۵

روند پیشرفت تحقیقات د رشکل دهی فلزات

عبدالعلی فرزاد
استادیار دانشگاه سیستان و بلوچستان

چکیده:
شکل دهی فلزات یکی از کهن ترین روشهای تولید به شمار می رود. تحقیقات وسیعی در این زمینه صورت گرفته است ولی هنوز هم طراحی قالب های شکل دهی هنر به حساب می آید. در این مقاله روند پیشرفت تحقیقات در زمینهٔ انرژی لازم برای شکل دهی، کاهش عیوب محصولات و افزایش عمر ابزار مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: شکل دهی فلزات- اکستروژن-طراحی قالب- تئوری پلاستیسته.

۱- مقدمه

در پروسه های شکل دهی فلزات، نیروی فوق العاده زیادی لازم می آید. گاهی درصد زیادی از این نیرو در مواردی مصرف می شود که برای شکل دهی یکنواخت فلز ضروری نیست. این نیروی بزرگ گاهی باعث ایجاد عیب در محصول و آسیب زدن ابزار می گردد. بدین دلیل، در هر پروسهٔ شکل دهی سؤالاتی نظیر سؤالات زیر مطرح می شود:

- چگونه می توان مصرف انرژی شکل دهی را کاهش داد؟
- چگونه از عیوب محصولات می توان جلوگیری کرد؟
- چگونه عمر ابزار را می توان افزایش داد؟

پی گیری و جستجوی جواب برای هریک از سؤالات فوق زمینهٔ تحقیق ویژه ای را باز می کند.

۲- تئوری های شکل دهی

تئوری های متعددی در شکل دهی فلزات وضع گردیده است. تئوریها بر اساس مبنای فرضیات ساده کنندهٔ اولیه باهم متفاوتند. برتری یکی بر دیگری به اصول زیر ارتباط دارد:

۱- توانایی روش برای پیش بینی نیروهای شکل دهی.
۲- توانایی روش برای ارزیابی توزیع تنش.
۳- شامل کردن اصطکاک، کارسختی و دیگر پارامترهای شکل دهی.
٤- توانایی روش برای پیش بینی توزیع کرنش و تغییرشکل های زاید.
٥- توانایی روش برای پیش بینی عیب های احتمالی محصول.
٦- سهولت کاربرد روش.
۷- دسترسی به دقت بالاتر.

یک روش بخصوص ممکن است تمامی خواسته های بالارا ارضا نکند. بنابراین، مقایسهٔ روشهای موجودمی تواند طراح را در انتخاب شیوهٔ تحلیل مناسب یاری دهد. این مقایسه توسط آلتان و لاهوتی [۱]، بصورت جدول ۱ ارائه گردیده است. این جدول بیشتر روشهای تولید را در بر می گیرد. اینک به توضیح مختصر برخی از این روش ها، که کاربرد بیشتری دارند می پردازیم.

۲-۱ روش انرژی یکنواخت

این روش بر پایهٔ موازنهٔ انرژی استوار است. کار انجام شدهٔ خارجی مساوی انرژی مصرفی شکل دهی قرار داده می شود. بدین ترتیب، فشار متوسط لازم بدست می آید. در این روش فرض می شود که کل انرژی مصرف شده صرف شکل دهی یکنواخت و همگن، بدون اصطکاک و تغییرشکل زاید، شده باشد. این مقدار انرژی بر واحد حجم ماده معادل مساحت زیر منحنی تنش-کرنش می باشد. این روش محاسبات ساده ای لازم دارد و در طراحی صنعتی کاربرد وسیعی داشته است [۱].

۲-۲ روش تحلیل تختاری

در روش تختاری تعادل پیکرهٔ آزاد یک تختار مجازی مجزا در نظر گرفته می شود. موازنهٔ نیرویی این تختار منجر به معادلهٔ دیفرانسیلی برحسب تنش های یکنواخت می گردد. با در نظر گرفتن تنش جاری شدن بصورت تابعی از کرنش می توان کارسختی را نیز منظورنمود.

