

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

Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan
 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 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





مقاله پژوهشی

شبیهسازی عددی جریان مافوقصوت گاز طبیعی گذرنده از یک لاوال نازل به منظور امکانسنجی رطوبت گیری 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 – جداکننده 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 می گردد. جریان سیال، انتقال جرم و حرارت در جداکنندههای مافوقصوت به دلیل برهم کنش پیچیده جریان مافوقصوت و تغییر فاز به خوبی درک نشده است. در این پژوهش مدل سازی عددی چگالش بخار آب با هدف بررسی جریان سیال در جداکننده یافوق صوت انجام شده است. برای شبیه سازی جریان چند فازی از روش مخلوط بهره گرفته و مدل آشفتگی مورد استفاده، ٤-۸ استاندارد است. از مدل ریاضی تغییر فاز لی برای پیش بینی دوتی پیده ی چگالش خودبه خودی استفاده شده است. مسئله در حالت دوبعدی شبیه سازی و فشار ورودی و خروجی و دمای ورودی به عنوان شرایط مرزی و دیواره ینازل آدیاباتیک فرض شده است. نتایج حاصل شده از مدل عددی به خوبی با داده های تجربی سازگار است. بر اساس تحلیل های انجام شده، تغییر فاز آب از بخار به مایع و رطوبت زدایی که هدف اصلی این پژوهش بوده است، با موفقیت حاصل شده است. مای انجام شده، تغییر فاز آب از بخار به مایع و رطوبت زدایی که هدف اصلی این پژوهش بوده است، با موفقیت حاصل شده است. هم چنین 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 کلیه ی بخار آب به مایع تبدیل شده و راندمان جداسازی بسیار بالا حاصل افزایش یافت. با در نظر گرفتن گاز طبیعی به عنوان سیال ورودی جداکننده کلیه ی بخار آب به مایع تبدیل شده و راندمان جداسازی بسیار بالا حاصل

واژههای کلیدی: جداکنندههای مافوقصوت – رطوبت گیری– شبیهسازی عددی –لاوال 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 غیر تجاری 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/).

k	هر یک از اجزای مخلوط	\hat{k}_{eff}	ضريب هدايت حرارتي موثر
$\mathbf{P'_{sat}}$	فشار اشباع	R	ثابت جهانی گازها
${\rm T'}_{\rm sat}$	دما اشباع	ν	فازبخار
\widehat{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
$\widehat{P}^{*'}$	فشار جزئي بخار	$\widehat{\mathrm{m}}_{\mathrm{lv}}$ - $\widehat{\mathrm{m}}_{\mathrm{vl}}$	نرخ انتقال جرم ناشی از میعان و تبخیر
μ_{m}	ويسكوزيتهي مخلوط	$\hat{\rho}_{l}$	چگالی مایع
$\hat{\rho}_m$	چگالی مخلوط	$\hat{\rho}_\upsilon$	چگالی بخار

فهرست علائم

۱–مقدمه

گاز طبيعي اغلب شامل متان و مقدار كمي از گازهاي اتان، پروپان، بوتان و هیدروکربنهای سنگینتر است. همراه این مواد ناخالصی هایی وجود دارد که باید جدا شوند. مهمتر این ناخالصی ها سولفید هیدروژن، کربن دی اکسید و آب است. بخار آب یکی از معمول ترین ناخالصی ها در جریان گاز طبیعی است که باید از آن جدا شود. بخارآب زمانی که در خطوط انتقال گاز به مایع یا جامد تبدیل می گردد بسیار نامطلوب است. آب در حالت مایع باعث خوردگی می شود و اگر به هیدرات های 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 می شود. هیدرات گازی شبیه به برف است، سبک، با بافت متخلخل و در دماهای بالاتر از صفر درجه سلسیوس شکل می گیرد. به منظور جداسازی گاز از مایع، جداکنندهها طراحی شدهاند که رایجترین نوع جداکنندهها اغلب به شکل تانکهای بسیار بزرگ است و طی مراحلی ذرات گاز را از آب جدا میسازند. تجهیزات دیگری که اکنون در صنعت مورد استفاده قرار می گیرد، شیر فشارشکن و توربین های انبساطی است که

