

# شبیه‌سازی عددی شکل‌دهی لوله‌های گرمایی شیاردار به کمک فرآیند اکستروژن و بررسی تاثیر پارامترهای هندسی و جنس در شکل‌دهی مناسب آنها

کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، kfreza94@gmail.com  
استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، f.hajiboutalebi@eng.ui.ac.ir  
دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، hamid.beheshti@eng.ui.ac.ir  
دانشیار، پژوهشکده مواد و انرژی، مرکز تحقیقاتی هوافضای ایران، اصفهان، ایران، saeed.asghari@gmail.com

محمدرضا سلطانی  
فرهاد حاجی ابوطالبی\*  
حمید بهشتی  
سعید اصغری

## چکیده

لوله گرمایی یک وسیله انتقال گرمای دوفازی، با قابلیت رسانایی گرمایی بسیار بالا و موثر است. ساختار یک لوله گرمایی از نظر عملی به سه منطقه تقسیم می‌شود: الف) ناحیه تبخیرکننده که در یک انتهای لوله قرار داشته و در این منطقه گرما به محفظه وارد می‌شود، ب) ناحیه چگالنده که در انتهای دیگر لوله بوده و گرما در این ناحیه دفع می‌گردد و ج) ناحیه آدیاباتیک که بین دو ناحیه تبخیرکننده و چگالنده را شامل می‌شود. در این تحقیق، فرآیند شکل‌دهی لوله‌های گرمایی شیاردار در ابعاد مینی/میکرو به روش اکستروژن شبیه‌سازی عددی شده و امکان تولید توسط فرآیند اکستروژن بررسی می‌گردد. در خلال شبیه‌سازی-های عددی، میزان نیروی لازم برای شکل‌دهی و تاثیر متغیرهایی مانند جنس لوله، قطر لوله، طول لوله، تعداد شیارها در مقطع لوله و پروفیل شیار بررسی می‌گردد. به علاوه، اثرات متقابل پارامترها بر یکدیگر شناسایی شده و انتخاب مناسب برخی پارامترها نظیر سرعت فرآیند اکستروژن و نوع پروفیل شیار صورت می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: لوله گرمایی شیاردار، فرآیند اکستروژن، شبیه‌سازی عددی، تاثیر پارامترهای هندسی و جنس.

## Numerical simulation of grooved heat pipes forming by extrusion process and investigation of the effect of geometric and material parameters on their proper forming

M. R. Soltani  
F. Haji Aboutalebi  
H. Beheshti  
S. Asghari

Department of Mechanical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran  
Department of Mechanical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran  
Department of Mechanical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran  
Institute of Materials and Energy, Iranian Space Research Center, Isfahan, Iran

## Abstract

Heat pipe is a two-phase heat transfer device with extremely high thermal conductivity. The structure of a heat pipe is practically divided into three regions: a) the evaporator region at one end of the pipe where heat enters to this region, b) the condensation region at the other end of the pipe where heat is excreted in this zone, and c) the adiabatic region, includes the evaporator and condenser regions. In this research, the forming process of grooved heat pipes in mini/micro dimensions by extrusion process is numerically simulated and the possibility of production by this process is investigated. During the numerical simulations, the value of force required for forming and the effect of variables such as pipe material, pipe diameter, pipe length, number of grooves in cross section and groove profile are studied. Additionally, the mutual effects of the parameters on each other have been identified and proper values of some parameters such as extrusion process velocity and groove profile type are determined.

**Keywords:** Grooved heat pipe, Extrusion process, Numerical simulation, Effect of geometry parameters and materials.

می‌شود. مایع اشباع حاصل، از طریق ساختار فتیله‌ای توسط نیروی مویبندی به قسمت تبخیرکننده بازگردانده شده و چرخه مجدداً تکرار می‌گردد تا گرما به طور پیوسته از ناحیه گرم به ناحیه سرد منتقل شود [۱]. لوله‌های گرمایی با کاربردهای سرمایش، صرفه جویی و بازیابی انرژی در زمینه هوافضا، سرمایش تجهیزات الکترونیکی، تهویه مطبوع به منظور کنترل رطوبت در هواسازها، خنک کاری قطعات فلزی در هنگام ماشین‌کاری و سرمایش رایانه‌های شخصی به عنوان یک سیستم با بازدهی بالای انرژی مورد استفاده قرار گرفته است.

اولین بار در سال ۱۹۴۲ پیشنهادهای لوله گرمایی بر مبنای نیروی مویبندی توسط گلاگر در شرکت جنرال موتورز<sup>۱</sup>، به عنوان ایده جدید

## ۱- مقدمه

لوله گرمایی یک وسیله انتقال گرمای دوفازی با قابلیت رسانایی گرمایی عالی بوده و به سه منطقه تبخیر یا تبخیرکننده که در یک انتهای لوله قرار داشته و در این منطقه گرما به محفظه وارد می‌شود، چگالنده یا ناحیه چگالش که در انتهای دیگر لوله بوده و گرما در این ناحیه دفع می‌گردد و ناحیه آدیاباتیک که بین دو ناحیه تبخیرکننده و چگالنده است تقسیم می‌گردد. گرما در منطقه تبخیرکننده به لوله گرمایی وارد شده و بدین وسیله سیال عامل داخل قسمت فتیله‌ای، در اثر دریافت گرمای نهان تبخیر، به بخار اشباع تبدیل می‌شود. بخار اشباع حاصل، در اثر اختلاف فشار به انتهای دیگر لوله گرمایی یا ناحیه چگالنده منتقل می‌گردد. این منطقه در ناحیه خنک‌تری قرار داشته و از این رو بخار اشباع، گرمای نهان تبخیر خود را از دست داده و تقطیر

<sup>1</sup> General Motors

به ثبت رسید ولی توسعه پیدا نکرد [۲]. در سال ۱۹۶۳ فیزیکدان لس آلاموس، گرور، با موفقیت دستگاه انتقال گرما بر پایه نیروی موینگی را با نام لوله گرمایی به ثبت رساند که از او به عنوان مخترع لوله گرمایی یاد می‌شود [۳]. در دهه‌های اخیر تجهیزات الکترونیکی به دلایل کاهش اندازه تراشه‌ها، افزایش تراکم دستگاه و سرعت سریع‌تر مدارها گرمای بالاتری تولید می‌نمایند. برای حل مشکلات حرارتی مارسینچن و همکاران چهار تکنولوژی اولیه برای خنک‌کاری تراشه‌ها پیشنهاد دادند [۵و۴].

مشخصه تعریف لوله‌های گرمایی، قطر هیدرولیکی می‌باشد که توسط مهندیل و همکاران [۶] و کیندلیر [۷] تعریف شده و به صورت زیر می‌باشد:

- میکروکانال‌ها (۵۰ تا ۶۰۰ میکرومتر)

- مینی کانال‌ها (۶۰۰ میکرومتر تا ۳ میلیمتر)

- کانال‌های معمولی (بیشتر از ۳ میلیمتر)

روند کوچک‌سازی لوله‌های گرمایی این اجازه را می‌دهد که به منبع گرمایی نزدیک شده، موجب فراهم‌سازی سطح تماس بیشتر و افزایش نیروی موینگی گردد. معمولاً لوله‌های گرمایی با استفاده از فلزات ساخته می‌شوند. مس با توجه به رسانش گرمایی بالایی که دارد، ماده‌ای پرکاربرد در ساخت لوله‌های گرمایی می‌باشد. همچنین از آلومینیوم و آلیاژهای آن نیز با مایع کار آمونیاک، متان و غیره استفاده می‌گردد. لوله‌های گرمایی سیلیکونی نیز برای خنک‌کاری دستگاه‌های نیمه‌رسانا به کار می‌روند.

