

# موقعیت تحقیقات جهانی در زمینه شکل دهی مکانیکی فلزات

عبدالعلی فرزاد

عضو هیأت علمی دانشگاه سیستان و بلوچستان

**چکیده:** شکل دهی فلزات یکی از کهن ترین روشهای تولید به شمار می رود. تحقیقات زیادی در زمینه تکمیل نظریه ها و گردآوری اطلاعات تجربی شکل دهی به انجام رسیده است. با وجود این، هنوز هم طراحی ابزار شکل دهی و ارزیابی کیفیت محصول در گرو روشهای سعی و خطاست. در این مقاله روند پیشرفت تحقیقات از نظر برآورد انرژی لازم در تغییر شکل مکانیکی، افزایش عمر ابزار و کاهش عیوب محصولات مورد بررسی قرار گرفته است.

**واژه های کلیدی:** شکل دهی فلزات، طراحی قالب، نظریه مومسانی، روشهای تولید، آموزش

مهندسی.

## ۱. مقدمه

در فرایندهای شکل‌دهی فلزات، نیروی فوق‌العاده زیادی لازم است. گاهی درصد زیادی از این نیرو در مواردی مصرف می‌شود که برای شکل‌دهی یکنواخت فلز ضروری نیست. توزیع تنشهای ناهمگن و غیریکنواخت در محیط تغییر شکل از ویژگیهای شکل‌دهی در قالبهای متداول است. این تنشها علاوه بر مصرف انرژی غیر لازم، گاهی باعث ایجاد عیب در محصول و آسیب‌زدن به ابزار می‌شود. بدین منظور، پژوهشهای ارزشمندی صورت گرفته است. تحقیقات انجام شده در زمینه شکل‌دهی فلزات بر روی سه محور زیر متمرکز است:

- کاهش مصرف انرژی؛
- علل کاهش عمر ابزار؛
- کاهش عیوب محصول و افزایش کیفیت آن.

## ۲. نظریه‌های شکل‌دهی

پس از پیدایش نظریه مومسانی و تکامل و گسترش آن، این نظریه کاربردهای ارزشمندی در شکل‌دهی فلزات یافته است. نظریه‌های متعددی در این زمینه ارائه شده است که بسته به مورد کاربرد آنها دایره‌های متفاوتی تفاوت اصلی آنها در اعمال فرضهای ساده‌کننده‌ای است که در مدل‌های فیزیکی آنها در نظر گرفته می‌شود. برتری یکی بر دیگری به اصول زیر بستگی دارد:

۱. توانایی روش در پیش‌بینی نیروهای شکل‌دهی؛
۲. توانایی روش در ارزیابی توزیع تنش؛
۳. توانایی روش در منظور کردن اصطکاک، کارسختی و دیگر عوامل شکل‌دهی؛
۴. توانایی روش در پیش‌بینی توزیع کرنش و تغییر شکل‌های زاید؛
۵. توانایی روش در پیش‌بینی عیبهای احتمالی محصول؛
۶. سهولت کاربرد روش؛
۷. دستیابی به دقت بالاتر.

یک روش بخصوص ممکن است تمام خواسته‌های بالا را ارضا نکند. بنابراین، مقایسه روشهای ارائه شده می‌تواند محقق را در انتخاب شیوه تحلیل مناسب یاری دهد. این مقایسه توسط آلتان و لاهوتی [۱]، به صورت جدول (۱) ارائه شده است. این روش بیشتر روشهای شکل‌دهی

مکانیکی را در بر می‌گیرد. اینک به توضیح مختصر برخی از این روشها، که کاربرد بیشتری یافته‌اند، می‌پردازیم.

#### ۱.۲. روش انرژی یکنواخت

این روش بر پایه موازنه انرژی استوار است. در این روش فرض می‌شود که کل انرژی مصرف شده در تغییر شکل یکنواخت و همگن، بدون اصطکاک و بدون تغییر شکل زاید، صرف شده باشد. کار انجام شده خارجی مساوی انرژی مصرفی شکل دهی قرار داده می‌شود. این مقدار انرژی بر واحد حجم ماده معادل مساحت زیر منحنی تنش - کرنش است. این روش محاسبات ساده‌ای لازم دارد و در طراحی صنعتی کاربرد وسیعی داشته است [۱].

#### ۲.۲. روش تحلیل تختاری

در روش تختاری، تعادل پیکره آزاد یک تختار مجازی جدا شده از محیط تغییر شکل در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود که تنشها به‌طور یکنواخت به سطوح تختار وارد می‌آید. از تعادل نیروها بر روی تختار معادله دیفرانسیلی حاصل می‌شود که حل آن مقادیر بر تنش را روی سطوح تختار به دست می‌دهد. اگر تنش تسلیم به صورت تابعی از کرنش در نظر گرفته شود، می‌توان اثر کار سختی را نیز در این روش منظور کرد.

این روش بر ارزیابی نیروهای شکل دهی برای محاسبه توزیع تنش [۲] و فشار در روی ابزار [۳] مناسب است. با وجود این، روش تحلیل تختاری بیشتر در مورد فرایندهای متقارن نظیر اکستروژن و کشش کاربرد دارد و در صورتی که زاویه قالب زیاد و نسبت کاهش کم باشد، این روش نتایج قابل قبولی به دست نمی‌دهد [۴].