عملکرد شیر فشارشکن در فرآیند اختناق، باعث کاهش فشار گاز به فشار مطلوب می شود. 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 می شود. توربین های انبساطی تجهیزات دوار پیشرفتهای میباشند که با انبساط گاز پرفشار، انرژی فشاری جریان به کار مکانیکی تبدیل می شود. 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 می باشند، 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 جداکننده های مافوق صوت به این صورت است که ابتدا جریان گاز پرفشار وارد این دستگاه شده و همچنان که سیال مادونصوت درون قسمت همگرای نازل پیش میرود، سرعت آن افزایش و فشار آن کاهش می یابد تا در گلوگاه نازل سرعت سیال به سرعت صوت مىرسد. پس از گلوگاه، جريان سيال با توجه به فشار درنظر گرفته شده برای خروجی نازل، دو حالت جریان مادون صوت ومافوق صوت را می تواند در قسمت واگرا تجربه کند. در نازل مافوقصوت پس از گلوگاه عدد ماخ افزایش یافته

مدلها در مطالعهی عددی	مراجع
مدل جریان متراکم، لاوال نازال، بدون موج ضربهای	شوشتری و شاهسوند [۱۶و۱۷]
مدل جریان متراکم، لاوال نازال، بدون موج ضربهای	ما و همکاران [۱۸و۱۹]
تغيير فاز تبخير – ميعان در نرم افزار انسيس – فلوئنت	نيکنام و همکاران [۲۰]

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

و مقداری بزرگتر از یک خواهد داشت. همزمان با افزایش سرعت در این قسمت، دما و فشار کاهش می یابند و گاز به صورت بی دررو منبسط می شود. 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 می شوند.امروزه فناوری جداکننده ی مافوق صوت با ویژگی راندمان بالا، صرفه جویی در مصرف انرژی، حفاظت از محیط زیست، حداقل هزینههای نصب و راهبری، اندازه ی بسیار کوچک در طیف گسترده ای از زمینهها مورد توجه قرار گرفته است [۱-۶].

جیارمتی رشد قطرات آب درون جریان بخار آب را در داخل نازلهای همگرا-واگرا مورد بررسی قرار داد. او با در نظر گرفتن اثر مویینگی و فرض دمای غیر یکنواخت، تقریب نسبتا 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 جريان مافوقصوت بخار أب فشار بالا، درون نازل همگرا-واگرا مورد بررسی قرار دادند، آنها یک رابطه نیمهتجربی برای رشد قطرات ارائه کردند [۹]. هنگوی و همکاران یک واحد آزمایشی برای بررسی و تحقیق در مورد کارآیی 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 مافوقصوت ارائه نمودند، سپس مدلشان را به منظور پیشبینی مشخصات تعادل فازی و کارایی جداسازی یک جداکنندهی مافوقصوت 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 مافوقصوت پرداختند و روش نازل مافوقصوت را با روشهای دیگر مقایسه کردند و به این نتیجه دست یافتند که جداکنندهی مافوقصوت یکی از بهترین روش ها برای رطوبتزدایی گاز طبيعي است [١٢]. اسماعيلي مقايسهاي بين شير فشار شكن و توربین انبساطی و جداکنندهی مافوقصوت انجام داد. نتایج نشان داد با افزایش دبی حجمی بخار آب ورودی، چگالش ذرات بخار زیاد می شود و در شرایط یکسان، جداکننده ی 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 مافوقصوت 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 می گردد [۱۴]. بیان و همکاران به مطالعهی فرایند چگالش متان- کربن دی اکسید جهت جداسازی کربن دی اکسید از گاز در یک جداکنندهی مافوقصوت پرداختند، نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش فشار ورودی و کاهش دمای ورودی، چگالش دیرتر اتفاق میافتد [۱۵]. شوشتری و شاهسوند [۱۶و۱۷]، ما و همکاران [۱۸و۱۹] نیز فرایند تغییر فاز در جداکنندهی مافوقصوت را مدلسازی کردند، اما موج ضربهای در این شبیهسازیها وجود نداشت.

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



شکل ۱. طرحی از جداکنندهی مافوق صوت [۲۱]

- j+ 0j+ 0	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••
مقدار (میلی متر)	ابعاد
۳۵/۱۰	قطر ورودي نازل
١۴/٧٥	قطر گلوگاه نازل
۱۸/۳۰	قطر خروجي نازل
٣٣/٣٩	طول قسمت همگرای نازل
$VT/\Delta \circ$	طول قسمت واگرای نازل
۲۲۰/۵۰	طول لوله ثابت
۴۰	قطر خروجي ديفيوزر
$r \circ r / \Lambda \Delta$	طول ديفيوزر

