ماهنامه علمى پژوهشى



mme.modares.ac.ir

بررسی فرآیند تراکم گاز داخل ضربه *گ*یر گازی-روغنی به روش شبیهسازی دوفازی جریان

سامان حسينزاده¹، بيژن محمدی^{2*}

1- فارغ التحصيل كارشناسي ارشد، مهندسي هوافضا، دانشگاه علم و صنعت ايران، تهران

2– دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستى 16765-167، bijan_mohammadi@iust.ac.ir

چکیدہ	اطلاعات مقاله
ضربهگیر گازی–روغنی، عملکردی دوگانه در یک سیستم تعلیق دارد. تراکمپذیری گاز در آن، نقش فنر و عبور روغن از اوریفیس، نقش مستهلککننده انرژی را ایفا میکنند. سیالات (گاز و روغن) و جریان آنها در داخل ضربهگیر، تعیینکننده پاسخ ضربهگیر به تحریکات مختلف است. پیشبینی رفتار جریان داخل ضربهگیر میتواند در مراحل طراحی، بهینهسازی و بررسی عملکرد آن، از هزینهی آزمایشهای تجربی بکاهد.	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 25 فروردین 1396 پذیرش: 20 خرداد 1396 ارائه در سایت: 18 مرداد 1396
- در پژوهش حاضر تحلیل عددی جریان با فرض تقارن محوری و به صورت دوفازی، با یک فاز تراکمپذیر و در شرایط اشفته انجام گرفته است. مدل کسر حجمی برای توصیف ارتباط دو فاز، مدل کی– اپسیلون تحقق یافته برای مدلسازی آشفتگی، روش متناسبشونده برای تابع دیواره و	<i>کلید واژگان:</i> ضربه گیر
معادله حالت ردلیچ–کنگ–سو برای توصیف تراکم پذیری گاز استفاده شده است. حرکت پیستون با روش مش متحرک شبیه سازی شده است. معادله حالت ردلیچ–کنگ–سو برای توصیف تراکم پذیری گاز استفاده ۵۵ میل جار میل میل میگرد.	رب یر تحلیل عددی جریان دیفانه
تخوه اختلاط کار و روعن و تعییرات دمایی کار در طول دورس، از افزایش 30 درجهای دمای حبابهای بزرگ کار در اتر ترا دم خبر میدهد. اما حبابهای کوچک با روغن همدما میشوند. در صورت توصیف فرآیند گاز به صورت پلی تروپیک، در طول جمع شدن ضربه گیر، توان پلی تروپیک نشت گیر گار تا حسب میداند.	دودری مش متحرک
فرایند کار، تابعیتی درجه 4 از دورس دارد. این توان در ابتدای دورس از معدار 1.3 به معدار 1.4 میرسد و با اختلاط دو فاز شروع به داهش میکند.	

Investigation of Gas Compression Process inside Oleo-Pneumatic Shock Absorber with Two-Phase Flow Simulation Method

Saman Hosseinzadeh^{1*}, Bijan Mohammadi²

1- School of Aerospace Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran 2- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* POB 16765-163 Tehran Iran bijan mohammadi@just ac ir

* P.O.B. 16765-163, Tehran, Iran, bijan_mohammadi@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	ABSTRACT
Original Research Paper Received 14 April 2017 Accepted 10 June 2017 Available Online 09 August 2017	The Oleo-Pneumatic shock absorber has a dual function in suspension systems. Compressibility of gas plays the role of spring and oil passing through the orifice plays damper role. Shock absorber response to various excitation depends on Fluids (gas and oil) and their internal flow. Prediction of the flow behavior inside the shock absorber can reduce cost of experimental during the design and optimization
Keywords: Shock Absorber CFD Two-Phase Dynamic Mesh	process and performance analysis. Numerical Fluids flow has been simulated with assumption of axisymmetric and two-phase flow. Primary phase is compressible and Redlich-Kwang-Soave equation of state has been used to describe the compressible gas behavior. Volume of fluid model (VOF) has been used to describe the relationship between two phases. k-ε model and Scalable wall function have been chosen for modeling turbulence. The piston's movement has been simulated using dynamic mesh (layering method). The way of gas-oil mixing and temperature change during stroke, shows an increase in temperature of about 50-degrees for largest gas bubble because of compression. However, temperature of small bubbles has been reduced to oil temperature because of higher heat exchange. In polytropic description of gas process, the polytropic expansion has been described with polynomial function of stroke. Polytropic expansion value starts from 1.3, rises to 1.4, and reduces again after mixing two phases.

1- مقدمه

(اولئونیوماتیک) است. این نوع جاذب، پیچیدهترین و جدیدترین نوع از جاذبهاست و بالاترین کارایی و بهترین نرخ اتلاف انرژی را دارد [1]. ضربه گیر گازی روغنی از یک سیلندر و پیستون تشکیل شده است که حجم داخل آن با یک سیال تراکمناپذیر (روغن) و یک سیال تراکمپذیر (گاز) پر میشود. با جمع شدن ضربه گیر و حرکت پیستون داخل سیلندر، روغن از

جاذب انرژی یا ضربهگیر، انواع مختلفی دارد که از بین آنها میتوان به فنرهای فولادی مارپیچی، فنر فولادی تخت، فنر لاستیکی، ضربهگیر گازی، ضربهگیر روغنی و ضربهگیر گازی روغنی اشاره نمود. میتوان گفت بهترین عملکرد و بازدهی در بین جاذبها مربوط به جاذبهای گازی روغنی

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

اوریفیس عبور می کند و گاز را فشرده می سازد. جاذب گازی روغنی دارای عملکردی دوگانه می باشد. گاز دارای عملکرد یک فنر است و باعث می شود سیستم تعلیق، به یک سیستم تعلیق قابل ارتجاع تبدیل شود. اوریفیس دارای عملکرد یک دمپر (مستهلککننده) است و باعث می شود سیستم تعلیق قابلیت جذب انرژی داشته باشد. جذب انرژی توسط ضربه گیر باعث کاهش شتاب و نیروی وارد بر سازه و سرنشینان می گردد. این اتلاف انرژی با عبور دادن سیال هیدرولیک از یک یا چند سوراخ ریز (اوریفیس) حاصل می شود. در این پژوهش ضربه گیری ساخت کشور، یگانه، بدون جداکننده گاز و روغن و با اوریفیس ثابت، برای تحلیل کورس اول استفاده شده است.

