



Original Article

Numerical simulation of supersonic natural gas flow passing through a Laval nozzle to assess the possibility of Dehumidification

Neda Zareei¹, Ramin Kouhikamali^{*2}, Mohsen Davazdah Emami², Seyed Amir Tayefi² and Navid Sharifi¹

1- Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan

2- Faculty of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology

Abstract: The Supersonic separator is a convergent-divergent nozzle with condensation and phase change at supersonic speeds. In this separator, the flow is converted from subsonic to supersonic, and this change in the flow regime leads to a sharp decrease in temperature and the formation of a liquid within the gas. Fluid flow, mass and heat transfer in supersonic separators are poorly understood due to the complex interaction of supersonic flow and phase change. In this study, numerical modeling of water vapor condensation has been carried out to investigate the fluid flow in the supersonic separator. The mixture method is used to simulate the multiphase flow and the implemented turbulence model is the standard k- ϵ . The Lee phase change and UDF mathematical models have been used to accurately predict the spontaneous condensation phenomenon. The problem is simulated in two-dimensional mode, the inlet and outlet pressures and the inlet temperatures are assumed as boundary conditions, and the nozzle wall is adiabatic. The results obtained from the numerical model are in good agreement with the experimental data. Based on the analysis, the phase change of water from vapor to liquid and the dehumidification, which was the main objective of this research, has been successfully achieved. Also, with an increase of 6.8% in the inlet temperature, the liquid mass fraction decreased by more than 2%. With an increase of about 12.5% in the inlet pressure under the same conditions, the maximum liquid mass fraction increased by more than 19%. Considering natural gas as the inlet fluid of the separator, all water vapor is converted to liquid and the separation efficiency is very high.

Keywords: supersonic separators, dehumidification, numerical simulation, laval nozzle.

Received: Mar. 5, 2025; Revised: May. 24, 2025; Accepted: Jun. 1, 2025; Published Online: Jun. 24, 2025.

* Corresponding Author : r.kouhikamali@iut.ac.ir

How to Cite: Zareei Neda, Kouhikamali Ramin, Davazdah Emami Mohsen and Tayefi Seyed Amir, Numerical simulation of supersonic natural gas flow passing through a laval nozzle to assess the possibility of dehumidification, Journal of Computational Methods in Engineering; 2025, 44(1), 85-102; DOI: 10.47176/jcme.44.1.1046

Copyright © 2025 Isfahan University of Technology, Published by Isfahan University of Technology press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.





شبیه‌سازی عددی جریان مافوق‌صوت گاز طبیعی گذرنده از یک لاول نازل به منظور امکان‌سنجی رطوبت‌گیری از آن

ندا زارعی^۱، رامین کوهی کمالی^{۲*}، محسن دوازده امامی^۲، سید امیر طایفی^۲ و نوید شریفی^۱

۱. دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان

۲. دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده - جداکننده‌ی مافوق‌صوت یک نازل همگرا-واگرا است که میعان و تغییر فاز در سرعت‌های بالاتر از صوت از خصوصیات عملکرد این دستگاه است. در این جداکننده جریان از حالت مادون‌صوت به مافوق‌صوت تبدیل شده و این تغییر رژیم جریان منجر به کاهش شدید دما و تشکیل مایع درون گاز می‌گردد. جریان سیال، انتقال جرم و حرارت در جداکننده‌های مافوق‌صوت به دلیل برهم‌کنش پیچیده جریان مافوق‌صوت و تغییر فاز به خوبی درک نشده‌است. در این پژوهش مدل‌سازی عددی چگالش بخار آب با هدف بررسی جریان سیال در جداکننده‌ی مافوق‌صوت انجام شده‌است. برای شبیه‌سازی جریان چندفازی از روش مخلوط بهره گرفته و مدل آشفتگی مورد استفاده، k-ε استاندارد است. از مدل ریاضی تغییر فاز لی برای پیش‌بینی دقیق پدیده‌ی چگالش خودبه‌خودی استفاده شده‌است. مسئله در حالت دوبعدی شبیه‌سازی و فشار ورودی و خروجی و دمای ورودی به عنوان شرایط مرزی و دیواره‌ی نازل آدیاباتیک فرض شده‌است. نتایج حاصل شده از مدل عددی به خوبی با داده‌های تجربی سازگار است. بر اساس تحلیل‌های انجام شده، تغییر فاز آب از بخار به مایع و رطوبت‌زدایی که هدف اصلی این پژوهش بوده‌است، با موفقیت حاصل شده‌است. هم‌چنین با ۶/۸٪ افزایش دمای ورودی، کسر جرمی مایع بیش از ۲٪ کاهش یافت. با حدود ۱۲/۵٪ افزایش فشار ورودی در شرایط یکسان، بیشترین کسر جرمی مایع بیش از ۱۹٪ افزایش یافت. با در نظر گرفتن گاز طبیعی به عنوان سیال ورودی جداکننده کلیه‌ی بخار آب به مایع تبدیل شده و راندمان جداسازی بسیار بالا حاصل شده‌است.

واژه‌های کلیدی: جداکننده‌های مافوق‌صوت - رطوبت‌گیری - شبیه‌سازی عددی - لاول نازل.

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۵، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱، اولین انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۳

* نویسنده مسئول، رایانامه: r.kouhikamali@iut.ac.ir

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۳

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد حیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج



در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

فهرست علائم

k	هر یک از اجزای مخلوط	$\hat{k}_{eff}$	ضریب هدایت حرارتی موثر
P'_{sat}	فشار اشباع	R	ثابت جهانی گازها
T'_{sat}	دما اشباع	v	فازبخار
$\bar{V}_m$	سرعت مخلوط	V_v	سرعت فاز بخار
α_k	کسر حجمی هر یک از اجزای مخلوط	α_v	کسر حجمی بخار
α_l	کسر حجمی مایع	β	بخشی از مولکول‌های بخار است که به سطح مایع رفته و توسط این سطح جذب می‌شوند
$\hat{p}^*$	فشار جزئی بخار	$\hat{m}_{lv} - \hat{m}_{vl}$	نرخ انتقال جرم ناشی از میعان و تبخیر
μ_m	ویسکوزیته‌ی مخلوط	$\hat{p}_l$	چگالی مایع
$\hat{p}_m$	چگالی مخلوط	$\hat{p}_v$	چگالی بخار

۱- مقدمه

گاز طبیعی اغلب شامل متان و مقدار کمی از گازهای اتان، پروپان، بوتان و هیدروکربن‌های سنگین‌تر است. همراه این مواد ناخالصی‌هایی وجود دارد که باید جدا شوند. مهم‌تر این ناخالصی‌ها سولفید هیدروژن، کربن‌دی‌اکسید و آب است. بخار آب یکی از معمول‌ترین ناخالصی‌ها در جریان گاز طبیعی است که باید از آن جدا شود. بخار آب زمانی که در خطوط انتقال گاز به مایع یا جامد تبدیل می‌گردد بسیار نامطلوب است. آب در حالت مایع باعث خوردگی می‌شود و اگر به هیدرات‌های جامد تبدیل شود امکان دارد لوله‌های انتقال را مسدود کند. گاز طبیعی استخراج شده با مقداری آب به صورت اشباع همراه است. آب با مولکول‌های متان، اتان و پروپان ترکیب شده و هیدرات تولید می‌شود. هیدرات گازی شبیه به برف است، سبک، با بافت متخلخل و در دماهای بالاتر از صفر درجه سلسیوس شکل می‌گیرد. به منظور جداسازی گاز از مایع، جداکننده‌ها طراحی شده‌اند که رایج‌ترین نوع جداکننده‌ها اغلب به شکل تانک‌های بسیار بزرگ است و طی مراحل ذرات گاز را از آب جدا می‌سازند. تجهیزات دیگری که اکنون در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد، شیر فشارشکن و توربین‌های انبساطی است که

عملکرد شیر فشارشکن در فرآیند اختناق، باعث کاهش فشار گاز به فشار مطلوب می‌شود. با کاهش فشار، فشار ناشی از اثر فشار شکننده هم کاهش می‌یابد، در نهایت قطره‌های مایع درون گاز ظاهر شده و امکان جداسازی مایع از گاز فراهم می‌شود. توربین‌های انبساطی تجهیزات دوار پیشرفته‌ای می‌باشند که با انبساط گاز پرفشار، انرژی فشاری جریان به کار مکانیکی تبدیل می‌شود. امروزه در صنایع نفت و گاز دنیا هدف این است که دستگاه‌های جداکننده‌ی گاز - مایع با واحد هایی که قادر به نصب مستقیم در خط لوله می‌باشند، جایگزین گردد. جداکننده‌ی مافوق صوت به عنوان یکی از جدیدترین نوع دستگاه‌های جداسازی در بسیاری از زمینه ها مورد توجه قرار گرفته است. اساس کار جداکننده‌های مافوق صوت به این صورت است که ابتدا جریان گاز پرفشار وارد این دستگاه شده و همچنان که سیال مادون صوت درون قسمت همگرای نازل پیش میرود، سرعت آن افزایش و فشار آن کاهش می‌یابد تا در گلوگاه نازل سرعت سیال به سرعت صوت می‌رسد. پس از گلوگاه، جریان سیال با توجه به فشار در نظر گرفته شده برای خروجی نازل، دو حالت جریان مادون صوت و مافوق صوت را می‌تواند در قسمت واگرا تجربه کند. در نازل مافوق صوت پس از گلوگاه عدد ماخ افزایش یافته

