

# طراحی فورجینگ به کمک کامپیوتر

دکتر علی کریمی طاهری

دانشیار دانشکده مهندسی متالورژی - دانشگاه صنعتی شریف

## چکیده

در طراحی فورجینگ پارامترهای اصلی، نیرو و یا انرژی ماکزیمی است که برای انتخاب پرس و با چکش فورج لازم است. این دو پارامتر، خود در اثر پارامترهای دیگری مانند شکل هندسی حفره قالب، ابعاد زایده، شکل قطعه کار، اصطکاک، خواص مکانیکی فلز مورد فورج، دما، سرعت کرنش، و تعداد مراحل فورج، تغییر می‌کنند. هدف این مقاله، به دست دادن روشی است به نام حد فوقانی اجزائی که اثر پارامترهای نامبرده را در طراحی فورجینگ قالب بسته در نظر می‌گیرد و به کمک کامپیوتر مقادیر بهینه نیرو، انرژی و ابعاد زایده را به دست می‌دهد. چنین روشی قادر است چگونگی سیلان فلز داخل قالب، تعداد مراحل فورج و شکل پیش فرم را پیش‌بینی و به طراحی قالب فورج کمک کند.

## نمادها

$\dot{E}$  نرخ مصرف انرژی داخلی

$Y$  تنش تسلیم ماده مورد فورج

$\dot{\epsilon}_R$  سرعت کرنش در جهت

$\dot{\epsilon}_Z$  سرعت کرنش در جهت محور

$\dot{\epsilon}_\theta$  سرعت کرنش در جهت محیط

$\dot{\epsilon}_{RZ}$  R - Z صفحه در

ضرب اصطکاک در مرز اجزاء F

سرعت لغزش نسبی در مرزها  $\dot{S}$

## مقدمه

در فرآیند فورج قالب بسته، قطعه کار و یا پیش فرم در بین دو قسمت قالب قرار می‌گیرد و پرس می‌شود. در اثر این عمل، فلز در داخل حفره‌های قالب جریان می‌یابد و شکل آن را به خود می‌گیرد. بدیهی است که میزان شکل‌گیری قطعه، بستگی به آن دارد که تا چه میزان حفره قالب پر می‌شود. در تغییر فرم فلز در فورج قالب بسته، سه مرحله می‌توان تشخیص داد (۱) این مراحل چنانکه در شکل ۱ دیده می‌شود عبارت‌اند از:

۱ - افزایش مقطع (upsetting)

در شروع فورج قطعه کار بین قالب‌های بالایی و پائینی فشرده می‌شود و به سمت خارج برای تشکیل فلانچ و به طرف داخل برای ساختن شافت جریان می‌یابد.

۲ - پر کردن (filling)

وقتی حفره پائینی پر شد، تشکیل زایده (flash)

شروع می‌شود. چون در این مرحله، قسمت شافت لزوماً به طور کامل پر نشده، با ادامه تغییر فرم جریان فلز به طرف زایده محدود شده به زور، به داخل شافت اکستروود می‌شود.

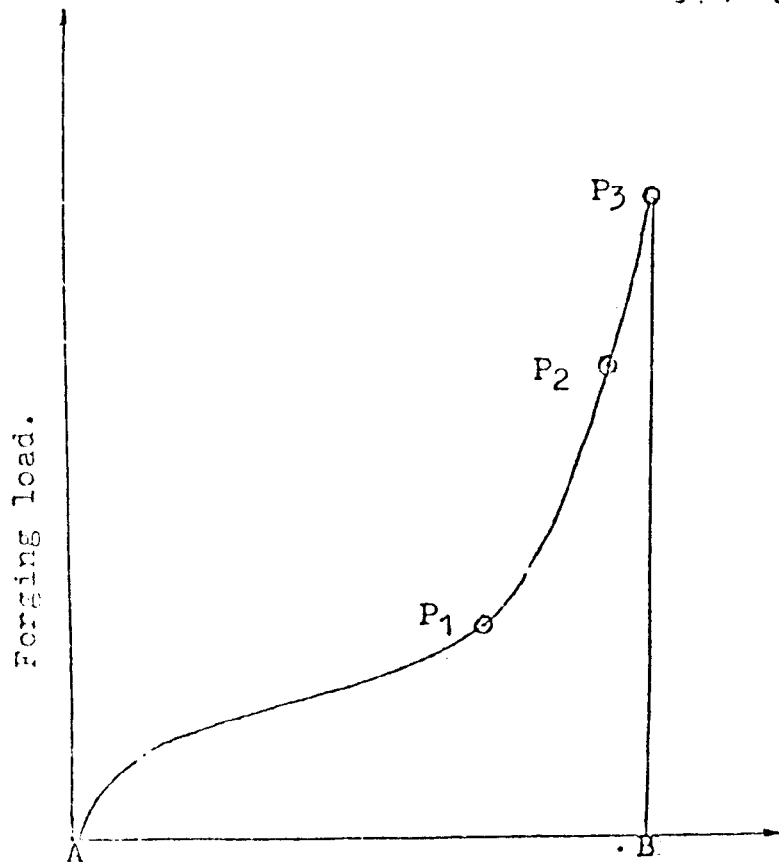
۳ - مرحله نهایی فورج

در این مرحله هر دو قالب کاملاً پر شده‌اند و تغییر فرم با اکستروود شدن فلز به داخل زایده ادامه می‌یابد و موجب افزایش سریع نیرو می‌شود.

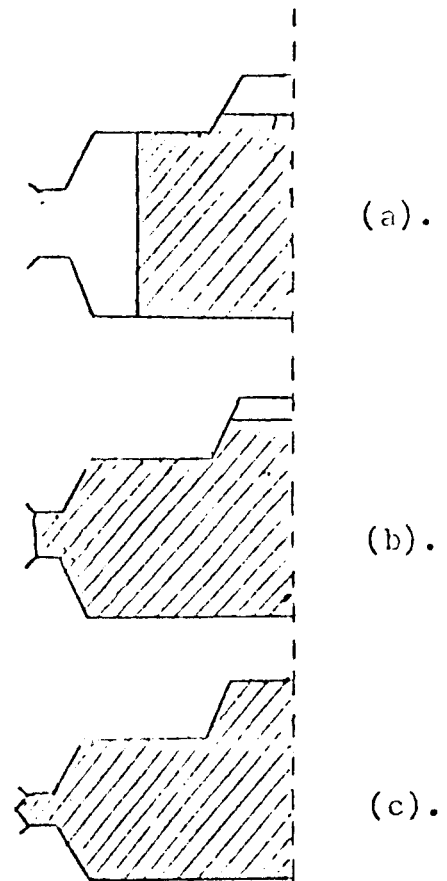
شکل ۲، منحنی نیروی فورج در برابر تغییر مکان قالب را برای مراحل بالا نشان می‌دهد چنانکه دیده می‌شود نیروی لازم برای فورج در خلال مرحله پر کردن به سرعت افزایش می‌یابد و کمترین نیروی لازم برای پر کردن کامل قالب در نقطه  $P_2$  است و پس از آن، اندک تغییر مکان قالب، کافی است تا اطمینان دهد که قالب پر شده است. باید دانست که مقدار نیروی فورج تا زمانی که قسمتهای مشکل‌تر قالب، کاملاً پر نشده و فلز به زایده رسیده است

می شود. برای انجام موفقیت آمیز فرآیند فورج، شرایط زیر باید پس از نقطه  $P_1$  فراهم باشد.