#### ۳.۲. نظریه میدان خط لغزش

نظریه میدان خط لغزش بر این پایه استوار است که تغییر شکل در امتداد تنشهای برشی بیشینه در طول خطوط لغزش اتفاق می‌افتد. وجود خطوط لغزش در آزمایشهای زیادی نمایان شده و به اثبات رسیده است [۵ و ۶]. این روش در مورد مسائل کرنشهای صفحه‌ای و مواد ایده‌آلی به کار می‌رود که صلب - کاملاً مومسان - فرض می‌شود توضیح کاملی از نظریه و کاربردهای آن را در

مراجعه [۷ و ۸] می‌توان یافت. با استفاده از روش نظریه میدان خط لغزش می‌توان موارد زیر را پیش‌بینی کرد [۹]:

جدول ۱. خلاصه روشهای مختلف محاسباتی در شکل‌دهی فلزات [۱]

| ملاحظات             | روش‌های محاسباتی |           |           |           |           |
|---------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                     | روش تجربی        | روش تجربی | روش تجربی | روش تجربی | روش تجربی |
| روش‌های مختلف جلازی | اصطلاحاً         | میدان     | میدان     | میدان     | میدان     |
| انتشاری             | متوسط            | ب         | خیر       | خیر       | خیر       |
| انرژی               | متوسط            | ب         | خیر       | خیر       | خیر       |
| یکنواخت             | متوسط            | ب         | خیر       | خیر       | خیر       |
| میدان               | متوسط            | الف و ب   | آری       | آری       | آری       |
| مقطع لغزش           | متوسط            | الف و ب   | آری       | آری       | آری       |
| حد بالاتر           | توزیع            | الف و ب   | آری       | آری       | آری       |
| روشن‌هیل            | توزیع            | الف و ب   | آری       | آری       | آری       |
| اختلاف              | توزیع            | الف و ب   | آری       | آری       | آری       |
| محدوده              | توزیع            | الف و ب   | آری       | آری       | آری       |
| المان محدود         | توزیع            | الف و ب   | آری       | آری       | آری       |
| روش                 | توزیع            | الف و ب   | آری       | آری       | آری       |
| ماتریسی             | توزیع            | الف و ب   | آری       | آری       | آری       |
| باقیمانده           | توزیع            | الف و ب   | آری       | آری       | آری       |
| وزنی                | توزیع            | الف و ب   | آری       | آری       | آری       |

الف)  $\sigma = 40$  (روش تجربی)

ب)  $\sigma = \frac{40}{\sqrt{3}}$  (روش تجربی)

۱- نیروهای شکل‌دهی می‌تواند در روش‌های مختلف محاسباتی در شکل‌دهی فلزات

۲. توزیع تنش در قطعه کار و فشار در روی قالب؛

۳. حرکت واقعی ماده در قالب ضمن تغییر شکل؛

۴. الگوی جریان ماده قالب و ارزیابی کرنشهای زاید؛

۵. پیش‌بینی خواص مکانیکی و کیفیت محصول؛

۶. عیوب ممکن در محصول و دلایل ممکن برای بروز آنها.

این روش نیروهای شکل‌دهی را قدری بیشتر از حد لازم پیش‌بینی می‌کند، ولی در مقایسه با نتایج تجربی قابل قبول است [۱۰].

با وجود مزیت‌های نظریه میدان خط لغزش، محدودیت‌های چندی در کاربرد آن وجود دارد. برای تبیین آن فرضیات چندی باید در نظر گرفت که ممکن است با واقعیت فیزیکی خیلی تطبیق نداشته باشد. تصور یک ناحیه کشسان و یک ناحیه مومضان که با یک خط فرضی از هم جدا شده باشند، از این مقوله است. علاوه بر آن، این نظریه فقط در مورد مسایل دو بعدی و متقارن کاربرد دارد و با ابداع روش‌های عددی سه بعدی جدید ارزش خود را تا حد زیادی از دست داده است [۱۱].

#### ۴.۲. نظریه حد بالاتر

این نظریه از اصول جنبش‌شناسی مبتنی بر مکانیک محیط‌های پیوسته پیدایش یافته است. تشکیل معادلات و حل آنها شامل مراحل زیر است:

۱. فرض یک میدان سرعت قابل قبول از نظر جنبش‌شناسی که دارای شرایط زیر باشد:

● ماده تراکم‌ناپذیر باشد؛

● پیوستگی وجود داشته باشد؛

● شرایط مرزی سرعت را داشته باشد.

میدان سرعت ممکن است بر حسب یک یا چند متغیر تعریف شود که به‌عنوان مجهول‌های مسئله ظاهر شوند [۱۲].

۲. حل معادله‌های به‌دست آمده و محاسبه توان لازم برای شکل‌دهی خالص، کرنشهای مازاد و از بین بردن اصطکاک.

۳. محاسبه انرژی کل و به حداقل رساندن آن نسبت به متغیرهای فرض شده در میدان سرعت.