جدول ۱. مطالعات CFD در جداکننده‌ی مافوق صوت با فرایند تغییر فاز

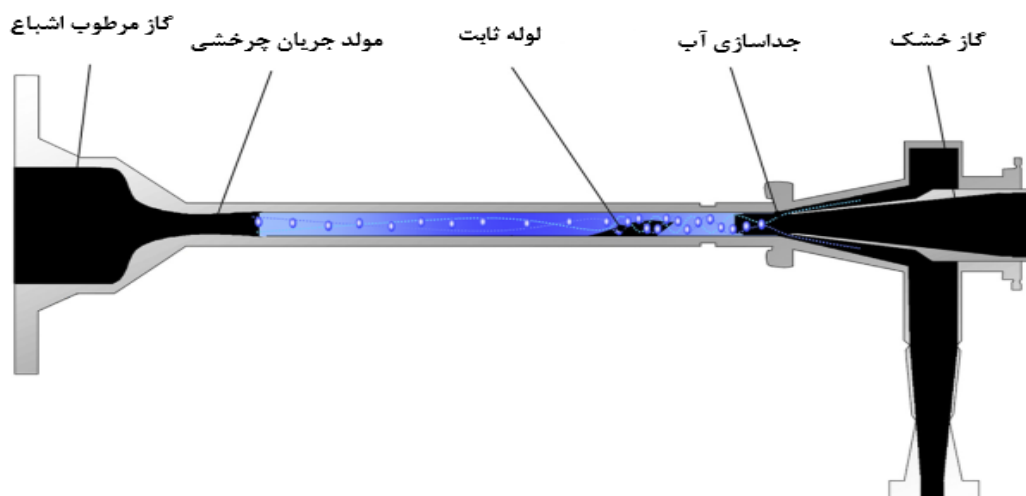
مراجع	مدل‌ها در مطالعه‌ی عددی
شوشتری و شاهسوند [۱۷و۱۶]	مدل جریان متراکم، لاوال نازل، بدون موج ضربه‌ای
ما و همکاران [۱۸و۱۹]	مدل جریان متراکم، لاوال نازل، بدون موج ضربه‌ای
نیکنام و همکاران [۲۰]	تغییر فاز تبخیر - میعان در نرم افزار انسیس - فلوئنت

و مقداری بزرگتر از یک خواهد داشت. همزمان با افزایش سرعت در این قسمت، دما و فشار کاهش می‌یابد و گاز به صورت بی‌دررو منبسط می‌شود. با کاهش شدید دما و فشار و رسیدن دما به نقطه شبنم آب، بخار آب میعان یافته و ذرات میعان یافته به صورت قطره‌های آب درون جریان ظاهر می‌شوند. امروزه فناوری جداکننده‌ی مافوق صوت با ویژگی راندمان بالا، صرفه جویی در مصرف انرژی، حفاظت از محیط زیست، حداقل هزینه‌های نصب و راهبری، اندازه‌ی بسیار کوچک در طیف گسترده‌ای از زمینه‌ها مورد توجه قرار گرفته است [۱-۶].

جبارمتی رشد قطرات آب درون جریان بخار آب را در داخل نازل‌های همگرا-واگرا مورد بررسی قرار داد. او با در نظر گرفتن اثر موینگی و فرض دمای غیر یکنواخت، تقریب نسبتاً مناسبی برای دمای قطرات زیر میکرون ارائه داد [۷]. کورمنوس معادلات بقا، آنتالپی و آنتروپی را برای مدل‌سازی هردو گاز ایده‌آل و حقیقی روی یک موج ضربه‌ای نرمال آیزنتروپیک بکار برد و به این نتیجه دست یافت که توان آیزنتروپیک گاز ایده‌آل منجر به نتایج نادرستی می‌گردد [۸]. باختر و زیدی پدیده‌ی هسته‌زایی را در جریان مافوق صوت بخار آب فشار بالا، درون نازل همگرا-واگرا مورد بررسی قرار دادند، آن‌ها یک رابطه نیمه تجربی برای رشد قطرات ارائه کردند [۹]. هنگوی و همکاران یک واحد آزمایشی برای بررسی و تحقیق در مورد کارایی جداکننده‌های مافوق صوت برای خشک کردن هوای مرطوب راه‌اندازی کردند [۱۰]. لینگ و همکاران یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی تعادل فازی فرایند جداسازی چند جزئی داخل جداکننده‌ی مافوق صوت ارائه نمودند، سپس مدلشان را به منظور پیش‌بینی مشخصات تعادل فازی و کارایی جداسازی یک جداکننده‌ی مافوق صوت آزمایشی میدانی برای خالص‌سازی گاز طبیعی

واقعی به‌کار بردند [۱۱]. جمالی آشتیانی و همکاران به بررسی بخشی از روش‌های مهم برای رطوبت‌زدایی گاز در نازل مافوق صوت پرداختند و روش نازل مافوق صوت را با روش‌های دیگر مقایسه کردند و به این نتیجه دست یافتند که جداکننده‌ی مافوق صوت یکی از بهترین روش‌ها برای رطوبت‌زدایی گاز طبیعی است [۱۲]. اسماعیلی مقایسه‌ای بین شیر فشار شکن و توربین انبساطی و جداکننده‌ی مافوق صوت انجام داد. نتایج نشان داد با افزایش دبی حجمی بخار آب ورودی، چگالش ذرات بخار زیاد می‌شود و در شرایط یکسان، جداکننده‌ی مافوق صوت قابلیت بیشتری را در میعان ذرات دارد [۱۳]. نیکنام و همکاران به بررسی اثر هندسه‌ی جسم مرکزی بر روی محل موج ضربه‌ای قائم و میزان حساس بودن محل موج ضربه‌ای قائم به شرایط عملیاتی و نیز کارایی جداکننده‌ی مافوق صوت پرداختند، نتایج حاصل از این پژوهش بیان نموده‌است که وجود جسم مرکزی منجر به کاهش حساسیت محل موج ضربه‌ای قائم نسبت به تغییرات فشار خروجی می‌گردد [۱۴]. بیان و همکاران به مطالعه‌ی فرایند چگالش متان-کربن دی‌اکسید جهت جداسازی کربن دی‌اکسید از گاز در یک جداکننده‌ی مافوق صوت پرداختند، نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش فشار ورودی و کاهش دمای ورودی، چگالش دیرتر اتفاق می‌افتد [۱۵]. شوشتری و شاهسوند [۱۷و۱۶]، ما و همکاران [۱۸و۱۹] نیز فرایند تغییر فاز در جداکننده‌ی مافوق صوت را مدل‌سازی کردند، اما موج ضربه‌ای در این شبیه‌سازی‌ها وجود نداشت.

هدف این پژوهش ارزیابی عملکرد جداکننده‌ی مافوق صوت با در نظر گرفتن تغییر فاز و امواج ضربه‌ای است، در این راستا رفتار تراکم غیرتعادلی در جداکننده‌ی مافوق صوت با استفاده از مدل‌های تک‌فاز و دوفاز بررسی شده‌است. مدل مورد نظر مدل



شکل ۱. طرحی از جداکننده‌ی مافوق صوت [۲۱]

جدول ۲. ابعاد جداکننده‌ی مافوق صوت

ابعاد	مقدار (میلی متر)
قطر ورودی نازل	۳۵/۱۰
قطر گلوگاه نازل	۱۴/۷۰
قطر خروجی نازل	۱۸/۳۰
طول قسمت همگرای نازل	۳۳/۳۹
طول قسمت واگرای نازل	۷۳/۵۰
طول لوله ثابت	۲۲۰/۵۰
قطر خروجی دیفیوزر	۴۰
طول دیفیوزر	۲۰۶/۸۵

و خروجی نازل به به ترتیب ۳۵/۱۰ و ۱۸/۳۰ میلی‌متر هستند. یک لوله ثابت برای جداسازی سیکلونی به انتهای خروجی لاول نازل وصل شده‌است، قطر خروجی دیفیوزر ۴۰ میلی‌متر است. دمای ورودی و خروجی ۵۲° کلوین و فشار ورودی و خروجی به ترتیب ۴۰ بار و ۲۵ بار در نظر گرفته شد. ابعاد این جداکننده‌ی مافوق صوت در جدول ۲ ذکر شده‌است [۲۲].

۲-۲ - معادلات حاکم

معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی به ترتیب در روابط (۱) و (۲) و (۳) به صورت زیر است.

بهبوده شده‌ای است که برای بهبود عملکرد جداسازی و بهره‌وری انرژی مناسب است.

۲- شرح مسئله

۲-۱ - مدل فیزیکی

شکل ۱، یک جداکننده‌ی مافوق صوت را نشان می‌دهد. به منظور ساده‌سازی مدل فیزیکی و تمرکز بر فرآیند تراکم، مولد جریان چرخشی در این شبه‌سازی به کار گرفته نشده‌است. نازل همگر-واگرا دارای گلوگاهی با قطر ۱۴/۷۰ میلی‌متر است و قطر ورودی

همه مهمتر داشتن دقت قابل قبول برای طیف وسیعی از جریان‌های آشفته مورد استفاده قرار می‌گیرد و زیربنایی برای مدل‌سازی جریان آشفته در بسیاری از تحقیقات است. ثبات این مدل به صورت تجربی بدست می‌آید. مدل k-ε استاندارد نسبت به مدل‌های k-ε از دقت بالاتری برخوردار است. از این رو در شبیه‌سازی‌های پیش رو در این مطالعه برای جداکننده‌ی مافوق صوت بدون مولد چرخش از مدل k-ε استاندارد استفاده می‌شود.

