سیزدهیمن کنفرانس سالانه و نهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک
اردیبهشت ۱۳۸۴- اصفهان- دانشگاه صنعتی اصفهان

شبیه سازی فرآیند اکستروژن پیشرو در حالت نیمه جامد با استفاده از روش حجم محدود

محمدرضا جعفری[۱]، سید مجتبی زبرجد[۲]، فرهاد کلاهان[۳]
مشهد-دانشگاه فردوسی-دانشکده مهندسی-ص-پ ۱۱۱۱-۹۱۷۷۵
Zebarjad@ferdowsi.um.ac.ir و Kolahan@ ferdowsi.um.ac.ir

چکیده

فرآیند شکل‌دهی در حالت نیمه‌جامد (Semi-solid Forming)از روشهای نوین تولید می‌باشد که در دو دهه اخیر مورد توجه محققان و صنعت گران قرار گرفته است. با این وجود در بین محققین این زمینه، یک اتفاق نظر کلی درباره روش مورد استفاده برای شبیه‌سازی رفتار ماده در حالت نیمه‌جامد (Semi-solid)وجود ندارد. تا کنون روشهای ریاضی متعددی در قالب نرم‌افزارهای مختلف به منظور شبیه‌سازی رفتار ماده در حالت نیمه‌جامد استفاده شده است. در این تحقیق از روش عددی حجم محدود و نرم‌افزار SuperForgeبه منظور پیش‌بینی رفتار ماده و بررسی پارامترهای مهم در فرآیند اکستروژن پیشرو در حالت نیمه‌جامد (Semi-solid Forward Extrusion)استفاده گردیده است. در این راستا شبیه‌سازی رفتار ماده، به صورت سه بعدی و با در نظر گرفتن عوامل موثر در اکستروژن از قبیل زاویه قالب، سرعت اکستروژن و نسبت اکستروژن انجام گرفته و نتایج محاسباتی با داده‌های تجربی مقایسه شده‌اند. نتایج محاسباتی بیانگر انطباق خوب شبیه‌سازی با داده‌های تجربی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: شکل دهی فلزات در حالت نیمه جامد، فرآیند اکستروژن پیشرو در حالت نیمه جامد، شبیه سازی حجم محدود

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد
۲- استادیار گروه متالوژی
۳- استادیار گروه مکانیک

شبیه‌سازی فرآیند اکستروژن پیشرو در حالت نیمه‌جامد با استفاده از روش حجم محدود

محمدرضا جعفری[۱]، سید مجتبی زبرجد[۲]، فرهاد کلاهان[۳]
گروه مهندسی مکانیک و گروه مهندسی متالورژی-دانشکده فنی مهندسی-
دانشگاه فردوسی مشهد، ص-پ ۱۱۱۱-۹۱۷۷۵
Zebarjad@ferdowsi.um.ac.ir
Kolahan@ ferdowsi.um.ac.ir

چکیده

فرآیند شکل‌دهی در حالت نیمه‌جامد(Semi-solid Forming) از روشهای نوین تولید می‌باشد که در دو دهه اخیر مورد توجه محققان و صنعت گران قرار گرفته است. با این وجود در بین محققین این زمینه، یک اتفاق نظر کلی درباره روش مورد استفاده برای شبیه‌سازی رفتار ماده در حالت نیمه‌جامد(Semi-solid) وجود ندارد. تا کنون روشهای ریاضی متعددی در قالب نرم‌افزارهای مختلف به منظور شبیه‌سازی رفتار ماده در حالت نیمه‌جامد استفاده شده است. در این تحقیق از روش عددی حجم محدود و نرم‌افزارSuperForge به منظور پیش‌بینی رفتار ماده و بررسی پارامترهای مهم در فرآیند اکستروژن پیشرو در حالت نیمه‌جامد(Semi-solid Forward Extrusion) استفاده گردیده است. در این راستا شبیه‌سازی رفتار ماده، به صورت سه بعدی و با در نظر گرفتن عوامل موثر در اکستروژن از قبیل زاویه قالب، سرعت اکستروژن و نسبت اکستروژن انجام گرفته و نتایج محاسباتی با داده‌های تجربی مقایسه شده‌اند. نتایج محاسباتی بیانگر انطباق خوب شبیه‌سازی با داده‌های تجربی می‌باشد.

واژه‌هاي كليدي: شکل‌دهی فلزات در حالت نیمه‌جامد- فرآیند اکستروژن پیشرو در حالت نیمه‌جامد- شبیه‌سازی حجم محدود

مقدمه

از آنجا كه امروزه گسترش و توسعه شيوه‌هاي جديد و نو در زمينه توليد، به يك پارامتر اصلي در دنياي رقابت تبديل شده است، لذا بکارگیری روشهای نوینی در زمینه شکل‌دهی فلزات، از طریق بهره‌گیری از یک حالت خاص از فلزات (حالت نیمه‌جامد) مورد توجه فراوانی قرارگرفته است. بخصوص در زمينه توليد محصول با فلزاتي كه بكارگيري روشهاي متداول در مورد آنها مشكل و سخت مي‌باشد، استفاده از فرآيند شكل‌دهي فلزات در حالت نيمه‌جامد پيشنهاد مي‌گردد. آنچه كه در زمينه شكل‌دهي فلزات در حالت نيمه‌جامد مي‌بايستي به آن توجه نمود اين است كه اصول حاكم براين فرآيندها در واقع همان اصول حاكم بر فرآيندهاي متداول شكل‌دهي فلزات مي‌باشد با اين تفاوت كه ماده در حالت نيمه‌جامد از خواصي برخوردار مي‌باشد كه در فرآيند شكل‌دهي با تكيه براين خواص مي‌توان به نتايج سودمندي دست يافت[۱].

