دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مکانیک

تحلیل فرایند فورجینگ با استفاده از توابع دوتایی جریان

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی

سید حجت موسوی

استاد راهنما

دکتر محمود سلیمی

۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مکانیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک سید حجت موسوی

تحت عنوان :

تحلیل فرایند فورجینگ با استفاده از توابع دوتایی جریان

در تاریخ ۱۳۹۰/۱۱/۱۱ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر محمود سلیمی
۲- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر محمود فرزین
۳- استاد داور	دکتر محمدرضا فروزان
۴- استاد داور	دکتر صالح اکبرزاده
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محمدرضا سلیم‌پور

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم

آنانکه مظهر عشق و محبت اند و با سوختن شمع وجودشان پرتو افشان بزم اندیشه اند

آنانکه مویشان سپیدی گرفت تا رویم سپید بماند

آنانکه فروغ نگاهشان، گرمی کلامشان و روشنی سیمایشان سرمایه های زندگی ام هستند

آنانکه راستی قامتیم در شکستگی قامتشان تجلی یافت.

خداوند بزرگ را شاکرم که به من کمک نمود تا مرحله ای دیگر از مراحل تحصیل خود را با موفقیت به پایان برسانم. از پدر و مادر، دو سرمایه بزرگ زندگیم که همیشه پشتیبان و مشوق من در این مسیر بودند سپاسگزارم. همچنین مراتب تشکر و قدردانی خود را از استاد ارجمندم جناب آقای **پروفسور سلیمی** که علاوه بر بهره علمی از محضرشان به ما درس حسن خلق و فروتنی در بالاترین مدارج علمی را نیز آموختند، اعلام می دارم و از بزرگ ترین افتخاراتم در زندگی قرار گرفتن در زمره یکی از کوچکترین شاگردان ایشان بوده است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: معرفی فرایند فورجینگ و مروری بر تحقیقات انجام گرفته

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- اهداف تعیین الگوی جریان ماده ۶