۲-۴- پیاده‌سازی مدل

در مدل‌سازی جریان تک‌فازی، معادلات پیوستگی، بقای جرم و انرژی به صورت مستقیم توسط نرم‌افزار انسیس-فلوئنت حل شده‌اند. مدل آشفتگی k-ε استاندارد با توجه به جریان مافوق صوت و چگالش اتخاذ شده‌است. خواص ترمودینامیکی مانند چگالی، ویسکوزیته، ظرفیت گرمایی ویژه و هدایت گرمایی از کتابخانه فلوئنت استخراج شده‌است. در همین حال پارامترهایی مثل دمای اشباع، فشار اشباع، کشش سطحی و چگالی آب مایع توسط UDF طی شبیه‌سازی عددی توسعه داده شده‌اند. شبکه ساختار یافته‌ای که برای جداکننده‌ی مافوق صوت طراحی شده‌است در شکل ۲ نشان داده شده‌است. شرایط مرزی برای جداکننده در جدول ۳ آمده است. استقلال از شبکه بر اساس ۳۶۸۶۵۰، ۱۸۴۰۰۰، ۳۶۰۰۰ سلول ساختار یافته برای شبکه‌های درشت، متوسط و ریز بررسی شده‌است. سه شبکه‌ی مختلف رفتار تقریباً یکسانی در جهت جریان و در بالادست گلوگاه نازل دارند. این شبکه‌ها وقوع چگالش غیر تعادلی را در جداکننده‌ی مافوق صوت نشان می‌دهد. بنابراین شبکه متوسط با توجه کاهش هزینه و زمان عددی برای ارزیابی عملکرد رطوبت‌زدایی جداکننده‌ی مافوق صوت استفاده می‌شود.

۳- تحلیل نتایج

۳-۱- اعتبارسنجی

جهت اعتبارسنجی، از داده‌های تجربی پروژه‌ی آزمایشی بین‌المللی بخار مرطوب IWSEP [۲۹] استفاده شد. هندسه و

$$\frac{\partial \hat{p}}{\partial t} + \nabla * (\hat{p} \hat{V}) = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\hat{p} \hat{V}) + \nabla * (\hat{p} \hat{V} \hat{V}) = -\nabla \hat{p} + \frac{1}{Re} \nabla * [(\nabla \hat{V} + \nabla \hat{V}^T)] + \hat{p} \hat{g} + \hat{F} \quad (۲)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{k=1}^n (\alpha_k \hat{p}_k \hat{E}_K) + \nabla \sum_{k=1}^n (\alpha_k \hat{p}_k (\hat{p}_k \hat{E}_K + \hat{p})) = \frac{1}{Pr} \nabla * (\hat{k}_{eff} \nabla \hat{T}) + \hat{S}_E \quad (۳)$$

مدل ریاضی تغییر فاز و میعان لی در این مدل استفاده شد. تغییر جرم از فازهای مایع و بخار براساس معادله‌ی انتقال بخار طبق رابطه‌ی (۴) بیان می‌گردد.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_v \hat{p}_v) + \hat{V} * (\alpha_v \hat{p}_v \hat{V}_v) = \hat{m}_{lv} - \hat{m}_{vl} \quad (۴)$$

همانطور که سمت راست معادله فوق بر می‌آید، انتقال جرم از فاز مایع به فاز بخار، مثبت فرض می‌گردد. بر اساس رژیم‌های دمایی تبخیر و میعان، انتقال جرم را طبق معادلات (۵) و (۶) می‌توان نشان داد [۲۳].

اگر $T_l > T_{sat}$ باشد (تبخیر)

$$\hat{m}_{lv} = \text{coeff} * \alpha_l \hat{p}_l \frac{(\hat{T}_l - \hat{T}_{sat})}{\hat{T}_{sat}} \quad (۵)$$

اگر $T_v < T_{sat}$ باشد (میعان)

$$\hat{m}_{vl} = \text{coeff} * \alpha_v \hat{p}_v \frac{(\hat{T}_{sat} - \hat{T}_v)}{\hat{T}_{sat}} \quad (۶)$$

Coeff یک ضریب است که باید به خوبی تنظیم شود. فرمول هرترز که شار تبخیر-چگالش را برای یک سطح مشترک بر اساس نظریه جنبشی نشان می‌دهد در معادله‌ی (۷) آورده شده‌است [۲۳].

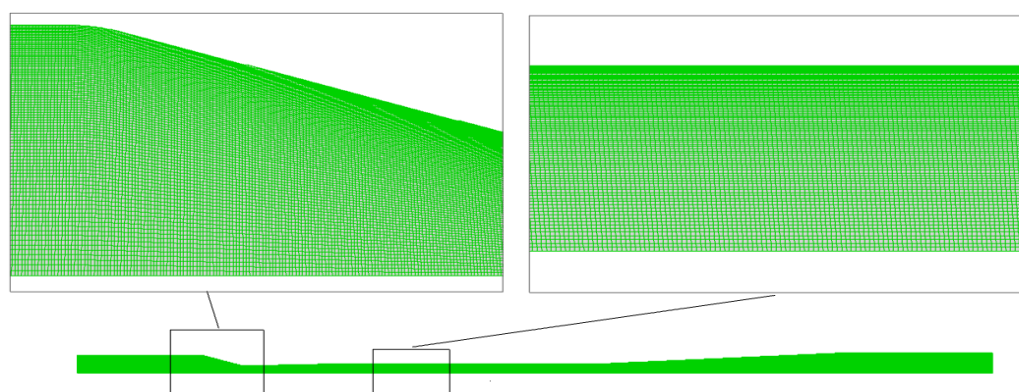
$$F' = \beta \sqrt{\frac{1}{2\pi R T'_{sat}}} (p'^* - p'_{sat}) \quad (۷)$$

۲-۳- مدل جریان آشفته

مدل‌سازی جریان آشفته به منظور پیش‌بینی صحیح رفتار دینامیکی سیال با توجه به ماهیت ویسکوز جریان، به‌خصوص در نزدیک دیواره و مدل‌سازی صحیح لایه‌ی مرزی ایجاد شده نزدیک دیواره بسیار مهم است. از بین مدل‌های مربوط به جریان آشفته مدل دو معادله‌ی k-ε به سبب قدرت پیش‌بینی بالا، اقتصادی بودن و از

جدول ۳. مدل جریان آشفته بکار رفته در سایر مطالعات

مرجع	نوع جداکننده‌ی مافوق صوت	مدل جریان آشفته
[۲۴]	بدون مولد چرخش	k-ε استاندارد
[۲۵]	بدون مولد چرخش	k-ε استاندارد
[۲۶]	بدون مولد چرخش	k-ε استاندارد
[۲۷]	بدون مولد چرخش	مدل غیر ویسکوز
[۲۸]	دارای مولد چرخش	RNG k-ε



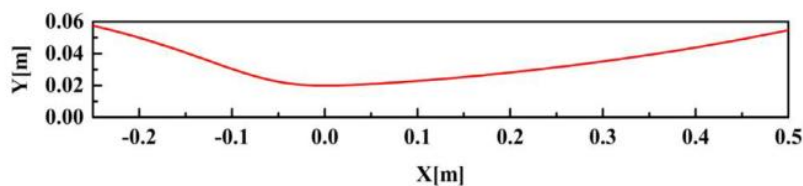
شکل ۲. نحوه‌ی شبکه‌بندی ساختاریافته برای جداکننده‌ی مافوق صوت

جدول ۴. شرایط مرزی جداکننده‌ی مافوق صوت

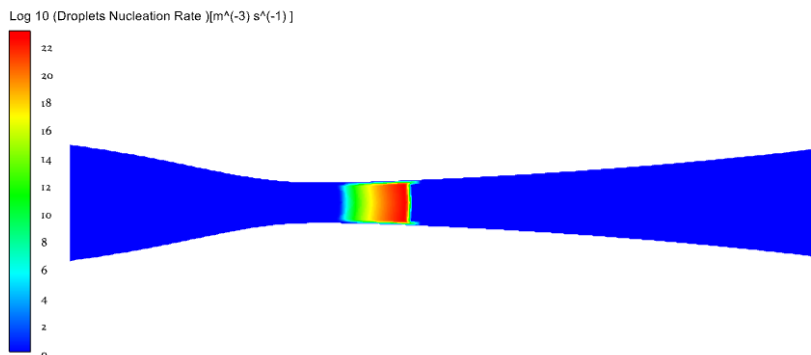
شرایط مرزی	ورودی جداکننده	خروجی جداکننده	سیال و دیواره‌ها
فشار نهایی	۴۰ بار	۲۵ بار	سیال کاری: متان، آب به صورت بخار و مایع
دمای نهایی	۲۹۸ کلوین	۳۰۰ کلوین	شرط مرزی عدم لغزش و آدیاباتیک روی دیواره‌ها

نمی‌شود. شرط عدم لغزش آدیاباتیک و مافوق صوت بودن برقرار است. مدل آشفتگی k-ε استاندارد در نظر گرفته شد و شرایط مرزی به صورت فشار ورودی برابر ۱۰۸۸۰۰ پاسکال و دمای ورودی ۴۰۱/۳۵ کلوین و فشار خروجی ۱۶۰۰۰ پاسکال فرض شد. نتایج CFD با داده‌های تجربی، با توجه به توزیع فشار در امتداد دیواره‌ی پایین نازل و کسر جرمی رطوبت و همچنین قطر قطرات در امتداد خط مرکزی نازل مقایسه شد. شکل ۴ توزیع فشار ساکن در امتداد دیواره ساکن IWSEP و توزیع قطر قطرات از طریق خط وسط نازل نشان می‌دهد.