یکی از انواع لوله‌های گرمایی مورد استفاده به‌عنوان خنک کننده دستگاه‌های الکترونیکی، لوله‌های گرمایی شیاردار<sup>۱</sup> می‌باشد که شیارهای درون آنها خاصیت موینگی را برای بازگرداندن سیال به ناحیه تبخیرکننده تامین می‌نمایند [۸].

وانگ<sup>۲</sup> و همکاران مکانیزم شیارزنی با اکستروژن<sup>۳</sup> را به‌عنوان روشی جدید برای تولید لوله‌های گرمایی در ابعاد میکرو ارائه دادند [۹]. همچنین تنگ و همکاران از این روش برای تولید لوله‌های گرمایی شیاردار با شیارهای V-شکل استفاده نموده و بازده حرارتی این لوله‌ها را با لوله‌های گرمایی تولید شده به روش سنتی مقایسه نمودند [۱۰]. در این تحقیق، محدوده دمای کاری لوله ۳۴۰-۳۹۰ کلوین بود که به دلیل ایجاد شیارهای ثانویه، عملکرد لوله گرمایی بهبود یافت. همچنین پوترا و پوتری مطالعه‌ای بر چگونگی تولید و توسعه‌ی لوله‌های گرمایی انجام دادند [۱۱].

از طرف دیگر، ایواتا و همکاران کاربرد لوله‌های گرمایی در سیستم کنترل حرارتی یک فضاپیما و عملکرد مناسب آن برای خنک‌کاری را گزارش نمودند [۱۲]. علیجانی و همکاران از لوله‌های گرمایی آلومینیومی با عرض شیارهای مختلف استفاده کرده، تاثیر عرض شیار بر انتقال گرما را مورد بررسی قرار داده و افزایش انتقال گرما با کاهش عرض شیارها را گزارش نمودند [۱۳]. ابابنه و همکاران از لوله گرمایی تیتانیومی با سیال آب برای کنترل حرارتی تقویت کننده‌های قدرت در ماهواره استفاده کردند [۱۴]. همچنین آنها یک لوله گرمایی ترکیبی از

جنس آلومینیوم شامل قسمت شیاردار در ناحیه چگالش و قسمت متخلخل در ناحیه تبخیرکننده در فضاپیما تحقیقاتی که بر کره ماه یا مریخ فرود می‌آید را پیشنهاد نمودند [۱۵]. در سال ۲۰۱۹ آناند یک حل تحلیلی برای پیش‌بینی عملکرد لوله گرمایی آلومینیومی با سیال متان و شیارهای ذوزنقه‌ای و دمای کاری ۱۰۰-۱۶۰ کلوین ارائه کرد [۱۶]. چن و همکاران از لوله گرمایی برای کاهش گرمای نوک فضاپیما<sup>۴</sup> با دمای کاری ۶۸۴-۹۴۶ سلسیوس استفاده کرده و نتایج شبیه‌سازی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند [۱۷].

این پژوهش با توجه به نیاز صنعت برای تولید مینی/میکرولوله‌های گرمایی، محدودیت‌های موجود هنگام تولید در این ابعاد، انتخاب محدوده مناسب پارامترها و در دسترس نبودن ملاحظات طراحی در تحقیقات پیشین صورت می‌گیرد. لذا امکان‌سنجی تولید لوله گرمایی شیاردار در ابعاد مینی/میکرو به روش اکستروژن توسط شبیه‌سازی عددی یکی از روش‌های برطرف کننده‌ی نیاز صنعت می‌باشد. در این تحقیق، فرآیند شکل‌دهی لوله‌های گرمایی شیاردار مینی/میکرو به روش اکستروژن شبیه‌سازی عددی شده و امکان ساخت این لوله‌ها توسط فرآیند اکستروژن بررسی می‌گردد. بنابراین با شبیه‌سازی‌های عددی، بدون انجام آزمون‌های پرهزینه و زمان‌بر به بررسی جریان ماده در داخل لوله گرمایی در زمان تولید پرداخته می‌شود. در خلال شبیه‌سازی‌های عددی، معادلات الاستیک و پلاستیک ماده در زمان شکل‌دهی لوله در قالب به روش عددی و توسط نرم‌افزار ABAQUS حل گردیده و متغیرهایی نظیر تنش، تنش هیدرواستاتیک، کرنش و کرنش پلاستیک در ماده تعیین می‌شوند. همچنین میزان نیروی لازم برای شکل‌دهی و امکان انجام آن توسط فرآیند اکستروژن و تاثیر متغیرهایی مانند جنس لوله، قطر لوله، طول لوله، تعداد شیارها در مقطع لوله و پروفیل شیار بررسی می‌گردد.

## ۲- شبیه‌سازی اولیه و اعتبارسنجی

در این قسمت به‌منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی‌های عددی، ابتدا فرآیند اکستروژن سرد مستقیم شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی با نتایج عملی ارائه شده در تحقیقات پیشین مقایسه و اعتبارسنجی می‌گردد.

### ۲-۱- آزمون عملی مبنا برای شبیه‌سازی عددی

در سال ۲۰۰۵ نورانی آزاد و همکاران فرآیند اکستروژن سرد مستقیم با قالب مخروطی شکل و نیم‌زاویه ۳۰° را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند [۱۸]. شکل ۱، طرح‌واره تقارن محوری فرآیند اکستروژن مستقیم فوق را نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> grooved heat pipe

<sup>2</sup> Wang

<sup>3</sup> Extrusion-Ploughing

<sup>4</sup> nose cap

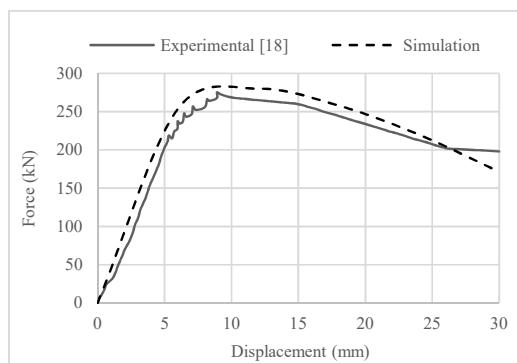
مرجع [۱۹] ۰/۱۵ در نظر گرفته شد. مطالعه حساسیت به مش انجام گردید و نتایج عددی در اندازه المان ۱/۵ میلیمتر برای شمش و ۳ میلیمتر برای سایر اجزاء همگرا شد. شکل ۳ المان بندی اجزاء فرآیند را نشان می‌دهد.



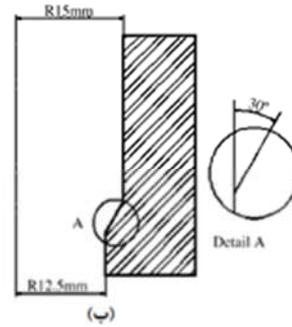
شکل ۳- المان بندی اجزاء فرآیند اکستروژن مستقیم

### ۳-۲- مقایسه نتایج عددی و تجربی

پس از انجام شبیه‌سازی‌ها، نتایج عددی شبیه‌سازی سه‌بعدی فرآیند اکستروژن سرد مستقیم برای آلیاژ آلومینیوم ۵۱۵۴ حاصل گردید. مطابق شکل ۴، نمودار نیرو-جابجایی فرآیند استخراج شده و با نمودار آزمون عملی ارایه شده در مرجع [۱۸] مقایسه می‌گردد. همان‌گونه که مقایسه نشان می‌دهد، شبیه‌سازی عددی رفتار افزایش اولیه، رسیدن به مقدار حداکثر و سپس افت نیروی لازم برای انجام فرآیند را به‌خوبی دنبال نموده و از تطابق مناسبی با نتایج تجربی گزارش شده در مرجع [۱۸] برخوردار است. مقدار خطای نیروی حداکثر ۲٪ و خطای نیروی انتهایی ۱۳/۵٪ است که برای شبیه‌سازی‌های عددی مورد قبول می‌باشد. بنابراین اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی و تحلیل عددی به‌خوبی صورت گرفته و با توجه به نتایج استخراج شده از نرم‌افزار می‌توان تحلیل پارامترهای مختلف فرآیند را با دقت مناسب مورد مطالعه و بررسی قرار داد.