تحقیقات موجود در زمینهی تحلیل عملکرد و مدلسازی ضربه گیر گازی- روغنی، همگی دارای نشانههایی از روش مطالعه میلویتزکی و کوک [2] در سال 1953 میلادی دارد. در مطالعه میلویتزکی و کوک، برای مدل کردن نیروی گاز در تراکم از فرض پلیتروپیک بودن فرآیند تراکم استفاده شده است. به دلیل ناشناخته بودن، مدلسازی با فرض توانهای پلیتروپیک 1.0، 1.12 و 1.3 انجام شده و تأثير آن در رفتار جاذب انرژی بررسی شده است. با فرض هر سه عدد برای توان پلی تروپیک بیشینه نیرو که در اواسط فرآیند تراکم حاصل میشود، تفاوت قابل ملاحظهای پیدا نمی کند. اما نیرو در انتهای فرآیند تراکم، که پیستون به انتهای کورس میرسد، میتواند تغییرات بزرگی داشته باشد. در سال 1954 آزمایشهایی توسط والز [3] صورت پذیرفته است. در این آزمایشها توان پلی تروپیک فرآیند تراکم گاز، بین 1.01 تا 1.10 اندازه گیری و محاسبه شده است. در 1976 واهی [4] با ارائه نتایج چند آزمایش نشان داده است که نمی توان در طول کورس توان پلی تروپیک را یک عدد ثابت فرض کرد. در یکی از آزمایشها توان پلیتروپیک بین 1.35 در ابتدای کورس و 1.1 در انتهای کورس متغیر بوده است و به طور متوسط توان 1.1 برای تخمین میانگین عدد مناسبی دیده شده است. در آزمایش دیگر توان پلی تروپیک بین مقدار نسبتاً خارج از انتظار 0.87 و مقدار 1.015 تغییر كرده است. واهى نتيجه گرفته است كه به احتمال زياد تراكم با ضرايب پلی تروپیک بالاتر آغاز می شود و در انتهای کورس ضریب کاهش می یابد که علت آن انتقال حرارت گاز به محیط یا روغن است. مدلسازی دیگری در 1996 توسط جیمز دنیلز [5] در آزمایشگاه تحقیقاتی ناسا انجام شده است. در تحقيق دنيلز، مانند تحقيقات پيشين براى محاسبه نيروى گاز، فرآيند تراكم گاز پلی تروپیک فرض شده است. در این مطالعه به ثابت نبودن توان پلی تروپیک در طول فرآیند فشردهسازی اشاره شده است، برای تعیین توان پلی تروپیک گاز، دو آزمایش شبه ایستا، انجام شده است. با بررسی نتایج این دو آزمایش، عدد 1.19 برای توان پلی تروپیک میانگین، مناسب دیده شده است. همچنین اشاره شده است که در تراکم شبهایستا با سرعت بالاتر گاز به عنوان یک فنر، سفتی بیشتری از خود نشان میدهد. اما در نهایت برای مطابقت بهتر نتایج مدلسازی با نتایج آزمایشهای دینامیکی به کمک لرزاننده، عدد 1.1 برای توان پلیتروپیک در نظر گرفته شده است. در سال 1386 حسینی و همکارانش [6] عدد 1.4 را برای توان پلیتروپیک فرآیند گاز داخل ضربه گیر انتخاب کردهاند. دلیل این انتخاب، سرعت بسیار بالای جمع شدن ضربه گیر و امکان آدیاباتیک فرض کردن فرآیند عنوان شده است. در سال 2009 در گزارشی توسط کروگر [7] به پیشرفتهای اخیر مدلسازی دینامیک ضربه گیر پرداخته شده است. در مورد مدل سازی ضربه گیر اولئونيوماتيک به نحوه مدل کردن نيروی گاز و روغن اشاره شده است. نيروی گاز با پلی تروپیک فرض کردن رابطه و اعمال توان پلی تروپیک بین 1 و نسبت

ظرفیتهای گرمایی گاز (1.3 برای هوا) مدل می شود. با این تفاوت که به دليل عدم اطمينان به توان انتخابي، براي اين توان يک ضريب اصلاح بين 0.9 تا 1.1 در نظر گرفته می شود. به این ترتیب می توان با اعمال تغییرات بر ضریب اصلاح توان پلیتروپیک، به مقداری که جوابهای معقول تری را حاصل می کند رسید. توان پلی تروپیک در مطالعه سال 2009 کنگ و همکارانش [8] عدد 1.0 فرض شده است. این فرض تا نیمهی کورس با دادههای آزمایش هماهنگی خوبی دارد. اما در نیمه یدوم کورس نیرو و فشار را تا 10 درصد بیشتر از مقدار واقعی تخمین میزند. در سال 2010 رسالهای در مدلسازی ضربه گیر اولئونیوماتیک توسط محبوبه خانی [9] ارائه گردیده است. با توجه به اینکه گاز و روغن جداسازی شدهاند، با فرض آدیاباتیک بودن فرآیند، برای مدلسازی گاز از توان پلیتروپیک 1.35 استفاده شده است. در سال گذشته شبیهسازی ضربه گیر در طول اولین مرحله جمعشدن به کمک نرمافزار الاماس، توسط آرتو هینینن [10] انجام شده است. در بررسی هینینن، به جای استفاده از فرمولاسیون معمول برای محاسبه نیروی گاز، از معادلهی حالت استفاده شده است. که در آن فشار، دما و حجم گاز در کنار یکدیگر محاسبه خواهند شد. البته استفاده از معادله حالت نيز فرضياتي احتياج دارد. در این شبیهسازی از معادله حالت پنگ-رابینسون استفاده شده است. اما در این مدل نیز اثرات انتقال حرارت، اختلاط گاز و روغن و بهطورکلی رفتار حرارتی و دینامیکی سیال، به علت صفر-بعدی بودن معادلات، قابل بحث

در بررسی حاضر به کمک حل عددی جریان دوفازی داخل ضربه گیر به صحتسنجی فرضیات مرسوم در مدلسازی فرآیند گاز در ضربه گیر پرداخته می شود. فرضیاتی که به دلیل عدم شناخت جریان سیالات، دقت بسیار پایینی دارند و معمولاً با آزمون های تجربی تصحیح می شوند. شناخت جریان به کمک حل عددی آن، در انتخاب این ضرایب، بدون هزینه آزمون تجربی، مفید است. در پژوهش حاضر بر خلاف پژوهش های پیشین، برای بررسی عملکرد ضربه گیر، نیازی به پلی تروپیک فرض کردن فرآیند گاز و انتخاب توان آن وجود ندارد.

2- هندسه و شبکه محاسباتی

هندسه ی مورد بررسی در این پژوهش، هندسه ی ضربه گیری است که در داخل کشور ساخته شده است. این ضربه گیر مرجع، دارای هندسه ی معمول از ضربه گیرهای اولئونیوماتیک است. تصویر شماتیک از این هندسه در شکل 1 آورده شده است. با توجه به هدف شبیه سازی که بررسی مسیر رفت (کورس جمع شدن) است، جزئیات اوریفیس برگشت، در نظر گرفته نشده است. با تقسیم کردن میدان جریان به 9 قسمت، باید ارتباط هر قسمت با قسمت (های) مجاور توسط مرزهای مشترک تعریف شود. مطابق شکل 2 بین مو دو ناحیه مجاور یک مرز مشترک وجود دارد. تمام مرزهای مشترک به روش غیرهمدیس^۱ تعریف شدهاند. در تمامی مرزها به غیر از مرز بین نواحی 2 و 3، خصوصیت یکتاسازی^۲ اطلاعات اعمال شده است. چرا که قسمتی از خط مرزی بین ناحیه 2 و 3، مرز مشترک این نواحی است و امتداد آن دیواره ی ناحیه 2 می باشد و در طول پیشرفت پیستون، طول دیواره زیاد و طول مرز مشترک کم می شود.