۱-۳- مروری بر تحقیقات و مطالعات انجام شده ۶

۱-۴- هدف ۹

فصل دوم: پلاستیسیته و روش های تحلیل فرایند فورجینگ

۲-۱- مقدمه ۱۱

۲-۲- نرخ کرنش در فشار و کشش تک محوره ساده ۱۷

۲-۳- معیار تسلیم در جسم ۱۸

۲-۴- روابط بین تنش و کرنش ۲۱

۲-۵- روش های تحلیل فرایند فورجینگ ۲۳

۲-۵-۱- روش کران پایینی ۲۳

۲-۵-۲- روش کران بالایی ۲۴

۲-۵-۳- روش قاچی ۲۴

۲-۵-۴- روش خطوط لغزش ۲۵

۲-۵-۵- روش المان محدود ۲۵

فصل سوم: آشنایی با مفهوم توابع دوتایی جریان

۳-۱- مقدمه ۲۷

۳-۲- تابع جریان در جریان دو بعدی ۲۷

۳-۳- توابع دوتایی جریان ۳۰

فصل چهارم: تحلیل فرایند فورجینگ بلوک چندضلعی

۴-۱- مقدمه ۳۳

۴-۲- تحلیل فرایند فورجینگ بلوک چند ضلعی ۳۴

۴-۲-۱- تحلیل تئوری و مدل ریاضی با در نظر گرفتن پدیده بشکه ای شدن ۳۴

۴-۲-۱-الف- توابع جریان، میدان سرعت سینماتیکی ومیدان نرخ کرنش ۳۷

۴-۲-۱-ب- قضیه کران بالایی ۴۱

۴-۲-۱-ج- روند حل مساله ۴۶

۴-۲-۲- فورج بلوک های چندضلعی با در نظر گرفتن پدیده تحدب اضلاع ۴۸

۴-۲-۲-الف- میدان سرعت و میدان نرخ کرنش ۴۸

۴-۲-۲-ب- قضیه کران بالایی ۵۰

فصل پنجم: نتایج تحلیل و بحث در نتایج

۵-۱- مقدمه ۵۵

۵-۲- نتایج تحلیل تئوری با استفاده از توابع دوتایی جریان ۵۵

۵-۳- نتایج تحلیل تئوری با استفاده از میدان سرعت در مختصات استوانه ای ۶۶

۵-۴- اعتباسنجی نتایج ۷۶

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- مقدمه ۹۶

۶-۲- نتیجه گیری ۹۶

۶-۳- پیشنهادات ۹۸

مراجع ۹۹

چکیده

فرایند فورجینگ به‌علت قابلیت‌های مطلوب از جمله دورریز کم مواد اولیه و افزایش مشخصات مکانیکی قطعه به‌عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های شکل‌دهی فلزات است و به‌همین علت روش‌های مختلفی در راستای تحلیل فرایندهای شکل‌دهی از جمله فورجینگ ارائه شده است. در این پایان‌نامه با استفاده از توابع دوتایی جریان از مکانیک سیالات و قضیه کران بالایی از تئوری‌های شکل-دهی فلزات روشی در تحلیل فرایند فورجینگ قالب‌باز بلوک‌های چندضلعی ارائه شده است. از جمله مزایای این روش می‌توان به فرمول-بندی ساده‌تر و سرعت محاسباتی بسیار بالا در مقایسه با دیگر روش‌های تحلیلی از جمله روش المان محدود نام برد. در این روش ابتدا برای ناحیه مورد نظر در تحلیل کران بالایی، با توجه به شرایط مرزی ناحیه دو تابع جریان پیشنهاد می‌شود. میدان سرعت سینماتیکی و میدان نرخ کرنش در هر نقطه از جسم با استفاده از توابع جریان پیشنهادی معین می‌شود که شامل ثابت‌های مجهولی خواهد بود و می‌توان این مجهولات را با روش مینیمم‌سازی تابع نرخ انرژی مصرفی تعیین نمود. در نتیجه میدان سرعت و میدان نرخ کرنش به‌صورت کامل در هر مرحله از فرایند در دسترس خواهد بود.از قابلیت‌های توابع جریان پیشنهادی در این پایان‌نامه پیش‌بینی میزان پدیده بشکه‌ای شدن سطوح آزاد بلوک در راستای ضخامت می‌باشد. هم‌چنین اثر پارامترهایی مانند ثابت اصطکاک و درصد کاهش ارتفاع بلوک بر فشار نسبی و نیروی فورج و میزان تحدب اضلاع بلوک بررسی شده است. در پایان نتایج تحلیل فورجینگ بلوک‌های مثلثی، مربعی و شش‌ضلعی حاصل از این روش با نتایج شبیه‌سازی در نرم افزار المان محدود آباکوس ۶.۱۰ و نتایج تجربی دیگران مقایسه شده‌اند که یکدیگر را به-خوبی تایید می‌نمایند.

کلمات کلیدی: فورجینگ بلوک‌های چندضلعی، توابع دوتایی جریان، روش کران بالایی، اثر بشکه‌ای شدن.

فصل اول
معرفی فرایند فورجینگ و مروری بر تحقیقات انجام گرفته

۱-۱- مقدمه

براساس مدارک باستان‌شناسی فرایند فورجینگ[1] قدیمی‌ترین روش شکل‌دهی می‌باشد. فرایند فورج در ابتدا برای برای رفع نیازهای اولیه بشر مورد استفاده قرار می‌گرفت و سپس به‌دلیل افزایش نیازها به تدریج توسعه پیدا کرد و از اهمیت بیشتری برخوردار شد. پس از سالیان متمادی، این فرایند شکل صنعتی به خود گرفت. این پیشرفت بیشتر مدیون انقلاب صنعتی بود که از قرن هجدهم میلادی در اروپا شروع شد. امروزه اکثر قطعات صنعتی در صنایع مهمی مانند ماشین‌سازی، خودروسازی و صنایع نظامی و هوایی با فرایند فورجینگ تولید می‌شوند. در این روش قطعات تحت فشار یا ضربه‌های متوالی شکل مطلوب را به خود می‌گیرند. این قطعات دارای مقاومت و استحکام بیشتری نسبت به قطعات ماشین‌کاری شده هستند. این فرایند از لحاظ جریان ماده در داخل قالب به دو دسته عمده تقسیم می‌شود:

الف- فورجینگ قالب‌باز[2]

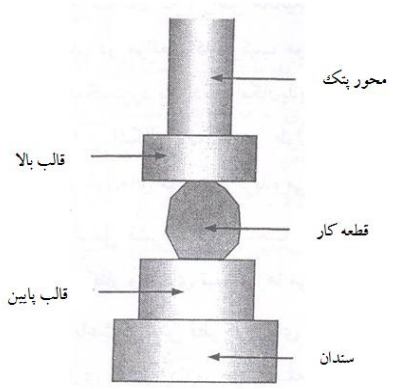
ب- فورجینگ قالب‌بسته[3]