شکل ۴- نمودارهای نیرو-جابجایی شبیه‌سازی عددی و تجربی



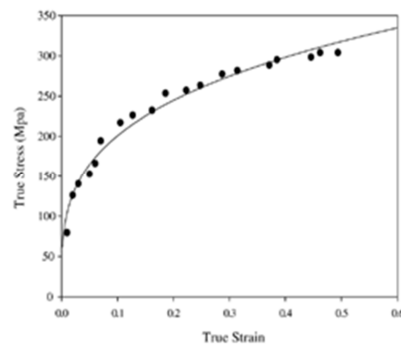
شکل ۱- طرح‌واره فرآیند اکستروژن مستقیم با نیم‌زاویه ۳۰° [۱۸]

در تحقیق فوق، شمش اولیه از جنس آلیاژ آلومینیوم ۵۱۵۴ دارای قطر ۳۰ میلیمتر و طول ۴۰ میلیمتر بوده که پس از انجام فرآیند به قطر نهایی ۲۵ میلیمتر می‌رسد. جدول ۱ خواص فیزیکی و الاستیک آلیاژ آلومینیوم فوق را بیان می‌کند [۱۸].

جدول ۱- چگالی و خواص الاستیک آلومینیوم ۵۱۵۴ [۱۸]

مقدار	خاصیت
2660 Kg/m <sup>3</sup>	چگالی (ρ)
70.7 GPa	مدول یانگ (E)
0.33	ضریب پواسون (ν)

هم‌چنین نمودار تنش-کرنش حقیقی این آلیاژ که از آزمون فشار به‌دست آمده در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۸].



شکل ۲- منحنی تنش-کرنش حقیقی برای آلیاژ آلومینیوم ۵۱۵۴ [۱۸]

### ۳-۲- شبیه‌سازی عددی اولیه

فرآیند اکستروژن سرد مستقیم آلیاژ آلومینیوم ۵۱۵۴ مطابق آزمون عملی نورانی آزاد و همکاران [۱۸] به صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی گردید. با توجه به تقارن فرآیند و به‌منظور زمان حل کمتر، یک چهارم هندسه مدل‌سازی شد. اجزاء قالب به‌صورت صلب تعریف گردیده و شمش اولیه توسط المان‌های چهارگوش منظم و ساختار یافته<sup>۱</sup> مجزاسازی شد. مقدار ضریب اصطکاک بین شمش و اجزاء قالب با توجه به مطالعات انجام گرفته در

<sup>۱</sup>quadratic CAX4R element

### ۳- شبیه‌سازی لوله گرمایی شیاردار و تاثیر پارامترها

در این قسمت امکان تولید لوله‌های گرمایی شیاردار در ابعاد مینی‌میکرو با استفاده از فرآیند اکستروژن به صورت عددی شبیه‌سازی شده و تاثیر پارامترهای مختلف در فرآیند مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۳-۱- ماده

فلز مس دارای رسانایی گرمایی بالایی نسبت به سایر فلزات است و این ماده کاربرد بسیاری در وسایل خنک کننده در تجهیزات الکترونیکی از جمله لوله‌های گرمایی دارد. هم‌چنین مس دارای استحکام پایین‌تری نسبت به سایر فلزات می‌باشد که این امر باعث شکل‌پذیری آن در فرآیندهای مختلف تولید می‌گردد. بنابراین با توجه به این ویژگی‌ها، مس به‌عنوان ماده اصلی در تولید لوله گرمایی شیاردار انتخاب می‌شود. مس دارای چگالی  $8960 \text{ Kg/m}^3$  و به ترتیب دارای ضریب پواسون و مدول یانگ برابر  $0.33$  و  $124 \text{ GPa}$  می‌باشد. در این تحقیق، از مدل پلاستیک جانسون<sup>۱</sup>-کوک<sup>۲</sup> برای تعریف خواص پلاستیکی مس استفاده می‌شود [۲۰]. استفاده از این مدل پلاستیک، امکان استفاده از تغییرات خواص پلاستیک با تغییرات دما را نیز فراهم می‌سازد. رابطه مدل جانسون-کوک به صورت زیر می‌باشد:

$$\sigma = [A + B\epsilon^n] \left[ 1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

که ضرایب ثابت آن در جدول ۲ آمده است:

جدول ۲- ضرایب ثابت مدل پلاستیک جانسون-کوک برای مس [۲۰]

A(MPa)	B(MPa)	n	m	C
90	292	0.31	1.09	0.025

برای شبیه‌سازی آسیب ماده نیز از مدل آسیب جانسون-کوک استفاده می‌شود. این مدل برای مسایی که در آن کرنش، نرخ کرنش و دمای بالا وجود دارد، مانند مسایل ضربه یا شکل‌دهی سریع استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر نیز به علت انجام فرآیند با سرعت قابل توجه از این مدل استفاده خواهد شد. رابطه مورد استفاده برای مدل آسیب جانسون-کوک به صورت زیر می‌باشد:

$$\epsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*] [1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*] [1 + D_5 T^*] \quad (2)$$

که در آن  $\epsilon^f$  کرنش شکست بوده  $\sigma^*$ ،  $\dot{\epsilon}^*$  و  $T^*$  به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\sigma^* = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \quad (4)$$

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (5)$$

$\sigma_m$  تنش میانگین،  $\bar{\sigma}$  تنش معادل فون میزز<sup>۳</sup>،  $\dot{\epsilon}_0$  نرخ کرنش،  $T_r$  نرخ

<sup>1</sup> Johnson

<sup>2</sup> Cook

<sup>3</sup> Von Mises

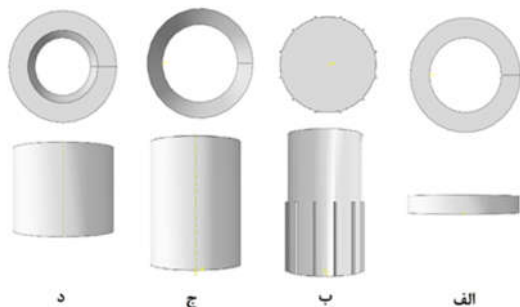
کرنش مرجع،  $T$  دما،  $T_r$  دمای اتاق و  $T_m$  دمای ذوب ماده می‌باشد. هم‌چنین ضرایب  $D_1$  تا  $D_5$  وابسته به جنس بوده که برای مس در جدول ۳ ارایه شده است [۲۰].