این روش انرژی مصرفی را بالاتر از واقعیت نشان می‌دهد، بنابراین مقادیر پایین به‌دست آمده

از بهینه‌سازی آن پیش‌بینی‌های بهتری را ارائه می‌کند. عیب اصلی این روش آن است که میدان سرعت فرض شده منحصر به فرد نیست و میدان سرعت‌های متعددی را می‌توان به یک فرایند به‌خصوص نسبت داد [۱۳].

در ابتدای پیدایش فرضیه حد بالاتر، ماده به صورت صلب - کاملاً مومسان منظور می‌گردید و یک میدان سرعت ثابت فرض می‌شد [۱۰]. امروزه، در نتیجه پیشرفت‌های حاصل شده در این زمینه اثر کارسختی و همچنین دیگر متغیرهای مؤثر در شکل‌دهی مانند شکل قالب را می‌توان در نظر گرفت [۱۲]. به‌علاوه استفاده از یک میدان سرعت با متغیرهای زیاد، که با بهره‌گیری از روش‌های عددی بهینه‌سازی متوالی را امکان‌پذیر می‌سازد، متداول شده است.

این روش برای پیش‌بینی نیروهای اکستروژن، الگوی جریان و توزیع کرنش نهایی، در حضور متغیرهای شکل‌دهی به کار برده شده و همخوانی بسیار رضایت‌بخشی با نتایج آزمایشها و نتیجه‌های حاصل شده از روش المانهای محدود گزارش شده است [۱۲].

با وجود محاسبات طولانی آن، این روش به‌عنوان بهترین روش عملی برای شبیه‌سازی جریان ماده در فرایندهای ساده شناخته می‌شود [۲].

## ۵.۲. روش المانهای محدود و شبیه‌سازیهای رایانه‌ای

با پیشرفت حاصل شده در روش‌های عددی و بهره‌گیری از رایانه، المانهای محدود کاربرد وسیعی در حل مسایل شکل‌دهی فلزات یافته است. سیر تحول این روش در شکل‌دهی فلزات توسط کوبایاشی [۱۴] و راو [۱۵] توضیح داده شده است. کاربردهای دیگری از المانهای محدود در خصوص پیش‌بینی انرژی شکل‌دهی، طراحی ابزار و پیش‌بینی تغییرشکل‌های زاید در مراجع [۱۶] و [۱۷] داده شده است.

اگرچه مسایل متعددی با بهره‌گیری از روش‌های المانهای محدود حل شده و جواب‌های قابل قبولی به‌دست آمده است، برای عمومیت دادن آن هنوز قدم‌های بیشتری باید برداشته شود تا مسایلی نظیر اثر اصطکاک، کار مازاد و پیش‌بینی تنش‌های پس‌ماند در محصول حل شود.

شبیه‌سازی رایانه‌ای در حل مسایل مهندسی روش متداولی شده است. در شکل‌دهی فلزات نیز از شبیه‌سازی استفاده زیادی به‌عمل آمده است. شبیه‌سازی رایانه‌ای نه تنها در مورد قطعات با شکل هندسی ساده، بلکه در تجزیه و تحلیل محصولات با شکل هندسی پیچیده‌تر مانند I و T شکل

نیز به سهولت انجام پذیر است [۱۸]. روشهای شبیه سازی ارزان، سریع و فراگیر هستند. با وجود این، متغیرهای شکل دهی باید کاملاً شناخته شده باشند، و میزان اثر هر یک به طور مناسب منظور شود. در غیر این صورت، ممکن است نتایج قابل قبولی حاصل نشود. به علاوه، پس از شبیه سازی نیز رفتار واقعی مواد با الگوی شبیه سازی شده باید با آزمایش تأیید شود.

### ۳. روشهای تجربی شکل دهی فلزات

#### ۱.۳. استفاده از مواد الگو

استفاده از مواد الگو در شکل دهی فلزات جایگاه ویژه ای دارد. موادی به عنوان الگو مورد استفاده قرار می گیرند که نقطه ذوب پایین داشته باشند و ماشینکاری، علامت گذاری و شکل دهی در آنها به سهولت امکان پذیر باشد. بهره گیری از مواد الگو دارای مزایای چندی است از جمله:

۱. ماشین آلات و تجهیزات آزمایشگاهی کمتر و ارزانتری مورد نیاز است.
۲. مواد مصرفی کمتری مورد نیاز است، زیرا می توان برخی از مواد الگو را بارها ارزیابی کرد و دوباره مورد استفاده قرار داد.

۳. نتایج را می توان سریع و واضح به دست آورد.

با وجود این، استفاده از مواد الگو معایبی نیز دارد، از جمله:

۱. شبیه سازی کامل دستگاههای الگو همانند دستگاههای واقعی صنعتی تقریباً غیر ممکن است.
۲. شباهت کامل بین مواد الگو و مواد واقعی وجود ندارد.
۳. برخی متغیرهای ناشناخته یا کمتر اهمیت داده شده ممکن است وجود داشته باشد که باعث تفاوت زیاد در نتایج مواد الگو با مواد واقعی بشود.

هدف اصلی تحقیقات آزمایشی در شکل دهی فلزات را می توان به دو دسته تقسیم بندی کرد:

● پژوهش کیفی؛

● تحلیلی کمی.