---

[1] Forging
[2] Open die forging
[3] Close die forging

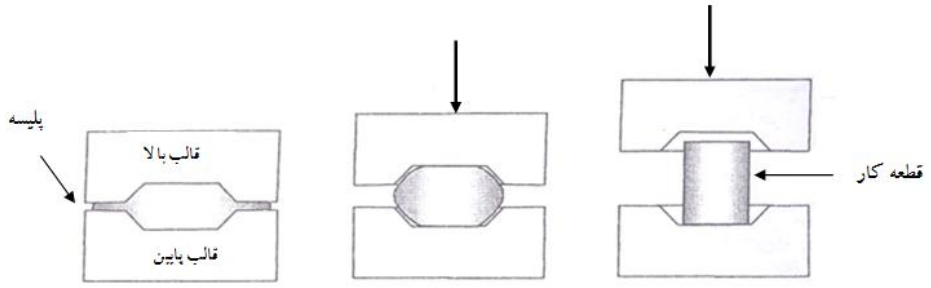
به‌طور کلی در فرایند فورجینگ نیروی فشاری به سطح قطعه وارد می‌شود که در نتیجه آن مواد در جهت عمود بر راستای فشار جریان می‌یابند. اگر مواد بتوانند آزادانه جریان پیدا کنند فورجینگ را قالب‌باز می‌نامند و در صورتی که جریان مواد توسط دیواره های قالب تحت کنترل باشد آن را فورجینگ قالب‌بسته می‌نامند. به‌علت کنترل روی جریان مواد در قالب، خواص قطعه از جمله خواص مکانیکی، مقاومت در برابر ضربه و خستگی، نسبت استحکام به وزن بالا، بهبود پیدا می‌کند. با کمک این روش به‌راحتی می‌توان قطعات با هندسه پیچیده حتی با ابعاد کوچک را تولید نمود بدون آن‌که مشخصه های عملکرد و یا ضریب اطمینان کاهش یابد. محورها، چرخ‌ها، چرخ‌دنده ها، فلنج‌ها، دیسک-های توربین و بسیاری از قطعات دیگر را می‌توان با خصوصیات مطلوب و کیفیت بالا و قیمت مناسب به کمک این فرایند تولید نمود.

فرایند فورجینگ قالب‌باز به نام‌های گوناگون فورج دستی، چکشی و قالب تخت شناخته شده است. بیشتر هنگامی به‌کار می‌رود که تعداد قطعات مورد نیاز به اندازه‌ای کم است که فورج قالب‌بسته مقرون به صرفه نیست و یا شکل قطعه به اندازه‌ای ساده است که تولید آن با فورجینگ قالب‌باز مقرون به صرفه‌تر از روش قالب‌بسته است. هم-چنین هنگامی‌که قطعه به اندازه‌ای بزرگ است که با فورج قالب‌بسته نمی‌توان آن‌را شکل‌دهی کرد. فرایند فورجینگ قالب‌باز در شکل (۱-۱) به‌طور شماتیک نشان داده شده است. انواع قالب با اشکال مسطح، شیب‌دار و ساده بر روی محور پتک و سندان قابل نصب هستند. قطعاتی مانند پروانه‌ها و محور کشتی‌ها که طول آن ها به ۲۸ متر می رسد از طریق فورجینگ قالب باز تولید می‌شوند. از طرف دیگر وزن قطعه فورجینگ قالب‌باز ممکن است به کوچکی نیم کیلوگرم یا به بزرگی ۳۰۰ تن باشد. عموماً شکل قطعات تولیدی با فرایند فورجینگ قالب‌باز ساده است، مانند اشکال مدور، مربع‌شکل، شش‌ضلعی و هشت‌ضلعی تولید شده با فورج شمشال که خواص مکانیکی آن‌ها بیش از میله‌های نورد شده است.اکثر فرایندهای فورجینگ قالب‌باز به‌وسیله یک جفت قالب تخت انجام می‌شوند. یکی از قالب ها به محور پرس و دیگری به فک ثابت (سندان) متصل می‌شوند.



شکل ۱-۱- فورجینگ قالب‌باز[۳۳]

فرایند فورجینگ قالب‌بسته به دو شکل فورجینگ معمولی و فورجینگ دقیق تقسیم‌بندی می‌شود. در فورجینگ معمولی برای اطمینان از پر شدن تمامی فضا و حفره‌های قالب و تولید سالم و بی‌نقص قطعه، در مقایسه با حجم محصول نهایی از ماده بیشتری برای تولید آن استفاده می‌شود. به‌هنگام شکل‌گیری قطعه در قالب مواد اضافی از آن به بیرون رانده شده و بدین ترتیب در اطراف قطعه پلیسه[1] ایجاد می‌گردد. لذا هزینه ماشین‌کاری در این نوع فورج به هزینه‌های اولیه اضافه می‌شود. در شکل (۱-۲) شکل شماتیک این فرایند نشان داده شده است.