جدول ۲. ابعاد جداکنندهی مافوقصوت

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

۲-شرح مسئله

۲ – ۱ – مدل فیزیکی
 شکل ۱، یک جداکننده یمافوق صوت را نشان می دهد. به منظور ساده سازی مدل فیزیکی و تمرکز بر فرآیند تراکم، مولد جریان چرخشی در این شبیه سازی به کار گرفته نشده است. نازل همگر و اگرا دارای گلوگاهی با قطر ۱۴/۷۰ میلی متر است و قطر و رودی

و خروجی نازل به به ترتیب ۲۵/۱۰ و ۱۸/۳۰ میلیمتر هستند. یک لوله ثابت برای جداسازی سیکلونی به انتهای خروجی لاوال نازل وصل شدهاست ، قطر خروجی دیفیوزر ۴۰ میلیمتر است. دمای ورودی و خروجی ۵۲۰ کلوین و فشار ورودی و خروجی به ترتیب ۴۰ بار و ۲۵ بار در نظر گرفته شد. ابعاد این جداکنندهی مافوقصوت 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.

همه مهمتر داشتن دقت قابل قبول برای طیف وسیعی از جریانهای آشفته مورد استفاده قرار می گیرد و زیربنایی برای مدلسازی جریان آشفته در بسیاری از تحقیقات است. ثبات این مدل به صورت تجربی بدست می آید. مدل ع-k استاندارد نسبت به مدلهای ع-k از دقت بالاتری برخوردار است. از این رو در شبیه سازی های پیش رو در این مطالعه برای جداکنندهی مافوق صوت بدون مولد چرخش از مدل ع-k استاندارد استفاده می شود.

۲-۴-پیادہسازی مدل

در مدلسازی جریان تکفازی، معادلات پیوستگی، بقای جرم و انرژی به صورت مستقیم توسط نرمافزار انسیس- فلوئنت حل شدهاند. مدل آشفتگی k-E استاندارد با توجه به جریان مافوقصوت 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 طى شبيهسازى عددى توسعه داده شدهاند. شبكه ساختار یافتهای که برای جداکنندهی مافوقصوت طراحی شدهاست در شکل ۲ نشان داده شدهاست. شرایط مرزی برای جداکننده در جدول ۳ آمده است. استقلال از شبکه بر اساس ۳۶۰۰۰، ۱۸۴۰۰۰، ۳۶۸۶۵۰ سلول ساختار یافته برای شبکههای درشت، متوسط و ریز بررسی شدهاست. سه شبکهی مختلف رفتار تقريبا يكساني در جهت جريان و در بالادست گلوگاه نازل دارند. این شبکهها وقوع چگالش غیر تعادلی را در جداکنندهی مافوقصوت نشان ميدهد. بنابراين شبكه متوسط با توجه كاهش هزينه و زمان عددي براي ارزيابي عملكرد رطوبتزدايي جداکنندهی مافوقصوت استفاده می شود.

۳- تحلیل نتایج ۱-۳ - اعتبارسنجی

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

$$\frac{\partial \hat{\rho}}{\partial \hat{t}} + \nabla * (\hat{\rho} \, \hat{V}) = 0 \tag{1}$$

$$\begin{split} \frac{\partial}{\partial \hat{t}(\hat{\rho}\widehat{V})} + \nabla * \left(\hat{\rho}\widehat{V}\widehat{V} \right) \\ &= -\nabla \hat{\rho} + \frac{1}{Re}\nabla \qquad (\Upsilon) \\ &* \left[\left(\nabla \widehat{V} + \nabla \widehat{V}^{T} \right) \right] + \hat{\rho}\hat{g} + \hat{F} \\ &\frac{\partial}{\partial \hat{t}} \int_{k=1}^{n} \left(\alpha_{k}\hat{\rho}_{k}\widehat{E}_{K} \right) + \nabla \sum_{k=1}^{n} \left(\alpha_{k}\hat{\rho}_{k}(\hat{\rho}_{k}\widehat{E}_{k} + \hat{p}) \right) \\ &= \frac{1}{Pr}\nabla * \left(\hat{k}_{eff}\nabla\widehat{T} \right) + \hat{S}_{E} \end{split}$$

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 می گردد.