ولی تشکیل زایده شروع نشده است، نسبتاً کم است. نقطه  $P_1$  در شکل ۲، نیروی فورج را در این مرحله نشان می دهد در بین  $P_1$  و  $P_2$  زایده تشکیل و قسمتهای مشکل قالب پر



شکل ۱



شکل ۲

(a) افزایش مقطع (Upsetting)

(b) پر کردن (Filling)

(c) پایان فورج

A تماس قالب و قطعه کار

$P_1$  شروع تشکیل زایده

$P_2$  پر شدن کامل قالب

$P_3$  نیروی اضافی لازم برای اینکه نیم

قالبها به هم نزدیکتر شوند

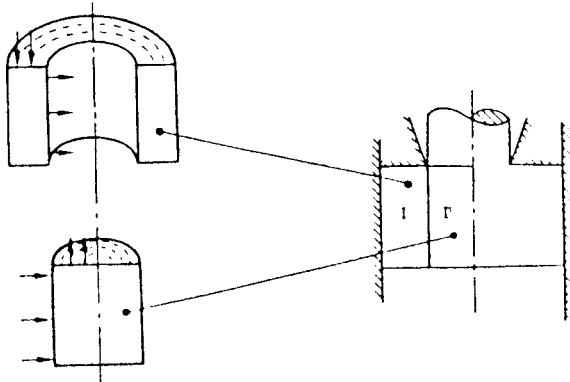
B کامل شدن فورج

شکل ۱ - تغییرات نیروی فورج در برابر تغییر مکان قالب  
شکل ۲ - مراحل مختلف تغییر فرم در فورجینگ قالب بسته

آسانتر قسمتهای مشکل حفره قالب را پر کند به سمت زایده روان شود. پس می توان گفت که طراحی موفقیت

۱ - حجم فلز داخل حفره های قالب باید برای پر کردن بقیه قالب، کافی باشد. ۲ - جریان فلز باید طوری باشد که

اجزائی (upper bound elemental technique) برای در نظر گرفتن کلیه پارامترهای موثر در فورج قالب بسته است. برای بدست آوردن شرایط بهینه پارامترها و رفع مشکلات ریاضی آنالیز لزوماً از کامپیوتر استفاده شده است.



شکل ۳- آنالیز فورجینگ اکستروژن پیشنهادی کودو

### تکنیک حد فوقانی در فورج قالب بسته

این روش، مشابه روشی است که کودو (۸) برای آنالیز فورج برگزیده است با این تفاوت که محدودیتهای نظری روش کودو را ندارد و شکل قطعه می تواند با شکل قطعه در بررسی کودو، فرق داشته باشد. در این روش از هشت جزء حلقه ای شکل قابل اتصال به هم استفاده می شود. مقطع برشی حلقه ها می تواند نه تنها به شکل مستطیل و یا مربع بلکه همچنین به صورت مثلث و یا منحنی شکل باشد که در این صورت، قطعات با گوشه های تیز و انحنا دار نیز قابل آنالیز است. شکل های ۴ و ۵، اجزاء فوق را نشان را می دهند. هر جزء، دارای شعاع خارجی واحد و شعاع داخلی B است و نسبت ارتفاع به شعاع خارجی آن A فرض شده است. در شکل های ۴ الف، ب، ۴ ج، ۴ د، هر چهار جزء به نحوی تغییر فرم می یابند که سطح فوقانی در اثر نیروی خارجی با سرعت واحد به صورت عمودی نزول کند و باعث شود که سطوح درونی مستقیماً به طرف داخل حرکت کنند. این اجزاء ممکن است با قالب و یا قسمتهای صلب قطعه کار در تماس باشند که در این صورت در این سطوح تماس، هیچ جریان

آمیز فورج، بستگی به توانایی پرکردن قسمتهای مشکل حفره قالب و فراهم آوردن شرایط لازم در داخل قالب برای این عمل دارد. این توانایی با عواملی مثل خواص مکانیکی فلز مورد فورج، اصطکاک، دمای قالب، شکل و اندازه قطعه کار، ابعاد زایده، تعداد مراحل فورج، تغییر می کند. لذا این پارامترها را باید در طراحی فرآیند فورج قالب بسته در نظر داشت.

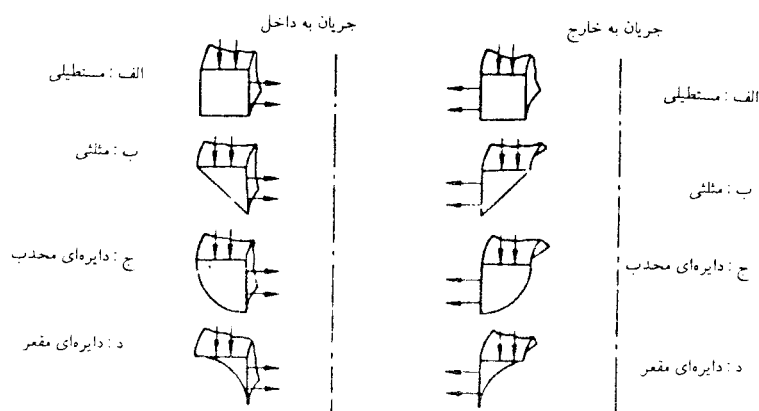
دو روش عمده ای که برای در نظر گرفتن پارامترهای نامبرده به کار می روند به شرح زیرند.

۱- روش مبتنی بر تجربه و حدس و فرمولهای قراردادی (۴-۲) که در بیشتر کارگاههای فورج متداول است. حُسن این روش در این است که انجام طراحی را سریع تر و ساده تر می کند اما در برابر، این عیب را نیز دارد که ممکن است میزان عوامل موثر را بیش از اندازه معمول آنها تخمین بزند برای مثال، ابعاد زایده را بیش از اندازه بهینه پیش بینی کند که مقرون به صرفه نیست.

۲- روشهای نظری از قبیل میدان خط لغزش (slip line field) (۵)، حد فوقانی (upper bound) (۶)، وفاینایت المنت (finite element) (۷) که پارامترهای گوناگون را در بر می گیرند و نتایج دقیق تری می دهند ولی در برابر روشهایی پیچیده ترند و اغلب برای حالات تقارن محوری (axisymmetric) و کرنش صفحه ای (plane strain) عرضه شده اند. برای مثال، در سال ۱۹۶۰ میلادی، کودو (Kudo) (۸) برای آنالیز شکلهای دارای تقارن محوری براساس حد فوقانی روشی عرضه کرد به این ترتیب که قطعه مورد فورج را به اجزائی استوانه شکل تقسیم کرد و انرژی لازم برای تغییر فرم هر جزء را با توجه به جریان فلز به داخل و روی محیط آن جزء به دست آورد (شکل ۳). در نتیجه این آنالیز کودو توانست ماکزیمم نیروی لازم برای فورج را به اندازه ۱۰ تا ۱۵ درصد بیشتر از عمل، پیش بینی کند که در صنعت فورجکاری مورد توجه قرار گرفت لیکن به علت استفاده از روابط ریاضی پیچیده کاربرد زیادی نیافت. پس از آن، کبایاشی و همکارانش (۹) روش کودو را بهبود دادند و بر دقتش افزودند.

هدف از این مقاله، پیشنهاد روشی مبتنی بر حد فوقانی

فلزی در نظر گرفته نمی شود.