این روش علاوه بر ارزیابی نیروهای شکل دهی برای محاسبهٔ توزیع تنش [۲] وفشار در روی ابزار [۳] مناسب می باشد. با وجود این، روش تحلیل تختاری بیشتر در مورد فرایندهای متقارن نظیر اکستروژن و کشش کاربرد دارد و در صورتیکه زاویهٔ قالب زیاد و نسبت کاهش کم در کار باشد این روش نتایج قابل قبولی نمی دهد [٤].

۲-۳ تئوری میدان لغزش

تئوری میدان لغزش براساس این استوار است که فرض شود که تغییرشکل در امتداد تنش های برشی حداکثر در طول خطوط لغزش بوقوع می پیوندد. این روش در مورد مسائل کرنش های صفحه ای و مواد صلب کاملاً پلاستیک بکار می رود. کاربرد وسیعی از تئوری در مراجع [٥ و ٦] می توان یافت. با روش تئوری میدان لغزش می توان موارد زیر را پیش بینی کرد [۷]:

۱- نیروهای شکل دهی.

جدول ۱- خلاصهٔ روش های مختلف محاسباتی درشکل دهی فلزات[۱]

روش	ورودی		خروجی				ملاحظات
	تنش جاری شدن	اصطکاک	میدان سرعت	میدان تنش	میدان دما	تنش در روی ابزار	
قطعه ای	متوسط	الف و ب	خیر	آری	خیر	آری	کارمازادرادرنظرنمی گیرد
انرژی یکنواخت	متوسط	ب	خیر	خیر	خیر	متوسط	کارمازادرابطورتقریبی درنظرمی گیرد
خط لغزش	متوسط	الف و ب	آری	آری	خیر	آری	معتبر برای مسائل کرنش صفحه ای
باند بالاتر	توزیع	ب	آری	خیر	خیر	متوسط	باند بالاترنیروهارامی دهد، مرزهای آزادرا تعیین می کند
روش هیل	توزیع	الف و ب	آری	خیر	خیر	متوسط	مسائل سه بعدی را می تواند تحلیل کند
اختلاف محدود	توزیع	الف و ب	آری	آری	آری	آری	وقت زیادی از کامپیوتر می گیرد
المان محدود	توزیع	الف و ب	آری	آری	آری	آری	وقت زیادی از کامپیوتر می گیرد
روش ماتریسی	توزیع	الف و ب	آری	آری	آری	آری	درمورد مواد صلب/پلاستیک مناسب است
باقیماندهٔ وزنی	توزیع	الف و ب	آری	آری	آری	آری	روش بسیار عمومی است
الف) $\tau=\mu\sigma_n$ ب) $\tau=m\bar{\sigma}/\sqrt{3}$							

۲- توزیع تنش در قطعه و فشار در روی قالب.

۳- حرکت واقعی ماده در قالب.

٤- الگوی جریان و در نتیجه کرنش های زاید.

٥- خواص مکانیکی محصول. و

٦- عیوب ممکن در محصول و دلایل ممکن برای بروز آنها.

این روش نیروهای شکل دهی را قدری بیشتر از حد لازم می دهد ولی در مقایسه با نتایج تجربی قابل قبول می باشند[۸].

با وجود مزیت هایش، محدودیت های چندی در کاربرد تئوری خطوط لغزش وجود دارد. فرضیات چندی لازم است که ممکن است با واقعیت های فیزیکی خیلی تطبیق نکنند. در نظر گرفتن یک ناحیهٔ الاستیک و یک ناحیهٔ پلاستیک که با یک خط فرضی از هم جدا شده باشند، بجای آن که یک ناحیهٔ انتقالی منظور شود، از این مقوله است. علاوه بر آن فقط در مورد مسائل دو بعدی و متقارن کاربرد دارد. این تئوری با ابداع روش های عددی سه بعدی جدید ارزش خودرا از دست داده است[۹].