به طور کلی فرآیندهای شکل‌دهی در حالت نیمه‌جامد نیز نظیر فرآیندهای شکل‌دهی متداول دارای انواع مختلفی می‌باشند. یکی از مهمترین و پرکاربردترین آنها روش اکستروژن پیشرو در حالت نیمه‌جامد(Thixo Forward Extrusion) و یا TFE است که در این تحقیق با استفاده از روش حجم محدود در قالب نرم‌افزار SuperForge شبیه‌سازی شده و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. روش حجم محدود یکی از روشهای حل تقریبی عددی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد
۲- استادیار گروه متالورژی
۳- استادیار گروه مکانیک

است که نظیر روش اجزای محدود برای حل عددی معادلات حاکم بر فرآیندهای شکل‌دهی بکار برده می‌شود. اگرچه روش اجزای محدود کاربرد زیادی در تحلیل و شبیه‌سازی انواع فرآیندهای شکل‌دهی فلزات دارد ولی با این وجود در شبیه‌سازی فرآیندهای شکل‌دهی همواره با مسئله اعوجاج المانها و واگرایی تحلیل همراه است. از این رو برای همگرا شدن جوابها از روش شبکه‌بندی مجدد(Remeshing) استفاده می‌شود که این نیز مدت زمان انجام تحلیل، بویژه در شبیه‌سازی سه بعدی فرآیندهای شکل‌دهی را به میزان بسیار زیادی افزایش می‌دهد. در صورتیکه در روش حجم محدود نیازی به استفاده از روش شبکه‌بندی مجدد نیست و در واقع در این روش، المانهای حجمی، تقسیمات ساده‌ای از فضا می‌باشند و بوسیله نقاط اتصالی(Grid Point) تعریف می‌شوند که این نقاط در فضا ثابت هستند. در نتیجه شبکه حجم محدود نیز به صورت یک محدوده ثابت مرجع عمل می‌نماید. مواد از بین این المانهای با حجم ثابت حرکت نموده و جرم، اندازه حرکت و انرژی از هر المان به المان دیگر منتقل میگردد[۲].

تعریف ماده نیمه‌جامد(Semi-Solid)

در مورد ماده نیمه جامد تعاریف متعددی ارائه شده است که هر کدام از این تعاریف بر پایه یک سری فرضیات خاص و یا یک برداشت خاص از ماده نیمه‌جامد شکل گرفته است. بر اساس کلی‌ترین تعریف، ماده نیمه جامد به تعبیر دقیقتر و صحیحتر عبارتست از ماده در حالت نیمه جامد، و حالت نیمه‌جامد در ماده عبارتست از حالتی از ماده که در آن مخلوطی از دو فاز جامد و مایع با درصدهای حجمی معین در کنار یکدیگر قرار گرفته اند[۳]. نمایی شماتیک از حالت نیمه‌جامد در یک ماده در شکل(۱) نشان داده شده است. در مورد این تعریف کلی به دو نکته می بایستی دقت نمود:

۱- مفهوم درصدهای حجمی در بحث حالت نیمه‌جامد یک ماده بسیار حائز اهمیت می‌باشد چراکه این عامل در بین سایر عوامل ریزساختاری دارای بیشترین تاثیر در سرنوشت یک ماده نیمه‌جامد می‌باشد. f_S یا درصد حجمی بخش جامد (Solid Fraction) به مفهوم میزان شرکت پذیری فاز جامد در ساختار ماده نیمه‌جامد و f_l یا درصد حجمی بخش مایع (Liquid Fraction) به مفهوم میزان شرکت پذیری فاز مایع در ساختار ماده نیمه‌جامد می‌باشد. تعاریف ریاضی f_S و f_l با بکارگیری قانون بقای جرم به گونه زیر بیان می‌شوند:

$$f_S = \frac{V_{solid}}{V_{solid} + V_{liquid}} \quad (۱)$$

$$f_l = \frac{V_{liquid}}{V_{solid} + V_{liquid}} \quad (۲)$$

$$f_S + f_l = 1 \quad (۳)$$

۲- مفهوم مخلوطی از دو فاز جامد و مایع در تعریف ماده نیمه‌جامد به این معنی است که در واقع برای هر ماده‌ای، با کنترل درجه حرارت می‌توان حالتی را بدست آورد که درآن حالت ماده تنها به صورت یک فاز وجود ندارد بلکه از ترکیبی از دو فاز جامد و مایع با درصدهای حجمی معین تشکیل شده است. در مورد یک ماده خالص، هنگامی که ماده به دمای ذوب رسانده شود، ماده در دمای ثابت شروع به ذوب شدن می‌نماید و از آن پس با گذشت زمان می‌توان به درصدهای حجمی مختلفی از فاز مایع و فاز جامد دست یافت. یعنی زمانی که درجه حرارت یک ماده خالص به درجه حرارت نقطه ذوب می‌رسد، هرچه زمان بیشتری از فرآیند حرارت دادن بگذرد، بدون تغییر کردن درجه‌حرارت ماده، مقدار بیشتری از فاز جامد به فاز مایع تبدیل گشته و در واقع درصد حجمی بخش جامد کاهش پیدا می‌کند. اما چنانچه ماده یک ماده خالص نبوده بلکه یک آلیاژ باشد که از چند ماده خالص با نقاط ذوب مختلف تشکیل شده است، برای دست‌یابی به حالت نیمه‌جامد در ماده می‌بایستی دما، به بالاتر از دمای ذوب یکی از عناصر اصلی آلیاژ که نقطه ذوب آن از نقطه ذوب سایر عناصر کمتر می باشد، رسانده شود. در واقع در یک آلیاژ نقطه ذوب جای خود را به یک بازه‌ای از درجه‌حرارت می‌دهد که نقطه شروع این بازه، نقطه ذوب عنصری است که کمترین نقطه ذوب را دارا بوده و نقطه انتهای این بازه، نقطه ذوب عنصری می‌باشد که از بیشترین نقطه ذوب برخوردار می‌باشد.