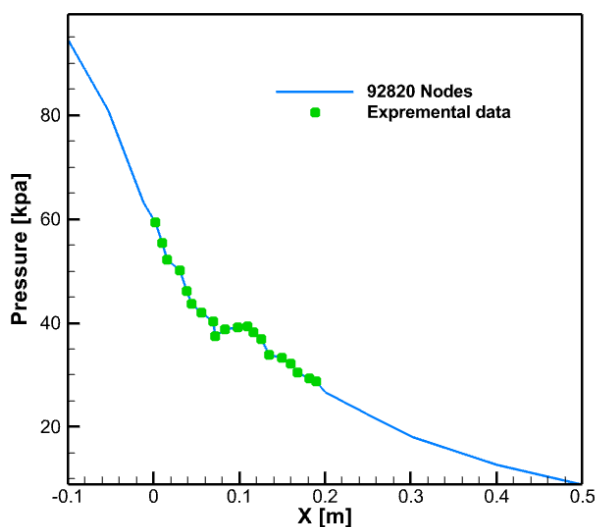
ابعاد این نازل در شکل ۳ آورده شده‌است. در شبیه‌سازی از سیال تک جزئی آب به عنوان سیال عامل استفاده شد و مدل بخار مرطوب^۱ فعال شد. هندسه و شبکه توسط پوینت وایز تولید شد. برای دستیابی به مناسب‌ترین شبکه، نازل IWSEP با اندازه‌های مختلف شبکه مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی انجام گرفته از صحت قابل قبولی برخوردار است. بنابراین شبکه‌ی متوسط دارای ۹۲۸۲۰ سلول محاسباتی، می‌تواند به عنوان شبکه‌ی بهینه در نظر گرفته شود. زیرا که نسبت به شبکه‌های ریزتر تغییر نامحسوس و قابل توجهی در نتایج دیده



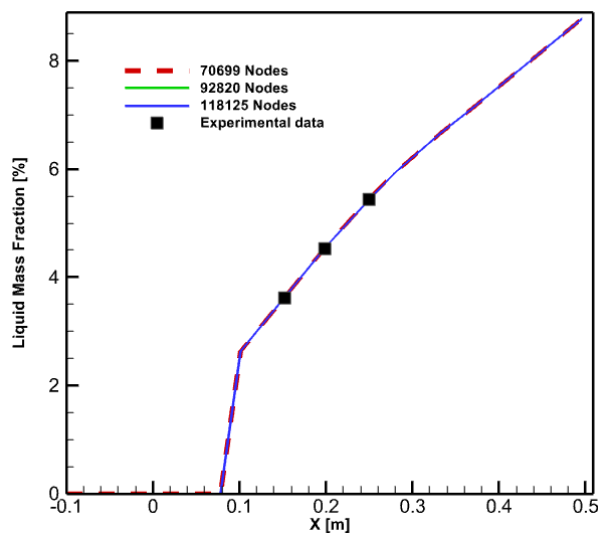
شکل ۳. مشخصات شکل نازل



الف) توزیع سرعت هسته‌زایی قطره در نازل IWSEP



ج) توزیع فشار استاتیک در امتداد نازل IWSEP



ب) توزیع کسر جرمی مایع در نازل IWSEP

شکل ۴. اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی

مرجع [۲۲] مدل سازی شد. عدد ماخ، فشار استاتیک، دمای استاتیک در دو مدل تک‌فاز و دوفاز بررسی شد. مدل‌های تک‌فاز و دوفاز تقریباً رفتار جریان یکسانی را در بالادست گلوگاه نازل پیش‌بینی می‌کنند.

۲-۳ - ویژگی‌های جریان در جداکننده‌ی مافوق‌صوت با جریان تک‌فاز و مدل جریان چگالشی

در این قسمت تفاوت‌های شبیه‌سازی جداکننده‌ی مافوق‌صوت تک‌فاز و دوفاز با یکدیگر مقایسه شد که مدل مورد نظر بر اساس

شود. عوامل دیگری مثل توزیع غیر یکنواخت بخار آب، افت فشار، و اختلاف در سرعت و چگالی در بخش‌های مختلف دیفیوزر نیز در این غیر یکنواختی نقش دارند. همچنین، در برخی موارد، وجود آشفته‌گی می‌تواند موجب پخش غیر یکنواخت گرما و در نتیجه، غیر یکنواختی دما شود. در نهایت، شرایط اولیه و هندسه دقیق دیفیوزر نیز در توزیع نهایی دما تاثیرگذارند. به طور خلاصه، پیچیدگی همزمان پدیده‌های مافوق صوت، انتقال جرم، انتقال گرما و آشفته‌گی‌ها در دیفیوزر، منجر به غیر یکنواختی کانتور دمای آن می‌شود.

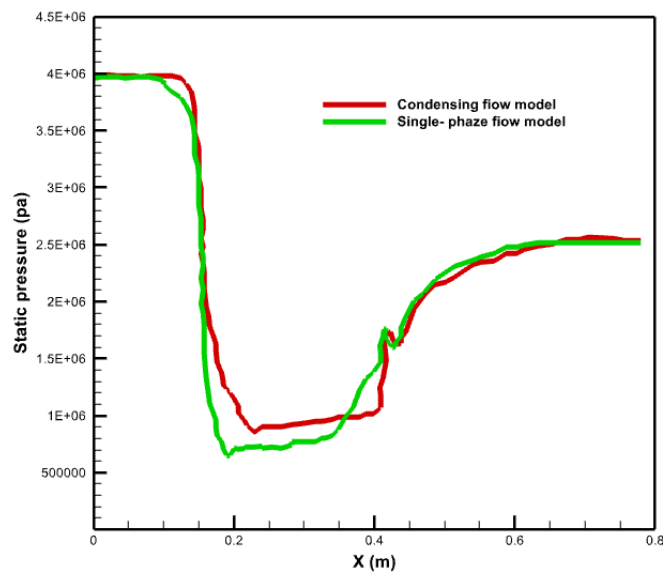
در شکل ۵ بخش‌های (ه) و (ی) به ترتیب نمودارهای توزیع عدد ماک در محور مرکزی جداکننده و کانتور عدد ماک، به کمک دو حالت شبیه‌سازی مدل تک‌فاز و دوفاز برای جریان درون جداکننده نمایش داده شده‌اند. عدد ماک در مدل دوفازی نسبت به مدل تک‌فاز به طور مشخصی کاهش می‌یابد. کاهش مقدار عدد ماک در مدل‌های دوفازی نسبت به تک‌فاز از برجسته‌ترین اثرات رطوبت بر جریان است. این به دلیل افزایش دما در حالت دوفاز است که رابطه معکوس بین دما و عدد ماک را تشدید می‌کند.

به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که وجود رطوبت در مدل دوفاز تأثیر معناداری بر روی پروفایل‌های فشار، دما و عدد ماک دارد. تفاوت‌های موجود بین دو مدل به وضوح نشان‌دهنده اهمیت در نظر گرفتن فازها و خصوصیات حرارتی گاز در طراحی و بهینه‌سازی جداکننده‌ها است.

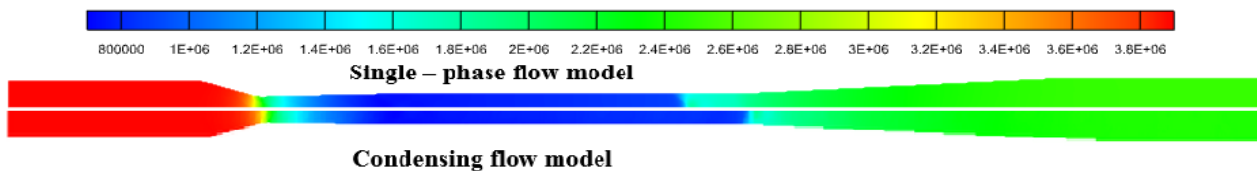
۳-۳- رطوبت‌زدایی گاز طبیعی

جهت بررسی رطوبت‌زدایی گاز طبیعی، از ترکیبات موجود در گاز شامل متان، نیتروژن، اکسیژن و بخار آب استفاده شد. با توجه به اینکه در عمل فشار خطوط لوله‌ای انتقال گاز حدود ۴۰ بار است، این مقدار فشار به عنوان فشار کل ورودی به جداکننده مورد استفاده قرار گرفت. فشار خروجی ۲۵ بار فرض شد. کسر جرمی رطوبت موجود در متان 0.004852 است که با توجه به رطوبت یکی از چاه‌های گاز در نظر گرفته شد. تغییرات فشار استاتیک، دمای استاتیک، عدد ماک، نرخ تولید جرم مایع در