۲-٤ روش باند بالاتر

حل مسائل به روش باند بالاتر شامل مراحل زیر است:

۱- فرض یک میدان سرعت قابل قبول از نظر سینماتیکی که دارای شرایط زیر باشد:

- غیر قابل تراکم باشد.
- پیوستگی داشته باشد.
- شرایط مرزی سرعت را داشته باشد.

میدان سرعت ممکن است بر حسب یک یا چند پارامتر تعریف شود، که بعنوان مجهولات معادلات ظاهر می شوند[۱۰].

۲- محاسبهٔ توان صرف شده برای شکل دهی خالص، برش زاید و اصطکاک.

۳- محاسبهٔ انرژی کل و حداقل کردن آن نسبت به متغیرهای فرض شده در میدان سرعت.

این روش انرژی مصرفی رابالاتر از واقعیت را نشان می دهد، بنابراین مقادیر پایین بدست آمده از بهینه سازی آن پیش بینی های بهتری را ارائه می دهد. عیب اصلی این روش آن است که میدان سرعت فرض شده منحصر به فرد نیست و میدان سرعت های متعددی را می توان به یک فرایند بخصوصی نسبت داد [۱۱].

در ابتدای پیدایش روش باند بالاتر، ماده بصورت صلب کاملاً پلاستیک منظور می گردید، و یک میدان سرعت ثابت فرض می شد[۸]. امروزه در نتیجهٔ پیشرفت های حاصله در این زمینه اثر کارسختی و همچنین دیگر پارامترهای موثر در شکل دهی مانند شکل قالب را می توان در نظر گرفت [۱۰]. بعلاوه استفاده از یک میدان سرعت پارامتری که بهینه سازی متوالی را امکان پذیر می سازد، یک امر عادی گردیده است.

این روش اخیراً برای پیش بینی نیروهای اکستروژن، الگوی جریان، و توزیع کرنش نهائی، در حضور پارامترهای شکل دهی بکار برده شده و نتایج بسیار رضایتبخشی در مقایسه با آزمایشات و المانهای محدود گزارش شده است[۱۰].

علیرغم محاسبات طولانی آن، این روش بعنوان بهترین روش عملی برای شبیه سازی جریان ماده در فرایندهای ساده شناخته می شود[۲].

۲-۵ روش المانهای محدود

باپیشرفت های حاصله در روش های عددی واستفاده از کامپیوتر، المانهای محدود کاربردوسیعی در حل مسائل شکل دهی فلزات یافته است. سیر تحول این روش در شکل دهی فلزات توسط کوبایاشی [۱۲] و راو [۱۳] توضیح داده شده است. کاربردهای دیگری از المانهای محدود دررابطه با پیش بینی انرژی شکل دهی، طراحی ابزار و پیش بینی تغییرشکل های زاید در مراجع [۱٤] و [۱۵] داده شده است.

هرچند که با استفاده از روش های المانهای محدود مسائل متعددی از شکل دهی حل گردیده است ولی برای کاربرد عمومی آن باید تلاش بیشتری بعمل آید تا مسائلی نظیر اثر اصطکاک، تنش های پس ماند و کار مازاد حل گردد.

۳- روش های تجربی شکل دهی فلزات

۳-۱- استفاده از مواد مدل

شبیه سازی در حل مسائل مهندسی روش شناخته شده ای است. با وجود این، شبیه سازی اولاً همیشه ساده نیست. یک پایهٔ ریاضی بسیار قوی برای کشف شباهت بین پدیده های کاملاً متفاوت از هم لازم است. مثلاً، حضور ذهن بسیار قوی لازم است تا تشابه بین معادلات ریاضی تودهٔ شنی و تنش ناشی از پیچش یک میله را بیابد[۱۶]. ثانیاً، پس از شبیه سازی نیز صحت رفتار واقعی مواد با مدل شبیه سازی شده بایدتوسط آزمایش تأیید گردد.