جدول ۳- ضرایب ثابت مدل آسیب جانسون-کوک برای مس [۲۰]

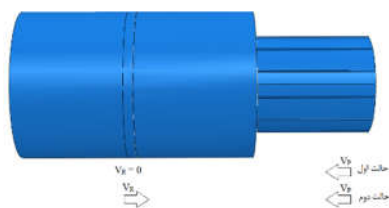
$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$
0.54	4.89	-3.03	0.014	1.12

#### ۳-۲- فرآیند تولید

وانگ و همکاران یک فرآیند جدید شیارزنی با اکستروژن را برای تولید لوله‌های گرمایی در ابعاد میکرو ارایه نمودند [۹]. در تحقیق حاضر از فرآیند اکستروژن شیارزنی معرفی شده توسط ایشان برای امکان‌سنجی تولید لوله گرمایی شیاردار در ابعاد مینی‌میکرو استفاده می‌گردد. اجزاء فرآیند در شکل ۵ نشان داده شده است. لوله اولیه به‌ترتیب دارای قطر داخلی و خارجی  $8/3$  و  $12/7$  میلی‌متر و طول  $10$  میلی‌متر می‌باشد. سنبه با پره‌های V-شکل به عمق  $0/1$  میلی‌متر و زاویه راس  $60^\circ$  یا دوزنقه‌ای با قاعده کوچک  $0/568$  میلی‌متر و عمق  $0/1$  میلی‌متر مدل می‌گردد. شکل ۶ حالت‌های مختلف حرکت رم و سنبه را نشان می‌دهد. حالت اول، رم ثابت در نظر گرفته شده و سنبه با سرعت ثابت از درون لوله عبور نموده و در حالت دوم، حرکت رم و سنبه با سرعت‌های ثابت مشخصی در جهت عکس یکدیگر برای انجام فرآیند در نظر گرفته می‌شود.

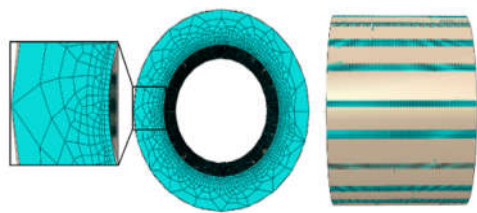


شکل ۵- اجزای فرآیند اکستروژن شیارزنی: الف) رم، ب) سنبه، ج) محفظه قالب و د) لوله اولیه



شکل ۶- حالت‌های مختلف انجام فرآیند

در حالت اول، به‌دلیل صرفه‌جویی در فرآیند تولید، بدنه قالب به گونه‌ای طراحی گردیده تا انتهای آن، وظیفه رم ثابت شده را نیز انجام دهد. بنابراین، تعداد اجزای قالب به سه عدد کاهش می‌یابد. برای عبور مندرل متصل به سنبه از درون لوله لازم است لقی مناسبی در نظر گرفته شود که در اینجا لقی  $0/1$  میلی‌متر در شعاع  $0/2$  میلی‌متر در



شکل ۸- المان بندی لوله اولیه با روش Bottom-Up

بررسی‌ها نشان می‌دهد که برای انجام شبیه‌سازی مناسب بهتر است از المان بندی چهارگوش یکپارچه منظم مطابق شکل ۷ استفاده گردد. این نوع المان بندی در دو اندازه ۰/۱ و ۰/۵ میلی‌متر برای لوله و ۰/۵ میلی‌متر برای سایر اجزاء استفاده گردید. هم‌چنین برای کاهش زمان حل، از یک چهارم مدل به دلیل تقارن استفاده شد. شکل ۹ نتایج آسیب را برای دو اندازه المان ۰/۵ و ۰/۱ میلی‌متر نشان می‌دهد. مطابق شکل، در حالت اندازه المان ۰/۱ میلی‌متر برخلاف حالت ۰/۵ میلی‌متر همه شیارها به‌طور کامل ایجاد شده‌اند.

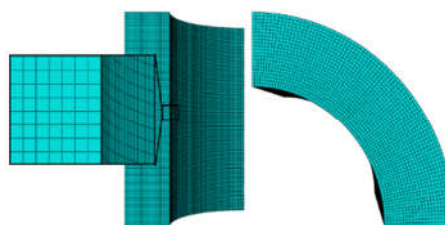
### ۳-۴- سرعت انجام فرآیند

سرعت انجام فرآیند از اهمیت بالایی در تولید محصولات بیشتر در مدت زمان کمتر برخوردار است. در این پژوهش، سرعت‌های ۰/۴، ۰/۲، ۰/۱ و ۰/۵ متر بر ثانیه انتخاب و بررسی شدند. نتایج سرعت‌های بررسی شده برای دو نوع شیار ۷-شکل و دوزنقه‌ای استخراج گردیده و در شکل ۱۰ با هم مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که شکل نیز نشان می‌دهد با افزایش سرعت، نیروی بیشینه فرآیند افزایش می‌یابد که با توجه به تاثیر نرخ کرنش بر استحکام ماده کاملاً منطقی است.

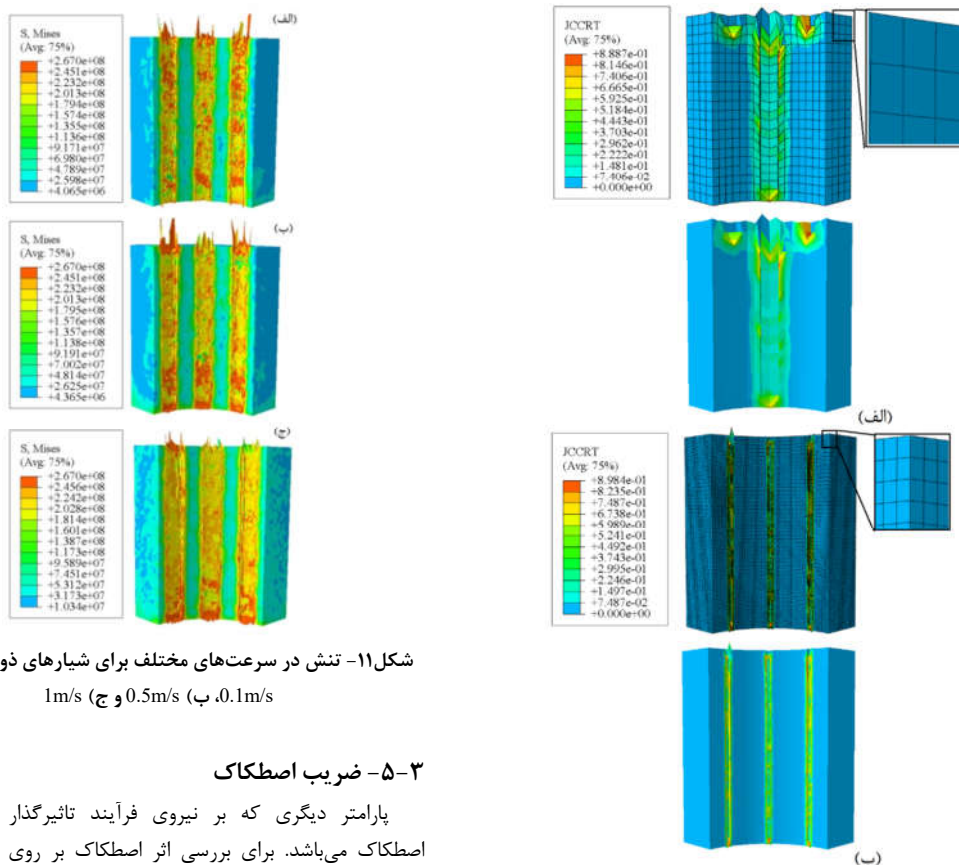
قطر) در نظر گرفته می‌شود. هم‌چنین از ضریب اصطکاک ۰/۰۵ برای تماس بین اجزاء استفاده می‌گردد.