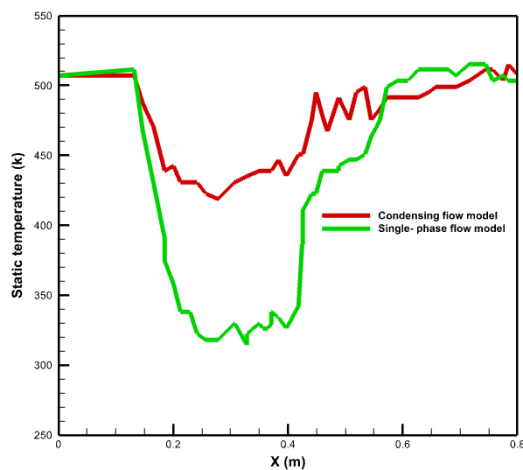
در شکل ۵ بخش‌های (الف) و (ب) به ترتیب نمودارهای توزیع فشار استاتیک در محور مرکزی جداکننده و کانتور فشار استاتیک، به کمک دو حالت شبیه‌سازی مدل تک‌فاز و دوفاز برای جریان درون جداکننده نمایش داده شده‌اند. در این جریان توزیع فشار استاتیک به دلیل آشکارسازی موقعیت موج‌های ضربه‌ای بر روی محور مرکزی نازل حائز اهمیت است. این وضعیت را به صورت پرش‌هایی در امتداد محور مرکزی نازل در طول نمودار می‌توان شناسایی کرد. در مدل تک‌فاز، موج ضربه‌ای در مکان پایین‌تری نسبت به مدل دوفاز قرار دارند. نوسانات فشار در مدل دوفاز کمتر است چرا که رطوبت ناشی از قطرات آب باعث جذب این نوسانات می‌شود. هنگام رسیدن به گلوگاه نازل، فشار به طور ناگهانی کاهش می‌یابد و در انتهای گلوگاه به نوساناتی می‌رسد که به دلیل وجود موج‌های ضربه‌ای ایجاد شده‌است. در ناحیه واگرای نازل، کمی از افت فشار جبران می‌شود، اما همچنان کمتر از فشار اولیه است. در قسمت دیفیوزر نازل، فشار کمی افزایش می‌یابد و ثابت می‌ماند. در شکل ۵ بخش‌های (ج) و (د) به ترتیب نمودارهای توزیع دمای استاتیک در محور مرکزی جداکننده و کانتور دمای استاتیک، به کمک دو حالت شبیه‌سازی مدل تک‌فازی و دوفازی برای جریان درون جداکننده نمایش داده شده‌اند. مقادیر دما در مدل دوفاز به شدت پایین‌تر از حالت تک‌فاز است. این تفاوت ناشی از تأثیر چگالش خودبه‌خودی و تغییرات انرژی حرارتی سیال است که به افزایش دما منجر می‌شود. در مدل تک‌فاز، دما به طور مداوم در ناحیه واگرای نازل کاهش می‌یابد، در حالی که در مدل دوفاز با در نظر گرفتن چگالش، انرژی آزاد شده به دما کمک می‌کند. موج نهایی دما در مدل دوفاز در موقعیت پایین‌تری نسبت به مدل تک‌فاز قرار دارد. برای توجیه غیر یکنواختی کانتور دما در بخش دیفیوزر، می‌توان گفت غیر یکنواختی کانتور دما در بخش دیفیوزر، ناشی از پیچیدگی فرایندهای انتقال جرم و گرما در این ناحیه است. در بخش دیفیوزر، جریان از حالت مافوق صوت به مادون صوت تغییر می‌کند و این تغییر ناگهانی و غیر یکنواخت می‌تواند باعث اختلاف دما در نواحی مختلف



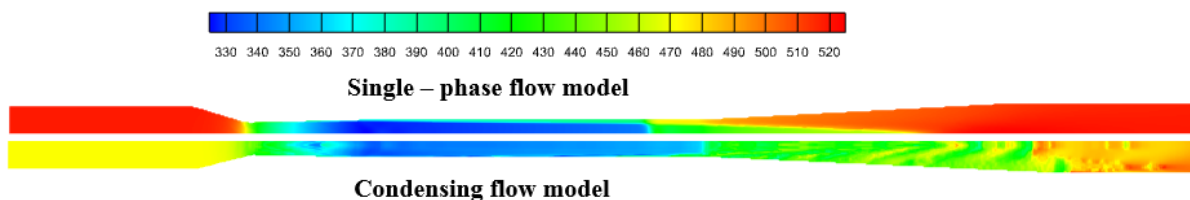
الف) پروفایل‌های فشار استاتیکی در خط مرکزی نازل برای دو مدل تک‌فاز و دوفازی (بخار مرطوب)



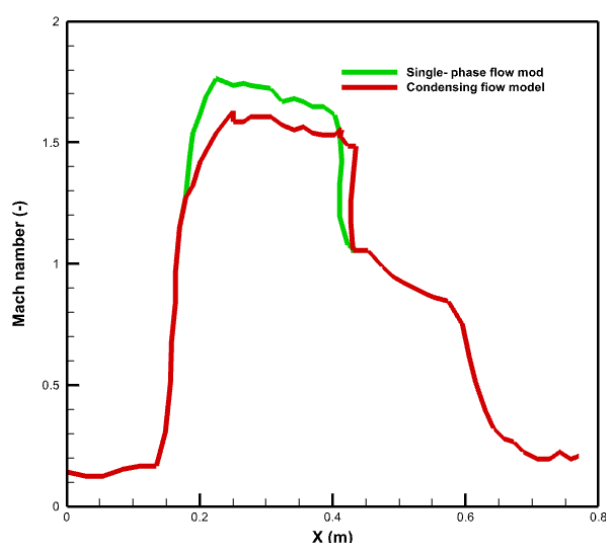
ب) فشار استاتیکی در خط مرکزی نازل برای دو مدل تک‌فاز و دوفازی (بخار مرطوب)



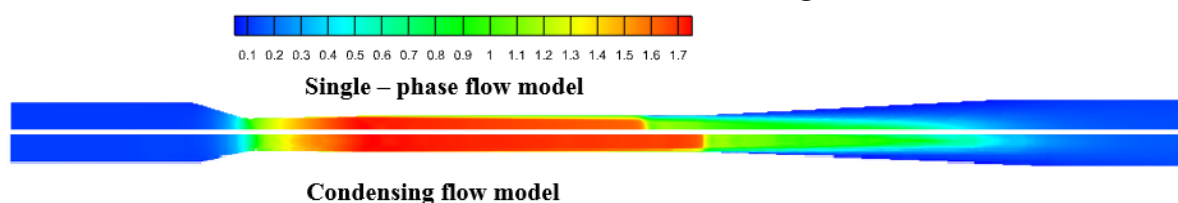
ج) پروفایل‌های دمای استاتیکی در خط مرکزی نازل برای مدل تک‌فاز و دوفازی (بخار مرطوب)



د) دمای استاتیک در خط مرکزی نازل برای مدل تک‌فاز و دوفازی (بخار مرطوب)



ه) پروفایل‌های عدد ماخ در خط مرکزی نازل برای مدل تک‌فاز و دوفازی (بخار مرطوب)



ی) عدد ماخ در خط مرکزی نازل برای مدل تک‌فاز و دوفازی (بخار مرطوب)

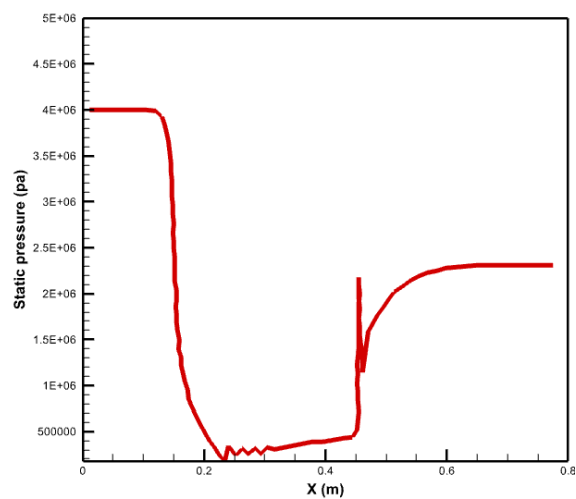
شکل ۵. مقایسه‌ی فشار استاتیکی، دمای استاتیکی، عدد ماخ در خط مرکزی نازل برای مدل تک‌فاز و دوفازی (بخار مرطوب)

کسر مولی سایر گونه‌ها در طول شبیه‌سازی ثابت مانده‌است که نشان می‌دهد مطابق میل تنها بخار آب دچار تغییر فاز شده‌است. نسبت فشار استاتیک ورودی به خروجی برابر $1/6$ ، نسبت دمای استاتیک ورودی به خروجی $0/99$ ، نسبت عدد ماخ ورودی به خروجی تقریباً $1/27$ است. فشار استاتیک خروجی نسبت به ورودی 40% کاهش، دمای استاتیک خروجی نسبت به ورودی $5/0\%$ افزایش یافته و عدد ماخ خروجی به ورودی تقریباً 27% افزایش یافته‌است. همانطور که قبلاً گفته شد جهت بازیابی فشار و جبران افت فشار ایجاد شده می‌توان از یک دیفیوزر پس از خروجی جداساز استفاده کرد.

