Isfahan University of technology

Department of Mechanical engineering

Pridiction Of Hot Radial Forging Force By Response Surface Method And Artificial Neural Network

By

Puya foode

Supervisor: Dr. ali reza fadai Tehrani

چکیده

آهنگری شعاعی یک فرآیند آهنگری قالب باز می‌باشد که جهت کاهش قطر شافت‌ها، لوله‌ها، شافت‌های پله‌دار و محورها مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجاییکه ماکزیمم نیروی قابل اعمال توسط دستگاه‌ها مقداری مشخص و ثابتی است، دانستن مقدار نیروی وارد بر قالب در زمان شکل دهی قطعات در شرایط متفاوت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از انجام این تحقیق پیش‌بینی نیروی وارد بر هر قالب در فرآیند آهنگری شعاعی می‌باشد. بیشتر تحقیقاتی که تا کنون در زمینه آهنگری شعاعی صورت گرفته است با استفاده از فرض متقارن محوری بوده است. در این تحقیق فرآیند آهنگری شعاعی داغ برای یک سیلندر توپر با استفاده از روش اجزای محدود سه بعدی شبیه‌سازی می‌شود. جهت شبیه‌سازی فرآیند آهنگری شعاعی داغ، از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS استفاده می‌گردد. صحت نتایج حاصل از شبیه سازی از مقایسه آنها با نتایج موجود، که به روش تختال صورت پذیرفته است، حاصل می‌گردد. در این تحقیق در قدم اول اثرات پارامترهایی از قبیل زاویه ورودی قالب، طول قسمت تخت قالب، دمای اولیه قطعه‌کار، میزان کاهش سطح مقطع قطعه‌کار و میزان پیشروی قطعه‌کار بر روی نیرو بررسی می‌گردد. جهت جلوگیری از اتلاف زمان و هزینه برای شبیه‌سازی فرآیند آهنگری شعاعی داغ ، نیروی مورد نیاز برای شکل دهی قطعات به دو روش رویه پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی پیش بینی می‌گردد. در این دو روش زاویه ورودی قالب،دمای اولیه قطعه‌کار، میزان کاهش سطح مقطع و میزان پیشروی به عنوان پارامترهای ورودی و نیروی آهنگری به عنوان پارامتر خروجی در نظر گرفته می‌شود. با افزایش پارامترهای زاویه ورودی قالب و دمای اولیه قطعه کار، نیروی وارد بر قالب کاهش و با افزایش پارامترهای طول قسمت تخت قالب کاهش سطح مقطع و میزان پیشروی، نیرو افزایش پیدا می کند. میزان خطای به دست آمده از روش شبکه عصبی مصنوعی انتخاب شده از روش رویه پاسخ بیشتر بوده ولی هر دو روش جواب قابل قبول ارائه می کنند.

کلمات کلیدی: آهنگری شعاعی داغ- نیرو - اجزا محدود سه بعدی- شبکه عصبی مصنوعی- روش رویه پاسخ.

فصل اول : آهنگری شعاعی

۱-۱ مقدمه

در طی سالهای اخیر در صنعت شکل‌دهی فلزات، روشهای متعددی که هم از لحاظ اقتصادی و هم از لحاظ سرعت عمل در تولید مناسب باشد به کار گرفته شده است. فرآیند آهنگری شعاعی[1] یکی از این فرآیندها می‌باشد. این فرآیند قادر است با استفاده از بیش از ۹۵٪ مواد اولیه، محصولاتی با کیفیت سطح بالا تولیدکند.

دستگاه آهنگری شعاعی اولین بار در سال ۱۹۴۶ و در اتریش مورد استفاده قرارگرفت. اولین دستگاه آهنگری شعاعی ۴ چکشه در اتریش در سال ۱۹۶۰ ساخته شد و بعد از آن به مرور بر ظرفیت و کاربردهای دستگاه آهنگری شعاعی افزوده شد. دستگاه‌های آهنگری شعاعی در دو نوع RF و SX ساخته شده‌اند. در جدول ۱-۱ انواع مختلف دستگاه های آهنگری شعاعی از نوع RF نشان داده شده است. همانطور که در این جدول مشخص است، در این نوع دستگاه، بیشینه قدرت قابل تحمل را دستگاه RF-70 داردکه برابر(MN) ۱۶ می‌باشد.

جدول ۱-۱: انواع مختلف دستگاه آهنگری شعاعی از نوع RF.

نوع	بزرگترین قطر شمش اولیه (mm)	کوچکترین قطر محصول (mm)	نیروی آهنگری (MN)	تعداد ضربه در دقیقه
RF-35	۳۵۰	۶۰	۷	۳۴۰
RF-45	۴۵۰	۸۰	۱۱	۲۶۰
RF-60	۶۰۰	۱۰۰	۱۳	۲۴۰
RF-70	۷۰۰	۱۲۰	۱۶	۲۴۰

[1] Radial forging process (RFP)

در جدول ۱-۲ انواع مختلف دستگاه‌های آهنگری شعاعی از نوع SX نشان داده شده است. همانطور که این جدول نشان می‌دهد، در این نوع دستگاه، بیشینه قدرت قابل تحمل را دستگاه SX-85 دارد که برابر (MN) ۳۰ می‌باشد [۱].

جدول ۱-۲: انواع مختلف دستگاه آهنگری شعاعی SX [۱].

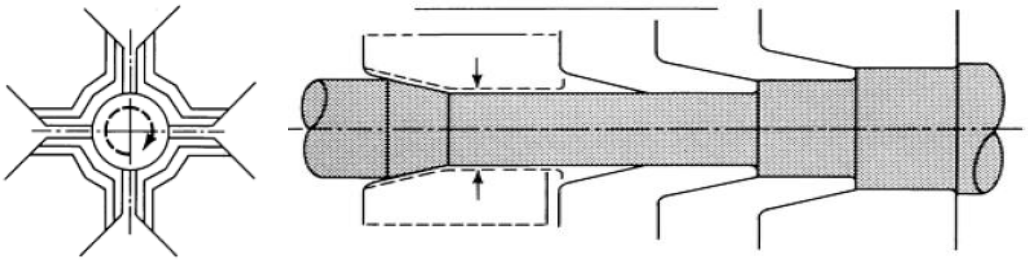
نوع	ماکزیمم سایز اولیه				مینیمم سایز محصول				ماکزیمم طول محصول		ماکزیمم نیروی آهنگری		تعداد ضربه در دقیقه
	دایره ای (قطر)		مربع		دایره ای		مربع						
	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	m	ft	MN	tonf	
SX-10	100	4	90	3.5	30	1.2	35	1.4	5	16.5	1.25	140	900
SX-13	130	5	115	4.5	35	1.4	40	1.6	6	20	1.6	180	620
SX-16	160	6	140	5.5	40	1.6	45	1.8	7	23	2	225	580
SX-20	200	8	175	7	50	2	50	2	8	26	2.6	300	480
SX-25	250	10	220	8.7	60	2.4	60	2.4	8	26	3.4	380	390
SX-32	320	12	290	11.5	70	2.8	70	2.8	8	26	5	560	310
SX-40	400	16	360	14	80	3.2	80	3.2	10	33	8	900	270
SX-55	550	22	480	19	100	4	100	4	10	33	12	1350	200
SX-65	650	26	570	22.5	120	4.8	120	4.8	12	40	17	1900	175
SX-85	850	34	750	29.5	140	5.5	140	5.5	18	60	30	3400	143