تقسیم بندی ماده نیمه‌جامد

آنچه که تمامی نظریه پردازان در زمینه ماده نیمه جامد بر آن اتفاق نظر دارند این است که اگر چه بر پایه دو فازی بودن ماهیت ماده، دو فاز جامد و مایع در کنار هم قرار گرفته‌اند ولی خواص یک ماده نیمه‌جامد به شدت از درصد شرکت هر یک از دو فاز در ساختار ماده نیمه‌جامد تاثیر پذیر است. لذا بر اساس اینکه فاز غالب ماده، فاز جامد یا فاز مایع باشد، ماده از خود رفتار متفاوتی نشان می‌دهد و بر همین اساس ماده نیمه‌جامد به دو دسته کلی ذیل تقسیم‌بندی می‌گردد[۴] :

۱- ماده نیمه‌جامد در حالت خمیری (Mushy State)

در این حالت فاز غالب ماده نیمه‌جامد فاز جامد بوده و لذا رفتار ماده نیمه‌جامد تا حد زیادی شبیه به رفتار یک ماده جامد تک فازی با دمای نزدیک به دمای ذوب می‌باشد. در واقع در این حالت ماده در عین اینکه از انسجام فیزیکی یک ماده جامد برخوردار می‌باشد، به میزان بسیار زیادی نیز شکل‌پذیر می‌باشد به طوری که نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی آن از طریق تمامی فرآیندهای شکل‌دهی، نسبت به ماده جامد تک فازی بسیار کمتر می باشد[۴]. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌گردد برای حالتهایی از ماده نیمه جامد که در آنها درصد حجمی بخش جامد بالا می‌باشد ($f_S \rangle$ ۰/۶۵) یعنی در ماده نیمه‌جامد حالت خمیری حاکم می‌باشد، رفتار تغییر شکلی ماده نیمه‌جامد بسیار به رفتار تغییر شکلی ماده جامد تک فازی شبیه است و تنها تفاوتی که وجود دارد مربوط به اعداد مشخص کننده نیرو در نقاط ماکزیمم است که از لحاظ مقداری، از نقاط معادل خود در نمودار ماده جامد تک فازی کمتر بوده و به تدریج با کاهش f_S ، بیشتر کاهش می‌یابند.

۲- ماده نیمه جامد در حالت دوغابی (Slurry State)

در این حالت فاز غالب ماده نیمه‌جامد فاز مایع می‌باشد و بنا بر نتایج آزمایشگاهی در این حالت ماده رفتاری شبیه به یک سیال تراکم ناپذیر از خود نشان می‌دهد. در واقع در این حالت، ماده از انسجام فیزیکی یک ماده جامد برخوردار نبوده و به دلیل برخورداری از سیالیت بسیار بالا، مانند یک مایع، قابلیت جاری شدن را دارا است[۴]. همانطور که در شکل(۲) نشان داده شده است برای حالتهایی از ماده نیمه‌جامد که در آنها درصد حجمی بخش جامد پایین می‌باشد ($f_S \leq$ ۰/۶۵) رفتار تغییر شکلی ماده نیمه‌جامد نسبت به رفتار ماده جامد تک فازی بسیار متفاوت می‌باشد. البته باید در نظر داشت که در این حالت میزان نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی در طول تمامی فرآیند، نسبت به ماده نیمه‌جامد در حالت خمیری بسیار پایینتر می‌باشد.

بدون شک جهت تفکیک حالتهای خمیری و دوغابی ماده نیمه‌جامد نیاز به استفاده از معیاری مناسب می‌باشد. این معیار در واقع اندازه خاصی از درصد حجمی بخش جامد می‌باشد که از آن به درصد بحرانی بخش جامد تعبیر می‌گردد و با علامت f_{cr} نمایش داده می‌شود. به عبارت دیگر f_{cr} میزانی از درصد بخش جامد می‌باشد که به ازای مقادیر بیشتر از آن، ماده نیمه‌جامد حالت خمیری پیدا نموده و به ازای مقادیر کمتر از آن، ماده نیمه جامد به حالت دوغابی در می‌آید.

آنچه که می‌بایستی به آن دقت نمود این است که در راستای شبیه‌سازی، از حالت خمیری ماده نیمه‌جامد یعنی حالتی که f_S = ۰/۸۵ می‌باشد، استفاده شده است.

مدل رفتاری ماده در حالت نیمه‌جامد

زمانی که یک ماده تا دماهای بسیار بالایی واقع در بازه دمایی نیمه‌جامد ماده حرارت داده شود، بنا بر تجربیات آزمایشگاهی از خود رفتار خمیرگونه یا پلاستیک نشان می‌دهد. از همین رو با استفاده از دیدگاه تئوری پلاستیسیته می‌توان رفتار ماده را در این حالت تفسیر و تشریح نمود. در مورد رفتار یک ماده در حالت نیمه‌جامد مدلهای پلاستیک مختلفی ارائه شده است که از میان آنها مدل رفتاری سنگ (Tseng) و همکارانش از تئوریهای معروف موجود در این زمینه می‌باشد[۵]. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، این تئوری برخلاف ظاهر ساده‌اش، رفتار پلاستیک بسیاری از آلیاژهاي سرب، آلومینیوم و مس را در حالت نیمه‌جامد بر اساس مدل ریاضی زیر شبیه‌سازی می‌نماید :

$$\sigma_f = A \dot{e}^{Bf_S} \qquad (۴)$$

که در آن σ_f تنش سیلان ماده در حالت نیمه‌جامد، $\dot{e}$ نرخ زمانی کرنش ماده در حالت نیمه‌جامد، A ثابت تسلیم، B ضریب تصحیح و f_S درصد بخش جامد می‌باشد. این مدل رفتاری همان مدلی می‌باشد که به عنوان مدل توجیه‌کننده رفتار

پلاستیک ماده در بسیاری از فرآیندهای شکل‌دهی مورد استفاده قرار می‌گیرد و به صورت زیر معرفی می‌گردد :

$$\bar{\sigma} = C\,\bar{\varepsilon}^{\,\cdot M} \qquad (۵)$$

با این تفاوت که ثابت A و نمای Bf_S در فرمول(۴) به ترتیب با ثابت C و نمایM در رابطه (۵) جایگزین شده‌اند.