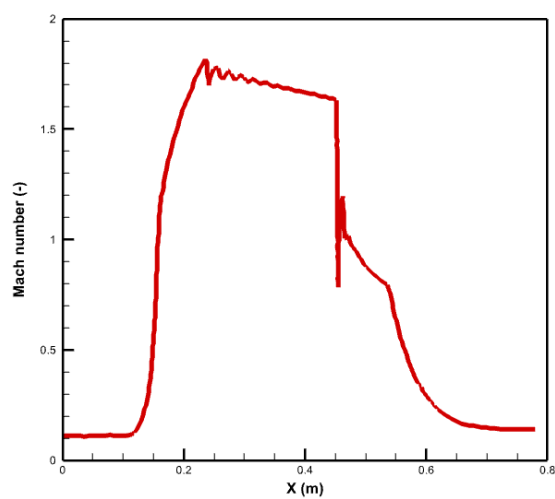
۳-۳-۱- کسر جرمی مایع

پدیده‌ی هسته‌زایی و تجمع قطرات متراکم، کسر مایع را تشکیل می‌دهد. این فرایند توزیع کسر رطوبت بالایی را در امتداد محور

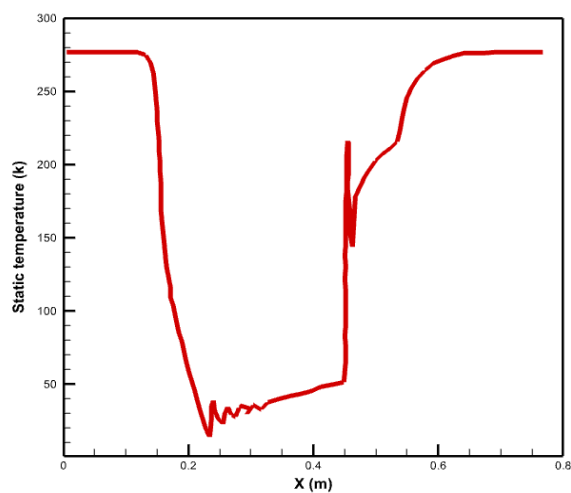
نمودارهای زیر قابل مشاهده است. مطابق شکل با ورود جریان سیال پرفشار مادون صوت دو صوت به جداکننده، در ابتدا با پیشروی در مقطع همگرا دما و فشار کاهش و سرعت سیال افزایش یافته است. در گلوگاه سرعت سیال به سرعت صوت رسیده و بلافاصله هسته‌زایی آغاز شده‌است. با کاهش بیشتر دما و فشار، رسیدن هسته‌زایی به بیشترین مقدار، قطره‌های مایع در جریان سیال ایجاد شده و بنابراین نرخ تولید جرم مایع و کسر مولی مایع افزایش یافته‌است. با افزایش شعاع قطرات مایع و آزاد شدن گرمای نهان چگالش از فاز مایع به فاز بخار، دما و فشار کمی افزایش یافته و موج ضربه‌ای چگالش ایجاد شده‌است. مطابق انتظار با پیشروی جریان سیال مافوق صوت در مقطع واگرا تا خروجی جداکننده، همچنان دما و فشار کاهش و سرعت سیال افزایش یافته‌است. مطابق شکل تمام بخار آب موجود در گاز طبیعی به آب مایع تبدیل شده‌است و راندمان مایع‌سازی بسیار بالا است. همچنین



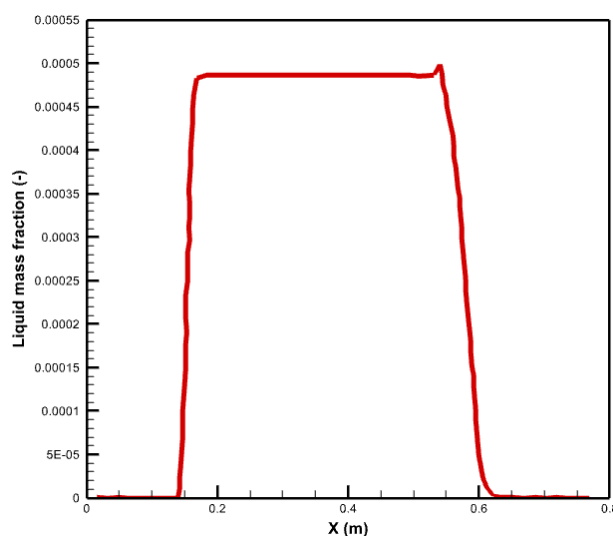
شکل ۶. پروفایل فشار استاتیکی در خط مرکزی نازل، جریان دوفازی (مخلوط)



شکل ۷. پروفایل عدد ماخ در خط مرکزی نازل، جریان دوفازی (مخلوط)



شکل ۸. پروفایل دمای استاتیکی در خط مرکزی نازل، جریان دوفازی (مخلوط)



شکل ۹. پروفایل کسر حجمی مایع در خط مرکزی نازل برای مدل دوفازی (مخلوط)



شکل ۱۰. کانتور کسر جرمی مایع در خط مرکزی نازل برای مدل دوفازی (مخلوط)

۳-۳-۲- بررسی اثر دماهای مختلف ورودی بر پارامترهای چگالش

جهت بررسی تاثیر دمای ورودی بر فرایند چگالش، مخلوط متان و بخار آب در دماهای مختلف و فشار ثابت ۴۰ بار مورد تحلیل قرار گرفت. هنگامی که دمای ورودی پایین‌تر است درجه‌ی زیرسرد در ورودی نازل بیشتر بوده و بخار سریع‌تر به حالت زیرسرد می‌رسد. منظور از حالت زیرسرد، هنگامی است که دمای بخار از دمای اشباع تعادل در فشار محلی کمتر شده و درجه‌ی زیر سرد دارای مقدار بزرگتری از صفر است. پس از رسیدن درجه‌ی زیر سرد به بیشترین مقدار به دلیل رخ دادن موج ضربه‌ای، آزاد شدن گرمای نهان و در نتیجه افزایش دمای بخار، درجه‌ی زیر سرد کاهش یافته‌است. با افزایش دمای ورودی فرایند هسته‌زایی دیرتر رخ می‌دهد. هنگامی که دمای ورودی افزایش یافته، موقعیت اولیه‌ی چگالش به سمت خروجی جابجا شده، این امر به این دلیل است که با افزایش دمای ورودی، درجه‌ی زیر

مرکزی نازل همگرا-واگرا فراهم می‌کند که در شکل ۹ و شکل ۱۰ قابل مشاهده است. بیشترین کسر رطوبت حدود ۰/۰۰۰۴۸ است. همانطور که انتظار می‌رود پس از شوک، کسر مایع به دلیل افزایش دمای ناشی از موج ضربه‌ای به تدریج کاهش می‌یابد. بخش بزرگی از کاهش رطوبت در قسمت دیفیوزر صورت می‌گیرد که تأثیر اضافی بر تبخیر قطرات مایع دارد. بنابراین مایع غلیظ شده در صورت ورود به دیفیوزر در خروجی جداکننده کاملاً تبخیر می‌گردد که باید توسط جداساز خارج گردد. نیروی گریز از مرکز القا شده توسط مولد جریان باعث خروج مایع می‌گردد (در این مطالعه نادیده گرفته شده‌است). افزایش فشار در امتداد قسمت دیفیوزر، دمای اشباع فاز مایع را افزایش می‌دهد و در نتیجه، تمام کسر جرمی مایع تا رسیدن به خروجی جداکننده بخار می‌گردد.



شکل ۱۱. کانتور غلظت جرمی متان در خط مرکزی نازل برای مدل دوفازی (مخلوط)



شکل ۱۲. کانتور کسر حجمی قطرات آب در خط مرکزی نازل برای مدل دوفازی (مخلوط)

کلوین بررسی شد. هنگامی که کسر جرمی بخار آب ورودی بیشتر است، تشکیل قطره‌های مایع ناشی از فرایند هسته‌زایی سریع‌تر رخ داده‌است و بیشترین نرخ رشد قطره افزایش یافته‌است. نرخ تولید جرم مایع به صورت مجموع افزایش جرم ناشی از هسته‌زایی و رشد یا از بین رفتن قطره‌های ایجاد شده تعریف می‌گردد. مطابق انتظار با کاهش کسر جرمی بخار آب ورودی تولید جرم مایع به پایین دست جریان منتقل شده و بیشترین مقدار آن کاهش یافته‌است. در حالتی که کسر جرمی بخار آب 0.004852 است، تمامی بخار آب موجود در سیال به مایع تبدیل شده‌است. یعنی در این حالت راندمان مایع‌سازی 100 درصد بوده‌است، در این حالت با میل کردن هسته‌زایی و نرخ رشد قطره به صفر، نرخ تولید مایع نیز به صفر رسیده‌است. با افزایش کسر جرمی از 0.004852 به 0.001582 و در نتیجه تشکیل سریع‌تر فاز مایع، کسر جرمی مایع کمی افزایش یافته‌است.

