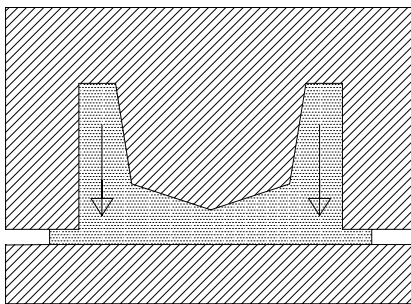
فرآیند فورجینگ اکستروژن یک قطعه با سطح مقطع مستطیل در این بخش مورد تحلیل قرار گرفت. در این فرآیند قطعه داخل دهانه قالب رانده شده و قسمت دیگر آن نیز به طرفین جریان می یابد (شکل (۱۱)).

گرفته است مشاهده می شود. همانطور که در این شکل ملاحظه می گردد یک قطعه با سطح مقطع جان-بال برای این منظور مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱۶: شکل قطعه مورد نظر برای فرآیند آهنگری محور متقارن (قطعه با سطح مقطع جان بال).

در این تحلیل شبیه سازی برای مرحله نهایی فرآیند که دو تکه قالب کاملاً بهم نزدیک شده است و حفره های قالب کاملاً پر شده اند انجام گردیده است (شکل (۱۷)).

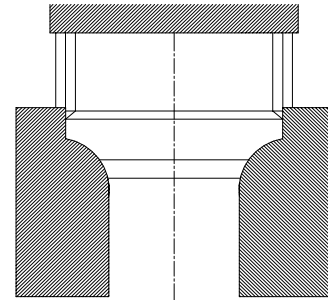


شکل ۱۷: مرحله نهایی فرآیند آهنگری محور متقارن (پر شدن کامل حفره های قالب).

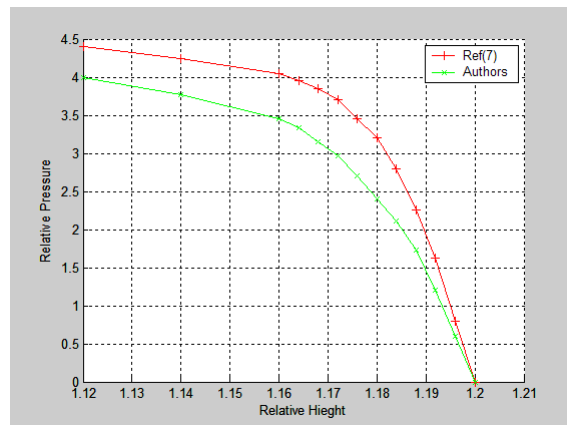
برای انجام این تحلیل، ماده صلب-پلاستیک و ضریب اصطکاک ۰،۰۵ در نظر گرفته شده است. به منظور المان بندی سطح مقطع از نقاط شکست قالب خطوطی به موازات و عمود بر محور خنثی رسم می شود. حاصل کار تقسیم سطح مقطع به ۱۲ المان می باشد (شکل (۱۸)).

پس از المان بندی سطح مقطع، تابع انرژی کل که دارای شش متغیر است به ازای مقادیر مختلف ضخامت پلیسه (... ) تشکیل شده و کمینه می گردد. با کمینه سازی تابع انرژی کل، مقدار انرژی مصرفی و

سطح مشترک المان شماره ۲ و قالب یک سطح برشی در نظر گرفته شده است. در هر مرحله یک المان دوزنقه ای با ورودی بر روی قاعده بزرگ به المان ها افزوده می شود.



شکل ۱۴: پیشروی فرآیند اکستروژن فورجینگ.



شکل ۱۵: تغییرات فشار نسبی با ارتفاع نسبی برای فرآیند آهنگری کرنش مسطح.

در شکل (۱۵) منحنی تغییرات فشار وارد بر سنبه نسبت به ارتفاع نسبی در مقایسه با نتایج مرجع {۶} ترسیم شده است. همانطوریکه ملاحظه می گردد نتایج بدست آمده از تحلیل ارائه شده در این مقاله بهبود قابل ملاحظه ای نسبت به نتایج قبلی نشان می دهند. البته در مقادیر بزرگتر برای ... این اختلاف کاهش می یابد. بدیهی است که در چنین شرایطی بخاطر اینکه فشار بطرف صفر میل می کند هر دو نتیجه منطبق می شوند.

## آهنگری محور متقارن

در شکل (۱۶) قطعه مورد نظر برای فرآیند آهنگری محور متقارن که در این تحلیل مورد استفاده قرار

بدست آمده در شرایط مختلف (اندازه های پلیسه و سرعت های متفاوت) و با تعداد المان های گوناگون با نتایج کارهای قبلی از دیگر مراجع مقایسه شده است. با بررسی این نتایج و مقایسه آنها با نتایج دیگران (جدول ۱) بهبود قابل توجه حل های ارائه شده در این مقاله مشاهده می گردد. البته نتایج بدست آمده برای بار فرایند در ضخامت های ... و ... برای پلیسه، فاصله بارهای بدست آمده با نتایج دیگران روند منطقی افزایش بار با کاهش پلیسه را نشان نمی دهد. لذا برای بررسی بیشتر موضوع تعداد المان ها را از ۱۲ به ۳۰ افزایش داده و نتایج معقول تری بدست آمد. بهر تقدیر از این مسئله چنین نتیجه گیری می توان نمود که عامل اصلی افزایش نسبت ابعادی المانها می باشد، بویژه هنگامیکه نسبت ابعادی در المان ... که در مقابل محل ورودی پلیسه قرار می گیرد، بیشتر از ۱۰ باشد خطاها بیشتر می شوند.