(*)

$$\begin{array}{l}
\begin{array}{l}
\begin{array}{l}
\begin{array}{l}
\begin{array}{l}
\begin{array}{l}
\begin{array}{l}
\end{array}\\
\end{array}\\
\end{array}\\
\end{array} & (\pi, \hat{\rho}_v) = \hat{m}_{lv} - \hat{m}_{vl} \\ (\pi, \hat{\rho}_v) = \hat{m}_{vl} - \hat{m}_{vl} \\ (\pi, \hat{\rho}_v) = \hat{$$

$$\hat{m}_{lv} = co \hat{e} f f * \alpha_l \hat{\rho}_l \frac{(\hat{T}_l - \hat{T}_{sat})}{\hat{T}_{sat}}$$
 (۵)

اگر T_v < T_{sat} باشد (میعان)

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

۲-۳- مدل جريان آشفته

مدلسازی جریان آشفته به منظور پیشبینی صحیح رفتار دینامیکی سیال با توجه به ماهیت ویسکوز جریان، به خصوص در نزدیک دیواره و مدلسازی صحیح لایهی مرزی ایجاد شده نزدیک دیواره بسیار مهم است. از بین مدلهای مربوط به جریان آشفته مدل دو معادلهای ٤-٤ به سبب قدرت پیشبینی بالا، اقتصادی بودن و از

مرجع	نوع جداکنندهی مافوقصوت	مدل جريان آشفته
[77]	بدون مولد چرخش	k-ε استاندارد
[67]	بدون مولد چرخش	k-ε استاندارد
[?7]	بدون مولد چرخش	k-ε استاندارد
[77]	بدون مولد چرخش	مدل غير ويسكوز
[77]	دارای مولد چرخش	RNG k- \mathcal{E}

جدول ۳. مدل جریان آشفته بکار رفته در سایر مطالعات



شکل ۲. نحوهی شبکهبندی ساختاریافته برای جداکنندهی مافوقصوت

جدول ۴. شرایط مرزی جداکنندهی مافوقصوت

سیال و دیوارەھا	خروجي جداكننده	ورودي جداكننده	شرايط مرزى
سیال کاری: متان، آب به صورت بخار و مایع	۲۵ بار	۴۰ بار	فشار نهایی
شرط مرزی عدم لغزش و آدیاباتیک روی دیوارهها	۰ ۳۰ کلوین	۲۹۸ کلوین	دمای نهایی

نمی شود. شرط عدم لغزش آدیاباتیک و مافوقصوت بودن برقرار است. مدل آشفتگی k-۶ استاندارد در نظر گرفته شد و شرایط مرزی به صورت فشار ورودی برابر ۱۰۸۸۰ پاسکال و دمای ورودی ۴۰۱/۳۵ کلوین و فشار خروجی ۱۶۰۰۰ پاسکال فرض شد. نتایج CFD با داده های 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 می دهد. ابعاد این نازل در شکل ۳ آورده شدهاست. در شبیه سازی 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 مناسب ترین شبکه، نازل IWSEP با اندازه های مختلف شبکه مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که شبیه سازی انجام گرفته از صحت قابل قبولی برخوردار است. بنابراین شبکهی متوسط دارای ۹۲۸۲۰ سلول محاسباتی، می تواند به عنوان شبکهی بهینه در نظر گرفته شود. زیرا که نسبت به شبکه های ریز تغییر نامحسوس و قابل توجهی در نتایج دیده





الف) توزيع سرعت هستهزايي قطره در نازل IWSEP



۳–۲ – 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

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

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 توزيع فشار استاتيک به دليل آشکارسازي موقعيت موجهاي ضربهای بر روی محور مرکزی نازل حائز اهمیت است. این وضعیت را به صورت پرشهایی در امتداد محور مرکزی نازل در طول نمودار می توان شناسایی کرد. در مدل تکفاز، موج ضربهای در مکان پایین تری نسبت به مدل دوفاز قرار دارند. نوسانات فشار در مدل دوفاز کمتر است چرا که رطوبت ناشی از قطرات آب باعث جذب این نوسانات می شود. هنگام رسیدن به گلوگاه نازل، فشار به طور ناگهانی کاهش می یابد و در انتهای گلوگاه به نوساناتی میرسد که به دلیل وجود موجهای ضربهای ایجاد شدهاست. در ناحیه واگرای نازل، کمی از افت فشار جبران می شود، اما همچنان کمتر از فشار اولیه است. در قسمت دیفیوزر نازل، فشار کمی افزایش می یابد و ثابت می ماند.