پس از توضیح در مورد مفاهیم حاکم بر ماهیت اصلی یک ماده نیمه‌جامد، در ادامه به تشریح اصول حاکم بر شبیه سازی فرآیند اکستروژن پیشرو در حالت نیمه‌جامد (TFE) با نرم‌افزار SuperForge اقدام می‌شود.

پارامترهای موثر در فرآیند شبیه‌سازی شده

بنا به دلایل فني - اقتصادی، فرآیندهای شکل‌دهی در حالت نیمه‌جامد بیشتر برای فلزاتي با دمای ذوب پایینتر کاربرد دارد. بنابر این، جنس قطعه‌کار غالباً از آلیاژهای آلومینیوم انتخاب می‌گردد. از میان آلیاژهای آلومینیوم، استفاده از آلیاژ آلومینیوم A۳۵۶ (AlSi7Mg و یا DIN3.2315) بیشتر متداول است.

در شبیه‌سازی، علاوه بر خواص مکانیکی قطعه‌کار، خواص حرارتی قطعه‌کار نیز مورد نیاز می‌باشد. این خواص برای آلیاژ آلومینیوم A۳۵۶ در درجه حرارت ۵۸۰°C(نقطه شروع ذوب این آلیاژ ۵۵۰°C است) یعنی زمانیکه $f_S = ۰/۸۵$ می‌باشد، عبارتند از:

مدول الاستیسیته($۴/۲ (N/mm^2)$ ، ضریب پواسون۰/۴ و چگالی ($۲۶۴۰ (Kg/mm^3)$، ضریب انتقال حرارت هدایتی($۱۵۹ (Watt/mK)$، ظرفیت گرمایی ($۹۶۳ (Joule/KgK)$، ضریب انتقال حرارت جابجایی با محیط($۷ (Watt/m^2K)$ و ضریب انتقال حرارت خطی $۲/۳۶\times۱۰^{-۵}/^{\circ}C$[۶ و۳].

در مورد اجزا قالب شامل کفه بالایی (سنبه) و کفه پایینی (محفظه و قالب)، ذکر این نکته ضروری است که جنس آنها میبایست به گونه‌ای انتخاب گردد که نقطه ذوب آنها از نقطه ذوب کامل جنس قطعه‌کار بسیار بالاتر باشد. در شبیه‌سازی، جنس این قطعات، فولاد ابزار (Tool Steel و یا DIN 1.2312) انتخاب شده است. در راستای شبیه‌سازی با نرم‌افزار مورد نظر، تنها خواص حرارتی مربوط به جنس ابزار تغییر شکل (فولاد ابزار) مورد نیاز خواهد بود که این خواص عبارتند از دمای اولیه ابزار تغییرشکل ۵۰۰°C، ضریب مقاومت سطح با قطعه‌کار ($۳۵۰۰۰ (Watt/m^2K)$ و ضریب انتقال حرارت جابجایی با محیط($۱۲ (Watt/m^2K)$.

با توجه به اینکه در فرآیند اکستروژن پیشرو در حالت نیمه‌جامد نرخ زمانی کرنش از کرنش با اهمیت‌تر است، لذا در طراحی مدل شبیه‌سازی از الگوی رفتار پلاستیک ماده مطابق با معادله (۵) استفاده می‌گردد. برای آلیاژ آلومینیوم A۳۵۶ در حالت نیمه‌جامد یعنی دمای ۵۸۰°C، مقادیر M و C به ترتیب ۰/۲۰۸ و۱/۴۱MPa در نظر گرفته شده اند[۳].

برای شبیه‌سازی شرایط تماسی، مدل قالبها صلب فرض شده و از مدل اصطکاکی کولمب استفاده شده است. این مدل اصطکاکی در معادله (۶) نشان داده شده است :

$$\tau = \mu\sigma_n \qquad (۶)$$

در معادله فوق، τ تنش برشی ایجاد شده بین سطح قطعه‌کار و سطح ابزار تغییرشکل، μ ضریب اصطکاک استاتیکی و σ_n فشار موجود بین این سطوح است که ناشی از نیروی عمودی موجود بین این سطوح می‌باشد. در این شبیه‌سازی ضریب اصطکاک بر اساس مرجع [۸] برابر ۳/. انتخاب شده است.

در طول فرآیند شبیه‌سازی، قطعه‌کار بشکل استوانه‌ای توپر با قطر۳۰mm و طول ۳۰mm در نظر گرفته شده است. قالب به عنوان اصلی‌ترین بخش از ابزار تغییر شکل دارای قطر اولیه برابر ۳۱mm می‌باشد که این مقدار برابر با قطر داخلی محفظه (Container) است. از آنجا که قالب مخروطی در نظر گرفته شده است، لذا زاویه قالب (α) پارامتر دیگری است که در اینجا مقدار آن۲۰° انتخاب شده است. همچنین قالب دارای قطر نهایی است که متناسب با نسبت اکستروژن مورد نظر دارای مقادیر متفاوتی میباشد.

به طور کلی نسبت اکستروژن (ER) در یک فرآیند اکستروژن عبارت است از:

$$ER=\frac{A_o}{A_f} \qquad (۷)$$

که در آن A_o سطح مقطع اولیه قالب و A_f سطح مقطع نهایی قالب خواهد بود.

با توجه به ساختار هندسی قطعات در فرآیند شکل‌دهی، استنباط می‌شود که این نوع قطعات دارای تقارن محوری هستند. این بدین معنی است که قطعه نسبت به محوری که از مرکز سطح مقاطع عرضی آن می‌گذرد دارای تقارن است. بنابراین نیازی به تحلیل مدل هندسی کامل قطعات نیست بلکه بر اساس خاصیت تقارن محوری می‌توان تنها بخش، و یا به تعبیر دقیقتر، قطاعی از قطعات را تحلیل نمود. این مسئله باعث کاهش تعداد المانهای بکار گرفته شده برای مدلسازی و در نتیجه کاهش زمان اجرای برنامه می‌شود. در شبیه‌سازی انجام یافته، قطاعهای°۳۰ از قطعات بکار گرفته شده‌اند که این مسئله در شکل (۳) نمایش داده شده است.