استفاده از مواد مدل درشکل دهی فلزات جایگاه ویژه ای دارد. موادی بعنوان مدل مورد استفاده قرار می گیرند که دارای نقطهٔ ذوب پایین بوده و ماشینکاری، علامت گذاری، و شکل دهی آنها بسهولت انجام بگیرد. بهره گیری از مواد مدل دارای مزایای چندی است از جمله:

۱- سرمایه گذاری روی تجهیزات آزمایشگاهی کمتر است.

۲- حجم مواد مصرفی کم است، زیرا می توان برخی از مواد مدل را بارها بازیابی کرد و دوباره مورد استفاده قرار داد.

۳- نتایج را می توان ارزان، ساده، واضح و سریع بدست آورد.

با وجود این، استفاده از مواد مدل دارای معایبی نیز می باشد از جمله:

۱-شبیه ساری کامل دستگاههای مدل با دستگاههای واقعی صنعتی تقریباً غیر ممکن است.

۲- شباهت کامل بین مواد مدل و مواد واقعی وجود ندارد.

۳- برخی از پارامترهای ناشناخته و یا کمتر اهمیت داده شده ممکن است وجود داشته باشند که در مواد مدل و مواد واقعی رفتار متفاوتی داشته باشند، که خود ممکن است نتایج اشتباه آمیزی ببار آورد.

هدف اصلی تحقیقات آزمایشی شکل دهی فلزات را می توان به دو دسته تقسیم کرد: پژوهش کیفی و تحلیل کمی. پیدایش و توسعهٔ روشهای آزمایشی در اکستروژن در کتابی توسط پیرسون و پارکینز [۱۷] توضیح داده شده است. در پژوهشهای کیفی از یخ [۱۸]، خاکه نقره [۱۹] و نظایر آن استفاده شده است. ولی، در تحقیقات کمی نیاز به اندازه گیری

پدیده ها پیش می آید. در صورتیکه ارتباط نتایج بین ماده مدل و مادهٔ واقعی مورد نظر باشد، مشکل پیچیده تر می گردد. با وجود این، در اکثر تحقیقات می توان پژوهش کیفی و کمی را همزمان انجام داد.

روش های علامت گذاری متفاوتی در شکل دهی فلزات معمول گردیده است. مثلاً یوئن و همکاران [۲۰] از شبکه های سرب با سیم های آلومینیمی استفاده کردند. یک روش لایه ای توسط بلازینسکی [۲۱] با استفاده از موم صنعتی بکار گرفته شد. یک روش بسیار متداول برای مطالعهٔ جریان ماده در درون قالب، شبکه ای کردن یک رویهٔ نصف شدهٔ قطعه کاراست، که به نام ویژیوپلاستیسته معروف بوده و به ویژه برای پروسه های متقارن مفیداست [۲۲،۳].

۳-۲ روش ویژیوپلاستیسته

در هر دو تئوری خطوط لغزش و باند بالا تر بردارهای سرعت طوری فرض می شوند که تعدادی از شرایط و خواسته های مرزی معادلات را ارضاء نمایند. صحت درستی فرض این بردارهای سرعت را می توان به روش آزمایش به روش ویژیوپلاستیسته تحقیق نمود. همچنین، اطلاعات اندازه گیری شده توسط این روش را می توان مستقیماً در حل مسائل پلاستیسته بکار برد.

در این روش، قطعه کار از وسط نصف می شود و در روی یک نیمه یک شبکهٔ مربعی یا دایره ای حک می گردد. دو نیمه بر روی هم گذاشته شده و شکل دهی انجام می گیرد. سپس، دو نیمه را از هم جدا کرده و تغییرات شبکه را مورد مطالعه قرار می دهند. اندازه گیری تغییرات حاصله توزیع کرنش را ممکن می سازد[۲۳]. با داشتن توزیع کرنش می توان توزیع تنش را در ناحیهٔ شکل دهی بدست آورد.

٤- طراحی ابزار در شکل دهی فلزات

علیرغم پیشرفت های شایان ذکری که در تئوری پلاستیسته و تئوری های شکل دهی فلزات حاصل گردیده است، طراحی ابزار هنوز هم اغلب بطریق سعی و خطا انجام می شود و طراحی دقیق هنوز بعنوان هنر محسوب می شود.