شکل ۴ و ۵ - شکل اجزاء با مقطع مستطیلی، مثلثی، دایره‌ای محدب و دایره‌ای مقعر در حالت سیلان به طرف داخل و یا خارج

شکل ۵، مستطیل با میدان به طرف خارج،

$$\dot{u} = \frac{R^2 - B^2}{2AR} \quad (3)$$

$$\dot{w} = -\frac{Z}{A}$$

$$\dot{u} = \frac{(1-B)(B+R)}{2AR} \quad (4)$$

$$\dot{w} = \frac{(1-B)Z}{2AR}$$

شکل ۴، مثلث با میدان به طرف داخل

$$\dot{u} = -\frac{\cot\alpha}{2} \left(1 + \frac{1}{R}\right) \quad (5)$$

$$\dot{w} = \frac{\cot\alpha}{2} \frac{Z}{R} + 1$$

شکل ۵، مثلث با میدان به طرف خارج،

$$u = \frac{\cot\alpha}{2} \left(1 + \frac{B}{R}\right)$$

شکل‌های ۵ الف، ۵ ب، ۵ ج، ۵ د، حالت دیگری از جریان فلز را نشان می دهند. در این حالت برخلاف حالت شکل‌های ۴ الف، تا ۴ د، به جای حرکت سطوح داخلی، سطوح خارجی استوانه‌ای شکل به صورت شعاعی به طرف خارج حرکت می کنند و استوانه‌ای شکل باقی می ماند.

برای هر یک از ۸ جزء نشان داده شده در شکل‌های ۴ و ۵ می توان یک میدان سرعت مجاز کلی (general admissible velocity field) به شرح زیر برگزید که در آن، توزیع سرعت ذرات از نظر سینماتیکی با خود و نیروی اعمالی خارجی سازگار باشد.

شکل ۴، مستطیل با میدان به طرف داخل:

$$\dot{u} = -\frac{(1-R^2)}{2AR} \quad (1)$$

$$\dot{w} = -\frac{Z}{A}$$

$$\dot{u} = \frac{-(1-B)(1-R)}{2AR} \quad (2)$$

$$\dot{w} = \frac{(1-B)Z}{2AR}$$

$$\dot{w} = -\frac{\text{Cot} \alpha Z}{2R} + 1 \quad (6)$$

$$\dot{u} = \frac{(R^2 - 1)}{2R(1 - 2B + 2BR - R^2)^{1/2}}$$

شکل ۴، دایره محدب با میدان به طرف داخل،

$$\dot{w} = -\frac{Z(-R^3 + 3BR^2 - 4BR + R + B)}{2R(1 - 2B + 2BR - R^2)^{3/2}} + 1 \quad (7)$$

$$\dot{u} = \frac{(R^2 - B^2)}{2R(B^2 - 2B + 2R - R^2)^{1/2}}$$

شکل ۵، دایره محدب با میدان به طرف خارج،

$$\dot{w} = -\frac{Z(-R^3 + 3R^2 + B^2R - 4BR + B^2)}{2R(B^2 - 2B + 2R - R^2)^{3/2}} + 1 \quad (8)$$

مصرف انرژی می تواند برای هر یک از اجزاء با استفاده از

رابطه هیل (۱۰) به صورت زیر به دست آید.

$$\dot{E} = \sqrt{\frac{2}{3}} Y \int_V (\dot{\epsilon}_R^2 + \dot{\epsilon}_\theta^2 + \dot{\epsilon}_Z^2 + \frac{1}{2} \dot{\kappa}_{RZ}^2) dv + \int_V F \cdot \dot{S} \cdot ds \quad (10)$$

در رابطه بالا نخستین انتگرال، در کل حجم یک جزء در حال تغییر فرم انجام می شود و دومین انتگرال مربوط به نرخ انرژی مصرف شده در سطوح نایبوستگیهای سرعت قالب و قطعه کار و سطوح مشترک اجزاء مختلف است. مقدار انرژی به دست آمده از هر جزء را می توان با تقسیم به حاصل ضرب تنش تسلیم و مساحت سطحی که نیرو بر آن اعمال می شود و سرعت پرس، بدون بعد کرد. در این صورت، نتیجه به دست آمده را ضریب نرخ مصرف انرژی می نامند. با جمع کردن انرژی کلیه اجزاء در یک عمل فورج پیچیده داریم.

$$\dot{E}T = \sum_{i=1}^n c_i A_i v_i \quad (11)$$

که در آن  $c_i$  = ضریب نرخ مصرف انرژی برای جزء  $i$

$A_i$  = سطح پرس برای جزء  $i$

$v_i$  = سرعت پرس برای جزء  $i$

$n$  = تعداد کل اجزاء قطعه فورج

به علت وجود روابط ریاضی در محاسبه سرعت مجاز اجزاء شکل های ۴ و ۵ و سرعت کرنشهای معادلات ۹ و از آنجا که انجام انتگرال معادله ۱۰ به روش ریاضی ممکن نیست در محاسبات از کامپیوتر استفاده می شود.

پس، انرژی و یا نیروی کل فورج قطعات پیچیده را می توان با تقسیم کردن آنها به جزءهای نشان داده شده در

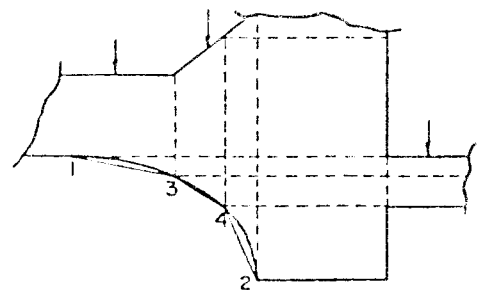
برای مناطق ۴ و ۵، تعیین میدان سرعت مجاز ممکن نیست و لذا با تبدیل آنها به مناطقی مثلثی، مانند شکل ۶ می توان میدان سرعت مثلثی شکل را برای آنها به کار برد. با دانستن مولفه های سرعت برای هر هشت جزء می توان مقدار سرعت کرنشهای موجود را به شرح زیر به دست آورد.

$$\dot{\epsilon} = \frac{\partial \dot{u}}{\partial R}$$

$$\dot{\epsilon}_Z = \frac{\partial \dot{w}}{\partial Z}$$

$$\dot{\epsilon}_\theta = -(\dot{\epsilon}_R + \dot{\epsilon}) \quad (9)$$

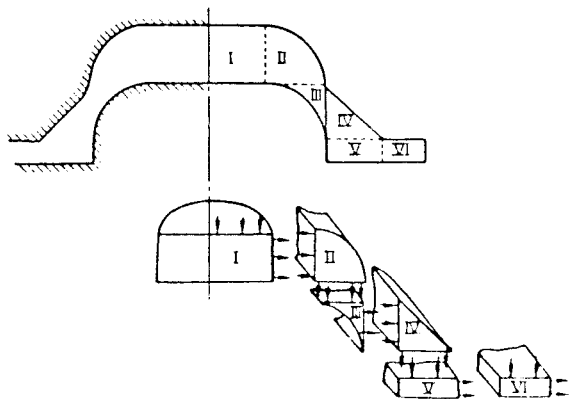
$$\dot{\kappa}_{RZ} = \left( \frac{\partial \dot{u}}{\partial Z} + \frac{\partial \dot{w}}{\partial R} \right)$$



شکل ۶ - تقریب سطوح انحنا دار

با تعیین شدن مولفه های سرعت کرنش از روابط بالا، نرخ

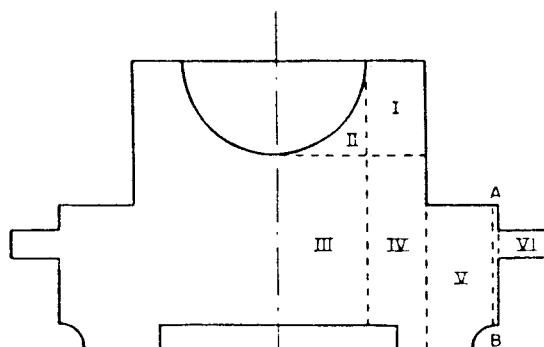
IV را شامل شود باید فلز، یک شکاف بسیار کوچک مانند AB را پر کند تا پیوستگی آن حفظ شود.