در این شبیه‌سازی نتایج تحلیلی از تغییر دادن دو پارامتر در فرآیند شکل‌دهی حاصل شده‌اند که عبارتند از نسبت اکستروژن و سرعت سنبه. برای زاویه قالب مقدار °۲۰و برای نسبت اکستروژن مقادیر ۴، ۱۶ و ۶۴ در نظر گرفته شده اند. همچنین برای سرعت سنبه از مقادیر $۱۰\ mm/s$، $۲۰\ mm/s$، $۴۰\ mm/s$، $۶۰\ mm/s$، $۸۰\ mm/s$ و $۱۰۰\ mm/s$ استفاده شده است.

تحلیل نتایج محاسباتی

همانند هر مسئله حجم محدود، اولین و مهمترین گام در شبیه سازی فرآیند اکستروژن، تعداد دقیق مشهای (المانها) مورد نیاز برای مشبندی ساختار هندسی قطعه‌کار است. کوچکي زیاد مشها باعث افزایش غیر معقول زمان محاسباتي و بزرگي بیش از حد آنها موجب کاهش دقت نتایج خواهد شد. بنابراین اندازه بهینه مشها طبق نمودار حساسیت به مش مربوط به قطعه‌کار که در شکل (۴) نمایش داده شده است تعیین میگردد.

همچنین، همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌گردد، با افزایش درصد جابجایی سنبه، ماکزیمم درجه حرارت در قطعه کار کاهش می‌یابد. به طور کلی عوامل موثر بر درجه حرارت قطعه‌کار را می‌توان در قالب دو پارامتر تقسیم‌بندی نمود:

۱- گرمای ایجاد شده ناشی از کار پلاستیک تولید شده؛

۲- انتقال حرارت صورت گرفته بین قطعه‌کار با ابزار تغییر شکل و محیط؛

این کاهش دمای قطعه‌کار به این دلیل است که میزان گرمای منتقل شده به ابزار تغییر شکل و محیط در طول فرآیند بیشتر از میزان گرمای تولید شده ناشی از کار پلاستیک می‌باشد. لذا در طول فرآیند درجه حرارت قطعه‌کار کاهش پیدا می‌نماید.

همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، نتایج مربوط به فرآیند اکستروژن رو به جلو در دو حالت از ماده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. حالت اول مربوط به یک شمش آلومینیومی با دمای°C۵۸۰ می‌باشد که این دما مربوط به منطقه دو فازی دیاگرام فازی این آلیاژ است. حالت دوم، رفتار همان شمش را در دمای °C۴۵۰ (منطقه تک فازی) نشان می‌دهد. دلیل کاهش دما با افزایش درصد جابجایی سنبه در حالت نیمه‌جامد ماده، در شکل (۵) توضیح داده شد. ولی علت ایجاد افزایش دما در حالت جامد تک فازی را می‌توان به ساختار ماده در این حالت مرتبط دانست. در واقع ماده جامد از نیروهای جاذبه بین ملکولی بزرگتری نسبت به یک ماده نیمه‌جامد برخوردار است. بدلیل رساندن دمای ماده به بازه دمایی نیمه‌جامد، انرژی موجود در یک ماده نیمه‌جامد تا حد زیادی نیروهای جاذبه بین ملکولی آنرا کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر برای گسستن پیوندهای بین ملکولی در یک ماده جامد تک فازی و ایجاد تغییر شکل مومسان در آن، به کار پلاستیکی بسیار بیشتری نسبت به حالت نیمه‌جامد، نیاز خواهد بود. کار پلاستیک بزرگتر یعنی تولید حرارت بیشتر و این بدان معنی است که در یک ماده جامد تک فازی میزان حرارت تولید شده ناشی از کار پلاستیک، نسبت به ماده نیمه‌جامد بسیار بیشتر می‌باشد. این مسئله باعث می‌شود که در یک ماده جامد تک فازی حرارت ناشی از کار پلاستیک بیشتر از حرارتی باشد که از طریق سطح تماس شمش و ابزار تغییر شکل انتقال می‌یابد. لذا در طی فرآیند اکستروژن متداول بر خلاف روش TFE درجه‌حرارت به صورت افزایشی تغییر می‌نماید.

علاوه بر این، با افزایش سرعت سنبه میزان افت درجه‌حرارت در ابتدا و انتهای فرآیند کاهش می‌یابد. این موضوع در شکل (۷) و برای زاویه قالب $\alpha = ۲۰^\circ$ و نسبت اکستروژن $E.R. = ۴$ بوضوح نشان داده شده است. دلیل این امر اینست که با افزایش سرعت سنبه، گرادیان درجه حرارت در طول فرآیند، یعنی اختلاف درجه حرارت بین ابتدا و انتهای فرآیند، کاهش می‌یابد. بعبارت دیگر، هر چه سرعت سنبه زیادتر باشد، مدت زمان انجام فرآیند کمتر خواهد بود. در نتیجه قطعه‌کار فرصت کمتری برای تبادل حرارتی با ابزار تغییر شکل و محیط دارد. لذا درجه حرارت قطعه‌کار، دچار تغییرات کمتری می‌گردد. از یک دیدگاه دیگر می‌توان گفت که افزایش سرعت، موجب ازدیاد تنش سیلان، افزایش کار تغییر شکل و نتیجتاً ازدیاد درجه‌حرارت می‌شود و این ازدیاد درجه حرارت سبب کم شدن میزان کاهش دما می‌گردد. همچنین هنگامی که سرعت به مقادیر بسیار بالا نظیر $۸۰\ mm/s$ و $۱۰۰\ mm/s$ رسانده می‌شود، گرادیان درجه حرارت در طول فرآیند تقریباً به سمت صفر میل می‌نماید. این به دلیل آن است که از آنجا که در سرعتهای بالا قطعه‌کار از فرصت چندانی برای تبادل حرارت با سنبه، مجموعه قالب و محیط برخوردار نمی‌باشد لذا درجه حرارت آن در طول فرآیند تقریباً در همان اندازه $۵۸۰^\circ C$ ثابت باقی می‌ماند و به تعبیر دیگر قطعه‌کار در یک فرآیند همدما (Isothermal) شرکت می‌نماید. علاوه بر این از دیدگاه دیگر می‌توان گفت که در سرعتهای بالا، حرارت ناشی از کار پلاستیک و اصطکاک با حرارتی که از طریق سطح تماس شمش و ابزار تغییر شکل انتقال می‌یابد، تقریبا برابر می‌باشد. در شکلهای (۸) و (۹) نتایج مشابهی برای نسبتهای اکستروژن ۱۶ و ۶۴ نشان داده شده است.