پیدایش و گسترش روشهای آزمایشی در اکستروژن در کتابی توسط بیرسون و پارکینز [۱۹] توضیح داده شده است. در پژوهشهای کیفی از یخ [۲۰]، خاکه نقره [۲۱] و نظایر آن استفاده شده است. لیکن، در تحقیقات کمی نیاز به اندازه گیری پدیده ها پیش می آید. در صورتی که یافتن ارتباط بین ماده الگو با ماده واقعی در نظر باشد، مشکل پیچیده تر می شود. در اکثر تحقیقات

می‌توان پژوهش کیفی و کمی را توأمأ انجام داد.

علامت‌گذاری در داخل جسم مورد آزمایش و اندازه‌گیریهای روی آن پس از تغییر شکل، اساس کار پژوهشهای تجربی را تشکیل می‌دهد. روشهای علامت‌گذاری متفاوتی در شکل‌دهی فلزات متداول شده است. مثلاً، یوئن و همکارانش [۲۲] از شمشهای سرب که در داخل آنها میله‌های نازک آلومینیومی گذاشته بودند استفاده کردند. بلازینسکی [۲۳] از موم صنعتی ریخته شده به صورت لایه‌های رنگین بهره‌گیری کرد. موم صنعتی با لایه‌های رنگین در پژوهشهای متنوعی مانند آهنگری [۲۴]، لوله‌سازی به روش اسل [۲۵] و اکستروژن [۵] به کار رفته است. از پلاستین نیز همانند موم صنعتی در پژوهشهای شکل‌دهی استفاده وسیعی به عمل آمده است [۲۶ و ۲۷]. یک روش بسیار متداول برای مطالعهٔ جریان ماده در درون قالب، شبکه‌ای کردن یک رویهٔ نصف شدهٔ قطعه کار است که به نام ویزیوپلاستیسته معروف است و به ویژه برای فرایندهای متقارن مفید است [۳ و ۲۸].

#### ۲.۳. روش ویزیوپلاستیسته

در هر دو نظریهٔ میدان خط لغزش و حد بالاتر، بردارهای سرعت طوری فرض می‌شود که تعدادی از شرایط و خواسته‌های مرزی معادلات را ارضا کند. درستی فرض این بردارهای سرعت را می‌توان با آزمایش به روش ویزیوپلاستیسته بررسی کرد. همچنین، نتایج اندازه‌گیری شده با این روش را می‌توان مستقیماً در حل مسایل مومسانی به کار برد.

در این روش، قطعه کار از وسط نصف می‌شود و در روی یک نیمهٔ آن یک شبکهٔ مربعی یا دایره‌ای حک یا چاپ می‌شود. دو نیمه بر روی هم گذاشته می‌شود و شکل‌دهی انجام می‌گیرد. سپس، دو نیمه از هم جدا می‌شود و تغییرات شبکه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. اندازه‌گیری تغییرات حاصل شده توزیع کرنش را ممکن می‌سازد [۲۹]. با داشتن توزیع کرنش می‌توان توزیع تنش را در ناحیهٔ تغییر شکل به دست آورد.

#### ۴. تحقیقات طراحی ابزار در شکل‌دهی فلزات

علی‌رغم پیشرفتهای شایان ذکری که در نظریه‌های مومسانی و شکل‌دهی فلزات حاصل شده است، طراحی ابزار هنوز هم به طریق سعی و خطا انجام می‌شود و طراحی صحیح هنوز یک هنر



محسوب می‌شود.

تحقیق در طراحی ابزار علاوه بر به دست آوردن دقت ابعاد محصول، شامل ارزیابی نیروهای شکل دهی، پیش‌بینی محل و نوع عیوب در محصول و تخمین عمر ابزار تحت شرایط شکل دهی نیز می‌شود. اغلب پژوهش‌های انجام یافته تاکنون در مورد نیروهای شکل دهی و مطالعه الگوی جریان صورت پذیرفته است. روش اصلی تحقیقات در این زمینه را به مقوله‌های زیر می‌توان تقسیم کرد:

۱. انتخاب یک دسته معین از شکلهای قالب و تعیین نیروهای کلی یا مطالعه الگوی جریان به صورت تجربی، یا پژوهش در خصوص شرایط اصطکاک و روانکاری در محل تماس قطعه کار و قالب.

۲. انتخاب شکل معینی از قالب شکل دهی و کاربرد نظریه‌های مومسانی بر روی آن برای محاسبه نیروها و پیش‌بینی الگوی جریان. پس از آن، تعیین توزیع کرنش و تنش در ناحیه شکل دهی نیز امکان پذیر می‌شود.

۳. کاربرد نظریه‌های مومسانی به همراه ایده‌ها و روشهای جدید به اضافه تجربه‌ها و مهارتهای ویژه، برای یافتن شکل مناسبی برای قالب که خواسته‌های ویژه یا اصلاحات معینی را نتیجه دهد. مقوله نخست مطالعه اساسی رفتار فلز در ناحیه شکل دهی را در بر می‌گیرد. تحقیقات نخستین در این زمینه توسط پیرسون و پارکینز به اختصار شرح داده شده است [۱۹]. تحقیقات اساسی ویستریچ [۳۰]، تیلور و کوینی [۳۱]، هوندی و سینگر [۳۲] و اخیراً فرزین [۳۳] از جمله این کارهاست.