1-2- شبكه محاسباتى

134

¹ Non-Conformal ² Matching



Fig. 1 Axisymmetric geometry of shock absorber

شکل 1 هندسه متقارن محوری ضربه گیر

8,9 7,8	6,8 4,6	2,3 3,4	4,5
1,2 ←			

Fig. 2 Interfaces

شکل 2 مرزهای مشترک

با سادهسازی انجام شده در هندسه، امکان استفاده از شبکه چهارضلعی^۱ ساختاریافته^۲ وجود دارد. نواحی نزدیک به دیواره و به خصوص ناحیه اطراف اوریفیس، احتیاج به دقت بیشتری در تولید شبکه محاسباتی دارند. یکی از مزیتهای شبکه چهارضلعی، امکان استفاده از روش لایهای در مش متحرک است. تصویر شبکه تولید شده در "شکل 3" دیده میشود.

دقت محاسبهی افت فشار اوریفیس، به اندازهی طولی سلول در بالادست اوریفیس بستگی زیادی دارد. برای اطمینان، اندازه طولی سلول بالادستی اوریفیس، باید تقریباً یکهزارم قطر لولهی بالادستی باشد [10]. این اندازه در شبکهی 15000 سلولی، 0.043 میلیمتر است. که با توجه به قطر پیستون (لولهی بالادستی اوریفیس) میتوانست تا 0.049 نیز افزایش یابد.

2-2- مش متحر ک

برای توصیف حرکت مرزها، از توابع کاربر^۳ استفاده می شود. برای توسعه کد این تابع، از ماکروی تعریف حرکت مرکز جرم^۴ استفاده می شود. این ماکرو در هر گام زمانی دو بار بهروز می شود و سرعت خطی و زاویه ای مرز را بهروز می کند. سرعت جمع شوندگی ضربه گیر به عنوان سرعت مرزها توسط این ماکرو به حل گر فلوئنت برگردانده می شود. در "شکل 4" مرزهایی که برای شبیه سازی حرکت پیستون داخل سیلندر به حرکت درمی آیند مشخص شده اند. علاوه بر مرزها، ناحیه شماره 6 نیز با پیستون حرکت می کند. سرعت می شود. این نمودار استخراج شده از نمودار حرکت آزمون رهایش ضربه گیر است. به این ترتیب نتایج آزمون و شبیه سازی قابل مقایسه و اعتبار سنجی خواهند بود. تابع جابجایی منتج از این تابع سرعت در "شکل 6" مشاهده می شوند.

3-حل گر



شکل 3 شبکه محاسباتی

⁴ Define CG Motion macro





Fig. 6 Exerted displacement profile

شکل 6 تابع جابجایی اعمالی

حل عددی جریان، متقارن محوری و به کمک نرمافزار انسیس فلوئنت^۵ انجام شده است. برای گسستهسازی معادلات تا حد امکان از دقت مراتب بالا استفاده شده است. از گام زمانی متغیر برای فرآیند تحلیل عددی بهره گرفته میشود. در حل عددی جریان از حل گر مبتنی بر فشار و برای کوپل حل میدان فشار و سرعت، الگوریتم سیمپل² استفاده میشود. معیار همگرایی برای معادله انرژی مقدار ⁷-10 و برای باقی معادلات ⁴-10 در نظر گرفته شده است.

1-3- شرايط مرزى

تمامی دیوارهها در شرایط عدم لغزش، دما ثابت و در دمای 300 درجه سلسیوس فرض شدهاند. نیروی ثقلی، با شتاب گرانش 9.81 متر بر مجذور ثانیه در جهت عکس حرکت پیستون اعمال شده است. فشار عملکردی برابر با فشار داخلی اولیه اوریفیس (10 بار) تنظیم میشود. سطح روغن (فاز ثانویه)

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-26

¹ Quadrilateral ² Structured

³ User Defined Function (UDF)

⁵ ANSYS FLUENT ⁶ SIMPLE

با توجه به حجم آن محاسبه مى شود. سطح آزاد روغن مطابق "شكل7"، 26.7 سانتیمتر از کف پیستون فاصله دارد. پس از مقداردهی اولیه، به سلولهای زیر سطح روغن مقدار یک برای کسر حجمی فاز ثانویه اعمال می شود.

3-2- گام زمانی

تعیین گام زمانی می تواند تأثیر مهمی در حل جریان داشته باشد. گام زمانی هم بر سرعت حل، هم بر دقت حل تأثير مي گذارد. همچنين مي تواند منجر به واگرایی حل شود. به خصوص که در حل جریان مش متحرک و جریان دوفازی نیز فعال هستند. به علت استفاده از مش متحرک و معادلات دوفازی، تعیین گام زمانی در این مسئله اهمیتی مضاعف دارد. در حل جریان، میتوان به جای تعیین گام زمانی، عدد کورانت را تعیین کرد. بهاینترتیب، در طول حل گام زمانی مناسب برای ثابت نگاه داشتن عدد کورانت توسط حل گر فلوئت انتخاب میشود. به این روش، روش گام زمانی متغیر ^۱ گفته میشود.

در این پژوهش عدد کورانت در مقدار 1 ثابت شده است. البته افزایش این عدد تا مقدار 5 نیز همگرایی را دچار مشکل نمی کند، تنها دقت حل مسئله در طول زمان کاسته می شود. به این تر تیب با بیشتر شدن سرعت پیستون، گام زمانی کوچک می شود. در بیشتر طول فرآیند تحلیل، گام زمانی از مرتبه 5-10 ثانیه است. در اوایل و اواخر حل که سرعت پیستون و بهطورکلی کلی میدان جریان کمتر است، به مرتبه بزرگی ⁴-10 ثانیه و در اواسط حل که سرعت پیستون به بیشینه خود میرسد، به مرتبه بزرگی 10⁻⁶ ثانیه نیز مىرسد. مقدار عدد كورانت دوفازى، 0.25 تعيين شده است. اين مقدار به اين معنی است که در هر گام زمانی، چهار گام زمانی محلی برای ایجاد تغییرات زمانی در حل معادلات کسر حجمی وجود دارد.

3-3- آشفتگی جریان

تحقیق جامعی به روش آزمایشگاهی، در مورد رینولدز بحرانی جریان در عبور از اوريفيس، توسط لاكشامانا و همكارانش [12] در سال 2010 انجام شده است. در پژوهش لاکشامانا تغییرات رینولدز بحرانی، با قطر نسبی اوریفیس در سه نوع هندسه اوریفیس بررسی شده است. در پژوهش حاضر سرعت سیال جریان عبوری از اوریفیس در ضربه گیر، در بحرانی ترین حالت به 140 متر بر ثانیه میرسد. قطر اوریفیس 6.85 میلیمتر و چگالی روغن 870 کیلوگرم بر متر مکعب است. لزجت سیال در بیشترین حالت (یعنی در پايينترين دما) 0.016 پاسكالثانيه است. بهاينترتيب عدد رينولدز جريان عبوری از اوریفیس، به بیش از 50 هزار و رینولدز جریان داخل پیستون به بیش از 4 هزار میرسد. با توجه به تحقیق مذکور قطعاً رینولدز بحرانی کوچکتر از این مقادیر است و در نتیجه جریان داخل ضربه گیر در بیشتر طول كورس، آشفته خواهد بود.