آهنگری شعاعی یک فرآیند آهنگری قالب باز محسوب می‌شود که نوع ماشین آن مکانیکی است. تغییر شکل در این روش نتیجه حرکت رفت و برگشت چهار قالب است که با فاصله کوتاه و به صورت شعاعی در محیط قطعه‌کار قرار گرفته‌اند. این قالب‌ها با سرعت بسیار زیاد بر قطعه‌کار ضربه وارد کرده و در انتها قطعه مورد نیاز را ایجاد می کنند. برای نگه‌داری قطعه‌کار در موقعیت مناسب و همچنین برای تغذیه قطعه‌کار به میان قالب‌ها این ماشین مجهز به یک یا دو کارگیر (سه نظام) در طرفین قفسه آهنگری می‌باشد. در عملیات آهنگری شعاعی معمولا قطعه‌کار بین سرهای کارگیر و به صورت افقی محکم گردیده و کنترل می‌گردد. جعبه آهنگری از دو یا چهار قالب با طرح‌بندی قطبی تشکیل شده است. این قالب‌ها به وسیله شاتون‌ها تحریک می‌شوند. شاتون‌ها خود به وسیله یک موتور الکتریکی با سرعتی بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ دور در دقیقه به چرخش در می‌آیند. قدرت این موتور الکتریکی به اندازه ماشین آهنگری بستگی دارد. پس از هر ضربه که با صدای بلند همراه است، قطعه‌کار در جهت محوری به درون قالب‌ها توسط کارگیر پیش برده می‌شود. در نتیجه در هر ضربه فقط یک جزء کوچک از قطعه‌کار شکل داده می شود. علاوه براین برای به دست آوردن سطح گرد در قطعات مدور، قطعه توسط کارگیر با نرخ ۶ الی ۱۵ دور در

دقیقه می‌چرخد. برای جلوگیری از پیچش در قطعه، چرخش کارگیر در مدت زمانی‌که قطعه و قالب در تماس با یکدیگر قرار دارند به طور لحظه‌ای متوقف می‌گردد [۲]. همچنین به سبب حرکت خلاف جهت قالب‌ها چون برآیند نیروها یکدیگر را خنثی می‌کنند، هیچ نیرویی به پی دستگاه انتقال پیدا نمی‌کند. شکل ۱-۱ نمایی از یک دستگاه آهنگری شعاعی را نشان می‌دهد.

شکل ۱-۱ : نمایی از یک دستگاه آهنگری شعاعی داغ [۳].

ابعاد قطعه آهنگری توسط تغییر موقعیت مبدا حرکت رفت و برگشتی قالب آهنگری کنترل می‌شود. موقعیت مبدا و سرعت تغذیه کارگیر می‌تواند به صورت دستی و یا به صورت عددی و کامپیوتری کنترل گردد. همانطور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است، با تغییر در موقعیت ابتدایی قالب، محصولی پله‌دار ساخته شده است.



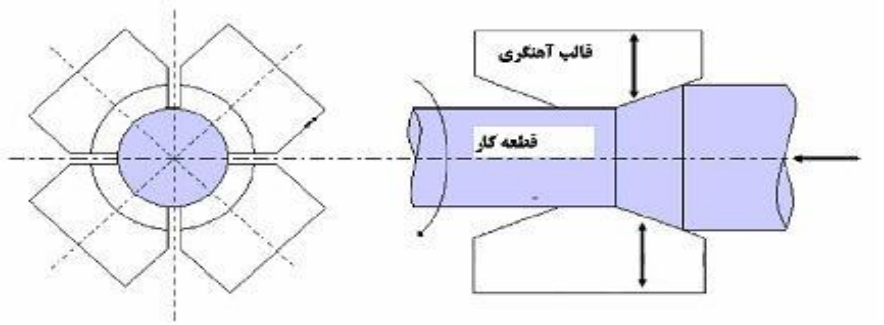
شکل ۱-۲ : ایجاد پله بر روی قطعه‌کار با تغییر در موقعیت قالب [۱].

برتری آهنگری شعاعی بر سایر روش‌های معمول آهنگری استفاده همزمان از چهار فک به جای دو فک برای شکل‌دهی است. شکل‌دهی ماده در یک صفحه و از چهار جهت مانع از پخش‌شوندگی آزاد فلز، آن‌چنان که در فرآیندآهنگری باز معمولی رخ می‌دهد، خواهد گشت. همچنین از تنش‌های کششی و ترک‌های سطحی در قطعه جلوگیری می‌شود. عدم وجود تنشهای کششی و ترک‌های سطحی، یکی از برتری‌های مهم فرآیند آهنگری شعاعی می‌باشد. البته مزایای انحصاری این فرآیند متعدد است که در ادامه بیان خواهد شد [۱]. همچنین عملیات آهنگری شعاعی این توانایی را دارد که محصولاتی از قبیل میله‌ها و لوله‌ها را با کیفیت سطح بالا و با استفاده بیش از ٪۹۵ مواد اولیه تولید کند.

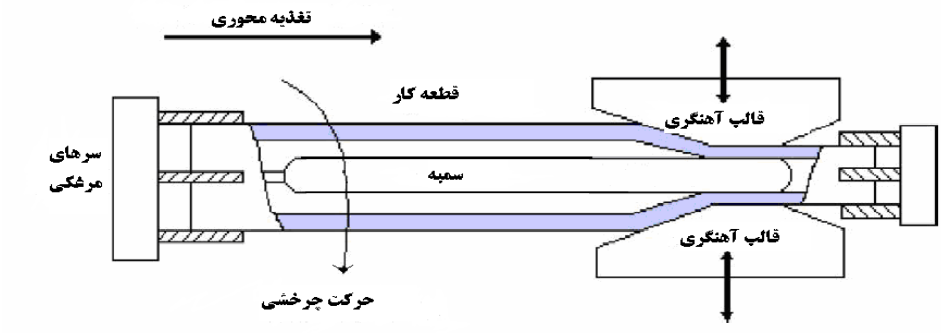
در حالت کلی فرآیندآهنگری شعاعی به دو صورت سرد و داغ صورت می‌پذیرد که تغییرشکل در حالت داغ آن بیشتر و سریعتر از حالت سرد است. به همین دلیل آهنگری شعاعی داغ کاربرد بیشتری دارد.

آهنگری شعاعی داغ معمولاً برای رسیدن به خواص متالوژیکی بهتر و کاهش قطر بیشتر و اغلب برای قطعات بزرگ استفاده می‌گردد. در صورتی‌که آهنگری شعاعی سرد برای رسیدن به صافی سطح بهتر و اغلب برای قطعات کوتاه به کار می‌رود.

جهت تولید یک شافت توخالی طویل در عملیات آهنگری سرد یا داغ، یک سنبه که دارای پروفیل وارونه می‌باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. سنبه استوانه‌ای، صاف و گاهی دارای سطح منقش یا سطح مقطع غیرگرد می‌باشد، که در یک نگه دارنده محکم می‌شود و تحرک آن توسط ابزاری، در پشت کارگیر صورت می‌پذیرد. کارگیر، لوله توخالی که قطر داخلی آن بزرگتر از سنبه می‌باشد را نگهداری می‌کند. قطعه‌کار درحالیکه سنبه در وسط آن مستقر است، هماهنگ با سنبه به درون قفسه آهنگری رفته و کوبش قطعه سبب کاهش قطر داخلی، قطر خارجی و ضخامت دیواره آن می‌گردد. در حالت آهنگری داغ، سنبه بایستی از درون خنک گردد. اصول کار یک ماشین آهنگری شعاعی در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.