### ۳-۳- المان بندی

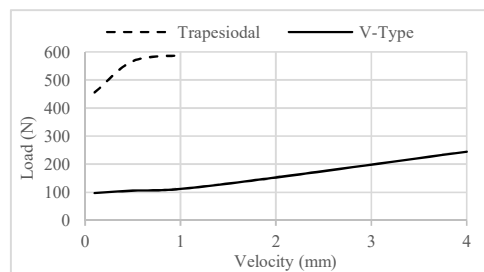
المان بندی اجزای قالب با توجه به ابعاد شیارها صورت می‌گیرد. اندازه المان برای دست‌یابی به نتایج قابل قبول، متناسب با عمق شیار در نظر گرفته می‌شود. در المان بندی اجزاء، معمولاً اندازه المان اجزای صلب حداقل دو برابر جسم تغییرشکل‌پذیر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، تناسب اندازه المان با عمق شیار بدین صورت تعریف می‌شود که عمق شیار، اندازه نهایی طول المان لوله اولیه (جسم تغییرشکل‌پذیر) را مشخص می‌سازد. مطابق شکل ۷، ابتدا از المان‌های چهارگوش منظم و ساختاریافته به طول ۰/۱ میلی‌متر برای لوله اولیه استفاده گردید. مزیت این نوع المان بندی استفاده از یک چهارم مدل بدلیل تقارن در شبیه‌سازی می‌باشد. عیب این نوع المان بندی تعداد بالای المان‌های تولید شده و بالا رفتن زمان حل توسط نرم‌افزار می‌باشد. برای رفع این عیب می‌توان از نوع دیگر المان بندی به نام Bottom-Up استفاده نمود. المان بندی فوق المان‌های ایجاد شده بر روی سطح را در عمق لوله تکرار می‌کند. در این روش ضخامت لوله به گونه‌ای قسمت بندی می‌گردد که ناحیه نزدیک به سنبه (محل ایجاد شیارها) دارای المان‌های ریزتر و ناحیه دورتر از محل ایجاد شیارها دارای المان‌های درشت‌تری باشند. این ترکیب المان بندی در ضخامت با تعداد مناسبی در طول لوله تکرار خواهد شد. شکل ۸ این نوع المان بندی را نشان می‌دهد. این روش المان بندی به دلیل تولید المان دلخواه و غیریکسان باعث می‌شود تا نتوان از قیود تقارن استفاده نمود. بنابراین برای شبیه‌سازی لازم به مدل کردن کل شکل اجزای فرآیند می‌باشد. هم‌چنین به دلیل استفاده از المان بندی نامنظم، ممکن است نمایش شیارهای ایجاد شده به‌خوبی صورت نگیرد. این روش المان بندی برای کاهش تعداد المان و زمان حل استفاده شده، ولی با مدل‌سازی کل فرآیند، این نتیجه به‌دست خواهد آمد که تعداد المان تقریباً با المان بندی یکپارچه و منظم یکسان خواهد بود. هم‌چنین اشکال دیگری که در این نوع المان بندی وجود دارد این است که زمانی که عمق شیار زیاد شود، المان بندی در ضخامت افزایش یافته و با توجه به نامنظم و غیریکپارچه بودن المان‌ها، ممکن است شیارها به خوبی نشان داده نشوند.



شکل ۷- المان بندی چهارگوش منظم و ساختاریافته



شکل ۹- تاثیر اندازه المان بر روی نتایج آسیب: الف) طول المان ۰/۵ میلیمتر و ب) طول المان ۰/۱ میلیمتر

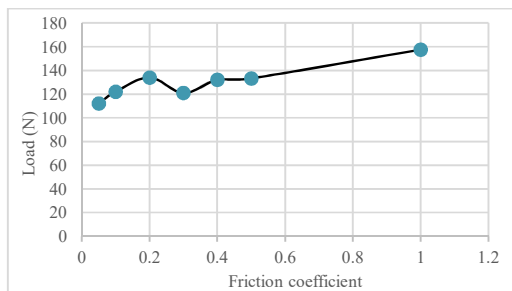


شکل ۱۰- نمودار نیرو-جابجایی برای سرعت‌های مختلف

شکل ۱۱- تنش در سرعت‌های مختلف برای شیارهای دوزنقه‌ای: الف) 0.1m/s، ب) 0.5m/s و ج) 1m/s

### ۳-۵- ضریب اصطکاک

پارامتر دیگری که بر نیروی فرآیند تأثیرگذار است، ضریب اصطکاک می‌باشد. برای بررسی اثر اصطکاک بر روی شرایط فرآیند نظیر نیرو و آسیب در شیارها از مقادیر ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱ تا ۰/۵ (با فواصل ۰/۱) و ۱ برای اصطکاک استفاده گردیده و نتایج مطابق شکل ۱۲ استخراج شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضریب اصطکاک، بیشینه نیروی به‌دست آمده افزایش می‌یابد. هم‌چنین در مقادیر ۰/۰۵-۰/۵ برای ضریب اصطکاک، میانگین نیرو حدود ۱۲۵ نیوتن می‌باشد که بیانگر محدوده‌ی نسبی مناسبی است. با توجه به لهیدگی ابتدای شیارها با افزایش ضریب اصطکاک، بازه ضریب اصطکاک مناسب برای کمینه‌سازی بیشینه نیروی فرآیند، ۰/۰۵-۰/۳ تعیین می‌گردد. به‌دلیل اختلاف کم نیروهای به‌دست آمده، در شبیه‌سازی‌های بعدی از ضریب اصطکاک ۰/۰۵ برای بررسی سایر پارامترها استفاده شده است.



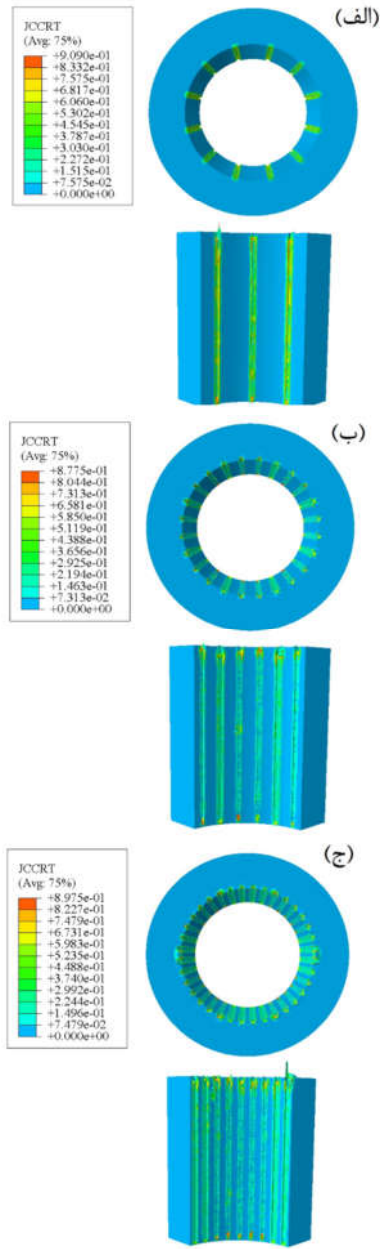
شکل ۱۲- نمودار نیرو-جابجایی برای بررسی اثر اصطکاک

### ۳-۶- پروفیل شیار

مطابق شکل ۱۳ دو نوع پروفیل شیار V-شکل و دوزنقه‌ای شبیه-سازی گردید. تعداد شیارهای ایجاد شده ۳ عدد در یک چهارم محیط

در حالت شیار V-شکل، نیروی حاصل در محدوده سرعت ۰/۱ تا ۱ متر بر ثانیه اختلاف کمتری نسبت به سایر سرعت‌ها دارد. برای شیارهای دوزنقه‌ای این محدوده بین ۰/۱ تا ۱ متر بر ثانیه بررسی گردید. مطابق شکل، روند صعودی نیروی فرآیند با افزایش سرعت، دارای شیب بیشتری می‌باشد که با توجه به هندسه‌ی شیار قابل توجهی می‌باشد. هم‌چنین شکل ۱۱، نتایج تنش در سرعت‌های مختلف برای شیار دوزنقه‌ای شکل را نمایش می‌دهد. مطابق شکل، تنش اطراف شیارها در جهت شعاعی با افزایش سرعت زیادتر شده، لذا، محدوده سرعت مناسب بین ۰/۱ تا ۰/۵ متر بر ثانیه است. در انجام شبیه‌سازی‌های بعدی از سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه برای کاهش زمان حل استفاده شده است.