شکل ۱-۲- شکل شماتیک مراحل فورجینگ قالب‌بست[۳۳]

در فرایند فورجینگ بواسطه آن‌که ماده در طول فرایند تحت تغییرشکل‌های زیادی قرار می‌گیرد، کارسخت می‌شود. این مقدار کارسختی در بعضی مواقع به‌حدی می‌رسد که ماده بسیار شکننده می‌گردد و ممکن است در گوشه‌ها و حفره‌ها دچار ترک‌خوردگی شود. برای اجتناب از این امر و کاهش تنش جریان در قطعه و هم‌چنین کاهش نیرو و انرژی لازم برای شکل‌دهی بایستی ماده را در حالت داغ تحت تغییرشکل قرار دهیم، چرا که با افزایش دما کارسختی کاهش می‌یابد. در محدوده دمایی که زیر دمای تبلورمجدد است تغییرشکل ماده همواره با تغییرشکل کریستال‌ها می‌باشد ولی اندازه کریستال‌ها تغییری نمی‌کند. در این حالت کارسختی ایجاد شده کمتر از حالت فوق می‌باشد. به‌علت کاهش تنش‌ها در قطعه انرژی لازم برای تغییرشکل کاهش می‌یابد. در دماهای بالا روان‌کاری و نوع روان‌کار اهمیتی خاص پیدا می‌کند چرا که کارایی روان‌کارها در دماهای بالا به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. در چنین مواقعی استفاده از گرافیت به عنوان روان‌کار توصیه می‌شود.کارسختی در حالت فورجینگ داغ بسیار اندک می‌باشد. هم‌چنین انرژی لازم برای تغییرشکل قطعه کم‌تر از حالت فورجینگ حالت سرد و گرم می باشد. به‌طورکلی در اغلب موارد فرایند فورجینگ همراه با کار گرم می‌باشد در این نوع فرایند جریان یافتن ماده و پر شدن فضای قالب به عوامل زیر بستگی دارد:

[1] Flash

۱- تنش سیلان و قابلیت فورجینگ ماده: برای یک فلز مشخص هر دو خاصیت تنش سیلان و قابلیت فورجینگ متاثر از مشخصات متالورژیکی ماده قطعه‌کار، دما، تغییرشکل نسبی معادل، سرعت تغییرشکل نسبی معادل و تنش معادل در هر مرحله از تغییرشکل معادل می‌باشند.

۲- اصطکاک: اصطکاک مابین قطعه کار و دیواره‌های قالب تاثیر زیادی بر جریان ماده، توزیع فشار، نیرو و انرژی لازم برای فرایند خواهدگذاشت. از طرفی تعیین و کنترل دقیق شرایط اصطکاکی در حین انجام فرایند امری غیر ممکن به نظر می‌رسد لذا در مدل‌های تئوری، اصطکاک در فصول مشترک قالب و قطعه را به‌صورت کمیتی برحسب فاکتور و یا ضریب درمی‌آورند.

۳- درجه حرارت قطعه: تعیین درجه‌حرارت قطعه حین تغییرشکل بسیار مشکل می‌باشد چراکه انرژی لازم برای تغییرشکل قطعه به‌صورت گرما در آن ظاهر می‌شود از طرفی انتقال حرارت از طرف قطعه به دیواره‌های قالب باعث کاهش دمای قطعه می‌شود. برای تعیین دمای واقعی قطعه در هر لحظه از تغییرشکل، بایستی اطلاعات کافی از تبادل حرارتی بین قطعه و قالب و هم‌چنین حرارت تولید شده در اثر تغییرشکل را داشته باشیم. در طول فرایند فورجینگ توزیع درجه حرارت در قطعه و قالب که تاثیر قابل ملاحظه‌ای برروی سیلان فلز، پرشدن فضای قالب، نیرو و انرژی لازم و سائیدگی قالب دارد، خود به مقدار زیاد وابسته به سرعت انجام فرایند فورجینگ است. سرعت تغییر شکل نیز به سهم خود بر میزان کارسختی جسم موثر است. با بالا رفتن سرعت تغییرشکل یا نرخ‌کرنش، سختی جسم بالاتر می رود. برای جلوگیری از این امر بایستی دمای قطعه را بالاتر برد، البته در نرخ‌های بالای کرنش امکان تبادل حرارتی کم‌تری وجود دارد، از این‌رو فرایند شکل‌پذیری در یک محدوده دمای کوچکی که به آن اصطلاحاً همدما[1] گفته می‌شود، مطلوب برای فرایند فورجینگ است.

۴- پیچیدگی شکل محصول: هر چقدر شکل قطعه پیچیده‌تر باشد تعیین و تعداد شکل پیش فرم ها به‌منظور رسیدن به محصول نهایی بهینه و صرفه‌جویی در نیرو و انرژی لازم از اهمیت بالایی برخوردار می‌شود. در این حالت به‌دست آوردن الگوی صحیح جریان ماده و خطوط جریان به صورت تحلیلی بسیار مشکل می‌باشد. در این مواقع نیز استفاده از روش‌های تجربی و سعی و خطا در تعیین پیش‌فرم‌ها و الگوی جریان نقش اساسی ایفاء می‌کند.

[1] Isothermal

۱-۲- اهداف تعیین الگوی جریان ماده

با تعیین الگوی جریان ماده به اهداف عمده ذیل می‌توان رسید:

۱- با مشخص شدن الگوی جریان ماده، میدان سرعت قابل شناسائی بوده و به‌کمک آن می‌توان کرنش‌ها را محاسبه نمود و به کمک قضیه کران بالایی می توان انرژی و نیروی لازم برای تغییرشکل را محاسبه نمود و به کمک آن ابزار مناسب برای تغییرشکل را انتخاب کرد.