(الف)



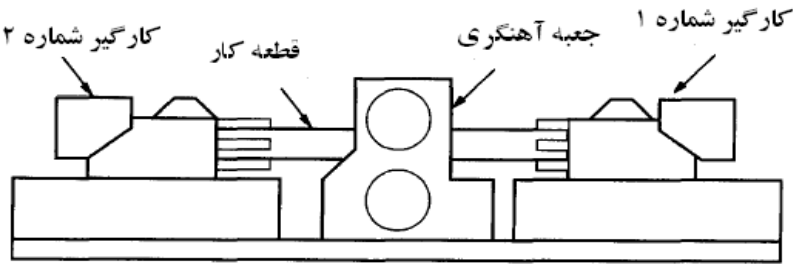
(ب)

شکل ۱-۳: اصول کار ماشین آهنگری شعاعی الف) آهنگری یک قطعه توپر ب) آهنگری یک لوله همراه با سنبه [۱].

برای تولید یک قطعه سالم و مطلوب در آهنگری شعاعی بطور خلاصه این موارد بایستی مدنظر باشند:
۱) اطمینان از نفوذ کامل تغییرشکل به مغز قطعه‌کار تا از نابرابری اندازه دانه بین سطح و مغز قطعه پیشگیری گردد.
۲) جلوگیری از ایجاد ترک‌های سطحی، ترکیدگی مرکزی وعیب دم ماهی.
۳) از بین بردن عیوب تشکیل شده هنگام انجماد و حفرات ناشی از ریخته‌گری.

۱-۲ جنس مواد اولیه
موادی که در طی این فرآیند، آهنگری می‌شوند عبارتند از انواع فولادها به ویژه فولادهای پرآلیاژ، آلیاژهای تیتانیوم، تنگستن، برلیم و تعداد زیادی سوپرآلیاژهای با کاربرد در دمای بالا [۴].

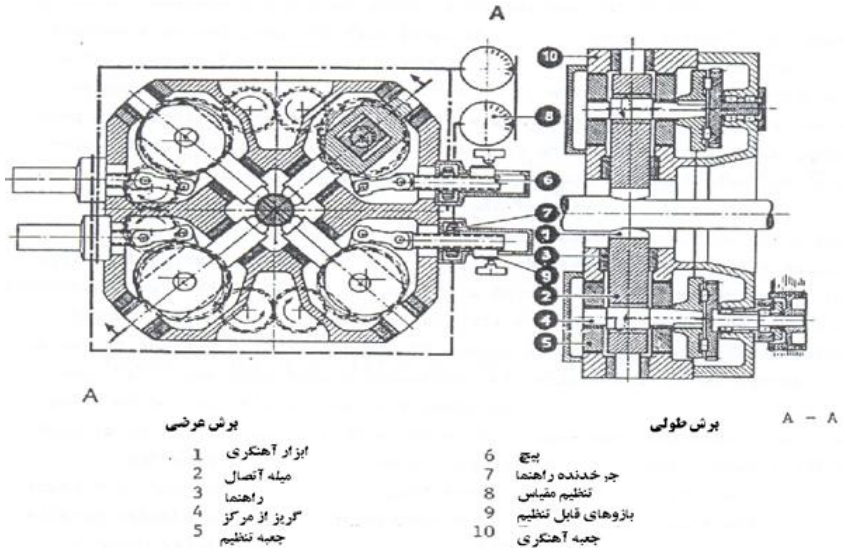
۱-۳ اجزای اصلی در ماشین‌های آهنگری شعاعی
ماشین‌های آهنگری شعاعی با روش شکل‌دهی سرد یا داغ معمولا از سه، چهار یا شش قالب برای تولید قطعات توپر، توخالی، گرد، مربع و مستطیلی استفاده می‌کنند.
با توجه به اینکه مسیر حرکت قالب‌ها، نسبت به هم زاویه ۱۸۰ درجه دارند، نیروی همدیگر را خنثی کرده و در نتیجه هیچ نیرویی به پایه ماشین انتقال داده نمی‌شود. شکل ۱-۴ شماتیک کلی از فرایند آهنگری شعاعی را نشان می‌دهد.
ماشین آهنگری شعاعی افقی از یک محفظه‌ی آهنگری همراه با سیستم انتقال قدرت چرخدنده‌ای[1]، دو کارگیر برای درست کردن شکل اولیه، دستگاه‌های مرکزی، اجزاء ضروری هیدرولیکی و الکترونیکی تشکیل می‌شود که در شکل ۱-۵ نشان داده شده است [۲].



شکل۱-۴ : دستگاه آهنگری شعاعی با دو کارگیر [۵].

۱-۳-۱ محفظه‌ی آهنگری و تنظیم ضربه
هسته‌ی مرکزی ماشین یک محفظه آهنگری تنومند فولادی است که تمام نیروهای ساخت را جذب می‌کند. این محفظه همراه با یک جعبه‌دنده[2] روی یک پایه متصل به پی نصب می‌شود. محفظه‌ی آهنگری که در شکل۱-۵ نشان داده شده است، از چهار هوزینگ[3] قابل تنظیم و قابل گردش تشکیل می‌شود، که در آن محورها به صورت خارج از مرکز نصب شده‌اند. این محورهای خارج از مرکز که توسط یک موتور الکتریکی از میان یک سیستم چرخ دنده‌ای تحریک می‌گردند و شاتون‌ها و قالب‌های آهنگری را به کار می‌اندازند، به صورت زوایای قائمه کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند.

---
[1] Gear drive
[2] Gear box
[3] housing

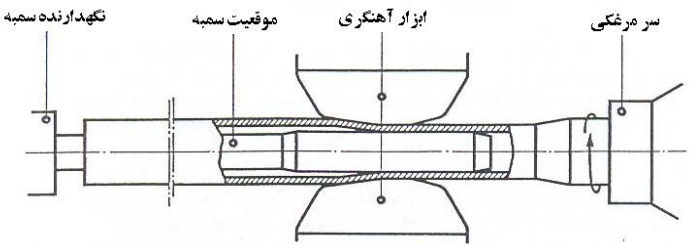


شکل ۱-۵: محفظه آهنگری ماشین آهنگری شعاعی [۲].

۱-۳-۲ کارگیرها و سنبه آهنگری

برای نگهداشتن ماده در موقعیتی مناسب و برای جلو بردن آن تا محفظه‌ی آهنگری، از یک یا دو کارگیر استفاده می‌شود (شکل۱-۶). در هرضربه، ماده‌ی آهنگری به صورت محوری به سمت کارگیرها حرکت می‌کند. این حرکت‌ها به صورت متناوب بر فنرهایی که در پشت یکی از کارگیرها واقع شده، فشار وارد می‌کنند. در آهنگری اجزاء گرد، قطعه‌کار چرخانده می‌شود. برای جلوگیری از پیچ خوردگی در آهنگری، کارگیرهای درحال چرخش، طی هر ضربه متوقف می‌شوند.