در شکل۵ 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 پايين تر از حالت تکفاز است. اين تفاوت ناشی از تأثیر چگالش خودبهخودی و تغییرات انرژی حرارتی سیال است که به افزایش دما منجر می شود. در مدل تکفاز، دما به طور مداوم در ناحیه واگرای نازل کاهش می یابد، در حالی که در مدل دوفاز با در نظر گرفتن چگالش، انرژی آزاد شده به دما کمک می کند. موج نهایی دما در مدل دوفاز در موقعیت پایین تری نسبت به مدل تکفاز قرار دارد. برای توجیه غیریکنواختی کانتور دما در بخش دیفیوزر، می توان 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 مافوقصوت به مادونصوت تغییر میکند و این تغییر ناگهانی و غير يكنواخت مي تواند باعث اختلاف دما در نواحي مختلف

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 آشفتگی می تواند 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 آشفتگی ها در دیفیوزر، منجر به غیر یکنواختی کانتور دمای آن می شود.

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

به طور کلی، نتایج نشان میدهد که وجود رطوبت در مدل دوفاز تأثیر معناداری بر روی پروفایل های فشار، دما و عدد ماخ 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 لولهی 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.

کسرجرمی رطوبت موجود در متان ۰/۰۰۰۴۸۵۲ است که با توجه به رطوبت یکی از چاههای گاز در نظر گرفته شد. تغییرات فشار استاتیک، دمای استاتیک، عدد ماخ، نرخ تولید جرم مایع در



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



Condensing flow model

ی) عدد ماخ در خط مرکزی نازل برای مدل تکفاز و دوفازی (بخار مرطوب) شکل۵. مقایسهی فشار استاتیکی، دمای استاتیکی، عدد ماخ در خط مرکزی نازل برای مدل تکفاز و دوفازی(بخار مرطوب)

کسر مولی سایر گونه ها در طول شبیه سازی ثابت مانده است که نشان می دهد مطابق میل تنها بخار آب دچار تغییر فاز شده است. نسبت فشار استاتیک ورودی به خروجی برابر ۱/۶، نسبت دمای استاتیک ورودی به خروجی ۹۹/۰، نسبت عدد ماخ ورودی به خروجی تقریبا ۱/۲۷ است. فشار استاتیک خروجی نسبت به ورودی ورودی ۴۰ ٪ کاهش، دمای استاتیک خروجی نسبت به ورودی ۵/۰ ٪ افزایش یافته و عدد ماخ خروجی به ورودی تقریبا ۲۷ ٪ افزایش یافته است. همانطور که قبلا گفته شد جهت بازیابی فشار و جبران افت فشار ایجاد شده می توان از یک دیفیوزر پس از خروجی جداساز استفاده کرد.

۳- ۳- ۱- کسرجرمی 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 مادونصوت دو صوت به جداکننده، در ابتدا با پیشروی در مقطع همگرا دما و فشار کاهش و سرعت سیال افزایش یافته است. درگلوگاه 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 شده و بنابراین نرخ تولید جرم مایع و کسر مولی مایع افزایش موج ضربهای چگالش ایجاد شدهاست. مطابق انتظار با پیشروی موج ضربهای چگالش ایجاد شدهاست. مطابق انتظار با پیشروی همچنان دما و فشار کاهش و سرعت سیال افزایش یافته است. مطابق شکل تمام بخار آب موجود در گاز طبیعی به آب مایع تبدیل شدهاست و راندمان مایع سازی بسیار بالا است.



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

۳–۲–۲ 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 پایین تر است درجهی زیرسرد در ورودی نازل بیشتر بوده و بخار سریع تر به حالت زیرسرد می رسد. 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 مربهای، آزاد شدن گرمای نهان و در نتیجه افزایش دمای بخار، درجهی زیر سرد کاهش یافته است. با افزایش دمای ورودی فرایند هسته زایی دیر تر خ می دهد. 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 ۴۸۰۰۰۰۰ 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 کاملا تبخیر می گردد که باید توسط جداساز خارج گردد. نیروی گریز از مرکز القا شده توسط مولد جریان باعث خروج مایع می گردد (در این مطالعه نادیده گرفته شده است). افزایش فشار در امتداد قسمت دیفیوزر، دمای اشباع فاز مایع را افزایش میدهد و بخار می گردد.



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 سریع تر 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 می گردد. 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 ۲۸۵۲۰۰۰۰ است، یافتهاست. در حالتی که کسر جرمی بخار آب تدمام مایت به با میل کردن هستهزایی و نرخ رشد قطره به صفر، نرخ تولید مایع نیز به صفر رسیدهاست. با افزایش کسر جرمی از ۲۸۵۲۰۰۰۰ به نیز به صفر رسیدهاست. با افزایش کسر جرمی از مایع، کسر جرمی مایع کمی افزایش یافتهاست.