از بین مدلهای توربولانسی روابط انتقال در مدل کی- اومگا نتایج بهتری در نزدیکی دیواره را ارائه میدهد. چراکه اطراف دیواره نیز به کمک همین معادله مدل میشود و نیازی به استفاده از روشهایی نظیر اعمال توابع

640 cc OIL	460 cc GAS
26.7 cm	
Fig. 7 Oil and gas Volume	

شکل 7 حجم روغن و گاز

ديوار نيست، ولى همكرايي آنها نسبت به مدل كي- اپسيلون دشوارتر است و همچنین به حجم محاسبات بیشتری احتیاج دارد. اشکال مدل کی- اپسیلون عدم حساسیت به گرادیان فشار معکوس است که باعث تأخیر در پیشبینی جدایش می شود. به همین دلیل از این مدل در جریان های خارجی کمتر استفاده می شود. به غیر از جریان های خارجی نظیر عبور جریان از ایرفویل، به شرط استفاده صحیح از توابع دیواره، مدل کی- اپسیلون در گستره وسیعی از کاربردهای مهندسی یاسخ مناسبی ارائه میدهد. از جمله این کاربردها می توان به جریان های برشی، اختلاطی و جت سیال اشاره کرد. از دلایل این اقبال می توان به سادگی، پایداری و سرعت انجام محاسبات عددی در کنار دقت قابل قبول این مدل اشاره کرد.

در تمامی پژوهشهای گذشته در زمینهی شبیهسازی جریان سیال، اگر جریان آشفته فرض شده باشد، از مدل کی- اپسیلون استفاده شده است. از طرفی، اگر عامل ایجاد آشفتگی جریان اوریفیس دانسته شود، میتوان برای انتخاب مدل آشفتگی، از پژوهشهایی که در آن شبیهسازی جریان عبوری از اوریفیس انجام شده نیز یاری گرفت. یک پژوهش جامع در مورد تحلیلهای عددی جریان عبور از اوریفیس توسط اردال و اندرسون [11] در سال 1997 صورت گرفته است. این پژوهش به بررسی جنبههای مختلف تحلیل عددی جریان عبوری از اوریفیس پرداخته است. براساس این پژوهش معمولاً مدل کی- اومگا در پایین دست اوریفیس، یکی از مقادیر k یا ω را بسیار زیاد و دیگری را بسیار کم تخمین میزند. اما مدل کی- اپسیلون میتواند به خوبی روند جریان عبوری از اوریفیس را پیشبینی کند. البته به این نکته نیز اشاره شده است که به توسعه مدلهای دقیقتری (مانند مدل چن-کیم) برای بهبود نتایج نیاز است. در نتیجه بهترین مدل در دسترس مدل کی- اپسیلون است. در استفاده از تابع دیواره استاندارد دیواره، ازآنجاکه لایهمرزی در لایه کاملاً آشفته قرار دارد، برای اعتبار نتایج، شبکهبندی ناحیهی محاسباتی در نزدیک ديوار بايد به گونهاى باشد كه مقدار y^+ در اولين سلول محاسباتى بين 30 تا 300 باشد. اما چون حفظ این محدوده کار دشواری است، برای اطمینان از تابع ديواره متناسبشونده ۲ استفاده می شود.

4-3- معادلات

بهطورخلاصه، معادلات مورد استفاده برای حل جریان داخل ضربه گیر، در روابط (1) الى (5) آورده شدهاند [13] :

پيوستگى:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho \varphi \cdot \mathrm{d}V + \int \rho \varphi \left(\vec{u} - \overline{u_g} \right) \cdot \mathrm{d}\vec{A} = \int S_{\varphi} \cdot \mathrm{d}V + \int \Gamma \nabla \varphi \cdot \mathrm{d}\vec{A} \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla(P) + \nabla \cdot [\mu(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^{\mathrm{T}})] + \rho g$$
(2)
Conversion:
Conversi

$$\frac{1}{\rho_i} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho_i \alpha_i) + \nabla \cdot (\rho_i \alpha_i \vec{u}) = \sum_{j=1}^2 (\dot{m}_{ji} - \dot{m}_{ij}) \right]$$
(3)

انرژى:

(2)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\vec{u}(\rho E + P)] = \nabla \cdot \left[k_{\text{eff}}\nabla T - \sum_{j} h_{j}\vec{J} + (\bar{\bar{\tau}}_{\text{eff}}\cdot\vec{u})\right]$$
(4)

² Scalable

¹ Variable Time Stepping Method

آشفتگی:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \varepsilon -Y_M$$
 (i.i.)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 S \rho \varepsilon + C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\vartheta\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \qquad (-5)$$

به علت وجود مش متحرک در مسئلهی مورد بررسی، معادله پیوستگی در رابطهی (1) در فرم انتگرالی خود مورد استفادهی حل گر نرمافزار فلوئنت قرار گرفته است. ضرایب ثابت معادلات آشفتگی در جدول 1 آورده شدهاند.

4- استقلال از مش

با حفظ نسبت ابعاد سلولها در ناحیههای مختلف هندسه، تعداد آنها در چهار مرحله با تولید شبکه جدید، تغییر داده شده است. در درشت ترین شبکه محاسباتی حدود 11 هزار و در ریز ترین شبکه در حدود 17 هزار سلول وجود دارد. شبکههای دیگر دارای 13 هزار و 15 هزار سلول محاسباتی می باشند. هر چهار شبکه تولیدی تحت شرایط یکسان امتحان می شوند. در اینجا تغییرات پارامتر سرعت در طول محور اصلی برای بررسی انتخاب شده است. چراکه در ادامه نیروی ضربه گیر مورد اعتبار سنجی قرار می گیرد و نیرو وابسته به فشار است. به همین دلیل ترجیح داده شده است که پارامتر دیگری برای اعتبار سنجی استفاده شود.

محور اصلی، بلندترین خط موجود در هندسه است که به دلیل حضور در هر دو محفظه اولیه و ثانویه به نوعی جامعیت دارد و همچنین به دلیل عبور از اوریفیس، یکی از بیشترین گرادیانها را در طول خود تجربه خواهد کرد. تغییرات سرعت در طول محور اصلی ضربه گیر از پیستون تا انتهای سیلندر، در 0.06 ثانیه بعد از شروع حل، برای چهار شبکه محاسباتی در نمودار "شکل 8" آورده شده است. در این نمودار به غیر از شبکه محاسباتی در نمودار میتوان گفت در توزیع سرعت فاصلهی زیادی با نتایج دیگر شبکهها دارد، اختلاف یا انطباق نتایج به خوبی محسوس نیست. برای بررسی دقیق تر، دو تاحیهی ابتدایی و انتهایی جت سیال، به طور جداگانه بررسی خواهند شد. در "شکل 9" توزیع سرعت در ثانیه ۵.00 و محدوده ابتدایی و انتهایی جت سیال مشخص شدهاند. محدودهی ابتدایی سیال، ناحیه شماره 1 و محدوده انتهایی جت، ناحیه شمارهی 2 نامیده شده است. علت انتخاب این دو ناحیه اختلاف محسوس تر نتایج در نمودار "شکل 8" میباشد. این اختلافات، نشان از

جدول 1 ضرایب معادلات آشفتگی کی- اپسیلون [13]