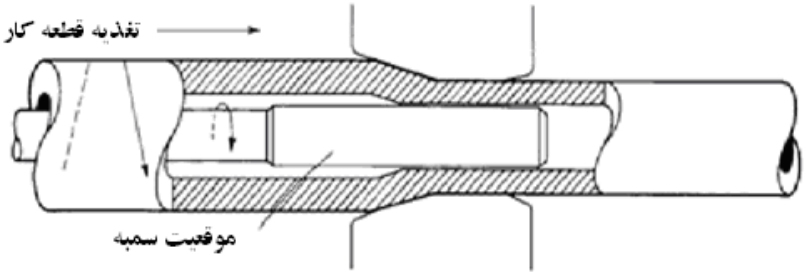
جلو رفتن کارگیرها و نفوذ قالب‌ها، یا همان کاهش سطح مقطع، به وسیله‌ی کنترل عددی[۱] تنظیم و تعدیل می‌شود. به این ترتیب، دستیابی به دقت بسیار بالا در تولید مجدد که کیفیت یکنواخت اجزاء آهنگری را تضمین می‌کند، ممکن می‌گردد.



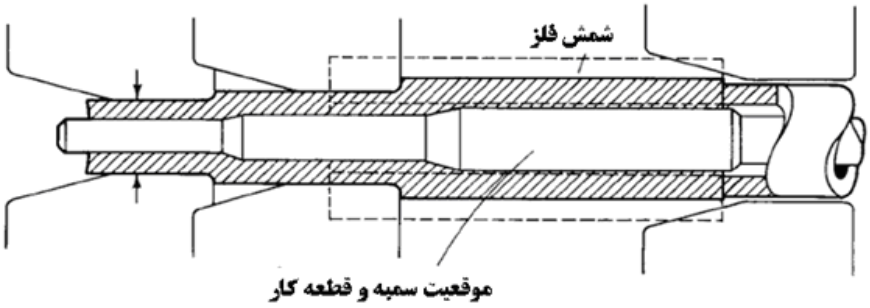
شکل۱-۶: آهنگری یک لوله با استفاده از سنبه [۲].

[۱] Numerical control

با توجه به پروفیل داخلی مورد نظری که می‌خواهد در درون قطعه‌کار ایجاد شود، دو نوع سنبه در آهنگری شعاعی بکار می‌رود که به سنبه کوتاه و سنبه بلند موسومند.
در شکل ۱-۷ تصاویری از نحوه تولید لوله‌های پله‌دار با استفاده از سنبه بلند و سنبه کوتاه نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱-۷ : آهنگری لوله های میان تهی پله‌دار الف) همراه با سنبه کوتاه ب) همراه با سنبه بلند [۱].

همانطور که در شکل ۱-۷ نشان داده شده است، لوله‌های طویل با سوراخ‌های استوانه‌ای شکل با استفاده از سنبه کوتاه آهنگری می‌شوند. زمانی‌که قطعه‌کار با استفاده از کارگیر به زیر قالب‌ها حرکت می‌کند، سنبه با استفاده از گیره خود در جای خود ثابت مانده و تنها حرکت دورانی انجام می‌دهد. سنبه مقداری مخروطی شکل ساخته می‌شود تا بتوان با تغییر در موقعیت سنبه، اصلاحاتی در قطر داخلی قطعه ایجاد کرد.
آهنگری بر روی سنبه‌های بلند معمولا برای لوله‌های کوتاه با سوراخ‌های پله‌ای شکل، استوانه‌ای شکل و مخروطی شکل انجام می‌پذیرد. سنبه بلند توسط کارگیرها گیره‌بندی شده و همزمان با حرکت قطعه‌کار به زیر قالب‌ها وارد می‌گردد. بعد از انجام پروسه آهنگری سنبه از درون قطعه‌کار به خارج کشیده شده و به درون سوراخ کارگیر وارد می‌گردد. در هنگام آهنگری با سنبه، به علت تماس سنبه با قطعه‌کار بایستی سنبه را با آب خنک کرد.
روند کلی حرکات درآهنگری شعاعی بدین ترتیب می‌باشد که قالب‌ها یک حرکت نوسانی با فرکانس معین، طول کورس ثابت و حداکثر نیروی مشخص داشته و در قسمت جعبه آهنگری موقعیت‌دهی می‌شوند. قطعه‌کار نیز دارای حرکت پیشروی می‌باشد به نحوی که کل طول قطعه‌کار از داخل جعبه آهنگری عبور می‌نماید. در این راستا حرکت قطعه‌کار ممکن است شامل حرکت دورانی نیز باشد به ویژه جهت تولید قطعات مدور، قطعه‌کار از حرکت دورانی به همراه حرکت پیشروی برخوردار است.

در فرآیند چهار چکشه، افزایش درجه حرارت در ماده قطعه‌کار رخ می‌دهد که میزان آن به نرخ تغییر شکل و مقاومت به شکل‌پذیری مواد بستگی دارد. تغییر شکل پلاستیک موجب افزایش درجه حرارت می‌گردد و هر چه نرخ آن بیشتر باشد حرارت ایجاد شده بیشتر خواهد بود.
معمولا در آهنگری سرد در صورت لزوم به استفاده از سنبه، برای بالا بردن عمر سنبه، جنس سنبه را از کاربید تنگستن در نظر می‌گیرند [۱].

۱-۴ پارامترهای موثر در فرآیند آهنگری شعاعی

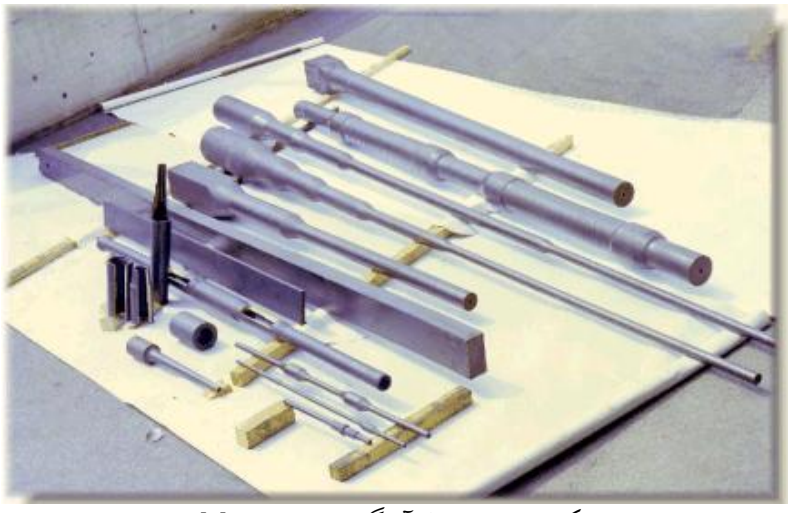
پارامترهایی که در فرآیند آهنگری شعاعی وجود داشته و روی نیروی وارد بر قالب تاثیرگذارند عبارتند از :
(۱) جنس ماده اولیه.
(۲) تعداد قالب‌های آهنگری.
(۳) قطر خارجی قطعه‌کار.
(۴) قطر داخلی قطعه‌کار.
(۵) قطر سنبه.
(۶) پروفیل سنبه.
(۷) قطر خارجی قطعه‌ی آهنگری شده.
(۸) قطر داخلی قطعه‌ی آهنگری شده.
(۹) درصد کاهش سطح.
(۱۰) طول قسمت تخت استوانه‌ای قالب[1].
(۱۱) زوایای ورودی قالب.
(۱۲) ضریب اصطکاک در مناطق تماس قالب – قطعه و سنبه – قطعه.
(۱۳) پیشروی محوری قطعه‌کار در هر کورس.
(۱۴) سرعت دورانی قطعه‌کار.