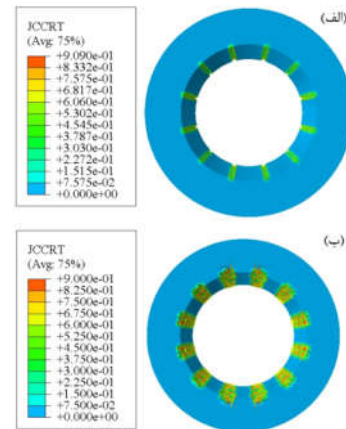


شکل ۱۵- تعداد شیار ۷- شکل ایجاد شده: الف) ۱۲، ب) ۲۴ و ج) ۳۶

### ۳-۸- عمق شیار

در این تحقیق، فرآیند شبیه‌سازی شده در عمق‌های کم (۰/۱ میلی‌متر)، انجام گردیده و بیشینه تعداد شیار به‌دست می‌آید که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد. عمق شیاری تولید شده در این روش معمولاً در محدوده ۰/۲ میلی‌متر است. با توجه به اثر متقابل عمق و تعداد شیار، مدل‌های پیشنهادی برای افزایش عمق شیاری ارائه خواهد شد. اثر متقابل این دو پارامتر به‌گونه‌ای است که با افزایش عمق تعداد شیار ایجاد شده کاهش می‌یابد. شکل ۱۶ مقایسه شیاری هموار و تکه‌تکه شده را در شبیه‌سازی و نتایج تجربی ارائه شده در مرجع [۲۱] نشان می‌دهد. لذا با افزایش عمق شیاری تعداد آن‌ها در محیط داخلی

لوله (۱۲ عدد در کل محیط داخلی لوله) برای هر دو نوع شیار می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، بیشینه نیروی به‌دست آمده در شیار دوزنقه‌ای به میزان قابل‌توجهی بیشتر از شیار V-شکل می‌باشد. علت این امر، اندازه سطح و نوع (عدم تیز بودن شیار دوزنقه‌ای) درگیری برای ایجاد شیاری می‌باشد. بنابراین هر چه سطح درگیری سنبه برای ایجاد شیار بیشتر باشد، نیروی بیشتری لازم است.



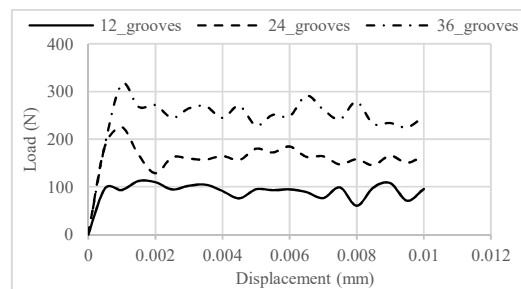
شکل ۱۳- انواع پروفیل شیار: الف) ۷- شکل و ب) دوزنقه‌ای

جدول ۴- بیشینه نیروی به‌دست آمده برای انواع پروفیل شیار

نوع پروفیل	نیروی فرآیند (N)
شکل ۷-شکل	۱۰۵/۹۰
دوزنقه‌ای	۵۶۶/۶۴

### ۳-۷- تعداد شیار

برای بررسی اثر تعداد شیار بر روی نیروی مورد نیاز برای انجام فرآیند، از شیاری ۷-شکل با تعداد ۱۲، ۲۴ و ۳۶ عدد در محیط داخلی لوله استفاده گردید. مطابق شکل ۱۴، نتایج آشکار نمود که بیشینه نیروی به‌دست آمده برای انجام فرآیند رابطه مستقیم با تعداد شیارها دارد. البته با توجه به اینکه با افزایش تعداد شیارها، تنش‌های ایجاد شده در اطراف شیاری دچار تداخل می‌شوند، افزایش تعداد شیارها باید به گونه‌ای باشد تا این تداخل و افزایش تنش‌ها باعث از بین رفتن و تکه‌تکه شدن دیواره‌های شیاری نشود. شکل ۱۵ شیاری ایجاد شده را نمایش می‌دهد.

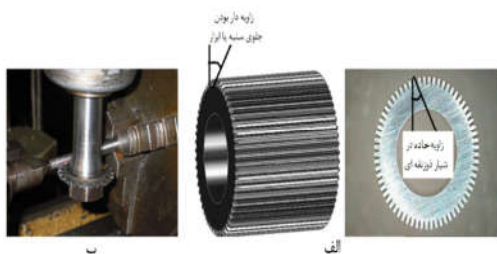


شکل ۱۴- نیروی به‌دست آمده از شبیه‌سازی برای تعداد شیاری ۱۲،

۲۴ و ۳۶

لوله کاهش می‌یابد. محدوده عمق‌های تولیدی با این روش معمولاً بین ۰/۱ تا ۰/۳ میلیمتر است. البته شیاریابی با عمق بیشتر از این محدوده نیز با این روش تولید شده‌اند که با توجه به اثر متقابل عمق و فاصله‌ی شیارها، تعداد شیارها در محیط داخلی کاهش می‌یابد [۹].

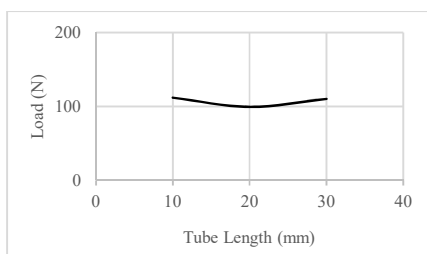
هزینه‌ی بیشتر توصیه نمی‌شود. شکل ۱۷ نمونه‌ی سنبه تولید شده به روش میکروماشینکاری را نشان می‌دهد [۲۱].



شکل ۱۷- نمونه سنبه تولید شده و (ب) تولید سنبه با روش میکروماشینکاری [۲۱]

### ۹-۳- طول لوله

شبیه‌سازی‌های عددی برای لوله‌ی اولیه در طول‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلیمتر تکرار شده و نتایج حاصل گردید. شکل ۱۸ بیشینه نیروی لازم به دست آمده برای انجام فرآیند در طول‌های مختلف را نشان می‌دهد. نتایج به وضوح بیان می‌کند که طول لوله تاثیر چندانی بر مقدار بیشینه نیروی لازم ندارد.