Table 1 Coefficient of turbulence k-ε equation [13]		
	ضريب	مقدار
	σ_k	1.0
	σ_{ϵ}	1.2
	$C_{1\varepsilon}$	1.44
	<i>C</i> ₂	1.9
	C1	$\operatorname{Max}\left[0.43, \frac{1}{1 + \frac{5\varepsilon}{kS}}\right]$



سامان حسینزادہ و بیژن محمدی



Fig. 9 Velocity contour at *t* = 0.06s (m/s) شکل **9** توزیع سرعت در *t* = 0.06s (متر بر ثانیه)

از اوریفیس و ابتدای جت (بین 17 تا 22 سانتیمتر) بیشترین سرعت را دارد. برای بررسی دقیق تر در این ناحیه تغییرات سرعت در نمودار "شکل10" آورده شده است. تطابق نتایج شبکه 15 و 17 هزار سلولی و اختلاف نتایج با دیگر شبکهها در این نمودار مشهود است. اگر پاسخ شبکه 17 هزار سلولی به عنوان مبنا قرار گیرد، بیشینه خطای پیش بینی سرعت شبکههای 77، 13 و 15 هزار سلولی در ناحیه ابتدای جت، به تر تیب 6.5، 3.4 و 0.7 درصد است.

در مورد ناحیه انتهایی جت سیال، بیشینه خطای پیشبینی سرعت شبکههای 11، 13 و 15 هزار سلولی، به ترتیب 25.5، 16.4 و 3.6 درصد است. برای بررسی دقیق تر، توزیع سرعت در انتهای جت سیال (بین 27 تا 36 سانتی متر) برای هر چهار شبکه در نمودار "شکل 11" آورده شده است. در ناحیه انتهایی جت سیال، اختلاف نتایج نسبت به ناحیه ابتدایی آن مشهودتر است. چرا که در نحوهی تولید شبکه محاسباتی، نواحی اطراف اوریفیس با دقت بیشتری گسسته سازی شدهاند.

در نتیجه حتی در شبکههای 11 و 13 هزار سلولی اختلاف نتایج در ابتدای جت با شبکه 17 هزار سلولی کمتر از 1 درصد است. اما در انتهای جت این اختلاف به 25 درصد رسیده است. با توجه به اختلاف کم (کمتر از 4 درصد) و تطابق مناسب نتایج شبکهی 15 هزار سلولی با شبکهی 17 هزار سلولی، دقت شبکهی 15 هزار سلولی کافی دانسته شده است و از این شبکه برای تحلیل اصلی استفاده شده است.

5- اعتبارسنجي

برای سنجش اعتبار مدلسازی، از دادههای آزمون رهایش از ارتفاع استفاده شده است. دادههای این آزمایش توسط مرکز طراحی هواگرد شرکت صنایع



Fig. 10 Velocity profile for 4 grids in jet zone no.1





 Fig. 11 Velocity profile for 4 grids in jet zone no.2

 شكل 11 توزيع سرعت چهار شبكه در ناحيه شماره 2 از جت

هواپیماسازی ایران (هسا) تأمین شده است. دادههای مربوط به نیرو و کورس ضربه گیر در حدود هر 0.000 ثانیه ثبت شدهاند. نمودار نیروی ضربه گیر در مسیر رفت (فشردهسازی ضربه گیر) با نیروی شبیه سازی شده در "شکل 12" مقایسه شده است. در این شکل تنها نمودار نیروی کل مدل سازی شده، بدون نیروهای تشکیل دهندهی آن، یعنی نیروی هیدرولیک و نیوماتیک، آورده شدهاند.

با توجه به "شکل 12"، مدلسازی در پیشبینی روند تغییرات نیرو به خوبی عمل کرده است. اما در مرحله شتاب گیری پیستون، از شروع کورس تا حدود 6 سانتیمتر فرورفتگی، نیروی مدل شده، مقدار کمتری از نیروی تجربی دارد. این اختلاف میتواند دلایل مختلفی داشته باشد. مدل نکردن نیروی اصطکاک قسمتی از کاهش نیرو نسبت به تجربه را سبب میشود. همچنین مدل نکردن دقیق اوریفیس برگشت میتواند به پیستون اجازه بیشتری برای عبور راحت ر درون سیلندر بدهد. البته در مسیر رفت، مساحت اوریفیس برگشت به قدری بزرگ میشود که تأثیر چندانی بر حرکت پیستون نمی گذارد و مقاومت اصلی برای حرکت، اوریفیس است. اما در هر حال، در واقعیت هم مساحت اوریفیس برگشتی نسبت به مدل کمتر است و هم مسیر



شکل 12 اعتبارسنجی نیروی ضربه *گ*یر

عبور جریان با پیچ و خم بیشتری همراه است. که هر دو مورد میتواند عبور روغن به محفظه برگشتی در مسیر رفت را کمی دشوارتر کنند. که نتیجهی آن افزایش نیروی ضربهگیر است.

فرآيند پلي تروپيک گاز

برای محاسبهی نیرو جاذب فشار محفظهها نقشی اساسی دارند. اگر گاز داخل محفظه کامل فرض شود و فرآیند پلیتروپیک، رابطهی (6) همواره برقرار است [1].

$$\frac{P_{\text{Air}}(x)}{P_{\text{Air}}^{1}} = \left(\frac{V_{\text{Air}}^{1}}{V_{\text{Air}}(x)}\right)^{n} \tag{6}$$

با توجه به اینکه تغییر حجم از ضرب جابجایی پیستون در مساحت آن به دست آید، رابطه فشار در هر لحظه به صورت رابطهی (7) خواهد شد.

$$P_{\rm Air}(x) = P_{\rm Air}^{1} \left(\frac{V_{\rm Air}^{1}}{V_{\rm Air}^{1} - xA_{\rm Air}} \right)^{n} \tag{7}$$

در صورتی که یک جاذب به صورت آرام یا استایک^۱ تحت بارگذاری قرار گیرد، عبور سیال از اوریفیس به آرامی صورت می گیرد و سیال فرصت کافی برای همفشار نگاه داشتن تقریبی تمام نقاطش دارد. در این صورت اختلاف فشار در دو طرف صفحه یاوریفیس به وجود نخواهد آمد. در نتیجه نیرویی حاصل از اختلاف فشار سیال و گاز ایجاد نمی شود. با توجه به روابط تنها عامل ایجاد نیرو در جاذب، فشار محفظه ی گاز خواهد بود. در نتیجه در بارگذاری آرام، نمودار نیرو-کورس منطبق بر رفتار گاز داخل محفظه شکل خواهد گرفت.

اگر بارگذاری به صورت آرام صورت گیرد، چه در افزایش بار و چه در کاهش آن، تغییرات بار بر حسب کورس منطبق بر این منحنی خواهد بود. اما در عمل، به علت آرام نبودن اِعمال و برداشت بار، منحنی رفت و برگشت، هیچ کدام بر منحنی گاز منطبق نیستند. عدم انطباق منحنی رفت و برگشت (بارگذاری و باربردای) حاصل افت انرژی در عبور سیال از اوریفیسهای اصلی و بازگشتی است.