۱-۵ کاربردهای فرآیند آهنگری شعاعی

آهنگری شعاعی در ابتدا صرفاً برای آهنگری داغ قطعات کوچک و آهنگری سرد لوله‌ها در روی سنبه بکار می‌رفت ولی اکنون کاربرد آن گسترش یافته و عمدتا برای کاهش سطح مقطع شفت‌ها، بیلت‌ها با سطح مقطع‌های گرد، مربعی، مستطیلی و همچنین برای ساخت انواع محورها و شافت‌های پله‌دار و دارای تقارن محوری مورد استفاده قرار می‌گیرد که به اختصار برخی از کاربردهای مهم این فرآیند در زیر آورده می‌شود.
(۱)آهنگری محورهای توربین.
(۲)تولید لوله‌هائی با پروفیل داخلی و ساده.
(۳)تولید لوله‌های بدون درز با قطر بیش از ۱۰۰۰mm برای مصارف انرژی.
(۴)خان درون لوله تفنگ (به صورت سرد و داغ).
(۵)تولید محورهای پله‌دار با قطرهای مختلف [۵].

[1] Die land

یک‌سری از قطعات تولید شده به روش آهنگری شعاعی سرد در شکل ۱-۸ نشان داده شده است.



شکل ۱-۸: محصول آهنگری شعاعی سرد [۶].

همانطور که در شکل ۱-۹ ملاحظه می‌شود معمولا شمش‌های مورد استفاده در روش آهنگری شعاعی داغ، لقمه‌های فولادی بزرگ با وزن ۱ تا ۲۰ تن می‌باشند که به محصولاتی که نسبت طول به قطر خارجی آنها در حدود ۳۶-۳۰ است، تبدیل می‌گردند. این محصولات ممکن است لوله‌های شیب‌دار، شافت‌های میان تهی، سیلندرهای جدار ضخیم و لوله‌های فشار قوی با سطح خارجی بدون شیب و یا شیب‌دار باشند.

شکل۱-۹ : قطعات تولید شده به روش آهنگری شعاعی داغ [۱].

۱-۶ مزایای فرآیند آهنگری شعاعی

آهنگری شعاعی یک روش بسیار موثر برای کاهش هزینه و صرفه‌جویی در مواد اولیه است. ولی بطور کلی مزایای این فرآیند عبارتند از:

(۱) تولید انبوه

(۲) کاهش هزینه‌ها

(۳) کاهش انرژی مصرفی

(۴) صرفه‌جوئی در مواد اولیه

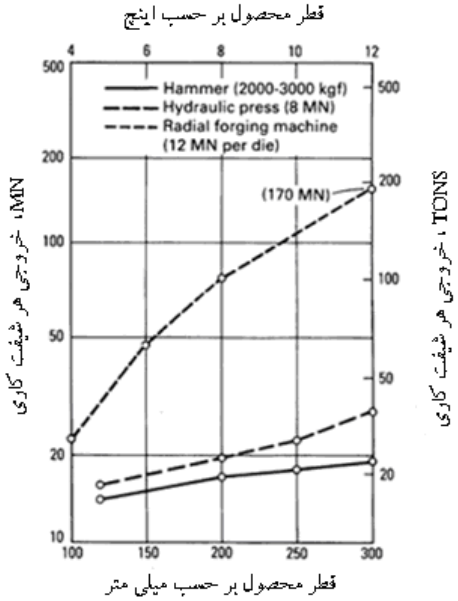
(۵) ساختار لایه‌ای بهبود یافته شده

(۶) به حداقل رسانیدن تخلخل و ترک‌ها و حفره‌ها

(۷) افزایش استحکام مواد

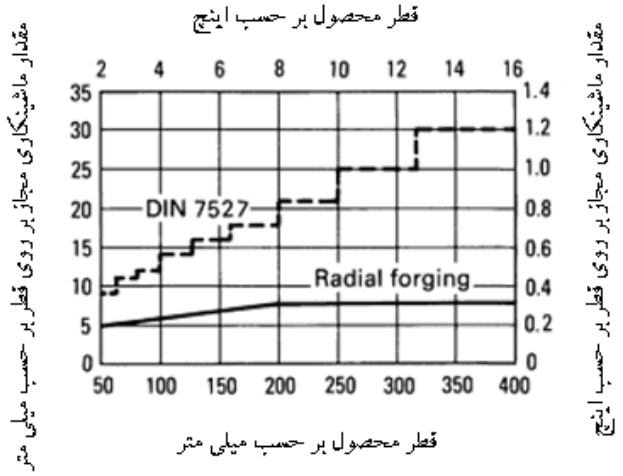
(۸) کیفیت سطحی بالا

همانطورکه در شکل ۱-۱۰ نشان داده شده است تولید محصولاتی از جنس فولاد کم آلیاژ با استفاده از روش آهنگری شعاعی تقریبا ۴ برابر تولید این محصولات با استفاده از روش قالب‌ها یا پرس‌های هیدرولیکی می‌باشد و در تولید فولادهای پرآلیاژ این مقدار تا ۶ برابر نیز رسیده است.



شکل ۱-۱۰ : مقایسه نرخ تولید قطعات با استفاده از روش آهنگری شعاعی و روش قالب‌ها و پرس‌های هیدرولیکی در تولید فولاد آلیاژی، قطر اولیه فولاد ۵۵۰ mm می‌باشد [۱].

همانطورکه در شکل ۱-۱۱ نشان داده شده است، مقدار مجاز ماشینکاری در روش آهنگری شعاعی۰/۳۳ مقدار مجاز ماشینکاری در روش‌های معمول می‌باشد.



شکل ۱-۱۱ : مقدار ماشینکاری مجاز در آهنگری شعاعی در قطرهای مختلف [۱].

۱- ۷ تاریخچه مطالعات انجام شده در زمینه آهنگری شعاعی

برای اولین بار در سال ۱۹۷۴ آهنگری شعاعی توسط آلتان[۱] و لاهوتی[۲] به روش کران بالا[۳] مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق تنش تسلیم ماده ثابت در نظر گرفته شد. مدل آنها بر فرض تقارن محوری[۴] استوار بود و اثر نرخ تغذیه و اصطکاک مورد مطالعه قرار گرفت [۷].

در سال ۱۹۷۶ آلتان و لاهوتی، ماشین‌های آهنگری شعاعی را برای قالب‌هایی با زاویه مرکب و تک زاویه با استفاده از روش تختال[۵] مورد بررسی قرار دادند [۸]. در همان سال آلتان و لاهوتی در یک تحقیق دیگر توزیع تنش را در ناحیه‌های فرورفتگی، آهنگری و سایزینگ به‌دست آوردند [۹].

در سال ۱۹۷۸ سابرامانیان[۶]، جریان فلز در فضای خالی را در آهنگری شعاعی برای لوله‌های تفنگ تحت شرایط کرنش صفحه‌ای مورد بررسی قرار داد. هدف از این تحقیق بررسی جریان فلز در خان لوله‌های تفنگ و همچنین بررسی تاثیرات پارامترهای فرآیند بر روی جریان فلز بود [۱۰].