در شکل (۱۰) نتایج مربوط به شبیه‌سازی فرآیند و نیز نتایج مربوط به داده‌های تجربي در مورد نیروی سنبه در طول فرآیند مقایسه شده‌اند. از این نتایج بدست آمده دو دستاورد قابل استنباط می‌باشد، یکی اینکه هم نتایج آزمایشگاهی و هم نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی فرآیند نشان می‌دهند که با افزایش درصد جابجایی سنبه نیروی مورد نیاز برای انجام فرآیند افزایش پیدا می‌کند. این افزایش در میزان نیرو به این دلیل است که افزایش جابجایی سنبه در واقع به معنی افزایش مدت زمان انجام فرآیند و در نتیجه برخوردار شدن قطعه‌کار از زمان بیشتر می‌باشد. بعبارت دیگر، قطعه‌کار از فرصت بیشتری برای تبادل حرارت با ابزار تغییر شکل و محیط برخوردار خواهد بود و در نتیجه به میزان بیشتری با ابزار تغییر شکل و محیط به تبادل حرارت میپردازد. این امر باعث می‌گردد که مقادیر توزیع درجه‌حرارت در قطعه‌کار با افزایش میزان جابجایی سنبه کاهش پیدا نموده و در نتیجه حالت قطعه‌کار از حالت نیمه‌جامد به سمت حالت جامد تک‌فازی تغییر حالت بدهد. در نتیجه سیلان ماده کاهش پیدا نموده و به نیروی بیشتری برای شکل‌دهی قطعه نیاز می‌باشد. دیگر اینکه همانطور که در شکل (۱۰) مشاهده مي‌گردد، میزان نیروی مورد نیاز در پشت سنبه برای فرآیند شکل‌دهی، در آخرین مرحله به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این امر بدلیل آنست که در آخرین مرحله مقادیر توزیع درجه‌حرارت در قطعه‌کار به پایینترین میزان خود در طی فرآیند می‌رسد. پس در این مرحله، ماده نیمه‌جامد بیش از مرحله‌های پیشین به حالت جامد تک فازی نزدیک می‌گردد (حتی شاید متناسب با شرایط حاکم بر فرآیند شکل‌دهی ماده به حالت تک فازی در آمده باشد). به تعبیر دیگر سیلان ماده به پایینترین میزان در طی فرآیند می‌رسد و لذا برای شکل‌دهی قطعه‌کار به بیشترین مقدار نیرو احتیاج است. لازم به ذکر است که بیشترین مقدار نیرو در نتایج آزمایشگاهی برابر با ۱۹۱۰Kn و بیشترین میزان نیرو در نتایج شبیه‌سازی شده برابر با ۲۱۵۰Kn محاسبه شده است. بنابر این متوسط خطای ایجادشده بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی برابر است با :

$$\text{درصد خطا} = \frac{۲۱۵۰-۱۹۱۰}{۱۹۱۰} \times ۱۰۰ = ۱۲/۵۷\%$$

این مقدار درصد خطای قابل قبولی می‌باشد و صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی را تایید می‌نماید.

با افزایش نسبت اکستروژن در یک زاویه قالب ثابت، ماکزیمم نیروی مورد نیاز در سنبه افزایش پیدا می‌نماید. این مسئله در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در واقع با افزایش نسبت اکستروژن، حداکثر نیروی پشت سنبه که در آخرین مرحله فرآیند شکل‌دهی روی می‌دهد، افزایش پیدا می‌نماید. بر اساس نتایج، این بزرگتر بودن نیرو تنها به مرحله آخر فرآیند شکل دهی محدود نمی‌شود بلکه براي

تمامی طول فرآیند شکل دهی با افزایش نسبت اکستروژن، میزان نیروی مورد نیاز در پشت سنبه افزایش خواهد یافت. به عبارت دیگر، با افزایش نسبت اکستروژن برای یک زاویه قالب ثابت ($\alpha = ۲۰^\circ$) به نیروهای بزرگتری برای انجام فرآیند شکل‌دهی نیاز است. بعبارت دیگر هر چه نسبت اکستروژنزیادتر شود، سطح تماس قطعه‌کار با قالب افزایش پیدا می‌نماید. این ایجاد افزایش در سطح تماس دو نتیجه خواهد داشت: ۱) به ازای یک ضریب اصطکاک ثابت μ، نیروی اصطکاک، با افزایش سطح تماس، افزایش پیدا می‌کند. ۲) با افزایش سطح تماس، سطح موثر برای انتقال حرارت بین قطعه‌کار با قالب بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر، قطعه‌کار به میزان بیشتر با قالب به تبادل حرارت می‌پردازد و در نتیجه حرارت بیشتری از دست می‌دهد. از دست دادن حرارت بیشتر به معنی تغییر حالت ماده از حالت نیمه‌جامد به سمت حالت تک فازی و در نتیجه کاهش سیالیت ماده می‌باشد. کم شدن سیالیت ماده منجر به اعمال نیروی بیشتر در پشت سنبه برای ایجاد تغییر شکل در قطعه‌کار می‌گردد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش فرآیند اکستروژن پیشرو در حالت نیمه‌جامد به کمک نرم‌افزار حجم محدود Super Forge شبیه‌سازی گشته و مورد تحلیل قرار گرفت. در این راستا، پارامترهای موثر در این فرآیند تعیین شده و نقش هر یک مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج حاصل از این تحلیل با نتایج آزمایشگاهی نشان میدهد که هماهنگی مناسبی بین آنها وجود دارد. بنابراین از این تکنیک ارزان قیمت می‌توان برای تعیین پارامترهای مهم، از قبیل نیروی لازم و سرعت شکل دهی، در فرآیند اکستروژن پیشرو در حالت نیمه جامد استفاده نمود. همچنین با توجه به تنوع نتایج بدست آمده می‌توان از آنها در جهت بهینه‌سازی کیفیت هندسی و مکانیکی محصولاتی که به روش TFE تولید می‌شوند، بهره گرفت. این امر خود باعث ارتقاء کیفیت محصولات و افزایش عمر و دوام تجهیزات تولیدی خواهد شد.