استفاده از مواد الگو و روش ویژگی‌پلاستیسیته رفتار واقعی جریان فلز را در ناحیه تغییر شکل به نمایش می‌گذارد و پیشرفت تحقیقات کیفی و کمی فرایندهای شکل دهی را میسر می‌سازد. ویژگی‌پلاستیسیته که توسط تامسن و همکارانش [۳۴] به‌طور گسترده‌ای بیان شده است، کاربرد شایانی یافته است. این روش نشان داده است که توقف شکل دهی و شروع دوباره آن ضمن عمل شکل دهی تأثیری در الگوی جریان ندارد. بدین طریق، می‌توان برای حالت غیربایدار جریان در ناحیه شکل دهی نیز میدان جریان مناسبی تعریف کرد [۲۹ و ۳۵].

برای مطالعه اصطکاک در فرایندهای شکل دهی کوشش فراوانی به عمل آمده است. پژوهش شیبک و همکارانش با استفاده از ویژگی‌پلاستیسیته [۳۶] و بسیلی و سنسام [۳۷] از جمله فعالیت‌های انجام یافته در این زمینه است.

نتیجه کارهای انجام شده به دست آوردن تعدادی فرمول تجربی و مهارتهای مناسب [۱۹، ۲۹ و ۳۸] برای تخمین نیروهای شکل دهی و ضرایب تغییر شکل های زاید [۹ و ۳۰] بوده است. متا - پیرتی و فریش [۳۹] نیروهای شکل دهی و تغییرات شبکه حک شده را در قالبهایی با نیمرخ کسینوسی، بیضوی، هیپربولیک، محدب و مخروطی مطالعه کردند. نتیجه کار آنها آشکار ساخت که نیروی شکل دهی خیلی به شکل نیمرخ قالب و شرایط روانکاری وابسته است.

کاربرد میدان خط لغزش و روش حد بالاتر برای محاسبه نیروهای شکل دهی و نمایش الگوی جریان در مقوله دوم دسته بندی فوق قرار دارد. تحقیقات در این زمینه شامل مطالعه قالب تخت [۷]، قالبهای مخروطی [۳]، قالبهای منحنی [۴۰ و ۴۱]، اکستروژن محصولات غیرمقارن [۴۲] و [۴۳] و پروفیلهای مختلف [۴۴] بوده است. ماحصل این تحقیقات علاوه بر موارد ذکر شده، منظور کردن کار مازاد، اصطکاک و کار سختی در شکل دهی نیز می باشد [۳].

ناگپال [۴۵] با فرض یک تنش اصطکاکی یکنواخت، رابطه ای یافت که برای هر نوع نیمرخ قالب کاربرد دارد. در این روش باید نوع نیمرخ از ابتدای کار معلوم باشد. او با آزمایش قالبهای مخروطی، کسینوسی، بیضوی و هیپربولیک، نیمرخ بهینه مربوط به شرایط اصطکاکی متفاوت را پیدا کرد.

مقوله سوم بر اساس استفاده از مطالعات نظری به همراه معرفی ویژگیهای خاص قالب است. این روش پایه منطقی کردن طراحی قالب در شکل دهی فلزات است.

با استفاده از نظریه میدان خط لغزش، ریچموند و دونپک [۴۶] نیمرخ یافتنده که بردار سرعت در هر نقطه بر امتداد تنش اصلی بزرگتر منطبق بود و آنها ثابت کردند که شکل دهی حاصل از این قالب با کرنش یکنواخت است. این تحقیق توسط هیل [۴۷] مورد تأیید قرار گرفت و صحت آن با نتایج تجربی بیشتری به اثبات رسید [۴۸]. سورتیاس و کوبایاشی [۴۹] و دیگر محققان [۴۱ و ۵۰] برتری قالبهای منحنی را بر قالبهای مخروطی در اکستروژن به اثبات رساندند.

بلازینسکی [۵۱] نظریه ای پیشنهاد کرده است که در آن خارج قسمت افزایش کرنشهای متوالی (C.R.H.S.) ضمن تغییر شکل در درون قالب ثابت بماند. این نظریه در چند فرایند شکل دهی از جمله اکستروژن [۵، ۵۲ و ۵۳] و دیگر فرایندها [۲۵ و ۵۴] با موفقیت انجام یافته است.

## ۵. آموزش در فرایندهای تغییر شکل فلزات

اگرچه ادعا می‌شود که یک استادکار ماهر فقط با داشتن یک عدد سوهان قادر است پیچیده‌ترین قطعات مهندسی را تولید کند، اقتصاد تولید کنونی جهانی اجازه تولید را، تنها به روش سوهان کاری، به استادکار نمی‌دهد. روزی آهنگر پیری گفته بود که "اگر من می‌توانستم یک سوزن بسازم، کمتر از صد تومان نمی‌فروختمش" (در آن روزگار صد تومان، خرج سفر رفت و برگشت دو نفر از خراسان به مکه بوده که یکسال به طول می‌انجامیده است). آهنگر پیر شاید تصور می‌کرد که برای ساختن سوزن هم حتماً باید از همان وسایل ابتدایی آهنگری خود استفاده کند. او احتمالاً نمی‌دانست که برای ساخت هر قطعه‌ای فرایند ویژه و یا تلفیقی از فرایندها به کار گرفته می‌شود و با به کارگیری شیوه‌های صحیح تولید می‌توان قطعات را دقیقتر، سریعتر، ارزاتر و فراوانتر به دست آورد.