در سال ۱۹۸۳ پاکورت[۷]، جریان مواد اولیه را در طول فرآیند آهنگری شعاعی مورد بررسی قرار داد [۱۱].

در سال ۱۹۸۶ تیزنگ[۸] و کوبایاشی[۹] اولین محققینی بودند که فرآیند آهنگری با سنبه را شبیه‌سازی کردند. آنها فرآیند فرآیند را به صورت همدما بررسی و از اختلاف بین قطر داخلی قطعه و سنبه صرف‌نظر کردند [۱۲].

در سال ۱۹۸۷ رودیچ[۱۰] و همکارانش ایده‌های اساسی برای مدل کردن فرآیند آهنگری شعاعی را به وسیله اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند [۱۳].

---

[1] Altan
[2] Lahoti
[3] Upper bound method
[4] Axisymmetric
[5] Slab method
[6] Subramanian
[7] Pakurt
[8] Tzaeng
[9] Kobayashi
[10] Rodic

در سال ۱۹۹۲ تامپسون[1] و همکارانش یک تکنیک تقریبا پایدار[2] را برای آنالیز آهنگری شعاعی ارائه کردند [۱۴]. تقریب آنها با روش اجزای محدود برای محاسبه دمای شمش و تغییرشکل فرآیند مورد استفاده قرار گرفت.

در سال ۱۹۹۲ نیز جاکمن[3] فرآیند آهنگری شعاعی را به عنوان یک آنالیز شبه‌استاتیکی[4] مورد تحلیل قرار داد و پراکندگی دما و کرنش را با استفاده از روش اجزای محدود پیش‌بینی کرد [۱۵].

در سال ۱۹۹۴ شیوپوری[5] و دامبلسکی[6] آهنگری شعاعی را برای یک پروفیل شبیه‌سازی کردند و به این نتیجه رسیدند رسیدند که تغییرشکل در طول فرآیند همواره یکنواخت خواهد بود [۱۶]. همچنین آنها آهنگری شعاعی چند مرحله-ای را برای لوله‌های با قطر زیاد بکار گرفتند و این روش را رایج ساختند.

در سال ۱۹۹۵ دامبلسکی و همکارانش در یک تحقیق دیگر یک مدل اجزای محدود برای محاسبه کرنش، نرخ کرنش و پراکندگی دما در آهنگری شعاعی ارائه کردند [۵]. در این تحقیق آنها با استفاده از نرم‌افزار DEFORM از فرمولاسیون صلب – ویسکو پلاستیک برای شبیه‌سازی یک قطعه توخالی استفاده کردند. در این تحقیق از روش حل ضمنی[7] استفاده شده بود که قادر به محاسبه انتقال حرارت بین سیکل‌های بارگذاری نبود، همچنین به علت بوجود آمدن نیروی عدم بالانس، گره‌های قطعه‌کار از سنبه و کارگیر جدا شده و یک حرکت صلب به وجود می‌آمد.

در سال ۱۹۹۸ جانگ[8] و لیو[9] تنش‌های پس‌ماند در محصولات آهنگری شعاعی را بوسیله روش اجزای محدود غیر خطی مورد بررسی قرار دادند [۱۷].

در طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۲ گئو[10] و همکارانش مدل کرنش صفحه‌ای فرآیند آهنگری متقارن محوری را با استفاده از ترکیبی از اجزای محدود و المان‌های مرزی مورد آنالیز قرار دادند [۱۸–۲۰].

در سال ۲۰۰۴ سوهای هسیانگ[11] و هیوی لین هو[12] اثر پارامترهای مختلف را روی فرآیند آهنگری شعاعی به وسیله روش اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند [۲۱].

در سال ۲۰۰۵ قاعی[13] و موحدی در یک تحقیق اثرات هندسی قالب را بر تغییرشکل در فرآیند آهنگری شعاعی مورد بررسی قرار دادند [۲۲]. باز در همین سال پولوزین[14] روش‌های تقریبی و دقیق برای محاسبه پارامترهای حرارتی در فرآیند آهنگری را مورد بررسی قرار داد [۲۳].

---

[1] Thompson
[2] Steady-state
[3] Jackman
[4] Quasi steady-state
[5] Shivpuri
[6] Domblesky
[7] Implicit
[8] Jang
[9] Liou
[10] Guo
[11] Su-Hai Hsiang
[12] Huey-Lin Ho
[13] Ghaei
[14] Alexandre polozine

در سال ۲۰۰۶ قاعی و کریمی‌طاهری در یک تحقیق فرآیند آهنگری شعاعی را به کمک روش کران بالا مورد بررسی قرار دادند [۲۴]. در همین سال در یک تحقیق دیگر عاملی و موحدی یک مطالعه پارامتریک بر روی تنش های پسماند[1] و نیروی آهنگری در فرآیند آهنگری شعاعی سرد انجام دادند [۴]. در همین سال در یک تحقیق متمایز دیگر، طاهری‌زاده تنها با توجه به نتایج آزمایشگاهی خواص قطعات توپر و تو خالی فرآیند آهنگری شعاعی را مورد بررسی قرار داد و با هم مقایسه کرد [۲۵]. وی همچنین نشان داد قطعات توخالی خواص بهتری نسبت به قطعات توپر دارند. در این تحقیق خواص مکانیکی و متالورژیکی[2] قطعات توپر و توخالی با استفاده از شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید.

در سال ۲۰۰۶ سنجری و طاهری با استفاده از روش شبکه عصبی و تاگوچی به بهینه‌سازی فرآیند آهنگری شعاعی پرداختند [۲۶].

در سال۲۰۰۷ سنجری و کریمی طاهری در یک تحقیق موقعیت صفحه خنثی را پیش‌بینی کردند و تاثیرات پارامترهای فرآیند را در آهنگری شعاعی به روش کران بالا مورد بررسی قرار دادند [۲۷]. در یک تحقیق دیگر قاعی و موحدی قالب آهنگری شعاعی را به کمک اجزای محدود سه بعدی طراحی کردند [۲۸]. البته در این تحقیق فقط یک هشتم از قطعه و قالب شبیه‌سازی گردید. باز در همین سال عابدیان و پورسینا با استفاده از روش اجزای محدود دو بعدی توانستند که فرآیند آهنگری شعاعی داغ را به صورت متقارن محوری شبیه‌سازی کرده و به مقایسه خواص مکانیکی قطعات توپر و توخالی بپردازند [۲۹].

در سال ۲۰۰۸ خیاط زاده و پورسینا با استفاده از روش اجزای محدود سه‌بعدی خواص مکانیکی قطعات آهنگری توپر وتوخالی را با یکدیگر مقایسه کردند [۳۰].

از آنجایی‌که دانستن میزان نیروی وارد بر قالب، قبل از انجام فرآیند می‌تواند از وارد شدن بیش از حد نیرو به قالب و ایجاد ضایعات جلوگیری به عمل آورد، در این تحقیق به پیش‌بینی نیروی وارد بر قالب پرداخته شده است. در ابتدا تاثیر هندسه قالب (زاویه ورودی قالب و طول قسمت تخت قالب) و پارامترهای دستگاه آهنگری شعاعی از جمله میزان پیشروی طولی وشعاعی و پارامتر مهم دمای اولیه قطعه‌کار بر روی نیروی وارد بر دستگاه مورد بررسی قرار گرفته و سپس با استفاده از روش شبکه عصبی و روش رویه پاسخ به پیش‌بینی نیرو پرداخته شده و در انتها نتایج این دو روش با هم مقایسه شده‌اند.