۲- با تعیین الگوی جریان ماده تحت تغییرشکل و توزیع میدان‌های تنش و تغییر شکل نسبی می‌توان پی به چگونگی تغییر خواص ماده در خلال تغییرشکل برد. در این حالت می‌توان به راحتی احتمال وجود عیوب داخلی و خارجی از قبیل وجود ترک در قطعه را تشخیص داد.

۳- در نهایت با مشخص شدن میدان تنش و کرنش در قطعه می‌توان تنش های وارد بر ابزار و قالب را تعیین نمود و در صورت ضعیف بودن قالب در برخی مواضع، آن‌را به شکل مناسب تقویت کرد.

۱-۳- مروری بر تحقیقات و مطالعات انجام شده

حل دقیق و ارائه مدلی واقعی از مسائل شکل‌دهی بسیار مشکل می‌باشد. در حل این‌گونه مسائل استفاده از اصول اکسترمم افزایش فزاینده‌ای داشته است. از اصول اکسترمم قضایای کران بالا و پائین مشتق شده است که اساس روش‌های کران بالا و پائین را در حل مسائل پلاستیسیته شکل می‌دهد. فرایند فورجینگ قالب‌باز شمشال‌های تخت به‌دلیل اهمیت بالایی که در صنعت دارد مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است و از موضوعات مورد علاقه آنان می باشد. مدل‌سازی عددی و تجربی فرایند فورج قالب‌باز شمش‌های مستطیلی مورد علاقه بسیاری از محققین بوده است. اولین فرمول‌بندی تجربی برای پیش‌بینی طویل‌شدگی و پهن‌شدگی در فورج شمشال تخت توسط تاملینسون[1] واسترینگر[2][۱] انجام شد، ایشان ضریب گستردگی را معرفی کردند.

قضیه کران بالایی ابتدا توسط هودج[3] و پراگر[4][۲] در سال ۱۹۵۱ فرمول بندی شده است. سپس بوسیله دراکر[5][۳] ناپیوستگی‌های سرعت نیز در این قضیه به‌کار برده شد. در سال ۱۹۵۱ گرین[6][۴] و در سال ۱۹۵۸ جانسون[7][۵] مقاله-

[1] Tomlinson
[2] Stringer
[3] Hodge
[4] Prager
[5] Drucker
[6] Green
[7] Johnson

هایی در تشریح روش بالا برای مسائل اکستروژن و فورجینگ در حالت کرنش‌صفحه ای[1] ارائه نمودند. کودو[2] [۶] در مقاله خود منطقه تغییرشکل را به بلوک‌هایی تقسیم نموده سپس با کمک قضیه کران بالایی انرژی لازم برای تغییرشکل بلوک‌ها را محاسبه نمود. جونجا[3] [۷]و[۸] ، جونجا و ساگار[4] [۹] جریان‌یافتن فلز و نیروی لازم برای فرایند فشردن دیسک‌های لوزی‌شکل، شمش‌های مستطیلی ودیسک‌های چهارضلعی را با استفاده از روش کران بالایی تحلیل کردند.

در سال ۱۹۷۴ نقپال[5] [۱۰] فرایند فورجینگ قالب‌باز در حالت کرنش‌صفحه‌ای را مورد بررسی قرار داد. ایشان مساله را در دو حالت مورد مطالعه قرار داده است در ابتدا فرض نمود حین تغییرشکل هیچ ناحیه مرده ای در جسم تشکیل نمی‌شود ولی قطعه حین تغییرشکل دچار پدیده بشکه‌ای می‌شود و در حالت دوم از بشکه‌ای شدن قطعه صرفنظر شده اما قسمتی از قطعه به صورت صلب جابجا می‌شود.

دین[6] و ندیانی[7] [۱۱] برروی فورج قالب‌بسته شمش‌های مکعب‌مستطیلی و استوانه‌ای مطالعه کردند. در این مطالعه مطالعه نحوه پر شدن قالب در گوشه‌ها در مراحل نهائی فرایند بررسی شده است. ایشان با بررسی‌های انجام‌گرفته به این نتیجه رسیدند که موضع‌گیری صحیح قطعه در داخل قالب قبل از شروع فرایند از اهمیت خاصی برخوردار است و عدم موضع‌گیری مناسب قطعه در داخل قالب باعث جریان ناهمگون ماده شده و در نتیجه فشار بالاتری برای شکل-دادن قطعه مورد نیاز است. کوبایاشی[8] [۱۲] برای تحلیل فرایند فورجینگ یک بلوک ساده از روش اجزاء محدود سه‌بعدی با کمک المان‌های مکعبی هشت‌گرهی استفاده نمود. ایشان در مطالعاتشان به این نتیجه رسیدند که با افزایش ضریب اصطکاک، پخش و انتشار ناهمگون ماده در حین تغییر شکل بیشتر می‌شود. کیفر[9] و شاه[10] [۱۳] نیزاز تحلیل سه‌بعدی المان محدود برای شبیه‌سازی فورج قالب‌باز بلوک‌ها استفاده کردند .