امروزه، تولید انبوه قطعات به استادکارهای ماهر فراوان و ماشین‌آلات سنگین و گران نیازمند است. افزایش مهارت متخصصان و تولید قطعات به‌طور دقیق و ارزان مستلزم آموزش‌های مناسب است. آموزش روشهای تولید را می‌توان به سه مقوله متفاوت تقسیم‌بندی کرد:

### الف. آموزشهای ویژه

آموزش کار با دستگاهها و کسب مهارتهای خاص که کارخانه‌ها و مؤسسات بر حسب نیاز و ضرورت به آن می‌پردازند.

### ب. آموزش عمومی روشهای تولید

در اکثر کشورها مراکز آموزش فنی و حرفه‌ای در سطح افزایش مهارتهای کارگری، هنرستانها و دبیرستانهای فنی در سطح تربیت کارداناها و دانشگاهها در سطح تربیت مهندسان، طراحان و برنامه‌ریزان به آموزش متخصصان می‌پردازند.

آموزش روشهای تغییر شکل فلزات، برخلاف برخی از روشهای تولید دیگر مانند جوشکاری و تراشکاری که با دستگاههای ارزاتر امکان‌پذیر است، تأسیسات و دستگاههای سنگین را طلب می‌کند. در نتیجه، آموزش این روشها عموماً به صورت نظری و در کلاسهای درس صورت می‌گیرد. با وجود این، در بعضی از دانشگاهها از دستگاههای کوچکتر آزمایشگاهی و از مواد الگو برای

آموزش شیوه‌های تغییر شکل استفاده می‌شود. کتابهای مفیدی در زمینه‌های روشهای تولید به‌طور عام [۵۵ و ۵۶] و در تغییر شکل فلزات به‌طور خاص [۲، ۳، ۴، ۶، ۳۴] انتشار یافته است.

### ج. آموزش مدیریت تولید

در این برنامه انتخاب روشهای تولید مناسب برای قطعات مختلف آموزش داده می‌شود. این نوع آموزش برنامه‌ای کوتاه‌مدت در قالب سمینارها، کارگاهها، نمایشگاهها و کلاسهای خصوصی گران‌قیمت است.

علی‌رغم پیشرفتهای شایان ذکری که در زمینه‌های مختلف تولید به‌دست آمده است، هنوز هم انتقادهایی در مورد بعضی از مقوله‌های یادشده فوق وجود دارد. در یکی از نمایشگاههای بین‌المللی تهران اتومبیلی به معرض تماشا گذاشته شده بود که بدنه آن را یک استادکار ماهر با صافکاری از ورقهای صاف ساخته بود. او مدت دو سال برای تولید آن کار کرده و از روشهای مختلف تولید استفاده کرده بود. در مهارت فنی او شکی نبود و کارش با تحسین روبه‌رو شده بود. ولی برای ساخت اتومبیل دیگری نظیر آن نیاز به دو سال وقت داشت! اگر او توان خود را در ساختن قالب یا پرسهایی صرف می‌کرد که در هر چند دقیقه یک بدنه اتومبیل را تولید می‌کرد بهتر نبود؟ راهنمایی صنعتگران توانمند و به‌کارگیری صحیح ایده‌ها، توان و نوآوری آنها در گرو آموزشهای صحیح درازمدت و کوتاه مدت است.

### ۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با وجود پیشرفتهای خوبی که در نظریه‌های شکل‌دهی حاصل شده است، بهبود در طراحی قالبها هنوز بر اساس سعی و خطا انجام می‌شود. شاید دلیل این موضوع در کمبود اطلاعات لازم از رفتار مواد در داخل قالبهای شکل‌دهی باشد. با وجود این، در زمینه سعی و خطا نیز پیشرفتهای زیادی انجام گرفته است که به‌کارگیری تجربه دیگران باعث جلوگیری از تکرار سعی و خطا و صرفه‌جویی در وقت و هزینه خواهد شد. علی‌رغم اینکه کاربرد رایانه در صنعت شکل‌دهی و طراحی قالب روش انقلاب‌گونه‌ای را به‌وجود آورده است [۵۷، ۵۸ و ۵۹]، هنوز کافی نیست. از طرف دیگر به‌نظر می‌رسد که آموزش در این زمینه از فناوریهای جدید کمتر سود جسته است و با دستاوردهای تحقیقات همگام نیست.