مراجع

1-R.Kopp and N.Witulski, Thixoextrusion of Aluminium Wrought Alloys, Journal of Materials Science and Engineering, vol.12, pp43-57,1996.

۲- م.ل.موسوی و م.ب.جویباری، شبیه‌سازی حجم محدود سه بعدی و تحلیل تجربی اکستروژن داغ، دوازدهمین کنفرانس سالانه و هشتمین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، اردیبهشت۱۳۸۳.

3-C.G.Kang and J.H.Yoon, A finite element analysis on the upsetting process of semi-solid aluminum material, Journal of Materials Processing Technology, vol.66, pp76-94,1997.

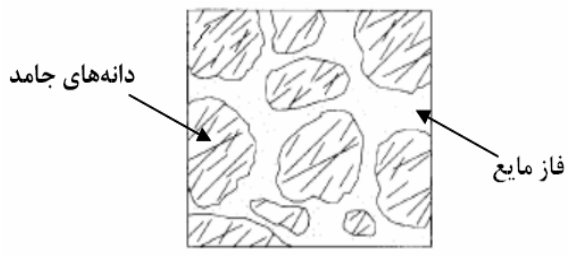
4-J.H.Yoon,Y.T.Im and N.S.Kim, Finite element modeling of the deformation behavior of semi-solid materials, Journal of Materials Processing Technology, vol.113, pp153-159,2001.

5-A.A.Tseng and P.Kotrbacek,Deformation behavior of steels in mushy state, Materials Science and Engineering,vol. 56, pp65-73,2000.

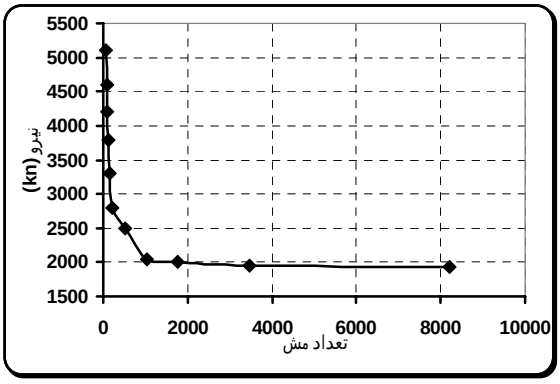
6-M.Koc,V.Vazquez,T.WitulskiandT.Altan, Application of the finite element method to predict material flow and defects in the semi-solid forging of A356 aluminum alloys, Journal of Materials Processing Technology, vol.59, pp106-112,1996.

7-E.Ogris and P.J.Uggowitzer, Semi-solid backward extrusion of Al-7075,Journal of Materials Processing Technology, vol.32, pp 90-102, 1999.

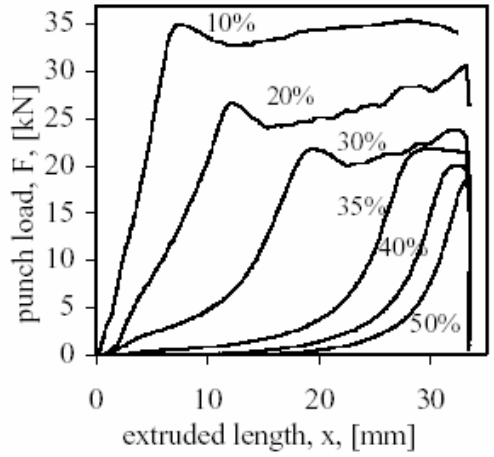
8-K.Watson and I.Demagor, Forming of Aluminium Alloy at Around Solidus Temperature, Journal of Machine Tools and Manufacture, vol.43, pp229-235,2003.



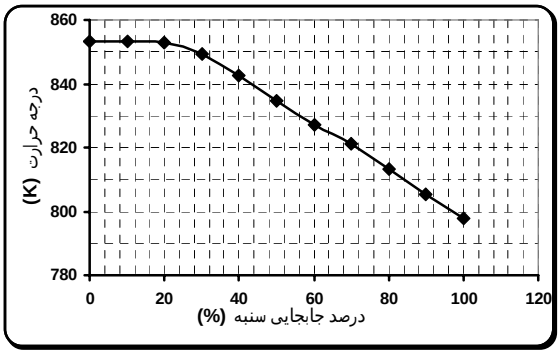
شکل ۱- نمایی شماتیک از حالت نیمه‌جامد در یک ماده



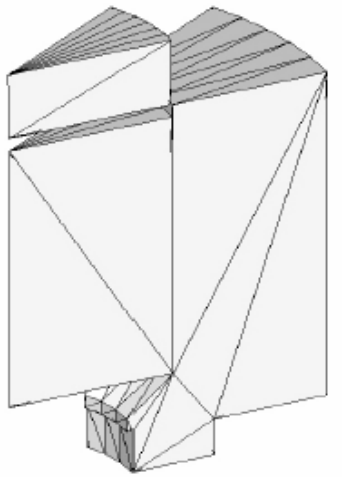
شکل۴- نمودار حساسیت به مش برای V=۶۰ mm/s و $\alpha = ۲۰^{\circ}$ و $E.R.$= ۴