یانگ[11] و کیم[12] [۱۴] همان بررسی‌های انجام شده به‌وسیله کوبایاشی را با روشی دیگر انجام دادند. در مقاله ایشان برای تغییرشکل سه‌بعدی یک چندوجهی منتظم تحت فرایند فورجینگ قالب‌باز یک میدان سرعت سینماتیکی قابل‌قبول درنظر گرفته شده‌است.

---

[1] Plain strain
[2] Kudo
[3] Juneja
[4] Sagar
[5] Nagpal
[6] Dean
[7] Nediani
[8] Kobayashi
[9] Kiefer
[10] Shah
[11] Yang
[12] Kim

فاکس[1] و لی[2] [۱۵] مدلی برای فورجینگ قالب‌بسته ارائه نموده که در آن اثرات کارسختی نیز در نظر گرفته شده‌است. تحلیل صورت گرفته به‌وسیله ایشان در هر دو حالت متقارن و کرنش‌صفحه‌ای انجام پذیرفته‌است. در سال ۱۹۹۱ موناقان[3] و همکارانش [۱۶] بر روی فورج یک شمش مکعبی داخل قالب دایروی مطالعه کردند. در این مقاله نسبت فشار فورجینگ به تنش موثر در گام‌های مختلف پیشروی سنبه به‌دست آمده‌است. نتایج به‌دست آمده حاوی این نکته است که در مراحل انتهایی پر شدن قالب، نیروی وارد بر سنبه افزایش چشم‌گیری می‌یابد. هم‌چنین در آزمایشات انجام‌گرفته به‌وسیله ایشان، انرژی تلف‌شده از اصطکاک ماده و سطوح بالایی و پائینی قالب بیشتر از انرژی اتلافی ناشی از اصطکاک دیواره های جانبی قالب و ماده در حال تغییرشکل می‌باشد. برملی[4] و همکارانش [۱۷] همچنین کیوچی[5] و همکارانش [۱۸] در توسعه روش کران بالای اجزایی در حل مسائل فورجینگ چرخدنده گام-های نخستین را برداشتند.

چیتکارا[6] و همکارانش [۱۹] در سال ۱۹۹۶، از روش کران بالای اجزایی در تحلیل فرایند فورجینگ چرخ‌دنده اسپلاین استفاده نمودند. در این مقاله از دو روش فورجینگ متفاوت استفاده شده که نتایج آن‌ها با هم مقایسه شده-است. در انتها تاثیر تغییرشکل داخلی، اصطکاک و برش را در انرژی مصرفی نشان داده‌اند. در مطالعه دیگری توسط چیتکارا و همکارانش [۲۰] بر روی فورجینگ چرخدنده ساده برای پیش‌بینی مقدار تنش و فشار کاری و تغییرشکل از تعادل جسم آزاد براساس روش تحلیل قاچی استفاده نموده‌اند. معادلات تعادل استخراج شده در دو سیستم مختصات کارتزین و استوانه‌ای، فشار لازم برای عمل فورجینگ را تخمین زده‌است. در سال ۲۰۰۳ نیز صادقی [۲۱] در تحلیلی بر فرایند فورجینگ چرخدنده‌های ساده و مارپیچ با استفاده از روش کران بالایی یک میدان سرعت جدید ارائه نمودند که دربرگیرنده بشکه‌ای شکل شدن سطح آزاد دندانه نیز می‌باشد.

ییح[7] [۲۲] اولین بار در سال ۱۹۵۷ توابع جریان را معرفی کرد. توابع دوتایی جریان یکی از ابزارهای سودمند در تحلیل فرایندهای شکل‌دهی سه‌بعدی می‌باشد که در این تحقیق در تحلیل فرایند فورجینگ مورد استفاده قرار گرفته-است. این روش برای اولین بار توسط نقپال [۲۳] برای تحلیل فرایندهای شکل‌دهی سه‌بعدی پیشنهاد شد. سپس در سال ۱۹۹۱ توسط مانوئل[8] و همکارانش [۲۴] در تحلیل فرایند نورد به کار بسته شد. در این مقاله ابتدا مفهوم توابع دوتایی جریان توضیح داده شده و سپس در ادامه چشم‌انداز مربوط به حل عددی این تکنیک به کمک کامپیوتر ارائه شده است. در سال ۱۹۹۳ کن رایت[9] [۲۵] در رساله‌ی دکترای خود با استفاده از توابع دوتایی جریان روشی برای