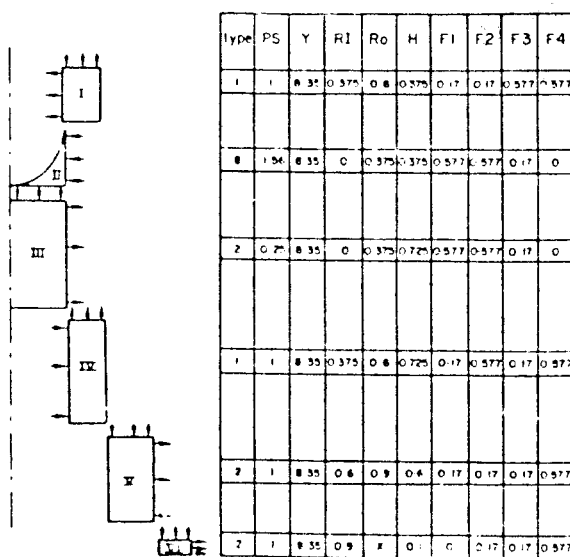
شکل ۷ - یک قطعه فورجینگ با تقارن محوری که به جزءهای مختلف تقسیم شده است.

شکلهای ۴ و ۵، محاسبه کردن انرژی جزءها و جمع کردن این انرژیها به دست آورد. باید دانست که این روش فقط پایان عمل فورج یعنی زمانی را که تمام نواحی حفره قالب پر شده باشد در نظر می‌گیرد به عبارت دیگر ماکزیمم نیروی فورج را به دست می‌دهد. بنابراین از نتیجه آن می‌توان برای یافتن پرس مناسب از نظر نیرو و چکش افتان از نظر انرژی استفاده کرد.

شکل ۷، یک فورج با تقارن محوری را نشان می‌دهد که به جزءهای مختلفی تقسیم شده است این جزءها قابل اتصال به هم‌اند و یک جریان آرام در بین آنها برقرار است. اکنون باید دید که اگر چنین جریانی برقرار نباشد آنالیز چگونه انجام می‌شود برای مثال، شکل ۸ الف، چنین فورجینگی را با جریان سیکلی از جزء I به IV نشان می‌دهد. در این صورت برای اینکه آنالیز، جزء V و



(الف)



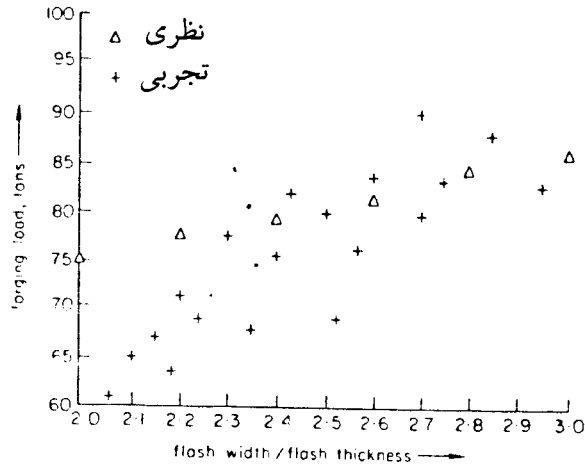
(ب)

شکل ۸- الف قطعه فورجینگ ب - تقسیم بندی

قطعه به اجزاء و پارامترهای مربوط به هر جزء

نتایج به دست آمده از آنالیز و آزمایش را با هم مقایسه می‌کند.

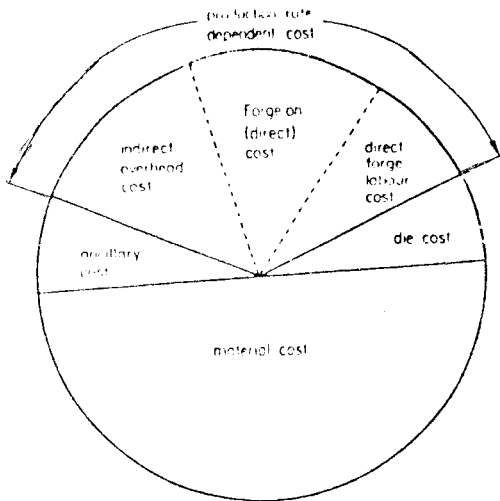
شکل ۸ ب، اجزاء قطعه فورج و پارامترهای مربوط به آن جزءها را نشان می‌دهد. در آنالیز این فورج ضخامت زایده ثابت فرض شده ولی عرض آن متغیر است. شکل ۸ ج،



(ج)

شکل ۸- ج مقایسه نتایج به دست آمده نظری و تجربی

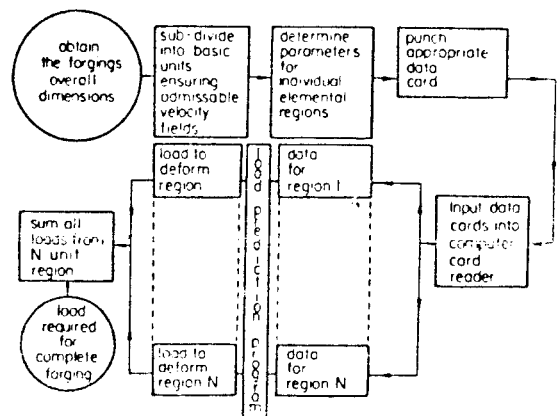
مخارج نسبی مواد و قالب و سایر هزینه‌های فرآیند فورجینگ را به صورتی که در شکل ۱۰ دیده می‌شود به دست داده است. (۱۲)



شکل ۱۰- توزیع مخارج فورجینگ

جالب توجه است که به طور متوسط ۵۰ درصد هزینه کل فورج صرف مواد می‌شود. بنابراین کاهش برابر با ۱۰ درصد در مواد، معادل کاهش برابر با ۵ درصد در قیمت فورج خواهد شد. ماده به دست آمده در فرآیند فورج قالب بسته، بعد از جدا کردن ضایعات از قبیل زایده

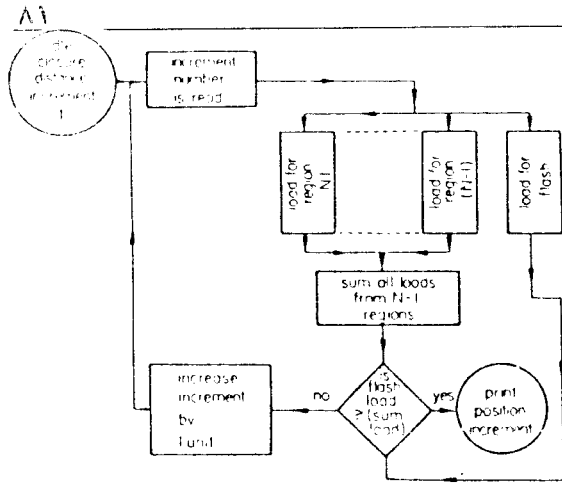
شکل ۹- نمودار گذر مورد استفاده در برنامه کامپیوتری برای آنالیز را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود پس از تقسیم بندی قطعه کار به جزءهای مورد نظر پارامترهای مربوط به هر جزء به عنوان داده، به کامپیوتر وارد می‌شود و کامپیوتر محاسبات لازم را انجام می‌دهد و نیروی لازم برای فورج را تعیین می‌کند. البته اگر تقسیم بندی قطعه به اجزاء مختلف را کامپیوتر انجام دهد دیگر نیازی به دادن پارامترهای هر جزء به کامپیوتر نیست بلکه خود کامپیوتر آنها را از برنامه دریافت می‌کند. (۱۱)