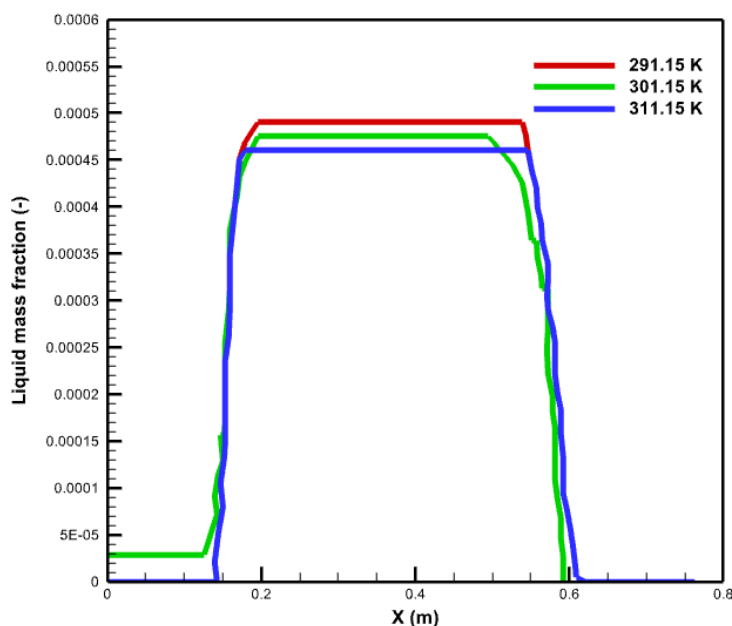
سرد در ورودی نازل کاهش یافته و بنابراین در این حالت رسیدن به چگالش مشکل‌تر است. بنابراین در دمای ورودی پایین‌تر تشکیل فاز مایع سریع‌تر رخ می‌دهد. با کاهش دمای ورودی، شعاع قطره‌های خروجی افزایش یافته‌است. دلیل این امر این است که با کاهش دمای ورودی و در نتیجه تشکیل سریع‌تر قطره‌های مایع، این قطره‌ها فرصت بیشتری جهت رشد تا مقطع خروجی خواهند داشت. بنابراین با تشکیل سریع‌تر فاز مایع و افزایش شعاع متوسط قطره به دلیل کاهش دمای ورودی، کسر جرمی مایع افزایش یافته‌است. با افزایش دمای ورودی از $291/15$ کلوین به $311/15$ کلوین، کسر جرمی مایع کاهش می‌یابد و بهترین حالت دمای $291/15$ است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد با افزایش دمای ورودی به اندازه‌ی $6/8$ درصد، کسر جرمی مایع بیش از 2 درصد کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند به دلیل کاهش چگالی بخار و تغییرات در شرایط میعان باشد.

۳-۳-۴- اثر فشار ورودی بر پارامترهای چگالش

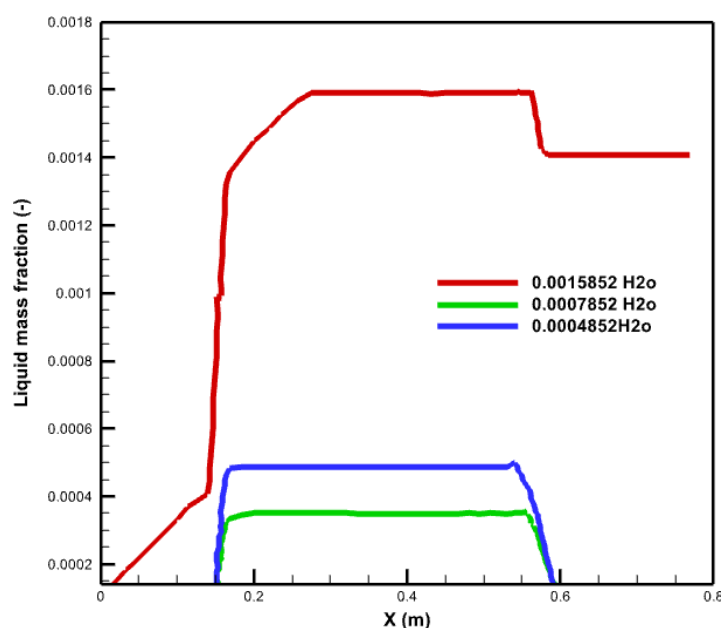
جهت بررسی اثر فشار ورودی بر فرایند چگالش، متان و بخار آب در فشارهای مختلف و دمای ثابت $190/5$ کلوین مورد بررسی

۳-۳-۳- اثر کسر جرمی ورودی بر پارامترهای چگالش

جهت بررسی اثر کسر جرمی ورودی بر فرایند چگالش، بخار آب در کسر جرمی‌های مختلف، فشار ثابت 40 بار و دمای ثابت $198/5$



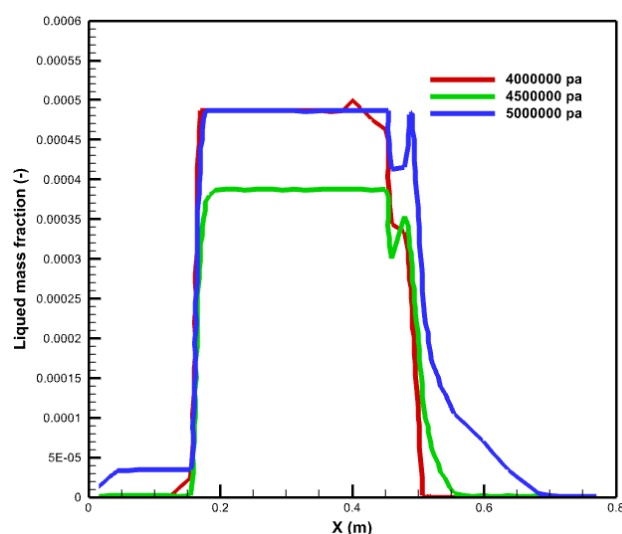
شکل ۱۳. پروفایل‌های کسر حجمی مایع در خط مرکزی نازل برای مدل دوفازی (مخلوط) در سه دمای ورودی مختلف



شکل ۱۴. پروفایل‌های کسر جرمی مایع در خط مرکزی نازل برای مدل دوفازی (مخلوط) در سه درصد جرمی بخار آب مختلف

مقدار، به دلیل وقوع شوک چگالش، آزاد شدن گرمای نهان، افزایش دمای بخار و در نتیجه افزایش فشار اشباع، حالت مافوق اشباع کاهش یافته‌است. مشاهده می‌گردد با کاهش فشار ورودی، بیشترین مقدار مافوق اشباع افزایش یافته‌است. با افزایش فشار ورودی موقعیت چگالش به بالادست منتقل شده و هسته‌زایی سریع‌تر رخ داده‌است. با

قرار گرفت. هنگامی که فشار ورودی بالاتر است، حالت مافوق اشباع در ورودی نازل بیشتر بوده‌است، بخار سریع‌تر به حالت مافوق اشباع می‌رسد. منظور از حالت مافوق اشباع هنگامی است که فشار بخار از فشار اشباع تعادل در دمای محلی بیشتر شده و مافوق اشباع دارای مقدار بزرگتری از یک است. پس از رسیدن مافوق اشباع به بیشترین



شکل ۱۵. پروفایل‌های کسر جرمی مایع در خط مرکزی نازل برای مدل دوفازی (مخلوط) در سه فشار ورودی مختلف

مافوق صوت شدن جریان از طریق نازل همگرا-واگرا و همچنین حرکت چرخشی ایجاد شده از طریق پره‌های ساکن ابتدایی جداکننده، استوار است. در پژوهش حاضر تنها، مافوق صوت شدن جریان و به تبع آن میعان ناخالصی‌ها در نازل بدون در نظر گرفتن حرکت چرخشی القاء شده به جریان مورد توجه قرار گرفت. با در نظر گرفتن حرکت چرخشی گاز و ترکیب آن با معادلات کلی جریان و محاسبه‌ی نرخ مایع تولیدی، می‌توان شبیه‌سازی کامل جداکننده‌ی مافوق صوت را انجام داد. همچنین با در نظر گرفتن حرکت چرخشی گاز می‌توان به بررسی زاویه مناسب برای این پره‌ها و تعیین محل مناسب برای قرار گرفتن آن‌ها (در ابتدای جداکننده یا پس از گلوگاه) پرداخت. در مدل مورد نظر، کسر مایع که تقریباً ۵٪ از جرم کل را محاسبه می‌کند، بر گرما و رفتار انتقال جرم در طول فرایند تغییر فاز بخار آب در جداکننده‌ی مافوق صوت اثر می‌گذارد.