### نتیجه گیری

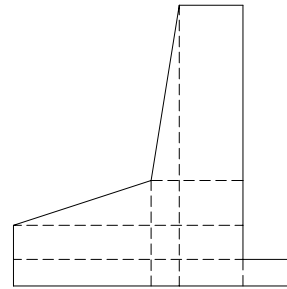
از تحلیل ارائه شده و نتایج بدست آمده می توان نکات ذیل را نتیجه گیری نمود:

- ۱ - تحلیل ارائه شده برای هر دو نوع از مسائل کرنش مسطح و محور متقارن کاربرد دارد.
- ۲ - شبیه سازی انواع فرایندهای فورج بصورت تحلیلی انجام گردید و توانائی این روش در بدست آوردن جریان مواد در قالب و نیروی لازم برای انجام فرایند به نمایش گذاشته شد.
- ۳ - نتایج بدست آمده در هر دو بخش کرنش مسطح و محور متقارن نسبت به نتایج دیگران بهبود قابل توجهی نشان می دهد (در حدود ۲۰ درصد بطور متوسط)
- ۴ - در شبیه سازی فرایند برای حالت محور متقارن باید برای حد اکثر نسبت ابعادی المانها با توجه به میزان پلیسه یک قید معینی را در برنامه لحاظ نمود.

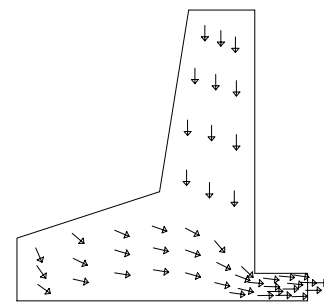
جدول ۱: مقایسه بارهای بدست از تحلیل حاضر با نتایج سایر کارهای انجام شده.

X	$U_0/W_{die}$	بار بدست آمده					درصد بهبود نتایج			
		مرجع 10	مرجع 11	مرجع 12	المان 12	المان 30	مرجع 11	مرجع 12	12 المان	المان 30
0.5	4	127.52	106.77	106.235	94.604	-----	16.2	16.7	25.8	-----
0.4	5	143.71	118.73	117.672	112.863	-----	17.4	18.1	21.5	-----
0.3	6.667	168.27	136.34	133.175	123.224	-----	19	20.9	26.8	-----
0.2	10	195.86	166.88	159.319	131.953	166.980	14.8	18.7	32.6	14.7
0.1	20	268.38	237.92	215.755	169.336	181.486	11.3	19.6	36.9	32.3

متغیرهای شبه مستقل بدست می آیند. مقدار بار لازم برای انجام فرایند با تقسیم انرژی مصرفی بر سرعت حرکت قالب و میدان جریان مواد با استفاده از متغیرهای شبه مستقل بدست خواهند آمد. لازم به ذکر است که برای بدست آوردن میدان جریان باید المان بندی مجدد اجرا شود. میدان جریان پیش بینی شده برای حالت ..... در شکل (۱۹) ارائه شده است.



شکل ۱۸: المان بندی سطح مقطع با ۱۲ المان (فرآیند آهنگری محور متقارن).



شکل ۱۹: میدان سرعت- جریان مواد - حاصل از شبیه سازی آهنگری محور متقارن.

همانطور که ملاحظه می شود تئوری ارائه شده قادر به نشان دادن سرعت ماده در همه نقاط میدان تغییر شکل می باشد. بدین ترتیب پیش بینی جریان مواد با استفاده از این تحلیل براحتی امکان پذیر می گردد. در جدول (۱) نتایج حاصل از تحلیل ارائه شده برای بار



## مراجع

- 1 - Kudo, H. (1960). "Some analytical and experimental studies of axi-symmetric cold forging and extrusion part I." *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 2, PP. 120-127.
- 2 - Kobayashi, S. (1964). "Upper bound solution of axi-symmetric forming problems." *Trans. ASME*, PP. 122.
- 3 - Mc Dermout, R. P. and Bramley, A. N. (1974). "An elemental bound technique for general use in forging analysis." *Proc. 15<sup>th</sup>, Int. MTDR Conf.*
- 4 - Cramphorn, A. S. and Bramley, A. N. (1977). "Computer aided forging design with UBET." *Proc. 18<sup>th</sup> Int. MTDR conf.*, PP. 717-724, London.
- 5 - Kiuchi, M. and Murata, Y. (1978). "Study on application of UBET simulation of axisymmetric metal forming process." *J. Jap. Soc. Technol. Plast.*, Vol. 30, No. 2, PP. 31.
- 6 - Lee, J. H., Kim, Y. H. and Bae, W. B. (1997). "An upper bound elemental technique approach to the process design of asymmetric forgings." *J. Mat. Process. Technol.*, Vol. 72, PP. 141.
- 7 - Oudin, J. and Ravalard, Y. (1981). "An upper bound method for computing loads and flow patterns in plane-strain forging." *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 21, PP. 237.
- 8 - Hou, J. (1997). "A plane strain UBET analysis of material flow in a filled deep die cavity in closed die forging." *J. Mat. Process. Technol.*, Vol. 10, PP. 103-110.
- 9 - Hou, J. and Stahlberg, U. (1992). "A three dimensional UBET model applied to the forging of square blocks between flat and grooved die of simple geometry." *J. Mat. Process. Technol.*, Vol. 62, PP. 81-89.
- 10 - Avitzur, B., John, W. I. and McDermout, R. P. (1978). "AXIFORM- A computer simulation program for axisymmetric forging and extrusion." *6<sup>th</sup> NAMRC*, P. 174.
- 11 - Kiuchi, M. and Murata, Y. (1981). "Study on application of UBET." *1<sup>st</sup> report, J. JSTP*, PP. 495.
- 12 - Lin, Y. T. and Way, J. P. (1997). "A new upper bound elemental technique approach." *Computer and Structures*, Vol. 65, No.4, PP. 601-611.