شکل ۹- نمودار برنامه کامپیوتری به کار رفته در تعیین نیروی لازم برای فورج از طریق نظری

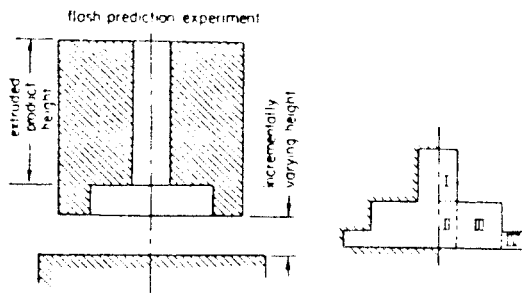
انجمن پژوهش در فورج انگلستان، تعیین ابعاد زایده بهینه،





شکل ۱۱ - نمودار گذر برنامه کامپیوتری برای تخمین ابعاد زایده بهینه از راه نظری

شکل ۱۲، قالبی را نشان می‌دهد که در تعیین ابعاد زایده لازم برای یک ارتفاع معین محصول اکستروژن به کار رفته است. در این قالب، فلز باید هم در زایده و هم در کانال اکستروژن جریان یابد. نتایج به دست آمده از آزمایش با این قالب و نتایج به دست آمده از آنالیز نظری در شکل ۱۳ نشان داده شده است چنانکه دیده می‌شود سازگاری خوبی بین نتایج تجربی و نظری وجود دارد.



شکل ۱۲

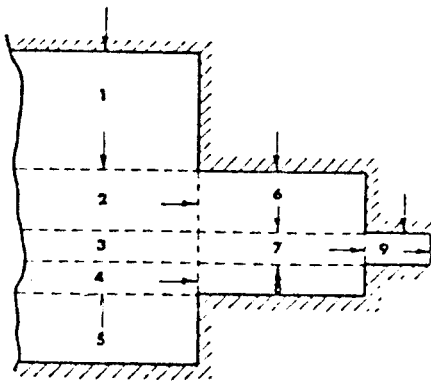
و تراشکاری در حدود ۵۰ تا ۹۰ درصد و به طور متوسط ۷۰ درصد مواد مصرفی ابتدایی است (۱۳) بنابراین با صرف نظر کردن از درآمد احتمالی ناشی از ضایعات، مقدار ۱۵ درصد از قیمت کل فورج صرف زایده، تراشکاری، اکسیدها و ... غیره می‌شود. پس با طرح زایده بهینه ممکن است هزینه مواد را چند درصد کاهش داد.

به کمک آنالیز بالا می‌توان ابعاد زایده بهینه را به دست آورد به عبارت دیگر می‌توان ابعاد زایده‌ای را معین کرد که دقیقاً کافی برای پر شدن قالب است و به این ترتیب ضایعات فورج در اثر زایده را به حداقل رسانید و در نتیجه عمر قالب را در اثر کاهش دادن نیروی ماکزیمم اعمالی در پل زایده، افزایش داد. معیار تعیین زایده بهینه به این صورت است که در هنگامی که دو قسمت قالب کمترین فاصله را از هم دارند قسمت بیشتر نیروی فورج مربوط به زایده است (۱۴) بنابراین اگر دو قسمت قالب تدریجاً به هم نزدیک شوند و در هر مرحله از نزدیک شدن، فرض شود که قالب کاملاً پر شده است در این صورت پارامترهای معینی از قبیل ارتفاع A از هر جزء و در نتیجه نیروی هر مرحله تغییر خواهد کرد. لذا مرحله‌ای وجود خواهد داشت که در آن، سهم نیروی مربوط به زایده بیشتر از سهم نواحی دیگر خواهد بود و در این مرحله، انرژی لازم برای به دست آوردن شکل کامل داخل قالبها کمتر است از انرژی لازم برای تشکیل زایده به تنهایی، بنابراین در این حالت برای ماده در حال فورج ساده‌تر است که حفره قالب را پر کند تا اینکه منبسط شده و به رشد زایده کمک کند. در نقطه تعادل یعنی مرحله‌ای که نیروی تغییر فرم زایده برابر با نیروی لازم برای بقیه قطعه است، با توجه به فاصله دو قسمت قالب از یکدیگر، اندازه زایده بهینه به دست خواهد آمد.

برای انجام دادن مراحل بالا، می‌توان از کامپیوتر استفاده کرد و با نوشتن برنامه کامپیوتری مناسب، اندازه زایده بهینه را به دست آورد. شکل ۱۱، نمودار گذر چنین برنامه‌ای را نشان می‌دهد.

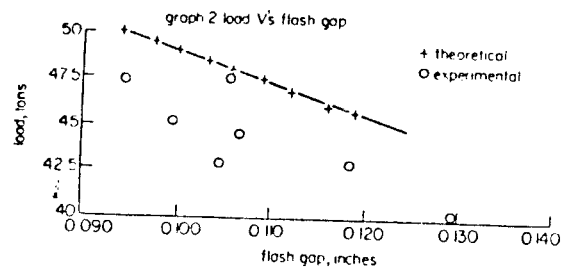
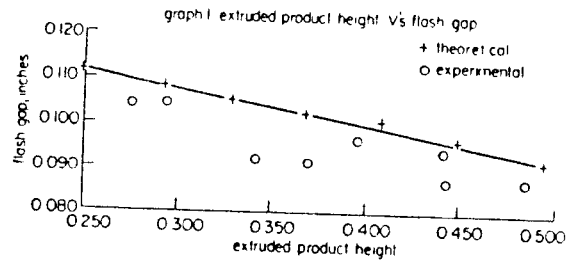
کاربرد آنالیز بالا به قطعات فرم یافته با پرس، محدود می شود.

علاوه بر این، در تقسیم قطعه به اجزاء، ممکن است میدان سرعتی به دست آید که با واقعیت سازگار نباشد برای مثال، ملاحظه شکل ۱۴ نشان می دهد که جریان به داخل جزء شماره ۳ میسر نیست زیرا نمی تواند از آنجا به جزء شماره ۷ وارد شود پس لزوماً جزء ۳ باید یک منطقه مرده باشد که این خلاف واقعیت است.



شکل ۱۴ - میدان سرعت غیر واقعی

برای رفع این ایراد، به جای اجزاء شکل‌های ۴ و ۵ از جزء شکل ۱۵ یعنی از دو جزء مثلثی و یک جزء مستطیل شکل استفاده شده است (۱۱). تفاوت این اجزاء، با اجزاء پیشین در این است که سیلان فلز در کلیه سطوح آنها امکان دارد در حالی که در اجزاء پیشین، سیلان فقط در دو سطح جزء انجام می شود.