شکل ۱۸- نیروهای به دست آمده در طول‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلیمتری لوله

### ۱۰-۳- قطر لوله

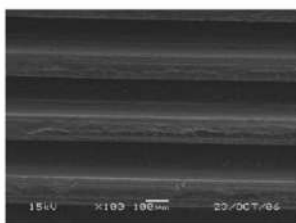
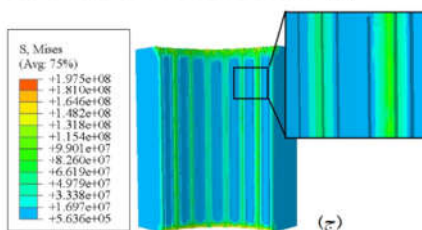
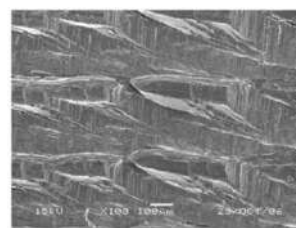
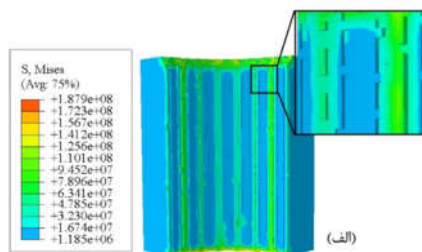
برای بررسی اثر قطر لوله بر بیشینه نیروی فرآیند از لوله‌ی اولیه دیگری به ترتیب با قطر داخلی و خارجی ۱۲/۹ و ۱۷/۳ میلیمتر در شبیه‌سازی استفاده شد. شیارهای مدل شده در هر دو لوله از نوع V- شکل با تعداد ۱۲ عدد در محیط داخلی لوله می‌باشد. با توجه به مقادیر بیشینه نیروی به دست آمده از شبیه‌سازی در جدول ۵، قطر لوله در شرایط یکسان تاثیری در مقدار بیشینه نیروی فرآیند ندارد. لذا با توجه به محدودیت تعداد شیار نسبت به عمق آن و نیز فضای که لوله گرمایی در آن استفاده می‌شود، می‌توان با افزایش قطر لوله تعداد شیارهای بیشتری ایجاد نمود و کارایی گرمایی آن را بالاتر برد.

جدول ۵- نیروی بیشینه در قطرهای مختلف لوله

اندازه قطر داخلی (mm)	بیشینه نیرو (N)
۸/۳	۱۱۲/۰۶۸
۱۲/۹	۱۱۰/۵۵۱

### ۱۱-۳- جنس لوله

تاکنون شبیه‌سازی‌های صورت گرفته با جنس مس بوده است. برای بررسی تاثیر جنس بر نیروی فرآیند و نیز رسیدن به صافی سطح



شکل ۱۶- ایجاد شیارها: (الف) شیارهای ناپیوسته در شبیه‌سازی، (ب) شیارهای ناپیوسته در آزمایش تجربی [۲۱]، (ج) شیارهای پیوسته در شبیه‌سازی و (د) شیارهای پیوسته در آزمایش تجربی [۲۱]

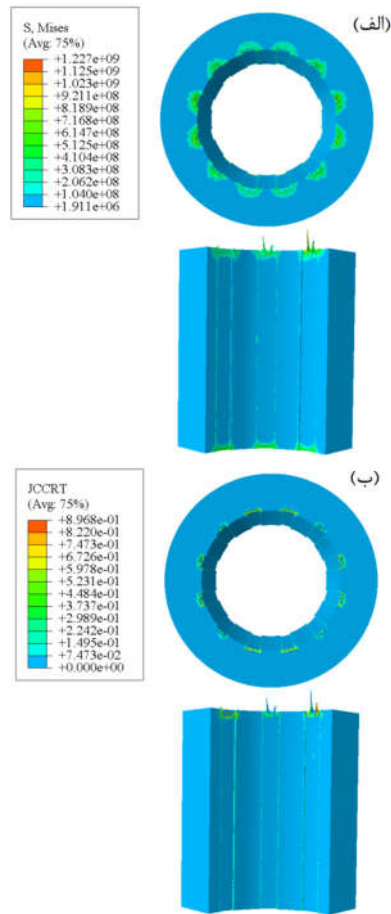
مدل‌های پیشنهادی برای افزایش عمق، به صورت زیر است:

الف- سنبه‌ی پله‌ای: در این حالت با توجه به توان ایجاد عمق ۰/۱ میلیمتر، می‌توان سنبه را به صورت پله‌ای با افزایش ۰/۱ میلیمتر در نظر گرفت.

ب- سنبه‌ی مخروطی یا منحنی شکل: در این حالت، افزایش عمق از ۰/۱ میلیمتر توسط سنبه مخروطی یا منحنی که زاویه مخروط و معادله منحنی می‌تواند بهینه‌سازی شود، صورت می‌پذیرد.

ج- استفاده از چند سنبه: در این حالت، چندین سنبه با ارتفاع‌های مختلف در پرها، عمق‌های مختلفی از کوچک به بزرگ ایجاد می‌کنند. البته این پیشنهاد به دلیل ساخت چندین سنبه، زمان ساخت و





شکل ۲۰- لوله آلومینیومی: الف) کانتور تنش و ب) کانتور آسیب

#### ۴- انتخاب مقدار مناسب سرعت

در این بخش، با توجه به نیاز، پارامتر سرعت فرآیند برای رسیدن به تعداد شیارهای بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرد. با افزایش تعداد شیار، برای عدم تکه‌تکه شدن دیواره‌های شیارها لازم است مقدار مناسب سرعت نیز در محدوده‌ای که قبلاً به دست آمده انتخاب شود. به این منظور، ابتدا شبیه‌سازی با تعداد ۲۴ شیار و سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه انجام گردید. پس از موفقیت‌آمیز بودن تولید شیارها، تعداد ۲۸ شیار با سرعت فوق مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۲۱-الف نمایان‌گر اثر نامطلوب سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه بر کیفیت شیارهای ایجاد شده می‌باشد. بنابراین سرعت تا ۰/۲ متر بر ثانیه افزایش یافته و همان‌طور که در شکل ۲۱-ب مشاهده می‌شود شیارها به صورت پیوسته ایجاد شده و دیواره‌های آنها دچار تخریب و تکه‌تکه شدن نگردید. بنابراین سرعت ۰/۲ متر بر ثانیه سرعت مورد قبول و بالایی برای کاهش زمان تولید و نیز کمینه نمودن نیروی فرآیند می‌باشد. هم‌چنین مطابق شکل ۲۲ در این سرعت، بیشترین تعداد شیار با عمق ۰/۱ میلی‌متر برابر ۳۶ عدد در محیط داخلی لوله می‌باشد.

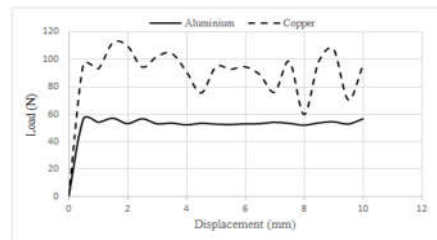
بهتر در شیارها، از جنس آلومینیوم AA2014-T652 در شبیه‌سازی استفاده گردید. ضرایب خواص پلاستیک و آسیب جانسون-کوک برای این ماده در جدول ۶ آورده شده است [۲۲]. هم‌چنین چگالی، مدول یانگ و ضریب پواسون ماده فوق به ترتیب برابر با  $2700 \text{ kg/m}^3$ ،  $69 \text{ GPa}$  و  $0.33$  می‌باشد.

پس از شبیه‌سازی و مقایسه‌ی نتایج در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود که آلیاژ آلومینیوم دارای شکل‌پذیری بهتری نسبت به مس بوده و تا ۵۰ درصد نیروی فرآیند کاهش یافته است. هم‌چنین شکل ۲۰، شیارهای ایجاد شده بر روی آلومینیوم ۲۰۱۴ را نشان می‌دهد. مطابق شکل، شیارهای ایجاد شده درون لوله آلومینیومی، دارای تنش‌های کمتری نسبت به جنس مس بوده و بیشتر آن در ابتدا و انتهای لوله قرار دارد. به‌علاوه میزان آسیب‌دیدگی المان‌های اطراف شیارها نیز ناچیز بوده‌اند. لذا، آلومینیوم به لحاظ صافی سطح نسبت به مس، جنس مناسب‌تری برای تولید لوله‌های گرمایی شیاردار در ابعاد مینی‌امیکرو می‌باشد.