---

[1] Fox
[2] Lee
[3] Monaghan
[4] Bramely
[5] Kiuchi
[6] Chitkara
[7] Yih
[8] Manuel
[9] Kenwright

تولید خطوط جریان سه بعدی ارائه نمود. در سال ۱۹۹۳ ونگ[1] و همکارانش [۲۶] به منظور رفع محدودیت‌های موجود در روش کران بالای اجزایی در مسائل شکل‌دهی دوبعدی از ترکیب قضیه کران بالایی و تابع جریان استفاده نمودند. ایشان با کمک این روش، فورجینگ یک بلوک مکعب مستطیلی را در حالت قالب باز و کرنش صفحه ای مورد بررسی قرار دادند.

در سال ۱۹۹۸ یونگ[2] و همکارش [۲۷] یک مدل ریاضی برای فرایند نورد تخت با کمک توابع دوتایی جریان و مختصات استوانه‌ای ارائه نمودند و سپس اثرات پارامترهای مختلفی مانند قطر غلتک، ضخامت صفحه، ضریب اصطکاک و... را مورد مطالعه قرار دادند. هم‌چنین ایشان در سال ۲۰۰۰، مدل ریاضی خود را با کمک توابع دوتایی جریان برای فرایند نورد مقاطع V شکل توسعه دادند [۲۸].

در سال ۲۰۰۳ کیم و همکارانش [۲۹] در مطالعه برروی اکستروژن معکوس[3] برای به‌دست آوردن میدان سرعت از توابع دوتایی جریان استفاده نمودند. لی[4] و مالینسون[5] [۳۰] روشی برای محاسبه سطوح جریان دوتایی برای میدان-های اندازه حرکت ارائه نمودند و نشان دادند که برای جریان های متقارن محوری یکی از توابع جریان دوتایی، تابع جریان استوکس است. در این حالت پاسخ مساله به‌جای حل معادلات دیفرانسیل جزیی از حل دو معادله دیفرانسیل معمولی به‌دست می‌آید.

در سال ۲۰۰۷ سزک[6] و همکاران تغییرشکل سه‌بعدی در فرایند نورد سرد و گرم ورق را مورد بررسی قرار دادند دادند [۳۱] ایشان یک میدان سرعت سینماتیکی قابل‌قبول برای پیش‌بینی جریان جسم حین فرایند با استفاده از توابع دوتایی جریان پیشنهاد دادند و نشان دادند نتایج به دست آمده با نتایج تجربی هم‌خوانی مناسبی دارند و این روش می‌تواند روش مناسبی برای کنترل فرایند نورد سرد و گرم ورق باشد. در سال ۲۰۰۹ میتی[7] و همکاران [۳۲] برای تحلیل فرایند اکستروژن شمش مربعی از روش کران بالایی استفاده کردند، ایشان از توابع دوتایی جریان به منظوردست‌یابی به میدان سرعت سینماتیکی استفاده کردند.نتایج آن ها با نتایج تجربی هم‌خوانی خوبی داشت.

۱-٤- هدف

هدف از این پایان‌نامه استفاده از توابع دوتایی جریان از مکانیک سیالات و قضیه کران بالایی از تئوری‌های شکل‌دهی فلزات در تحلیل فرایند فورجینگ قالب‌باز بلوک‌های چندضلعی می‌باشد. از جمله مزایای این روش می-

---

[1] Wang
[2] Yeoung
[3] Backward extrusion
[4] Li
[5] Mallinson
[6] Sezek
[7] Maity

توان به فرمول‌بندی ساده‌تر و سرعت محاسباتی بسیار بالا در مقایسه با دیگر روش‌های تحلیلی از جمله روش المان محدود نام برد. در این روش ابتدا برای ناحیه مورد نظر در تحلیل کران بالایی، با توجه به شرایط مرزی آن ناحیه، دو تابع جریان پیشنهاد می‌شود. میدان سرعت سینماتیکی و میدان نرخ کرنش در هر نقطه از جسم با استفاده از توابع جریان پیشنهادی معین می‌شود که شامل ثابت‌های مجهولی خواهد بود و می‌توان این مجهولات را با روش مینیمم-سازی تابع نرخ انرژی مصرفی تعیین نمود. در نتیجه میدان سرعت و میدان نرخ کرنش به‌صورت کامل در هر مرحله از فرایند در دسترس خواهد بود. اثر بشکه‌ای شدن[1] در راستای ضخامت وتحدب[2] اضلاع بلوک نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این راستا در فصل دوم به طور اجمالی روابط پلاستیسیته حاکم بر مساله مرور می‌شود. در ادامه در فصل سوم توابع جریان در جریان های دو و سه‌بعدی معرفی می‌شوند و در فصل چهارم این توابع برای بلوک‌های چندضلعی در فرایند فورجینگ قالب‌باز تعیین خواهند شد. در فصل پنجم نتایج حاصل از روش توابع دوتایی جریان و نرم‌افزار المان محدود آباکوس، با نتایج تحلیلی دیگر و نتایج تجربی مقایسه و بر روی آن بحث شده است و در انتها، در فصل ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادات ارائه می‌گردد.