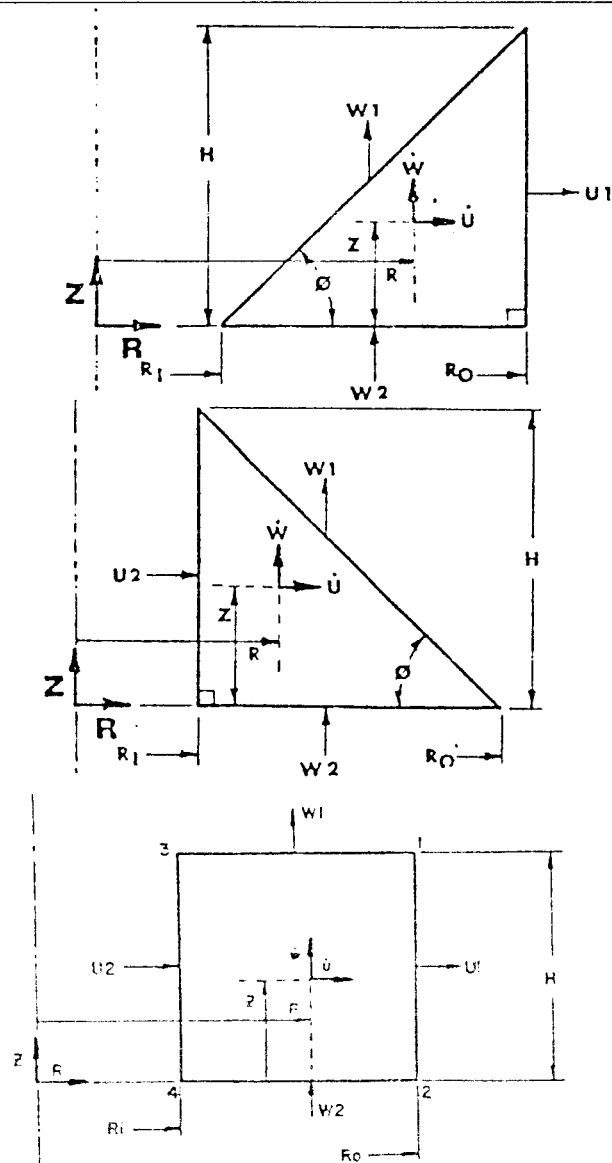


شکل ۱۳

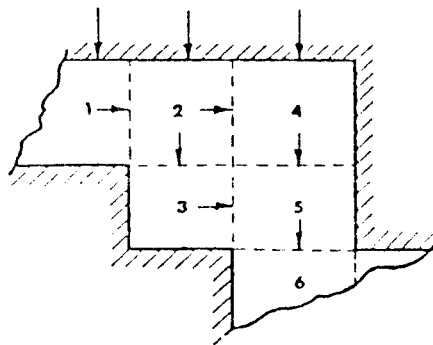
شکل ۱۲ - قالب به کار رنده برای تعیین تجربی زائده  
شکل ۱۳ - مقایسه نتایج به دست آمده نظری و تجربی

### بهینه کردن میدان سرعت

در آنالیز حد فوقانی بالا، مرزهای قطعه کار در حال تغییر فرم، دقیقاً در لحظه پر شدن حفره قالب تعریف می شوند، بنابراین میدان سرعت به دست آمده می تواند فقط برای پایان فرآیند فورج تعریف شود. به این دلیل در آنالیز بالا، فقط نیروی ماکزیمم فورج قابل محاسبه است و نه انرژی لازم برای تغییر فرم بنابراین می توان گفت که



شکل ۱۵ - اجزاء مثلثی و مربعی به کار رونده برای به دست آوردن میدان سرعت بهینه

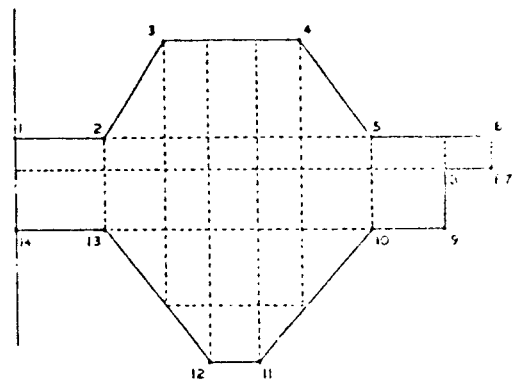


شکل ۱۶ - تقسیم بندی قطعه به اجزاء و سرعت‌های آنها

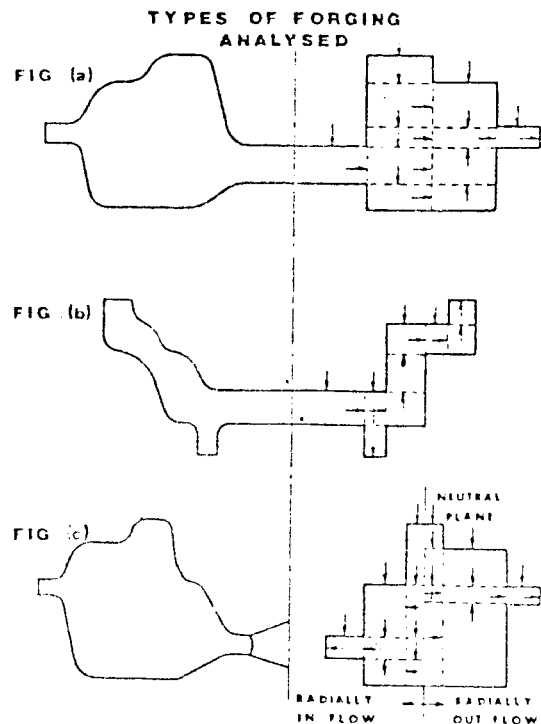
ورودی و یا خروجی وجود دارد. برای مثال در شکل ۱۶، از جزء شماره ۲، جریانی به جزءهای ۳ و ۴ وجود دارد و با در نظر گرفتن سرعت جزء ۳ به عنوان متغیر مستقل، سایر متغیرها نسبت به آن به دست خواهند آمد. و لذا نیرو را می توان نسبت به این پارامتر سرعت مستقل، بهینه کرد تا کوچکترین مقدار حد فوقانی به دست آید. (۱۱)

بدیهی است که تعداد پارامترهای سرعت مستقل برای یک میدان سرعت، بستگی به تعداد جزءها دارد به طوری که می توان گفت تفاضل بین تعداد مرزهای مشترک جزءها و تعداد جزءها برابر با تعداد پارامترهای سرعت مستقل است. برای مثال، شکل ۱۷ دارای ۴۳ مرز مشترک و ۲۸ جزء است بنابراین، ۱۵ پارامتر سرعت مستقل خواهد داشت. پس بهینه کردن میدان سرعت و یا می نیم کردن مقدار نیرو باید نسبت به این ۱۵ متغیر انجام شود. اگر میدان سرعت به دست آمده یک میدان حقیقی باشد در این صورت مقدار نیروی واقعی با بهینه کردن این میدان سرعت به دست خواهد آمد. عمل بهینه کردن را می توان به وسیله کامپیوتر انجام داد. به این طریق که کامپیوتر پس از تقسیم قطعه کار به جزءهای مختلف، متغیرهای سرعت مستقل را شناسایی خواهد کرد. سپس عمل بهینه کردن را نسبت به متغیرهای نامبرده انجام خواهد داد و مقدار بهینه آن متغیرها را به دست خواهد آورد. در این حالت به کمک یک ترمینال گرافیک می توان تقسیم بندی اجزاء و میدان سرعت بهینه را مشاهده کرد.