¹ Static

همان طور که به ارتباط بین فشار و حجم برای گاز اشاره شد، برای توصیف عملکرد گاز در یک جاذب، لازم است انتخاب صحیحی برای توان پلی تروپیک (n) صورت گیرد. فرض کامل بودن گاز (هوا یا نیتروژن) در فشار بالای داخل سیلندر و با وجود فشار بالایی که در محفظه وجود دارد، فرض محالی است.

توان پلی تروپیک فرآیند گاز، می توان به عوامل مختلفی مانند فشار گاز، نوع گاز، نرخ انتقال حرارت، آزاد یا بسته بودن سطح گاز و روغن، دما و ضریب هدایت حرارتی روغن، هندسه داخلی ضربه گیر، جنس دیوارهها، سرعت و شرایط اعمال بار وابسته باشد. در فصل قبل بیان شد که گاز در یک جاذب گازی-روغنی، حکم یک فنر را برای جاذب خواهد داشت. یکی از مواردی که از فرآیند گاز و به تبع آن، توان پلی تروپیک فرآیند، متأثر خواهد بود، سفتی فنر گازی است. هرچه فرآیند دارای توان پلی تروپیک بزرگ تری باشد، منحنی فشار بر حسب حجم آن شیب بیشتری دارد. در نتیجه گاز در یک جاذب اگر به جای فرآیند هردما، فرآیند آدیاباتیک را طی کند، سفتی بیشتری به مجموعه خواهد داد. توان پلی تروپیک به عنوان ضریب تجربی و تعیین کننده در فرآیند تراکم گاز و نیروی جاذب معرفی شدند.

7- بررسی نتایج

اگر قرار باشد مدلسازی به روش سنتی انجام شود، پلی تروپیک فرض کردن فرآیند گاز، اجتناب ناپذیر است. اما توان پلی تروپیک در طول فرآیند به دلیل اختلاط روغن و انتقال حرارت و همچنین به دلیل تغییر سرعت تراکم، تغییر می کند. برای صحت سنجی فرضیات سنتی در مورد توان پلی تروپیک و فرآیند گاز، در این بخش ابتدا به بررسی این تغییرات و سپس به بررسی دلایل آن پرداخته می شود. اصلی ترین دلایل اختلاط گاز و روغن، انتقال حرارت بین آنها و توزیع غیریکنواخت فشار در محفظه ثانویه می باشند.

7-1- رفتار گاز

پلی تروپیک فرض کردن فرآیند گاز، راهی برای توصیف صفر بعدی رفتار گاز در روش سنتی است. در نتیجه در مدل سازی این رساله، توان پلی تروپیک اهمیتی ندارد. اما با استخراج دو متغیر از سه متغیرِ دما، فشار و حجم، می توان توان پلی تروپیک را در هر لحظه از کورس محاسبه کرد. برای این محاسبه، تغییرات حجم با استفاده از حرکت پیستون و تغییرات فشار در نقطه انتهایی محفظه ثانویه استفاده شده است. در رابطهی (8)، نحوهی استخراج توان پلی تروپیک ارائه شده است.

$$n = \frac{\ln(\frac{P_{\rm Air}}{P_{\rm Air}^1})}{\ln(\frac{V_{\rm Air}}{V_{\rm Air}})}$$
(8)

که در آن بالانویس یک (۱) نشان از مقادیر اولیه متغیرها در شروع کورس دارد. استخراج توان پلی تروپیک در هر گام زمانی و رسم آن برحسب کورس، نمودار "شکل 13" را حاصل می کند. در مورد علت تغییر توان پلی تروپیک، باید انتقال حرارت و توزیع دما مورد بررسی قرار بگیرد. اما به طور کلی می توان توان پلی تروپیک را به جنس و دمای دیوارهها، سرعت تراکم و اختلاط آن با انتقال حرارت از گاز به محیط آن داشته باشند. تراکم سریعتر این فرصت را از گاز برای انتقال حرارت به بیرون می گیرد. به همین دلیل توان پلی تروپیک بزرگ تر و گاز فنر سفت تری خواهد بود. از طرفی گاز متراکم که افزایش دما داشته است، در اختلاط با روغن دمای خود را از دست می دهد و این باعث کاهش توان پلی تروپیک می شود.



Fig. 13 Polytropic exponent change during the stroke شکل 13 تغییر توان پلی تروپیک در طول کورس

تغییرات توان پلی تروپیک در طول کورس، دقت نتایج تحقیقات حسینی و همکارانش [6]، کروگر [7] و کنگ و همکارانش [8] و دیگر تحقیقاتی را که در آنها توان پلی تروپیک ثابت فرض شده است، زیر سؤال میبرد. افزایش توان پلی تروپیک در ابتدای کورس و کاهش آن پس از اختلاط، با نتایج آزمایشهای واهی [4] تطابق دارد. در آزمایش وی نمودار فرآیند گاز بین دو نمودار پلی تروپیک با توانهای 1 و 1.4 قرار گرفته است که در ابتدای مسیر به سمت توان 1.4 و در انتهای مسیر به سمت نمودار با توان پلی تروپیک 1 نزدیک شده است. پژوهش جعفری و مهدیه [14] در سال 1392 نشان داده است که افزایش توان پلی تروپیک در نیمه دوم کورس، می تواند عملکرد ارتعاشاتی ضربه گیر را تا 18 درصد بهبود بخشد.

اما با توجه به نتیجهی حاصلشده در بررسی حاضر، نهتنها توان پلی تروپیک در طول کورس افزایش نمی یابد، بلکه در نیمه دوم آن کاهش نیز خواهد داشت. بنابراین فرض کنترل فرآیند گاز و افزایش توان پلی تروپیک در اواسط کورس، در ضربه گیرهای غیرفعال امکان پذیر نیست.

اگر قرار باشد مدلسازی به روش سنتی انجام شود، بهتر است توان پلی تروپیک متغیر در طول کورس به معادلات اعمال شود. این باعث افزایش دقت محاسبات و تطابق بهتر با نتایج تجربی خواهد شد. اما افزایش مضاعف پیچیدگی معادلات سنتی را نیز در پی دارد. با توجه به نحوه اختلاط گاز و روغن و توزیع غیریکنواخت فشار و دما در محفظه ثانویه، روش دقیق تر برای استخراج توان پلی تروپیک استفاده از فشار و دمای فاز گاز است.