[1] Barreling
[2] Bulging

فصل دوم
پلاستیسیته و روش‌های تحلیل فرایند فورجینگ

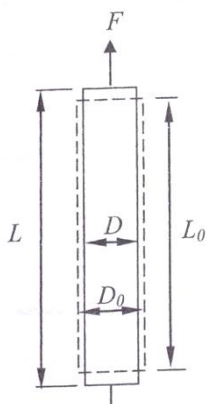
۲-۱- مقدمه

پلاستیسیته عنوانی است که به مطالعات ریاضی بر روی تنش و کرنش اجسامی که به‌طور پلاستیک تغییرشکل داده‌اند اطلاق می‌شود. وظیفه این تئوری اولاً بیان روابطی میان تنش و کرنش است که تا حد امکان با مشاهدات تجربی تطابق داشته و از عمومیت کافی برخوردار باشد و ثانیاً ارائه روش‌های ریاضی به‌منظور محاسبه توزیع غیریکنواخت تنش و کرنش در اجسامی است که به طرق مختلف تغییرشکل دائمی داده‌اند، می‌باشد. دست‌یابی به پاسخ قابل‌قبول در مسائل شکل‌دهی فلزات نیاز به درک صحیح از مکانیک تغییرشکل و دانش کافی از رفتار فلز در طول فرایند شکل‌دهی دارد. عمدتاً در بررسی مکانیک شکل‌دهی فلزات سه مرحله زیر دنبال می‌گردد:

۱- بررسی جریان فلز تحت تغییرشکل که درک صحیح از آن مستلزم داشتن رابطه میان هندسه تغییرشکل و علت تغییر شکل قسمت‌های مختلف می‌باشد.
۲- بررسی حدود شکل‌پذیری و قابلیت انجام‌کار، یعنی روش مورد نظر استعداد آن کار را بدون اینکه در محصول نهایی عیب و نقصی بروز نماید دارا می باشد یا نه.
۳- تخمین و محاسبه میدان‌های تنش و تغییرشکل نسبی و در نتیجه نیروی لازم برای تغییرشکل که بدین‌وسیله طراحی ابزار برای تغییرشکل ماده مورد بحث امکان‌پذیر می‌گردد.

دست‌یابی به خواسته‌های فوق بدون اطلاع از اصول حاکم بر تشکیل فلزات امکان‌پذیر نمی‌باشد لذا در ادامه سعی بر آن است که مروری اجمالی بر پلاستیسیته و مکانیک تغییرشکل فلزات به‌عمل آید و سپس فرایند فورجینگ و مشخصات آن مورد بررسی قرارگیرد. اغلب در تئوری پلاستیسیته مواد را ایده‌آل فرض می‌کنند، ماده ایده‌آل ماده‌ای است که در آن از اثر باشینگر[1] و هیسترزیس[2] در بارگذاری و باربرداری و برخی اثرات حرارتی از قبیل آسایش تنش[3]، خزش[4] و دیگر پدیده‌های حرارتی صرف‌نظر شده باشد اما ماده می‌تواند ایزوتروپیک[5] و یا غیرایزوتروپیک باشد.با این حال در بسیاری موارد آن را ایزوتروپیک فرض می‌کنند.

شکل‌دهی صنعتی به تبدیل هندسه یک جسم به شکل دل‌خواه گفته می‌شود که در تیراژ بالا و با استفاده از روش-های اقتصادی انجام می‌شود. فرایند شکل‌دهی در اکثر منابع مهندسی به تغییر هندسه اجسام بدون افزایش یا کاهش حجم آنان گفته می‌شود. تغییر طول نسبی و کرنش[6] از مفاهیم اولیه در تحلیل فرایندهای شکل‌دهی هستند. ساده‌ترین نوع تغییرشکل از کشش یک میله مستقیم طبق شکل (۲-۱) به‌دست می‌آید نیروی کششی باعث تغییرطول میله از مقدار L_0 به مقدار L می‌شود. نیروی اعمال‌شده F به‌صورت گسترده بر روی سطح مقطع میله اعمال می شود. تنش در میله از توزیع نیرو روی سطح مقطع قابل محاسبه است.



شکل۲-۱- تغییر طول یک میله با نیروی کششی

مقدار تنش (تنش واقعی یا کوشی[7]) در میله با رابطه زیر برابر است:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{4F}{\pi D^2} \qquad (۱-۲)$$

[1] Bauschinger
[2] Hysteresis
[3] Relaxation
[4] Creep
[5] Isotropic
[6] Strain
[7] Cauchy