با دانستن میدان سرعتها می توان مقادیر سرعت در نقاط مختلف قطعه و بنابراین سرعت کرنش را محاسبه کرد.



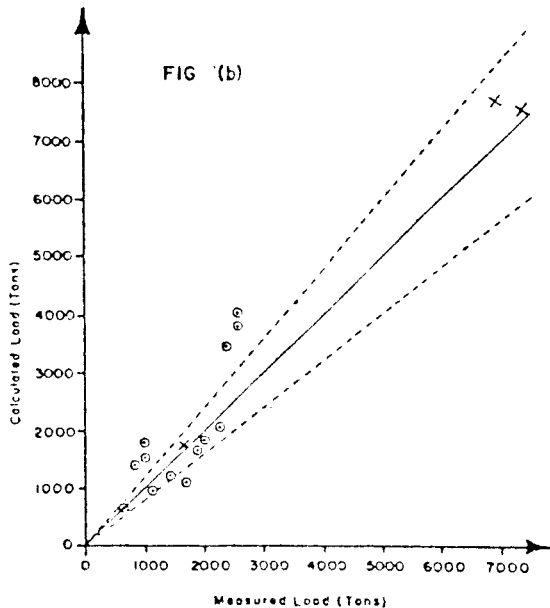
شکل ۱۷ - نشان دهنده اجزاء برای تعیین تعداد پارامترهای سرعت مستقل



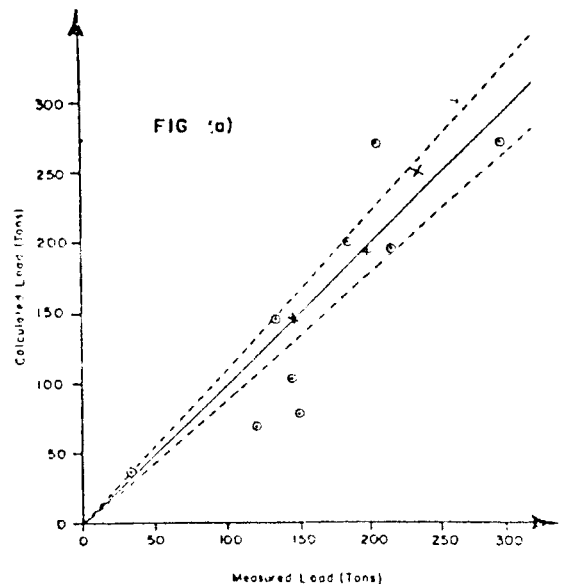
شکل ۱۸. الف ۱۸، ب ۱۸ و ج ۱۸ شکلهای متداول قطعات صنعتی آنالیز شده

**قابلیت کاربرد آنالیز در مورد قطعات صنعتی**  
برای بررسی قابلیت کاربرد آنالیز در مورد قطعات صنعتی، تعدادی از قطعات فورج ۶ کشور صنعتی جهان آنالیز شده است (۱۱) شکل این قطعات را به طور کلی می توان به گروههای زیر تقسیم کرد.

با معرفی این سه جزء و تقسیم بندی قطعه کار به آنها، ضرورت بهینه کردن میدان سرعت آشکار می شود. این امر به آن دلیل است که برای هر جزء، بیش از یک سرعت



(ب)



(الف)

شکل ۱۹ الف، ۱۹ ب - مقایسه نیروی فورج محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در مورد قطعات شکل‌های ۱۸ الف، ۱۸ ب، ۱۸ ج

شده است. چون اطلاع درباره روغنکاری به کار رفته کم بوده بنابراین ضریب اصطکاک به کار رفته در آنالیز نیز دقیق نبوده است.

۲ - قسمتهای انحنادار قالب، تقریباً خط مستقیم فرض شده‌اند و این فرض در صورت افزایش تعداد قسمتهای انحنادار باعث تقریب بیشتری در نتیجه آنالیز شده است.

۳ - تقسیم بندی قطعه به اجزاء در بعضی از موارد دستی یعنی بدون کامپیوتر انجام شده. در نتیجه تعداد اجزاء کم بوده و بنابراین میدان سرعت به دست آمده احتمالاً منحصر به فرد نبوده و باعث تخمین اضافی شده است.

### انرژی، جریان فلز و شکل پیش فرم

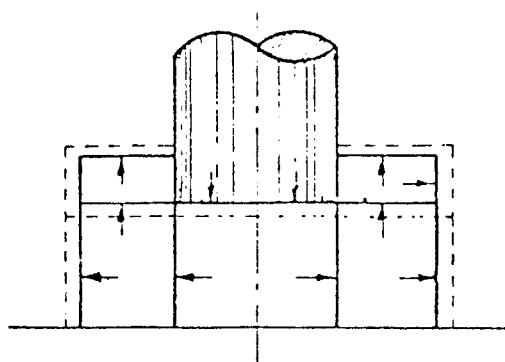
اگر چه محاسبه ماکزیمم نیروی لازم جهت فورج یک قطعه برای پرسهایی که ماکزیمم نیروی اعمالی آنها

قطعات با شکل ۱۸ الف که متداول ترین قطعات بوده‌اند یک زائده در اطراف دارند. قطعات بدون زائده شکل ۱۸ ب، نیز در بین قطعات وجود داشته‌اند که ابعاد آنها به وسیله ترکیبی از حرکت سمبه و حجم فلز کنترل می‌شود و بالاخره در قطعاتی با ترکیبی از فورج داخلی و خارجی مانند شکل ۱۸ ج. با استفاده از آنالیز بالا، نیروی لازم برای قطعات، با توجه به ابعادشان بین ۲۵ تا ۸۰۰۰ تن بوده است. شکل ۱۹ الف و ب، نتایج آزمایش را برای قطعات فوق نشان می‌دهد.

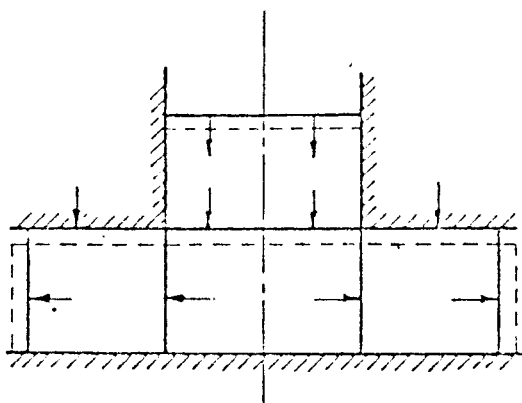
چنانکه دیده می‌شود سازگاری خوبی بین نتایج نظری و تجربی وجود دارد. همچنین ملاحظه می‌شود که در بعضی موارد نیروی فورج کمتر از مقدار نظری است که این خلاف قضیه حدفوقانی است. دلیل این امر را می‌توان چنین توضیح داد.