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

جهت بررسی اثر فشار ورودی بر فرایند چگالش، متان و بخارآب در فشار های مختلف و دمای ثابت ۱۹۰/۵ کلوین مورد بررسی سرد در ورودی نازل کاهش یافته و بنابراین در این حالت رسیدن به چگالش مشکل تر است. بنابراین در دمای ورودی پایین تر تشکیل فاز مایع سریع تر رخ می دهد. با کاهش دمای ورودی، شعاع قطره های خروجی افزایش یافته است. دلیل این امر این است که با کاهش دمای ورودی و در نتیجه تشکیل سریع تر قطره های مایع، این قطره ها فرصت بیشتری جهت رشد تا مقطع خروجی خواهند داشت. بنابراین با تشکیل سریع تر فاز مایع و افزایش شعاع متوسط قطره به دلیل کاهش دمای ورودی، کسر جرمی مایع افزایش یافته است. با افزایش دمای ورودی از ۲۹۱/۱۵ کلوین به ۲۱۱/۱۵ کلوین، کسر جرمی مایع کاهش می یابد و بهترین حالت دمای ورودی به اندازهی ۸/۶ درصد، کسر جرمی مایع بیش از ۲ درصد کاهش می یابد. این امر می تواند به دلیل کاهش چگالی بخار و تغییرات در شرایط میعان باشد.

۳-۳ -۳ -۱ اثر کسر جرمی ورودی بر پارامترهای چگالش
جهت بررسی اثر کسر جرمی ورودی بر فرایند چگالش، بخار آب
در کسر جرمیهای مختلف، فشار ثابت ۴۰ بار و دمای ثابت ۱۹۸/۵



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



شکل ۱۴. پروفایل های 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 می گردد با کاهش فشار ورودی، بیشترین مقدار مافوق اشباع افزایش یافتهاست. با افزایش فشار ورودی موقعیت چگالش به بالادست منتقل شده و هستهزایی سریع تر 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 می رسد. 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



شکل۱۵. پروفایل های کسر جرمی مایع در خط مرکزی نازل برای مدل دوفازی (مخلوط) در سه فشار ورودی مختلف

افزایش فشار ورودی، مافوق اشباع در ورودی نازل افزایش یافته و بنابراین در این حالت رسیدن به چگالش آسان تر 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 كمترى جهت رشد تا مقطع خروجي خواهند داشت. با تشکیل سریع تر 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 بالاترين مقدار خود همان ۴۸۵۲ • • • ٥٠ مىرسد. نتايج شبيهسازى 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 ایده آل تری برای تشکیل قطرات مايع در نازل و ساير نواحي مي شود.

۴- نتیجهگیری

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

مافوقصوت 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، مافوقصوت 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 شبیه سازی کامل جداکننده ی 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 تقریبا ۵/۰ ٪ 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 می شود. 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 می کنند و جداسازی بهتر صورت می گیرد. نتایج به صورت کلی و خلاصه به شرح زیر است:

- ✓ وجود موج ضربهای در جداکنندهی مافوقصوت جهت
 بازیابی فشار سبب کاهش چشمگیر راندمان مایعسازی
 می شود.
- ✓ 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 :
 - بخارآب سريعتر به حالت فوق اشباع مىرسد.
- فرایند هستهزایی سریعتر اتفاق افتاده و رسیدن به چگالش آسان تر است.

واژه نامه

 قطرههای مایع سریعتر تشکیل می گردد و فرصت بیشتری برای رشد داشته و شعاع بزرگتری خواهد داشت.

 با تشکیل سریعتر فاز مایع و افزایش شعاع متوسط قطره، کسرجرمی 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.

1. Wet Steam

References

- 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.
- 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.
- Teixeira, M., Arinelli, L. O., Medeiros, J. L., Araujo, O. Q. F., "Economic leverage affords postcombustion 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

2. Superhit grade

منابع

offshore processing of natural gas with high carbon dioxide content: environmental and economic assessments", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 233, pp. 510-521, 2019.

- 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.
- Gyarmathy, G., *Two-phase steam flow in turbines and separators*, Hemisphere publ. Corp. Washington DC. 1976.
- 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.
- 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.

- Bao, L., Liu, Z., Liu, H., Jiang, W., Zhang, M., and Zhang, J., "Phase equilibrium calculation of multicomponent gas separation of supersonic separator", *Science china technological sciences*, Vol. 53, pp. 435-443, 2010.
- Ashtiani, A. J., Haghnejat, 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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., Smołka, 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.