۱-۸ مروری بر فصل‌های پایان‌نامه

در فصل اول، پایان نامه همانطور که ملاحظه شد در ابتدا سعی گردید خلاصه‌ای از نحوه کارکرد دستگاه آهنگری شعاعی، ویژگی‌ها وکاربردهای روش آهنگری شعاعی بیان گردد و در انتها تاریخچه‌ای از کارهای صورت گرفته در زمینه آهنگری شعاعی ارائه گردیده است.

در فصل دوم پایان نامه نحوه مدل‌سازی، رفتار ماده، نوع آنالیز به کار گرفته شده، نوع اصطکاک، شرایط بارگذاری، نوع مش‌بندی و المان به‌کارگرفته شده، بیان شده است.

---

[1] Residual Stress
[2] Metallurgical

در فصل سوم به منظور بررسی صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی، نتایج اجزای محدود با روش تختال مقایسه گردیده و به بررسی تاثیر پارامترهای مختلف نظیر درجه حرارت اولیه قطعه‌کار، طول قسمت تخت قالب، زاویه ورودی قالب، میزان پیشروی طولی قالب و میزان پیشروی شعاعی قالب بر روی نیروی وارد بر قالب پرداخته شده است.
از آنجاییکه در این تحقیق به منظور پیش‌بینی نیروی وارد بر قالب از روش رویه پاسخ که یکی از روش‌های طراحی آزمایش می باشد و شبکه عصبی مصنوعی که الهام گرفته از شبکه عصبی انسان است، استفاده گردیده است، لذا در فصل‌های چهارم و پنجم درباره این دو روش توضیحاتی ارائه گردیده است. در فصل ششم نتایج کلی و پیشنهادات بیان شده است.

فصل دوم : مدل‌سازی اجزای محدود

۲-۱ مقدمه

یکی از روش‌هایی که امروزه بیشترین کاربرد را در حل مسائل مهندسی دارد، شبیه‌سازی به کمک روش اجزای محدود است که توسط محققین زیادی برای شبیه‌سازی آهنگری شعاعی مورد استفاده قرار گرفته است. این روش با استفاده از فرمولاسیون و الگوریتم‌های پیچیده می‌تواند تعداد پارامترهای زیادی را وارد مدل کرده و مدل را به واقعیت نزدیکتر کند. وجود این فرمولاسیون‌های پیچیده که در طی سال‌ها تحقیق و پژوهش، توسعه یافته‌اند منجر به توسعه نرم‌افزارهای تجاری زیادی شده است. به تبع گوناگونی این فرمولاسیون‌های پیچیده، این نرم‌افزارها نیز هر یک دارای نقاط ضعف و قوتی هستند. بنابراین هر کاربر اجزای محدود باید شناخت کافی از مسئله مورد نظر، نرم‌افزار و روش‌های مختلف مدل‌سازی موجود در نرم‌افزار داشته باشد، تا بتواند به یک مدل مناسب برای مسئله خود برسد. بر اساس این روش، نرم‌افزارهای متعدد تخصصی و همه منظوره زیادی به وجود آمده است. از مشهورترین این نرم افزارهای همه منظوره می‌توان به ABAQUS و ANSYS اشاره کرد. فرآیندهای شکل‌دهی فلزات به دلیل ماهیت غیر خطی و پیچیده‌ای که دارند (وجود شرایط تماسی و اصطکاکی پیچیده، تغییر شکل پلاستیک زیاد، تغییر شرایط مرزی و هندسه در طول فرآیند) از جمله پیچیده‌ترین مسائل مهندسی برای مدل‌سازی هستند. به این دلیل امروزه نرم افزارهای تخصصی متعددی برای مدل‌سازی شکل‌دهی فلزات توسعه یافته‌اند. از این دسته نرم‌افزارها می‌توان به SUPER FORGE, DEFORM اشاره کرد.

با توجه به اینکه هدف از این تحقیق پیش‌بینی نیروی وارد بر قالب در فرآیند آهنگری شعاعی داغ می‌باشد، نیاز به یک مدل‌سازی کامل است که با واقعیات فرآیند آهنگری شعاعی سازگار باشد. شبیه‌سازی این فرآیند با استفاده از روش اجزای محدود و به کمک نرم‌افزار ABAQUS انجام گرفته است [۳۱]. در این تحقیق سعی شده است که یک

مدل سه بعدی از فرآیند آهنگری شعاعی داغ ایجاد گرددکه بتوان از این شبیه‌سازی برای حالات، اندازه‌ها و شرایط مختلف آهنگری شعاعی داغ استفاده نمود. در این فصل نحوه مدلسازی در نرم افزار CATIA و چگونگی شبیه‌سازی فرآیند آهنگری شعاعی داغ از لحاظ رفتار ماده، رفتار مکانیکی، نوع اصطکاک، نوع مش‌بندی، نوع تحلیل و ... ارائه شده است.

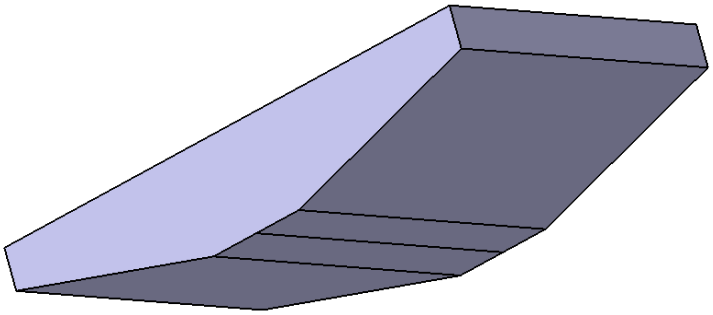
۲-۳ مدل‌سازی

مدل‌سازی این فرآیند توسط نرم‌افزار CATIA صورت گرفته است. مدل شامل دو بخش زیر است که عبارتند از:

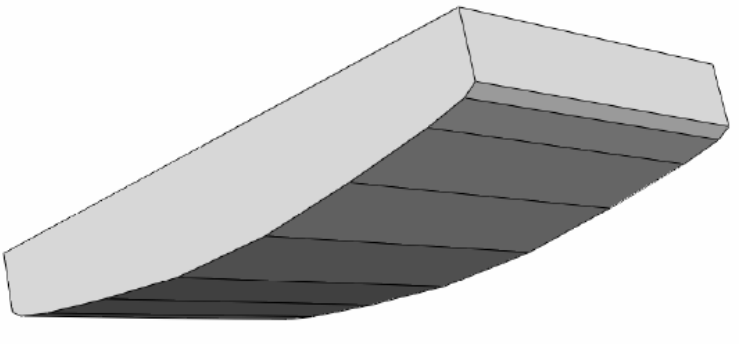
(۱) قالب‌ها شامل چهار چکش هم شکل و هم اندازه است که با فاصله یکسان و به صورت محیطی در اطراف قطعه کار قرار گرفته‌اند.

(۲) قطعه‌کار یک استوانه تغییرشکل‌پذیر توپر می‌باشد.