تحقیق در طراحی ابزار علاوه بر بدست آوردن دقت ابعاد محصول، شامل ارزیابی نیروهای شکل دهی، پیش بینی موقعیت و نوع عیوب محصول، و تخمین عمر ابزار تحت شرایط شکل دهی نیز می گردد. اغلب پژوهش های انجام یافته تا کنون در مورد نیروهای شکل دهی و مطالعهٔ الگوی جریان صورت پذیرفته است. روش اصلی تحقیقات در این زمینه را به مقوله های زیر می توان تقسیم کرد:

۱- انتخاب یک دستهٔ معین از شکل های قالب و تعیین نیروهای کلی یا مطالعهٔ الگوی جریان بصورت تجربی، یا پژوهش در خصوص شرایط اصطکاک و روانکاری در محل تماس قطعه کار و قالب.

۲- انتخاب یک شکل معین از قالب شکل دهی و کاربرد تئوری پلاستیسته بر روی آن جهت محاسبهٔ نیروها و پیش بینی الگوی جریان. پس از آن، تعیین توزیع کرنش و تنش در ناحیهٔ شکل دهی نیز امکان پذیر می شود.

۳- کاربرد تئوری پلاستیسته بهمراه ایده ها و روش های جدید به اضافهٔ تجربه ها و مهارت های ویژه، برای یافتن شکل مناسبی برای قالب که خواسته های ویژه و یا اصلاحات معینی را نتیجه دهد.

مقولهٔ نخست مطالعهٔ اساسی رفتار فلز در ناحیهٔ شکل دهی را در بر می گیرد. تحقیقات اولیه در این زمینه توسط پیرسون و پارکینز به اختصار شرح داده شده است [۱۷]. تلاش اساسی وبستربج [۲٤]، تیلور و کوینی [۲۵]، هوندی و سینگر [۲۶] و اخیراً فرزین [۲۷] از جملهٔ این کارها است.

استفاده از مواد مدل و روش ویژیوپلاستیسته سیرت واقعی جریان فلز را در ناحیهٔ شکل دهی به نمایش می گذارند و پیشرفت تحقیق کیفی و کمی فرایند شکل دهی را میسر می سازند. ویژیو پلاستیسته که توسط تامسن و همکارانش [۲۸] بطور گسترده ای عرضه گردید کاربرد شایانی یافته است. این روش نشان داده است که توقف شکل دهی و شروع دوبارهٔ آن ضمن عمل شکل دهی تأثیری در الگوی جریان ندارد. بدین طریق، می توان برای حالت غیر پایدار ناحیهٔ شکل دهی نیز میدان جریان مناسبی تعریف نمود [۲۳، ۲۹].

کوشش فراوانی جهت مطالعهٔ اصطکاک در فرایند شکل دهی بعمل آمده است. پژوهش تجربی شبیک و همکاران با استفاده از ویژیوپلاستیسته [۳۰]، و بسیلی و سنسام [۳۱] از جملهٔ فعالیت های انجام یافته در این زمینه است.

نتیجهٔ کارهای انجام شده یافتن تعدادی فرمول تجربی و چارتهای مناسب [۱۷، ۲۳، ۳۲] برای تخمین نیروهای شکل دهی و ضرایب تغییرشکل های زاید [۷، ۲٤] بوده است.

متا- پیرتی و فریش [۳۳] نیروهای شکل دهی و تغییرات شبکهٔ حک شده را در قالب هایی با نیمرخ های کسینوسی، بیضوی، هیپربولیک، محدب و مخروطی آزمایش کردند. نتیجهٔ کار آنها آشکار ساخت که نیروی شکل دهی خیلی وابسته به شکل نیمرخ قالب و شرایط روانکاری است.