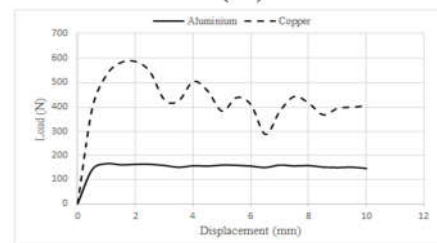
جدول ۶- ضرایب خواص پلاستیک و مدل آسیب جانسون-کوک برای

آلومینیوم AA2014 [۲۲]

ضرایب خواص پلاستیک جانسون-کوک				
A(MPa)	B(MPa)	n	C	m
453	453	0.5948	0.013	1.08
ضرایب مدل آسیب جانسون-کوک				
D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>
0.087	2.68	-8.01	0.029	5.332



(الف)



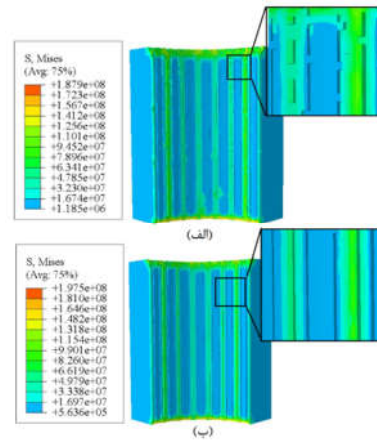
(ب)

شکل ۱۹- نیروهای به‌دست آمده برای جنس‌های مختلف لوله: الف)

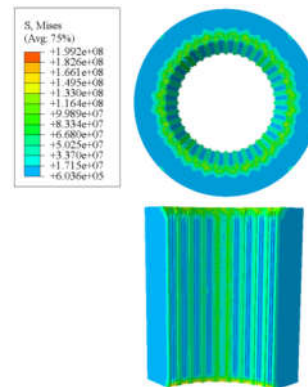
شیار ۷-شکل و ب) شیار دوزنقه‌ای

## ۷- مراجع

- [1] Shukla K. N. Heat Pipe for Aerospace Applications-An Overview, Journal of Electronics Cooling and Thermal Control, 2015.
- [2] Glaugler R. Heat Transfer. Patent No. 2350348, 1944.
- [3] Grover G.M. Evaporation-Condensation Heat Transfer Device. US patent No. 3229759, 1966.
- [4] Marcinichen J.B., Thome J.R., Michel B. (2010) Cooling of microprocessors with micro-evaporation: a novel two-phase cooling cycle, Int. J. Refrig. 33.
- [5] Marcinichen J.B., Olivier J.A. Lamaison N., Thome J.R., Advances in electronics cooling, Heat Transfer. 34, 2013.
- [6] Mehendale S.S.J., Jacobi A.M., Shah R.K. Fluid flow and heat transfer at micro and meso-scales with application to heat exchanger design, Appl. Mech. Rev. 53, 2000.
- [7] Kandlikar S.G. Two-phase flow patterns, pressure drop, and heat transfer during boiling in minichannel flow passages of compact evaporators, Heat Transfer Eng. 23, 2002.
- [8] Chen P., Tang Y. Research on ploughing-extrusion process mechanism of multi/micro dimensional grooves inside cylindrical micro heat pipe. J Habin Inst Technol, 2005.
- [9] Wang X., Tang Y., Chen P. Investigation into performance of a heat pipe with micro grooves fabricated by extrusion-ploughing, Energy Conversion and Management 50, 2009.
- [10] Tang Y., Chen P., Wang X. Experimental investigation into the performance of heat pipe with micro grooves fabricated by Extrusion-ploughing process, Energy Conversion and Management 51, 2010.
- [11] Putra N., Putri F. N. The Fabrication and Testing Development of Heat Pipe Wicks: IEEE 2nd International Conference on Power and Energy Applications, 2019.
- [12] Iwata N., Take Y., Okamoto A., Ogawa H., Yumoto T., Ono Y., Kokubun M., Takahashi T. Evaluation of In-Orbit Thermal Performance of X-Ray Astronomy Satellite "Hitomi", 2017.
- [13] Alijani H., Çetin B., Akkuş Y., Dursunkaya Z. Experimental Thermal Performance Characterization of Flat Grooved Heat Pipes, Heat Transfer Engineering, 2018.
- [14] Ababneh M. T., Tarau C., Anderson W. G. High Temperature Heat Pipe for Solid-State Power Amplifier (SSPA) Thermal Management, Advanced Cooling Technologies, 2019.
- [15] Ababneh M. T., Tarau C., Anderson W. G. Thermal Control of Lunar and Mars Rovers/Landers Using Hybrid Heat Pipes, journal of thermophysics and heat transfer, 2019.
- [16] Anand A.R. Analytical and experimental investigations on heat transport capability of axially grooved aluminium-methane heat pipe, International Journal of Thermal Sciences 139, 2019.
- [17] Chen S., Han H., Shi J., Lu Q., Hu L., Ai B. Applications of Sodium/GH4099 Heat Pipes for Nose Cap Cooling, Microgravity Science and Technology, 2019.
- [18] Noorani-Azad M., Bakhshi-Jooybari M., Hosseinipour S.J., Gorji A. Experimental and numerical study of optimal die profile in cold forward rod extrusion of aluminum, Journal of Materials Processing Technology 164-165, 2005.
- [19] Wagener H.W., Wolf J. Coefficient of friction in cold extrusion, J. Mater. Process. Technol. 44, 1994.
- [20] Johnson G. R., Cook W. H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, Engineering Fracture Mechanics Vol. 21, No. 1, pp. 3148, 1985.
- [21] Li X., Li M., Li M., Wu R., Wan Y., Cheng T. Forming method of micro heat pipe with compound structure of sintered wick, Heat Mass Transfer, 2015.
- [22] Sharma P., Chandela P., Mahajanb P., Singh M. Quasi-Brittle Fracture of Aluminium Alloy 2014 under Ballistic Impact, Procedia Engineering 173, 2017.



شکل ۲۱- سرعت انجام فرآیند برای تعداد ۲۸ عدد شیار: (الف) ۰/۱ متر بر ثانیه و (ب) ۰/۲ متر بر ثانیه



شکل ۲۲- ایجاد تعداد ۳۶ شیار با سرعت مناسب ۰/۲ متر بر ثانیه

## ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، فرآیند شکل‌دهی لوله‌های گرمایی شیاردار به روش اکستروژن شبیه‌سازی عددی شده و امکان ساخت آن در ابعاد مینی/میکرو توسط فرآیند اکستروژن بررسی گردید. میزان نیروی لازم برای شکل‌دهی و امکان انجام آن و تاثیر متغیرهایی مانند جنس، قطر و طول لوله، تعداد شیارها در مقطع لوله و پروفیل شیار بررسی گردید. این پژوهش برطرف کننده‌ی نیاز صنعت بوده و با آرایه‌ی روشی جدیدتر نسبت به فرآیند اکستروژن معمولی امکان تولید این لوله‌ها در ابعاد مینی/میکرو را فراهم می‌نماید. با توجه به نتایج عددی، محدوده مناسب پارامترها به صورت اصطکاک ۰/۰۵-۰/۳، سرعت ۰/۱-۰/۵ متر بر ثانیه و عمق ۰/۱-۰/۳ میلی‌متر برای طراحی پیشنهاد می‌گردد:

## ۶- سپاسگزاری

نویندگان مقاله از حمایت‌های مادی و معنوی پژوهشکده مواد و انرژی اصفهان در انجام کلیه مراحل تحقیق، تشکر و قدردانی می‌نمایند.