- برای پیگیری تحقیقات و آموزش در شکل دهی فلزات، چه به طور نظری و چه به صورت تجربی و کاربردی، زمینه‌های چندی وجود دارد که فهرست وار بیان می‌کنیم:
- تحلیل و فرمولبندی عمر قالب و ارتباط آن با شکل هندسی.
  - شبیه‌سازی روانکاری و اصطکاک مابین قالب و قطعه‌کار.
  - مطالعه ساختمان مولکولی محصول و ارتباط آن با شکل قالب.
  - مطالعه خواص مکانیکی محصول و ارتباط آن با شکل قالب.
  - توسعه تحلیل و فرمولبندی شکل دهی در مسائل سه‌بعدی.
  - گسترش استفاده از فناوریهای نوین آموزشی، نظیر تهیه و توزیع اسلاید، فیلم و برنامه‌های رایانه‌ای شبیه‌سازی شده فرایندهای شکل دهی فلزات.
  - همگام کردن آموزش با تحقیقات در روشهای تولید.
  - گسترش و افزایش آموزش مدیریت تولید.

## مراجع

1. T. Altan and G.D. Lahoti, Limitations, applicability and usefulness of different methods in analysis forming problems, *Annals of the C.I.R.P.*, Vol. 28, pp. 473-485, 1979.
2. T. Altan, S. Oh and G.D. Gegel, Metal forming, fundamentals and applications, *A.S.M.*, 1983.
3. G.W. Rowe, Principles of industrial metalworking processes, Edward Arnold, London, 1977.
4. W.F. Hosford and R.M. Caddell, Metal forming, mechanics and metallurgy, Printice-Hall, 1983.
5. A. Farzad, Ph.D. thesis, University of Leeds, 1988.
6. G.W. Rowe, Elements of metalworking theory, *Edward Arnold Ltd*, 45-61, 1979.
7. R. Hill, The mathematical theory of plasticity, Oxford University Press, 1985.
8. W. Johnson, R. Sowerby and R.D. Venter, Plane strain slip line fields for metal

- deformation processes, Pergamon Press, 1982.
9. R.W. Johnson and G.W. Rowe, Redundant work in drawing cylindrical stock, *J. Inst. Met.*, Vol. 96, pp. 97-105, 1968.
  10. W. Johnson, Estimation of upper bound loads for extrusion and coining operations, *Proc. Inst. Mech. Engrs.* pp. 61-72, 1959.
  11. K.(ed) Lange, Hand book of metal forming, McGraw-Hill, 1985.
  12. D.Y. Yang and C.H. Han, A new formulation of generalized velocity field for axisymmetric forward extrusion through arbitrarily curved dies, *J. Eng. Ind.*, Vol. 109, No. 2, pp. 161-168, 1987.
  13. W. Johnson and P.B. Mellor, Engineering plasticity, Ellis Horwood Ltd., 1983.
  14. S. Kobayashi, A review on the finite element method metal forming process modeling, *J. Appl. Metalworking*, Vol. 2, p. 163, 1982.
  15. G.W. Rowe, Problems involved in the numerical analysis of plastic working processes for new materials, *Advd. Tech. Plas.* pp. 27-38, 1984.
  16. Pei Chi Chou and Wu Longwu, A dynamic relaxation finite element method for metal forming processes, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 28, No. 4, pp. 231-250, 1986.
  17. C.R. Boer and F. Jovane, Computer aided design in metal forming systems, *Annals of the C.I.R.P.*, Vol. 33/2, 1984.
۱۸. کارن، ابری‌نیا، اکستروژن مقاطع پیچیده از قبیل I و T شکل، چهارمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک انجمن مهندسان مکانیک ایران و دومین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، ۱۳۷۵.
19. C.E. Pearson and R.N. Parkins, The extrusion of metals, Chapman and Hall, London, 1960.
  20. T. Chandra and J.J. Jonas, The extrusion force and the mean strain rate during the extrusion of strain rate sensitive materials, *Met. Trans.* Vol. 1, pp. 2079-2082, 1970.
  21. C. Smith and N. Swindells, Some factors affecting the quality of extrusion, *J. Int. Metals.*, Vol. 82, pp. 1953-1954, 1953.

22. D.P. Yuen, S. Kobayashi and J. Frisch, Metal flow in extrusion of shapes, *Proc. N.A.M.R. Conf., Vol. 4, pp. 188-192, 1976.*
23. T.Z. Blazynski, Optimization of die design and tube making, *The engineer, Vol. 223, No. 5797, pp. 627-630, 1967.*
24. H.F. Massey, The flow of metal during forging, *Trans. Manchester Asso. Engrs, pp. 21-66, 1921, 1922.*
25. J.H. Mohamed, Ph.D. thesis, University of Leeds, 1986.
26. P.M. Cook, Forging research, used of plasticine models, *Metal treatment and drop forging Vol. 20, pp. 540-548, 1953.*
27. N. Inoue and M(ed.) Nishihama, Hydrostatic extrusion, theory and applications, Elsevir, 1985.
28. S. Dinda, S.P. Keeler, K.F. James and P.A. Stine, How to use circle grid analysis for die tryout, A.S.M., 1981.
29. E.G. Thomsen, C.T. Yang and J.B. Bierbower, An experimental investigation of the mechanics of plastic deformation of metals, *University of California Publications in engineering Vol. 5, No. 4, pp. 89-144, 1945.*
30. J.G. Wistrich, The fundamentals of wire drawing, *Metal. Rev., Vol. 3, No. 10, pp. 79-142, 1958.*
31. G.I. Taylor and H. Quinney, The distortion of wore on passing through a draw plate, *J. Inst. Met., Vol. 49, pp. 187-202, 1932.*
32. B.B. Hundy and A.R.E. Singer, Inhomogeneous deformation in rolling and wore drawing, *J. Inst. Met., Vol. 83, pp. 401-407, 1954-1955.*
33. M Farzin, Sheet metal forming by a pressure medium, *Int. Conf. Engg., Sharif University, Iran, pp. 514-521, 1992.*
34. E.G. Thomsen, G.T. Yang and S. Kobayashi, Mechanics of plastic deformaiton in metal processing, Macmillan, N. Y., London, 1965.