کاربرد خطوط لغزش و روش باند بالاتر برای محاسبهٔ نیروهای شکل دهی و نمایش الگوی جریان در مقولهٔ دوم دسته بندی فوق قراردارد. تحقیقات در این زمینه شامل مطالعهٔ قالب تخت [٥]، قالب های مخروطی [۳]، قالب های منحنی [۳٤، ۳٥]، اکستروژن محصولات غیر متقارن [۳٦، ۳۷] و مقاطع [۳۸] بوده است. ماحصل این تحقیقات منظوز نمودن کار مازاد، اصطکاک، و کارسختی در شکل دهی می باشد [۳].

ناگپال [۳۹] با فرض یک تنش اصطکاکی یکنواخت، رابطه ای یافت که برای هر نوع نیمرخ قالب قابل استفاده است. در این روش باید نوع نیمرخ از ابتدای کار معلوم باشد. او با آزمایش قالب های مخروطی، کسینوسی، بیضوی، و هیپربولیک نیمرخ بهینهٔ مربوط به شرایط اصطکاکی متفاوت را پیدا نمود.

مقولهٔ سوم براساس استفاده از مطالعات نظری به همراه معرفی ویژگی های خاصی به قالب می باشد. این روش پایهٔ منطقی کردن طراحی قالب در شکل دهی فلزات است.

با استفاده از تئوری خطوط لغزش، ریچموند و دونپک [٤۰] نیمرخی یافتند که بردار سرعت در هر نقطه به امتداد تنش اصلی بزرگتر منطبق بودو ثابت نمودند که شکل دهی حاصل از این قالب با کرنش یکنواخت است. این تحقیق توسط هیل [٤۱] مورد تأیید قرار گرفت و صحت آن با نتایج تجربی بیشتری به اثبات رسید [٤۲]. سورتیاس و کوبایاشی [٤۳] و دیگر محققین [٤٤، ٤٥] برتری قالب های منحنی را بر قالب های مخروطی در اکستروژن به اثبات رساندند.

بلازینسکی [٤٦] یک روش تئوری پیشنهاد کرد که در آن خارج قسمت افزایش کرنش های متوالی (C.R.H.S.) ثابت بماند. این فرضیه در اکثر فرایندهای شکل دهی از جمله اکستروژن [٤۷، ٤۸، ٤۹] و دیگر فرایندها [٥۰، ٥۱] با موفقیت انجام یافته است.

٥- نتیجه گیری و پیشنهادات

با وجود پیشرفت های خوبی که درتئوری های شکل دهی حاصل گردیده است، بهبود در طراحی قالب ها تا کنون بر اساس سعی و خطا انجام می یابد. شاید دلیل این موضوع در نقص اطلاعات کافی از رفتار مواد در داخل قالب های شکل دهی باشد. با وجود این در زمینهٔ سعی و خطا نیز پیشرفت های قابل ملاحظه ای انجام گرفته است. علیرغم اینکه

کاربرد رایانه در صنعت طراحی قالب روش های انقلاب گونه ای را بوجود آورده است [۵۲، ۵۳، ۵۴] هنوز کافی نیست. برای پی گیری تحقیقات در شکل دهی فلزات چه بطور نظری و چه بصورت تجربی و کاربردی زمینه های چندی وجود دارد که بصورت فهرست وار ارائه می گردد:

- تحلیل و فرمولبندی عمر قالب و ارتباط آن با شکل هندسی قالب.
- شبیه سازی روانکاری و اصطکاک مابین قالب و قطعه کار.
- مطالعهٔ ساختمان مولکولی محصول و ارتباط آن با شکل قالب.
- تحلیل و فرمولبندی شکل دهی در مسائل سه بعدی.
- گسترش روش های المانهای محدود در شکل دهی.
- جمع آوری و کاربرد عملی نتایج تحقیقات در طراحی قالب.

مراجع:

1- Altan T., and Lahoti G. D., "Limitations, applicability, and usefulness of diffrent methods in analysing forming problems", Annals of the C.I.R.P., vol. 28, 1979, 473-485.

2- Altan T., Oh S., and Gegel G. D., "Metal forming, fundamentals and applications", A.S.M., 1983.

3- Rowe G. W., "Principles of industrial metalworking processes", Edward Arnold, London, 1977.