7-2- توزيع فشار در محفظه ثانويه

هم در اندازه گیری های تجربی و هم در مدل سازی سنتی فرض بر یکنواخت بودن فشار در هر محفظه است. در استفاده از روش ارائه شده در این رساله و تحلیل عددی جریان داخل ضربه گیر، احتیاجی به مفروض قرار دادن یکنواختی فشار در محفظه ها نیست. چرا که اطلاعات از جمله فشار در تمام نقاط میدان در دسترس است. در نمودار "شکل 14" تغییر فشار دو نقطه از محفظه ثانویه در طول کورس رسم شده است. یک نقطه دقیقاً در پشت دیواره اوریفیس، و نقطه دیگر در انتهای محفظه قرار دارد. 3

2

1

0

0

x 100000

Pressure Dif. (Pa)



Fig. 16 Piston velocity effect on pressure difference in secondary chamber (Accelerating)

شكل 16 اثر سرعت پيستون بر اختلاف فشار محفظه ثانويه (شتابگيرى)



شكل 17 اثر سرعت پيستون بر اختلاف فشار محفظه ثانويه (كاهش شتاب)

3-7- نحوه اختلاط گاز و روغن

یکی از عواملی که در بیشتر مدلسازیهای ضربه گیر به روش سنتی به آن اشاره شده است، تأثیر اختلاط یا عدم اختلاط گاز و روغن بر عملکرد ضربه گیر است. با افزایش فشار گاز در طول کورس، دمای آن بالا می ود، اما اختلاط گاز و روغن باعث انتقال حرارت به روغن و کاهش دمای گاز می شود. رفتار گاز چه در روش سنتی با معادله پلی تروپیک و چه در روش حاضر با معادله حالت ردلیچ-کنگ-سو، به انتقال حرارت آنها وابسته است. نحوهی اختلاط دوفازی می تواند در پیش بینی مقدار انتقال حرارت و گستردگی آن روشن گر باشد. چرا که در استفاده از روشهای سنتی، انتخاب توان پلی تروپیک، گرچه با حدس آغاز و با آزمایش قطعی می شود، اما نحوهی اختلاط دو فاز می توان به حدس اولیه کمک کند. توزیع کسر حجمی یک فاز در طول زمان حل، "شکل 18"، می تواند نحوه اختلاط را روشن کند.

شناخت نحوه اختلاط گاز و روغن، در انتخاب محل قرارگیری حس گرها در آزمایشها نیز میتواند مؤثر باشد. به عنوان مثال اگر قرار بر نصب حس گر دما برای اندازه گیر دمای روغن بعد از عبور از اوریفیس باشد، این حس گر باید در طول فرآیند با روغن در تماس باشد. توزیع کسر حجمی در "شکل 18" نشان از محصور شدن مقداری از گاز در انتهای محفظهی ثانویه دارد. در



شکل 14 تغییر فشار محفظه ثانویه در طول کورس

با توجه به نمودار "شکل 14" اختلاف بین فشارهای ابتدا و انتهای محفظه ثانویه در طول کورس متغیر است. با رسم این اختلاف برحسب کورس، نمودار "شکل 15" حاصل شده است. اختلاف فشار در محفظه ثانوی، به 2.5 بار رسیده است. اگرچه در "شکل 15"، رابطه اختلاف فشار داخل محفظه یا کورس به نظر معنادار است، اما آنچه باعث ایجاد این اختلاف میشود، میزان فرورفتگی پیستون در سیلندر نیست. بلکه سرعت جمعشدن ضربه گیر، عامل ایجاد اختلاف است. چرا که در سرعت بالاتر، ناحیه جدایش ایجاد شده در پشت اوریفیس بزرگتر و قویتر است. همچنین جت قویتر سیال، بر فشار دینامیک میافزاید و از فشار استاتیک میکاهد رابطه اختلاف فشار ابتدا و انتهای محفظه در طول کورس، با سرعت پیستون، در نمودارهای "شکل 16

یک نمودار مربوط به نیمه ابتدایی کورس، یعنی مرحله شتابگیری پیستون و یک نمودار مربوط به مرحله کاهش شتاب آن است. هر دو نمودار را میتوان با چندجملهای درجه دو تخمین زد. اگرچه این تخمین در مدلسازی به روش حاضر نیاز نیست ولی در تشکیل مدلهای سنتی دقیقتر در آینده میتواند به محققان کمک کند. البته رابطه درجه دو با سرعت، باعث افزایش بیش از پیش پیچیدگی در معادلات توصیف کننده ی رفتار ضربه گیر خواهد شد.



Fig. 15 Pressure difference in secondary chamber during stroke شکل 15 اختلاف فشار در محفظه ثانویه در طول کورس

نتیجه می توان از خشک ماندن این نقطه در طول آزمون رهایش مطمئن بود. اگر سطح روغن کم باشد، ناحیه چرخشی ایجاد شده پشت اوریفیس در اثر جت قوی سیال، قدرت این را خواهد داشت که این ناحیه را از روغن تخلیه کند. البته با ارتفاع 26.7 سانتیمتر برای سطح روغن، این پدیده رخ نداده است.

پژوهش دیگر جعفری و مهدیه [15] در ۱394، برای بررسی تأثیر استفاده از سیال هوشمند در ضربه گیر، توان پلی تروپیک فرآیند گاز، با استفاده از جداکننده عدد 1.35 و در صورت اختلاط گاز و روغن، عدد 1.1 در نظر گرفته شده است. اما در پژوهش حاضر نشان داده شد که در صورت اختلاط گاز و روغن، فرض کردن یک عدد ثابت برای توان پلی تروپیک، دور از واقعیت است. یکی دیگر از پدیده های قابل بررسی با توزیع کسر حجمی، انتقال احتمالی گاز به محفظه برگشتی است. همان طور که در "شکل 18" مشاهده می شود، در مسیر رفت مقداری از گاز از اوریفیس برگشتی عبور و به محفظه برگشتی وارد می شود. حضور گاز در محفظه برگشتی، هنگام برگشت عملکرد اوریفیس، برگشتی در استهلاک انرژی را تحت تأثیر قرار می دهد. عبور گاز از اوریفیس، مقاومت و استهلاکی به همراه ندارد. این پدیده نامطلوب به اصطلاح کف کردن¹ نامیده می شود.

7-4- توزيع دما

تأثیر دمای گاز بر روی فرآیند طی شده توسط آن توضیح داده شد. در "شکل 19" توزیع دما در میدان محاسباتی ارائه شده است. از مقایسه توزیع دما با توزیع کسر حجمی در "شکل 18"، میتوان در مورد دمای گاز نتیجه گرفت. در انتهای کورس، گاز محصورشده در انتهای محفظه، به دمای 350 کلوین میرسد. این به معنای 50 درجه افزایش دما در گاز است. اما کل حجم گاز فقط در انتهای محفظه محصور نشده است.

در نقاط دیگر محفظه و حتی محفظه برگشتی نیز حبابهای گاز وجود دارند. اما توزیع دما، دمای حبابهای گاز را بسیار کمتر از 350 کلوین نشان میدهند. این به معنای خنک شدن کموبیش حبابهای معلق گاز در روغن است. حبابهای کوچکتر کاهش دمای بیشتری داشتهاند. اما اختلاف دمای حبابهای بزرگتر با روغن حفظ شده است.