35. J. Halling and L.A. Mitchle, Experimental study of symmetrical extrusion using parafin wax as model material, *Proc. 5th Conf. M.T.D.R.*, pp. 353-390, 1964.
36. A.H. Shabalk, Metal forming, inter relation between theory and practice, (ed. Hoffmanner), pp. 63-83, 1971.
37. B.B. Basily and D.H. Sansom, Determination of the mean coefficient of friction in the direct drawing of section rods from round bars, 17th Int. M.T.D.R. Conf., pp. 475-486, 1976.
38. I.S.M.E., Cold forging data sheet No. 69002, Determination of extrusion pressure, *Metal forming*, Vol. 36, No. 5, pp. 134-147, 1969.
39. Mata-Pietri and F. Frisch, Metal flow through various mathematically countoured extrusion dies, *Proc. 5th N.A.M.R. Conf.*, pp. 99-113, 1977.
40. C.T. Chen and F.F. Ling, Upper bound solution to axisymmetric extrusion problems, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 10, pp. 863-879, 1968.
41. S.K. Samanta, A new die profile with high process efficiency, *Appl. Sci. Res.*, Vol. 25, pp. 54-64, 1971.
42. A.P. Green, On unsymmetrical extrusion in plane strain, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 3, pp. 189-196, 1955.
43. W. Johnson and H. Kudo, The mechanics of metal extusion, Manchester University Press, 1962.
44. C.B. Boer, W.R. Schneider, B. Eliasson and B. Avitzur, An upper bound approach for the direct drawing of square section rod from round bar, *Proc. 20th Int. M.T.D.R. Conf.*, pp. 149-156, 1979.
45. N. Nagpal, Analysis of plane strain extrusion through arbitrarily shaped dies using flow function, *J. Eng. Ind.*, Vol. 99, No. 3, pp. 754-759, 1977.
46. O. Richmond and M.L. Devenpeck, A die profile for maximum efficiency in strip drawing, Proc. 4th US National Congress of applied mechanics, Vol. 2, pp.



1053-1057, 1962.

47. R. Hill, A remark on diagonal streaming in plane plastic strain, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 14, pp. 245-248, 1966.
48. M.L. Devenpeck and O. Richmond, Strip drawing experiments with a sigmoidal die profile, *J. Eng. Ind.*, Vol. 87, No. 4, pp. 425-428, 1965.
49. H.C. Sortias and S. Kobayashi, An optimum die profile for axisymmetric extrusion, *Int. J. M.T.D.R.*, Vol. 8, pp. 61-72, 1968.
50. J.S. Gunasekera, S. Hoshino and R.H. Brown, Extrusion of non-circular section through shaped dies, *Annals of the C.I.R.P.*, Vol. 29, pp. 141-145, 1980.
51. T.Z. Blazynski, Theoretical method of designing tools for metal forming processes, *Metal forming*, Vol. 34, No. 5, pp. 143-150, 1967.
52. T.Z. Blazynski, Optimization of die design in the extrusion of rod using model materials, *J. Mech. Sci.*, Vol. 13, No. 2, pp. 113-131, 1971.
53. P.V. Vaidyanathan, Ph.D. thesis, University of Leeds, 1972.
۵۴. عبدالعلی، فرزاد، طراحی قالب در شکل دادن فلزات، پنجمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک ایران، دانشگاه تبریز، صفحات ۱۴۵۹ الی ۱۴۶۷، ۱۳۷۶.
55. E.P. Degarmo, J.T. Black and R.A. Kohser, Materials and processes in manufacturing, (6th ed.) Macmilian Pub., 1984.
56. S. Kalpakjian, Manufacturing processes for engineering materials, Addison-Wesley, 1983.
57. D.Y. Yang and T. Altan, Analytical and experimental investigation into lubricated three dimensional extrusion of general helical sections, *Annals of the C.I.R.P.*, Vol. 35, pp. 169-172, 1986.
58. J.S. Gunasekara, H.L. Gegel, J.C. Malas, S.M. Doreivelu, J.T. Morgan and T. Altan, Computer aided process modelling of hot forging and extrusion of aluminum alloys, *Annals of the C.I.R.P.*, Vol. 31, pp. 131-135, 1982.

59. L.E. Farmer and P.L.B. Oxley, A computer aided method for calculating the distribution of strain rate and strain from an experimental flow field, *J. Strain Analysis*, Vol. 11, No. 1, pp. 26-32, 1976.

(تاریخ دریافت مقاله: ۷۸/۷/۱۰)