4- Hosford W. F., and Caddell R. M., "Metal forming, mechanics and metallurgy", Printice-Hall, 1983.

5- Hill R., "The mathematical theory of plasticity", Oxford University Press, 1985.

6- Johnson W., Sowerby R., and Venter R. D., "Plane strain slip line fields for metal deformation processes", Pergamon press, 1982.

7- Johnson R. W., and Rowe G. W., "Redundant work in drawing cylindrical stock", J. Inst. Met., vol. 96, 1968, 97-105.

8- Johnson W., "Estimation of upper bound loads for extrusion and coining operations", Proc. Inst. Mech. Engrs., 1959, 61-72.

9- Lange K. (ed), "Hand book of metal forming", McGraw-Hill, 1985.

10- Yang D. Y., and Han C. H., "A new formulation of generalized velocity field for axisymmetric forward extrusion through arbitrarily curved dies", J. Eng. Ind., vol. 109, No. 2, 1987, 161-168.

11- Johnson W., and Mellor P. B., "Engineering plasticity", Ellis Horwood Ltd., 1983.

12- Kobayashi S., "Areview on the finite element method metal forming process modeling", J. Appl. Metalworking vol. 2, 163, 1982.

13- Rowe G. W., "Problems involved in the numerical analysis of plastic working processes for new materials", Advd. Tech. Plas., I, 27-38, 1984.

14- Pei Chi Chou and Longwu Wu, "A dynamic relaxation finite element method for metal forming processes", Int. J. Mech. Sci., vol. 28, No. 4, 231-250, 1986.

15- Boer C. R., and Jovane F., "Computer aided design in metal forming systems", Annals of the C.I.R.P, vol. 33/2, 1984.

16- Timoshenko S. P., and Goodier J. N., "Theory of elasticity", (3rd ed.), McGraw-Hill, 1982.

17- Pearson C. E., and Parkins R. N., "The extrusion of metals", Chapman and Hall, London, 1960.

18- Chandra T., and Jonas J. J., "The extrusion force and the mean strain rate during the extrusion of strain rate sensitive materials", Met. Trans., vol. 1, 1970, 2079-2082.

19- Smith C., and Swindells N., "Some factors affecting the quality of extrusion", J. Int. Metals., vol. 82, 1953-54, 324-334.

20- Yuen D. P., Kobayashi S., and Frisch J., "Metal flow in extrusion of shapes", Proc. N.A.M.R. Conf., vol. 4, 1976, 188-192.

21- Blazynski T. Z., "Optimization of die design and tube making", The engineer, vol. 223, No. 5797, 1967, 627-630.

22- Dinda S., Keeler S. P., James K. F., and Stine P. A., "How to use circle grid analysis for die tryout", A. S. M., 1981.

23- Thomsen E. G., Yang C. T., and Bierbower J. B., "An experimental investigation of the mechanics of plastic deformation of metals", University of California Publications in engineering, vol. 5, No. 4, 1954, 89-144.

24- Wistrich J. G., "The fundamentals of wire drawing", Metal. Rev., vol. 3, No. 10, 1958, 79-142.

25- Taylor G. I., and Quinney H., "The distortion of wire on passing through a draw plate", J. Inst. Met., vol. 49, 1932, 187-202.

26- Hundy B. B., and Singer A. R. E., "Inhomogeneous deformation in rolling and wire drawing", J. Inst. Met., vol. 83, 1954-55, 401-407.

27- Farzin M., "Sheet metal forming by a pressure medium", Int. Conf. Engg., Sharif University, Iran, 1992, 514-521.

28- Thomsen E. G., Yang C. T., and Kobayashi S., "Mechanics of plastic deformation in metal processing", Macmillan, N. Y., London, 1965.

29- Halling J., and Mitchle L. A., "Experimental study of symmetrical extrusion using parafin wax as model material", Proc. 5th Conf. M.T.D.R., 1964, 353-390.

30- Shabaik A. H., in "Metal forming, interrelation between theory and practice", (ed. Hoffmanner), 1971, 63-83.