Fig. 18 Secondary phase (oil) volume fraction contour during stroke شکل 18 توزیع کسر حجمی فاز دوم (روغن) در طول کورس

در مدل سازی حاضر، در انتهای کورس، دمای مرکز بزرگترین حباب گاز در روغن، در اثر تراکم 50 درجه افزایش داشته است. اما حبابهای کوچکتر به انتقال حرارت بیشتر به روغن، دمای پایینتری دارند. حتی برخی از حبابهای گاز، با روغن همدما شدهاند. نحوه اختلاط دو فاز گاز و روغن، در حگونگی تشکیل حیابها مؤث است. هر تغیید در شکل حیان، به واسطهی

چگونگی تشکیل حبابها مؤثر است. هر تغییر در شکل جریان، به واسطهی تغییر هندسه و ابعاد اوریفیس یا سطح روغن یا سرعت پیستون، میتواند نحوه اختلاط دوفازی را تغییر دهد. در شبیهسازی ضربهگیر پدیدهی کف کردن یا فومینگ در جریان سیال داخل ضربه گیر مشاهده گردید که میتواند



295 301 307 312 318 324 330 336 341 347 Fig. 19 Temperature contour during stroke (K)

شكل 19 توزيع دما در طول كورس (كلوين)

8- جمع بندی نتایج

شبیهسازی جمعشدن ضربه گیر گازی روغنی به روش حل عددی جریان با فرض تقارن محوری و به صورت دوفازی، با یک فاز تراکم پذیر و در شرایط آشفته انجام گرفته است. نحوه تغییرات و بیشینه نیرو ضربه گیر و همچنین طول کورس در شبیه سازی عددی جریان تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی دارد. در نواحی ابتدایی و انتهایی جت سیال عبوری از اوریفیس، بیشترین اثر پذیری از ابعاد سلول های شبکه، در نتایج دیده می شود. این موضوع نشان از اهمیت ابعاد سلول ها در این دو ناحیه دارد.

فرض یکنواخت بودن فشار در محفظه ثانویه، از فرضیات مرسوم در مدلسازی سنتی ضربه گیرهای گازی روغنی است. در پژوهش حاضر نشان داده شده است که اختلاف زیادی بین فشار ابتدا و انتهای محفظه ثانویه، وجود دارد. این اختلاف تابعیتی درجه دو از سرعت پیستون در طول کورس دارد.

اگر ضربهگیر مورد بررسی در شرایط کاملاً مشابه، با روش سنتی مدل شود، برای دقت کامل در توصیف فرآیند گاز، باید توان پلی تروپیکی متغیر استفاده شود. این توان در ابتدای کورس از مقدار 1.3 به مقدار 1.4 می سد و با اختلاط گاز و روغن شروع به کاهش می کند. در مدل این رساله تغییرات توان پلی تروپیک از درجه چهارم کورس می باشد. اما این رابطه درجه 4 از کورس، نمی تواند در شرایط دیگر هم بر رفتار گاز حاکم باشد. چراکه هر تغییر در شرایط، می تواند شکل جریان و نحوه اختلاط گاز و روغن را عوض کند. در نتیجه انتقال حرارت از گاز به روغن و دیوارهها تحت تأثیر قرار گرفته و به تبع فرآیند طی شده توسط گاز تغییر می کند.

¹ Foaming

بر عملکرد ضربه گیر به خصوص در کورس برگشت مؤثر باشد.

- (m²) سطح مقطع A
- g نیروی گرانش (m.s⁻²)
- (m²s⁻³) نرخ تولید انرژی آشفتگی (*B*
- (Wm⁻²K⁻¹) ضريب انتقال حرارت هدايتي k
 - $(m^{2}s^{-3})$ نرخ انرژی جنبشی آشفتگی k
 - n توان پليتروپيک فرآيند گاز
 - P فشار (kgm⁻¹s⁻²)
 - - Re عدد رينولدز
 - t زمان (s)
 - حجم (m³)
 - (m) کورس (x
 - (kgm⁻¹s⁻⁴) نرخ تولید انرژی آشفتگی (kgm⁻¹s⁻⁴)

علايم يوناني

- (kgm⁻³) چگالی (β
- (kgm⁻¹s⁻¹) لزجت دینامیکی (μ
- نرخ اضمحلال انرژی آشفتگی (m²s⁻³)
- $(m^2 s^{-3})$ نرخ اضمحلال ویژه انرژی آشفتگی ω
 - (kgm⁻¹s⁻¹) لزجت سينماتيک ν
 - ر (Nm⁻²) تنش برشی τ

زيرنويسها

- Air محفظه گاز
 - مؤثر eff
- مرز متحرک g
- M فاز تراکم پذیر
 - t توربولانس
- ε اضمحلال انرژی جنبشی آشفتگی
 - k انرژی جنبشی آشفتگی

10- تقدير و تشكر

نگارندگان بر خود لازم میدانند از مرکز طراحی هواگرد شرکت صنایع هواپیماسازی ایران (هسا)، به خاطر حمایتهای بیدریغشان از این پژوهش تشکر و قدردانی نمایند.

11- مراجع

- [1] N. Currey, Aircraft Landing Gear Design: Principles and Practices, Georgia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp. 69-70, 1988
- B. Milwitzky, F. Cook, Analysis of Landing Gear Behaviour, National [2] Advisory Committee for Aeronautics, NACA Report 5411, 1953.
- [3] J. Walls, Investigation of the Air-Compression Process during Drop Test of An Oleo-Pneumatic Landing Gear, National Advisory Committee for Aeronautics, NACA Report 2477, 1954.
- M. Wahi, Oil compressibility and polytropic air compression analysis for [4] oleopneumatic shock strut, Journal of Aircraft, Vol. 13, No. 7, pp. 527-530, 1976.
- [5] J. Daniels, A method for landing gear modeling and simulation with experimental validation, NASA Langley Research Center, Virginia, 1996.
- [6] A. Hosseini, H. Pouriavi, R. Moshkani, S. Khadem, Theorical and experimental determination of oleo-pneumatic shock absorber stiffness, Proceeding of The 7th International Conference of Iran Aerospace Community, Tehran, February 19-21, 2007. (in Persian فارسى)
- [7] W. Kruger, Integrated Design Process for the Development of Semi-Active Landing Gears for Transport Aircraft, Stuttgart University, Ph.D. Thesis, 2000.
- [8] J. Kong, J. D. Lee, Y. S. Han, O. S. Ahn, Drop impact analysis of smart unmanned aerial vehicle (SUAV) landing gear and comparison with experimental data, *Mat.-wiss.u. Werkstofftech*, Vol. 40, No. 3, pp. 192-197, 2009.
- [9] M. Khani, Magneto-Rheological (MR) Damper for Landing Gear System, Concordia University, Montreal, pp. 38-41, 2010.
- [10] A. Heininen, Modeling and Simulation of an Aircraft Main Landing Gear Shock Absorber, Tampere University of Technology, Ph.D. Thesis, 2016.
- [11] A. Erdal, H. I. Anderson, Numerical aspect of flow computation through orifices, Flow Measurement Instrument, Vol. 8, No. 1, pp. 27-37, 1997.
- [12] N. S. Lakshamana, K. Sridharan, S. H. Alvi, Critical reymolds number for orifice and nozzle flow in pipe, Hydraulic Research, Vol. 15, No. 2, pp. 167-178, 2010.
- [13] ANSYS Fluent, Theory Guide, ANSYS, 2015.
- [14] A. Jafari, S. Borujeni, To obtain the dynamic response of the aircraft at the moment of landing, Proceedinf of The 3rd International Conference of Acoustic and Vibration, Tehran, December 25-26, 2013. (in Persian فارسى)
- [15] A. Jafari, S. Borujeni, Conceptual design of single-chamber oleo-pneumatic shoch absorber in landing gear, Proceeding of The 1st Conference on New Findings in Aerospace and Related Sciences, Tehran, September 23-25, فارسى 2015. (in Persian)

9- فهرست علايم