طبق مطالعات انجام شده در حالتی که توییستر درون نازل وجود ندارد، ذرات مایع تشکیل شده در تمام مقاطع نازل پخش می‌شود. زمانی که توییستر به نازل اضافه شود، به علت وجود چرخش درون نازل و ایجاد نیروی گریز از مرکز، ذرات مایع تشکیل شده به سمت دیوار حرکت می‌کنند و جداسازی بهتر صورت می‌گیرد. نتایج به صورت کلی و خلاصه به شرح زیر است:

افزایش فشار ورودی، مافوق اشباع در ورودی نازل افزایش یافته و بنابراین در این حالت رسیدن به چگالش آسان‌تر است. در فشار ورودی بالاتر تشکیل فاز مایع سریع‌تر اتفاق می‌افتد. در این حالت فرایند هسته‌زایی سریع‌تر خاتمه یافته‌است. با افزایش فشار ورودی شعاع قطرات افزایش یافته‌است. دلیل این امر این است با کاهش فشار ورودی و در نتیجه تشکیل دیرتر قطرات مایع، این قطرات فرصت کمتری جهت رشد تا مقطع خروجی خواهند داشت. با تشکیل سریع‌تر فاز مایع و افزایش شعاع متوسط قطره به دلیل افزایش فشار ورودی، کسر جرمی مایع افزایش می‌یابد. با افزایش فشار ورودی از ۴۰ بار به ۵۰ بار، کسر جرمی مایع به بالاترین مقدار خود همان ۰/۰۰۴۸۵۲ می‌رسد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد با افزایش فشار ورودی به اندازه‌ی ۱۲/۵ درصد، کسر جرمی مایع بیش از ۱۹ درصد افزایش یافت. این افزایش نشان‌دهنده‌ی تاثیر مثبت فشار بر راندمان جداسازی و میزان میعان است. فشار بیشتر منجر به شرایط ایده‌آل‌تری برای تشکیل قطرات مایع در نازل و سایر نواحی می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

به طور کلی نحوه‌ی عملکرد جداکننده‌ی مافوق صوت برای جداسازی رطوبت از گاز طبیعی بر اساس دو پدیده‌ی

- قطره‌های مایع سریع‌تر تشکیل می‌گردد و فرصت بیشتری برای رشد داشته و شعاع بزرگتری خواهد داشت.
- با تشکیل سریع‌تر فاز مایع و افزایش شعاع متوسط قطره، کسر جرمی مایع افزایش می‌یابد. بنابراین استفاده از دمای پایین و فشار بالا در ورودی به منظور بهبود بازده جداکننده ضروری به نظر می‌رسد.

تشکر و قدردانی:

از شرکت گاز استان اصفهان و دانشگاه گیلان که ما را در این پروژه یاری نمودند، تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

- ✓ وجود موج ضربه‌ای در جداکننده‌ی مافوق صوت جهت بازیابی فشار سبب کاهش چشمگیر راندمان مایع‌سازی می‌شود.
- ✓ به منظور جبران افت فشار ایجاد شده می‌بایست از یک دیفیوزر پس از جداکننده استفاده کرد. وقوع موج ضربه‌ای در دیفیوزر می‌تواند عمل بازیابی فشار را بدون کاهش راندمان جداکننده انجام دهد.
- ✓ با افزایش فشار ورودی در دمای ثابت، کاهش دمای ورودی در فشار ثابت و افزایش کسر جرمی بخار آب ورودی در دما و فشار ثابت :
- بخار آب سریع‌تر به حالت فوق اشباع می‌رسد.
- فرایند هسته‌زایی سریع‌تر اتفاق افتاده و رسیدن به چگالش آسان تر است.

واژه نامه

1. Wet Steam

2. Superhit grade

References

منابع

1. Bazooyar, B., Jomekian, A., and Mirfasihi, S. S., 2024. "Modeling and simulation of natural gas dehydration via supersonic separators", *Advances Natural Gas: Formation, Processing, and Applications. Volume 8: Natural Gas Process Modelling and Simulation*, Elsevier, pp. 255-276, 2024.
2. Shoghl, S. N., Naderifar, A., Farhadi, F., and Pazuki, G., "A novel strategy for comprehensive optimization of structural and operational parameters in a supersonic separator using computational fluid dynamics modeling", *Scientific Reports*, Vol. 11, No. 1, p. 21850, 2021.
3. Bian, J., Cao, X., Teng, L., Sun, Y., and Gao, S., "Effects of inlet parameters on the supersonic condensation and swirling characteristics of binary natural gas mixture", *Energy*, Vol. 188, p.116082.2019.
4. Teixeira, M., Arinelli, L. O., Medeiros, J. L., Araujo, O. Q. F., "Economic leverage affords post-combustion capture of 43% of carbon emissions: supersonic separators for methanol hydrate inhibitor recovery from raw natural gas and CO₂ drying", *Journal of Environmental Management*, Vol. 236, pp. 534-550, 2019.
5. Arinelli, L. O., Teixeira, A. M., Medeiros, J. L., Araujo, O. Q. F., "Supersonic separator for cleaner offshore processing of natural gas with high carbon dioxide content: environmental and economic assessments", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 233, pp. 510-521, 2019.
6. Brigagão, G. V., Arinelli, L. O., Medeiros, J. L., Araujo, O. Q. F., "A new concept of air prepurification unit for cryogenic separation: low pressure supersonic separator coupled to finishing adsorption", *Separation and Purification Technology*, Vol. 215, pp. 173-189, 2019.
7. Gyarmathy, G., *Two-phase steam flow in turbines and separators*, Hemisphere publ. Corp. Washington DC. 1976.
8. Kouremenos, D. A., "The normal shock waves of real gases and the generalized isentropic exponents", *Forschung im Ingenieurwesen A*, Vol. 52, No. 1, p. 2331, 1986.
9. Bakhtar, F., and Zidi, K., "Nucleation phenomena in flowing high-pressure steam Part 2: theoretical analysis", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, Vol. 204, No. 4, pp. 233-242, 1990.
10. Hengwei, L., Zhongliang, L., Yongxun, F., Keyu, G. U., and Tingmin, Y. A. N., "Characteristics of a supersonic swirling dehydration system of natural gas", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 13, No. 1, p. 9. 2005.

11. Bao, L., Liu, Z., Liu, H., Jiang, W., Zhang, M., and Zhang, J., "Phase equilibrium calculation of multi-component gas separation of supersonic separator", *Science china technological sciences*, Vol. 53, pp. 435-443, 2010.
12. Ashtiani, A. J., Haghejati, A., Sharif, M. and Fazli, A., "Investigation on new innovation in natural gas dehydration based on supersonic nozzle technology", *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 8, No. S9, pp. 450-454, 2015.
13. Esmaeili, A., "Supersonic separation of natural gas liquids by Twister technology", *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 52, No. 6, pp. 7-12, 2016.
14. Niknam, P. H., Mortaheb, H. R., and Mokhtarani, B., 2018. Effects of fluid type and pressure order on performance of convergent-divergent nozzles: An efficiency model for supersonic separation. Asia-Pacific", *Journal of Chemical Engineering*, Vol. 13, No. 2, p.e2181.
15. Bian, J., Jiang, W., Hou, D., Liu, Y., and Yang, J., "Condensation characteristics of CH₄-CO₂ mixture gas in a supersonic nozzle", *Powder Technology*, Vol. 329, pp. 1-11, 2018.
16. Shooshtari, S. R., and Shahsavand, A., "Reliable prediction of condensation rates for purification of natural gas via supersonic separators", *Separation and Purification Technology*, Vol. 116, pp. 458-470, 2013.
17. Shooshtari, S. R., and Shahsavand, A., "Maximization of energy recovery inside supersonic separator in the presence of condensation and normal shock wave". *Energy*, Vol. 120, pp. 153-163, 2017.
18. Ma, Q. F., Hu, D. P., Jiang, J. Z. and Qiu, Z. H., "A turbulent Eulerian multi-fluid model for homogeneous nucleation of water vapour in transonic flow", *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Vol. 23, No. 3, pp. 221-231, 2009.
19. Ma, Q. F., Hu, D. P., Jiang, J. Z., and Qiu, Z. H., "Numerical study of the spontaneous nucleation of self-rotational moist gas in a converging-diverging nozzle", *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Vol. 24, No. 1-2, pp. 29-36, 2010.
20. Niknam, P. H., Fiaschi, D., Mortaheb, H.R. and Mokhtarani, B., "Numerical investigation of multiphase flow in supersonic separator considering inner body effect", *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, Vol. 14, No. 6, p. e2380. 2019.
21. Haghighi, M., Hawboldt, K. A., and Abdi, M. A., "Supersonic gas separators: Review of latest developments", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 27, pp.109-121. 2015.
22. Wen, C., Ding, H., and Yang, Y., "Optimisation study of a supersonic separator considering nonequilibrium condensation behaviour", *Energy Conversion and Management*, Vol. 222, p.113210. 2020.
23. Fluent, A. N. S. Y. S., 12.0, Theory Guide, 2022. <https://orcid.org/0000-0002-8335-3121>.
24. Wen, C., Cao, X., Yang, Y., and Feng, Y., "Prediction of mass flow rate in supersonic natural gas processing", *Oil & Gas Science and Technology- Revue d'IFP Energies nouvelles*, Vol. 70, No. 6, pp. 1101-1109, 2015.
25. Jiang, W., Liu, Z., Liu, H., Pang, H., and Bao, L., "Influences of friction drag on spontaneous condensation in water vapor supersonic flows", *Science in China Series E: Technological Sciences*, Vol. 52, No. 9, pp. 2653-2659, 2009.
26. Jassim, E., Abdi, M. A., and Muzychka, Y., "Computational fluid dynamics study for flow of natural gas through high-pressure supersonic nozzles: Part 1. Real gas effects and shockwave", *Petroleum Science and Technology*, Vol. 26, No. 15, pp. 1757-1772, 2008.
27. Arina, R., "Numerical simulation of near-critical fluids", *Applied numerical mathematics*, Vol. 51, No. 4, pp. 409-426, 2004.
28. Wen, C., Cao, X., and Yang, Y., "Swirling flow of natural gas in supersonic separators", *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, Vol. 50, No. 7, pp. 644-649, 2011.
29. Zhang, G., Dykas, S., Majkut, M., Smółka, K., and Cai, X., "Experimental and numerical research on the effect of the inlet steam superheat degree on the spontaneous condensation in the IWSEP nozzle", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 165, p. 120654, 2021.