31- Basily B. B., and Sansom D. H., "Determination of the mean coefficient of friction in the direct drawing of section rods form round bars", 17th Int. M.T.D.R. Conf., 1976, 475-486.

32- I.S.M.E., Cold forging data sheet No. 69002, "Determination of extrusion pressure", Metal forming, vol. 36, No. 5, 1969, 134-147.

33- Mata-Pietri, and Frisch F., "Metal flow through various mathematically countoured extrusion dies", Proc. 5th N.A.M.R. Conf., 1977, 99-113.

34- Chen C. T., and Ling F. F., "Upper bound solution to axisymmetric extrusion problems", Int. J. Mech. Sci., vol. 10, 1968, 863-879.

35- Samanta S. K., "A new die profile with high process efficiency", Appl. Sci. Res., vol. 25, 1971, 54-64.

36- Green A. P., "On unsymmetrical extrusion in plane strain", J. Mech. Phys. Solids, vol. 3, 1955, 189-196.

37- Johnson W., and Kudo H., "The mechaincs of metal extrusion", Manchester University Press, 1962.

38- Boer C. B., Schneider W. R., Eliasson B., and Avitzur B., "An upper bound approach for the direct drawing of square section rod from round bar", Proc. 20th Int. M.T.D.R. Conf., 1979, 149-156.

39- Nagpal N., "Analysis of plane strain extrusion through arbitrarily shaped dies using flow function", J. Eng. Ind., vol. 99, No. 3, 1977, 754-759.

40- Richmond O., and Devenpeck M. L., "A die profile for maximum efficiency in strip drawing", Proc. 4th US National Congress of applied mechanics, vol. 2, 1962, 1053-1057.

41- Hill R., "A remark on diagonal streaming in plane plastic strain", J. Mech. Phys. Solids, vol. 14, 1966, 245-248.

42- Devenpeck M. L., and Richmond O., "Strip drawing expriments with a sigmoidal die profile", J. Eng. Ind., vol. 87, No. 4, 1965, 425-428.

43- Sortias H. C., and Kobayashi S., "An optimum die profile for axisymmetric extrusion", Int. J. M.T.D.R., vol. 8, 1968, 61-72.

44- Samanta S. K. "A new die profile with high process efficiency", Appl. Sci. Res., vol. 25, 1971, 54-64.

45- Gunasekera J. S., Hoshino S., and Brown R. H., "Extrusion of non-circular section through shaped dies", Annals of the C.I.R.P., vol. 29, 1980, 141-145.

46- Blazynski T. Z., "Theoretical method of designing tools for metal forming processes", Metal forming, vol. 34, No. 5, 1967, 143-150.

47- Blazynski T. Z., "Optimization of die design in the extrusion of rod using model materials", J. Mech. Sci., vol. 13, No. 2, 1971, 113-131.

48- Vaidyanathan P. V., "Ph.D thesis", University of Leeds, 1972.

49- Farzad A., "Ph. D. thesis", University of Leeds, 1988.

50- Mohamed J. H. "Ph. D. thesis", University of Leeds, 1986.

۵۱- فرزاد ع.، "طراحی قالب در شکل دادن فلزات"، پنجمین کنفرانس سالانهٔ مهندسی مکانیک ایران، دانشگاه تبریز، ۱۳۷۶، ۱۴۵۹-۱۴۶۷

52- Yang D. Y., and Altan T., "Analytical and experimental investigation into lubricated three-dimentional extrusion of general helical sections", Annals of the C.I.R.P., vol. 35, 1986, 169-172.

53- Gunasekara J. S., Gegel H. L., Malas J. C., Doreivelu S. M., Morgan J. T., and Altan T., "Computer aided process modelling of hot forging and extrusion of aluminum alloys", Annals of the C.I.R.P., vol. 31, 1982, 131-135.

54- Farmer L. E., and Oxley P. L. B., "A copmuter aided method for calculating the distribution of strain rate and strain from an experimental flow field", J. Strain Analysis, vol. 11., No. 1. 1976, 26-32.