۱ - اثر سرعت کرنش بر تنش تسلیم، در آنالیز در نظر گرفته نشده و به عبارت دیگر تنش تسلیم، ثابت فرض

مقدار معینی است دارای اهمیت است با این حال، در مورد پرسهائی که محدودیت انرژی دارند لزوم تخمین انرژی لازم برای فورج آشکار می شود زیرا با تعیین مقدار انرژی و یا نیروی فورج ظرفیت پرس مربوط به آن به دست می آید. روش معمول محاسبه انرژی، اندازه گیری سطح زیر منحنی نیرو در برابر تغییر مکان است. به کمک آنالیز بالا یعنی تکنیک حد فوقانی اجزائی می توان این انرژی را محاسبه کرد. روش عمل به این ترتیب است که دو قسمت قالب را قدم به قدم به هم نزدیک کرده در هر قدم نیروی لازم را به کمک کامپیوتر معین می کنیم. بدیهی است که بعد از هر قدم، باید سطح مقطع فورج شونده را با توجه به سرعت اجزاء تعیین کرد و سپس یک قدم دیگر دو قسمت قالب را به هم نزدیک کرد. نزدیک شدن دو قسمت قالب تدریجاً هم چنان ادامه می یابد تا شکل مورد نظر به دست آید. با توجه به عمل فوق، تغییرات نیرو بر حسب تغییر مکان و در نتیجه انرژی لازم برای فورج قابل محاسبه خواهد بود. شکل پیش فرم نیز در مراحل مختلف با توجه به سرعت اجزاء مشخص می شود برای مثال، فرآیندهای Punch indentation و extrusion forging دو نوع تغییر فرمی هستند که اغلب در فورج قالب بسته با آن مواجهیم این دو فرآیند در شکل های ۲۰ و ۲۱ نشان داده شده اند. روش تعیین شکل پیش فرم به این ترتیب است که به مرزهای آزاد، مقادیر غیرمشخص سرعت نسبت داده می شود و سپس انرژی لازم برای انجام فرآیند را کامپیوتر بهینه می سازد و مقادیر مربوط به سرعت های غیرمشخص را به دست می دهد. با استفاده از این مقادیر در مراحل مختلف تغییر فرم می توان شکل پیش فرم را پیش بینی کرد و طراحی قالب مربوط به آن را انجام داد.



شکل ۲۰ - فرآیند Punch Indentation



شکل ۲۱ - فرآیند فورجینگ اکستروژن

### تأثیر خواص مکانیکی فلز فورج

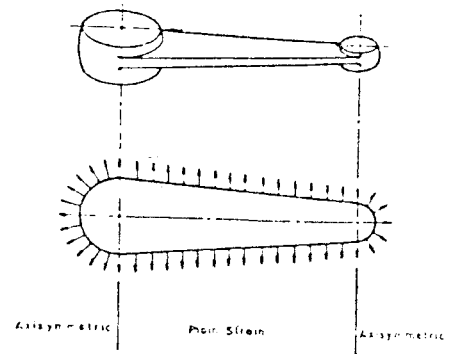
در فرآیندهای شکل دادن داغ، تنش سیلان فلز به دما، سرعت کرنش، و مقدار کرنش بستگی دارد. با فرض یکنواخت بودن دمای قطعه فورج، می توان از روابط تنش بر حسب کرنش و یا روابط تنش - سرعت کرنش - دما استفاده کرد و با دخالت دادن آن روابط در برنامه کامپیوتری بهینه سازی میدان سرعت، تنش سیلان فلز را برای نقاط مختلف قطعه در مراحل مختلف فورج محاسبه کرد و در نتیجه مقادیر نیرو، انرژی، ابعاد زاید و غیره را با در نظر گرفتن خواص مکانیکی فورج به دست آورد. در صورتی که برای فلزات و یا آلیاژهایی، روابط مذکور در دسترس نباشد می توان از یک مقدار ثابت تنش سیلان استفاده کرد. این مقدار ثابت برابر با تنش سیلان برای میانگین سرعت کرنش است.

### آنالیز فورجینگ قطعات تحت کرنش صفحه ای و محوری

به کمک اجزاء مربعی و مثلثی شکل ۱۵، و با بهینه سازی میدان سرعت می توان فورجینگ تحت کرنش

پارامترها، در هزینه فلز مصرف شده در فورج و سایر هزینه‌های مربوط به طراحی فورجینگ صرفه جویی خواهد شد.

صفحه‌ای و محوری را نیز آنالیز کرد. برای مثال از میله رابط موتور احتراق داخلی می‌توان نام برد. همان طور که در شکل ۲۲ دیده می‌شود چنین قطعه‌ای را ممکن است سه قسمت کرد که دو قسمت آن، تقارن محوری و دیگری شرایط کرنش صفحه‌ای دارد. سپس میدان سرعت بهینه نیرو، انرژی، خطوط جریان فلز و غیره را در مورد هر قسمت و در نتیجه در مورد کل قطعه فورج به دست آورد.



شکل ۲۲ - فورجینگ قطعه بلند - میله رابط

### نتیجه گیری

به کمک نظریه حد فوقانی اجزائی می‌توان پارامترهایی مانند نیرو، انرژی، جریان فلز، شکل پیش فرم و ابعاد قالب، تعداد مراحل فورج و ابعاد زائده بهینه را برای فورج قالب بسته قطعات پیچیده تعیین کرد. چگونگی عمل به این ترتیب است که کامپیوتر، قطعه کار را به اجزاء مختلف تقسیم می‌کند و سپس میدان سرعت بهینه را معلوم می‌دارد و با توجه به این میدان، پارامترهای مذکور را به دست می‌دهد. چنین آنالیزی می‌تواند آثار پارامترهایی مانند اصطکاک، دمای فورج، سرعت کرنش، خواص مکانیکی فلز مورد فورج و شکل ابتدائی قطعه کار را نیز در نظر بگیرد و اثر هر یک را بر پارامترهای نامبرده در بالا، معلوم کند.

مقایسه نتایج به دست آمده نظری و تجربی در مورد قطعات فورج شش کشور صنعتی جهان، گویای آن است که سازگاری خوبی بین نظریه و عمل وجود دارد. به عبارت دیگر با استفاده از این نظریه و تعیین شرایط بهینه

## فهرست منابع :

- 1) T. Altan " Forging Equipments, Materials and Practices " McGraw Hill , London, 1991.
- 2) E. Siebel, Werkstattstechnik und Maschinenbau , 1950 , 40 , 11, 373 - 380
- 3) K. Lange, "Theory and Basic Principle of Drop Forging , Metal treatments and Drop Forg" , May '1965
- 4) Altan and Fiorentino, "Predictions of Load and Stress in Closed Die Forging" , J. Eng . For Ind. May , 1971, 477 - 484
- 5) W. Johnson , R. Sowerby and J.B. Haddow , " Plane Strain Slip Line Fields", Arnold , 1990
- 6) W. Prager and P.G Hodge , " Theory of Perfectly Plastic Solids" , Chapman and Hall , 1951
- 7) S. Kobayashi, "Finite Element Modeling of Metal Forming Processes" , Proc . 4th. Int. Conf. Prod. Eng. Tokyo, 1980, 50 - 53
- 8) H.Kudo, "some Analytical and Experimental Studies of Axi - symmetric Cold Forging and Extrusion", Int , J. Mech. Sc. 1960, 2, 102 - 127
- 9) S. Kobayashi, " Upper bound Solutions of Axi - symmetric Forming Problems," Trans. ASME . May 1964, 122
- 10) R. Hill "The Mathematical theory of plasticity " Clarendon Press Oxford , 1950
- 11) A.S. Cramphorn and A.N. Bramley , "Computer Aided Forging Design with UBET, " proc, 18th, Int, MTDR Conf, London , pp, 717 - 724 , 1977.
- 12) T. Altan and H.J. Henning , "Closed Die Forging of Round Shapes," Metallurgica and Metal Forming , March , 1972, P. 83
- 13) A.C. Hobdel and A.Thomas , "Approaches to Cheaper Forgings" , Metal Forming, Jan. 1969 P,17
- 14) K. - Viergge, "A contribution to Flash Design in Colsed Die Forging " Doctoral Disertation, Technical University, Hanover , 1989