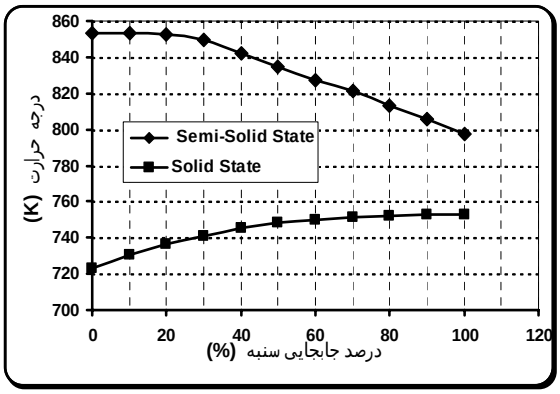
شکل۲- مقایسه رفتار آلیاژ آلومینیوم به ازای درصدهای حجمی مایع مختلف[۷]



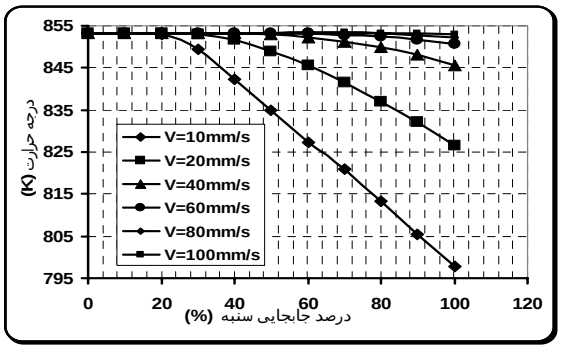
شکل۵- تغییرات درجه حرارت در طول فرآیند به ازای V= ۱۰ mm/s و $\alpha = ۲۰^{\circ}$ و $E.R.$= ۴



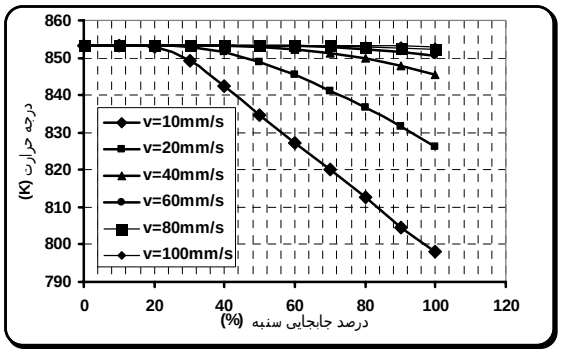
شکل۳- هندسه قالب و قطعه‌کار مورد استفاده در **SuperForge**



شکل۶- مقایسه تغییرات درجه حرارت برای ماده در حالت نیمه‌جامد و جامد تک فازی به ازای V= ۱۰ mm/s و $\alpha = ۲۰^{\circ}$ و $E.R.$= ۴

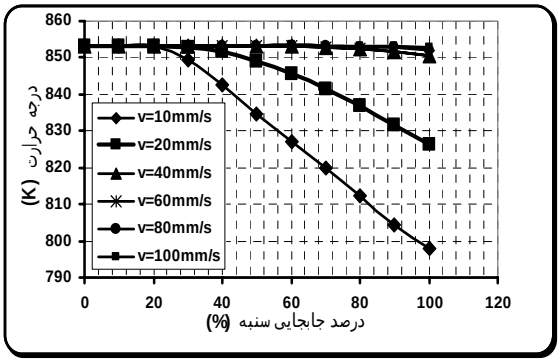


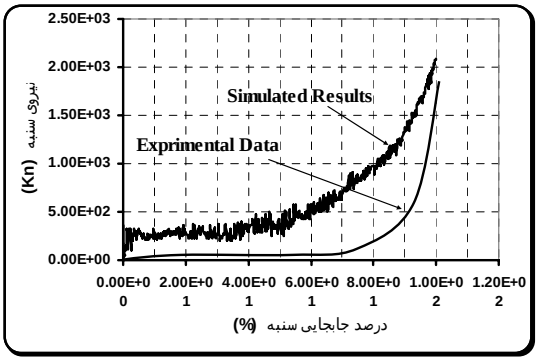
شکل۷- مقایسه تغییرات درجه حرارت در طول فرآیند به ازای سرعتهای مختلف برای $\alpha = ۲۰^{\circ}$ و ***E.R.***=۴



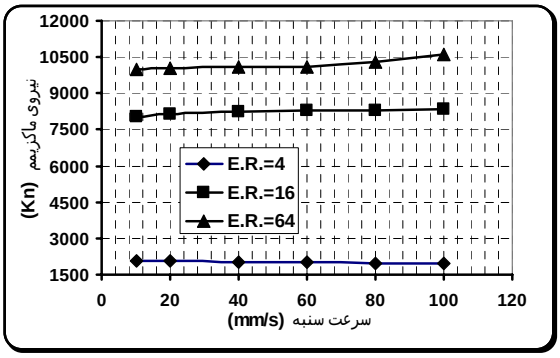
شکل۸- مقایسه تغییرات درجه حرارت در طول فرآیند به ازای سرعتهای مختلف برای $\alpha = ۲۰^{\circ}$ و***E.R.***=۱۶

شکل۹- مقایسه تغییرات درجه حرارت در طول فرآیند به ازای سرعتهای مختلف برای $\alpha = ۲۰^{\circ}$ و***E.R.***=۶۴





شکل۱۰- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج شبیه‌سازی مربوط به تغییرات نیروی سنبه به ازای V= ۱۰ mm/s و $\alpha = ۲۰^{\circ}$ و ***E.R.***= ۴



شکل۱۱- مقایسه تغییرات بیشترین نیروی سنبه در طول فرآیندبه ازای نسبتهای اکستروژن مختلف برای $\alpha = ۲۰^{\circ}$