با توجه به اینکه در آنالیز آهنگری شعاعی داغ، تغییر شکل قالب‌ها در مقایسه با قطعه‌کار قابل صرفه نظر می‌باشد، به همین دلیل چکش‌ها صلب فرض می‌شوند. صلب فرض کردن چکش‌ها به شدت، زمان محاسبات را پایین می‌آورد. در این تحقیق دو نوع قالب زاویه مرکب[1] و قالب تک زاویه[2] مورد بررسی قرار گرفته است. از این به بعد در این تحقیق این دو قالب به نام قالب مرکب و قالب ساده نامیده می‌شود. شکل ۲-۱ نمایی سه بعدی از این قالب‌ها را نشان می‌دهد.



الف

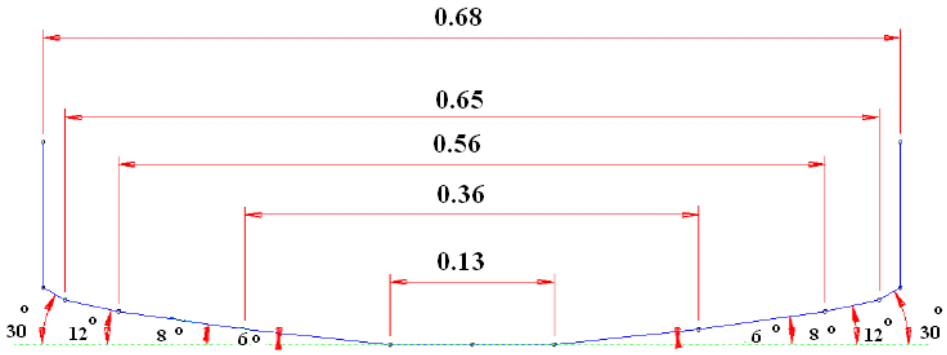


ب

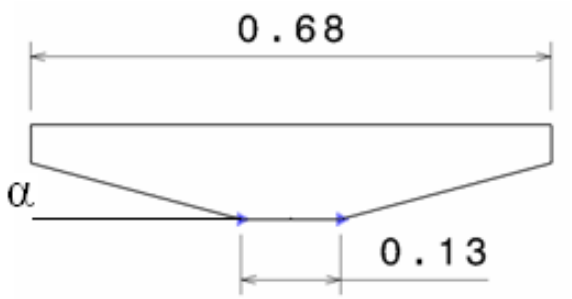
شکل ۲-۱ : نمای سه بعدی قالب ، (الف)قالب تک زاویه (قالب ساده)، (ب) قالب زاویه مرکب (قالب مرکب).

[1] Multiple Angle
[2] Single Angle

شکل ۲-۲ سطح مقطع قالب مرکب و ساده را نشان می‌دهد(ابعاد بر حسب متر می‌باشد).



الف



ب

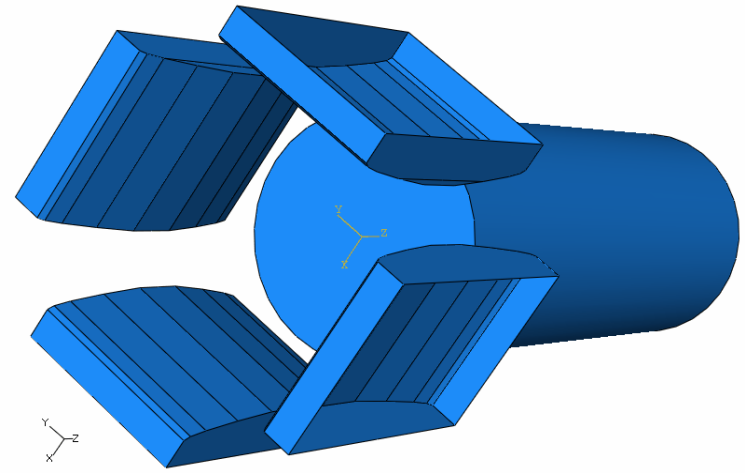
شکل ۲-۲: سطح مقطع قالب (الف) قالب مرکب، (ب) قالب ساده.

در این تحقیق ماشین SX55 شبیه سازی گردیده است که مدت زمان هر ضربه این دستگاه ۰/۳ثانیه می‌باشد. طول و قطر خارجی شمش اولیه در این تحقیق به ترتیب برابر ۱/۶ و ۰/۵۴ متر می‌باشد. سرعت چرخشی قطعه‌کار نیز برابر ۱۲ درجه بر کورس در نظر گرفته شده است. نکته قابل توجه این است که در شبیه‌سازی‌های دو بعدی متقارن محوری که تاکنون انجام گرفته است، قطعه‌کار ثابت در نظر گرفته شده و از دوران قطعه صرف‌نظر گردیده است[۲۹]، در حالی‌که در این تحقیق چرخش قطعه نیز در نظر گرفته شده است. پارامترهای ثابت شبیه‌سازی در جدول ۲-۱ نشان داده شده است.

جدول ۲-۱: پارامترهای ثابت شبیه سازی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
طول قطعه‌کار	۱/٦ متر	قطر اولیه قطعه‌کار	۰/٥٤ متر
مقدار چرخش قطعه‌کار به ازای هر ضربه	۱۲ درجه	دمای اولیه قالب	۲۰۰ درجه
طول کل قالب	۰/٦٨ متر	ماکزیمم سرعت قالب	۰/٤ متر بر ثانیه

شکل ۲-۳ مدل ایجاد شده برای فرآیند آهنگری شعاعی سیلندر توپر را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳ : مدل سازی فرآیند آهنگری شعاعی سیلندر توپر.

۲-۳ رفتار ماده

تحلیل فرآیند شکل‌دهی فلزات به پارامترهای مختلفی نظیر معادلات متشکله، شکل قطعه خام، شکل محصول نهایی، شکل ابزار، دمای قطعه و ابزار، سرعت شکل‌دهی و اصطکاک بستگی دارد.

اساسا سه روش عمده برای شبیه‌سازی رفتار تغییر شکل ماده در شکل‌دهی فلزات وجود دارد:

(۱) مدل صلب – پلاستیک

(۲) مدل الاستیک – پلاستیک

(۳) مدل ویسکو – پلاستیک

در روش اول، مدل تا قبل از رسیدن به تنش تسلیم به صورت صلب فرض می‌شود و از نقطه تسلیم به بعد مطابق یکی از مدل‌های پلاستیسیته عمل می‌کند. در این نوع فرمول‌بندی اثراتی از قبیل تنش‌های پسماند و برگشت فنری که در ارتباط با شکل‌دهی فلزات مهم می‌باشند، قابل پیش‌بینی نیستند. این روش به علت فرمول‌بندی ساده و کارایی عددی بهتر، بیشترین کاربرد را در شبیه‌سازی مسائل شکل‌دهی دارد.

مدل الاستیک –پلاستیک به رفتار واقعی ماده نزدیک‌تر بوده و رفتار ماده قبل از رسیدن به تسلیم به صورت الاستیک در نظر گرفته می‌شود و همینطور برای مواد غیرحساس به نرخ کرنش که عمده فرآیندهای شکل‌دهی سرد را در بر می‌گیرند، کاربرد دارد.

مدل ویسکو- پلاستیک نیز برای موادی استفاده می‌گردد که رفتار ماده علاوه بر کرنش و تنش به نرخ کرنش و دما نیز بستگی داشته باشد.