



شبیه‌سازی و امکان‌سنجی استحصال مایعات هیدروکربنی از گاز دارای رفتار میعان معکوس با استفاده از نازل‌های فراصوتی

علیرضا فضلعلی^{1*}، وهب قلعه خندابی²، عفت ظاهری بیرگانی³، رضا مسیبی بهبهانی⁴

¹دانشیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

²دانشجوی دکتری گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

³دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

⁴استاد گروه مهندسی انتقال و فرآوری گاز، دانشگاه صنعت نفت، اهواز، ایران

دریافت: 97/1/23 پذیرش: 97/7/14

چکیده

در این مطالعه، نازل‌های فراصوتی به عنوان یک سیستم فشارقوی متراکم که قادر به جداسازی میعانات گازی از گاز طبیعی می‌باشد، معرفی گردیده است. یکی از مهم‌ترین مزایای این سیستم، بازیابی فشار تا حد زیادی در ناحیه واگرای نازل، طی پدیده تراکم موج ضربه ای می‌باشد. از طرفی نازل‌های فراصوتی فاقد تجهیزات دوار می‌باشند و به‌کارگیری آنها نیازی به مصرف انرژی ندارد. برای مدل کردن و شبیه‌سازی جداکننده‌های فراصوتی، یک دسته معادلات غیرخطی با استفاده از نرم‌افزارهای MATLAB و HYSYS به صورت عددی حل شدند. در این پژوهش اثر دما، فشار و دبی جریان خوراک ورودی، فشار برگشتی در خروجی نازل و رفتار جریان در داخل نازل ارزیابی شده است. نتایج کار حاضر نشان داد که جداسازی انتخابی آب و میعانات گازی با افزایش فشار ورودی در دمای ثابت، افزایش دمای ورودی در فشار خروجی ثابت و کنترل فشار برگشتی امکان‌پذیر است.

کلمات کلیدی: استحصال مایعات هیدروکربوری، شبیه‌سازی، گاز با رفتار میعان معکوس، موج ضربه‌ای، نازل فراصوتی

مقدمه

گاز طبیعی به دست آمده از مخزن، یک ترکیب تک جزئی نیست بلکه شامل ترکیبات سنگین‌تر از متان، مایعات گاز طبیعی، کربن‌دی‌اکسید، هیدروژن سولفید و آب می‌باشد. گاز طبیعی پیش از استفاده در شبکه

* a-fazlali@araku.ac.ir

توزیع نیاز به فرآورش دارد. ناخالصی‌هایی مانده نیتروژن، کربن دی اکسید، هیدروژن سولفید و هیدروکربن‌های سنگین می‌توانند در واحدهای فرآورشی حذف شوند [1]. در طول فرآورش گاز طبیعی احتمال اینکه آب و ترکیبات هیدروکربن میعان یابند و یک فاز مایع را تشکیل دهند، وجود دارد. میعان آب و هیدروکربن‌ها، در گاز طبیعی ارزش حرارتی آن را کاهش داده و موجب مشکلات عملیاتی مانند خوردگی، افت فشار بیش از حد، تشکیل هیدرات و لخته‌ای شدن جریان و کاهش توان عبور گاز می‌گردد. یکی از جدی‌ترین مشکلات در صنایع گاز، امکان انسداد خط عبور جریان و کاهش توان عبور گاز، به وسیله تشکیل هیدرات می‌باشد. گرم کردن خط لوله، تزریق مواد ضد تشکیل هیدرات و نم زدایی روش‌های مرسوم جهت برطرف کردن و یا جلوگیری از تشکیل هیدرات می‌باشد [2]. در فرآیندهایی نظیر انتقال گاز در خطوط لوله با فشار زیاد و انباشتن گاز در ظروف فشار بالا برای انتقال گاز به شکل فشرده در دریا و یا خشکی، در یک شرایط دمایی و فشاری مشخص، حضور هیدروکربن‌های سنگین در گاز طبیعی مطلوب است [3].

در فرآورش گاز طبیعی، فرآیندهای برودتی در شرایطی به کار می‌آیند که دما کم‌تر از 45°C باشد. به منظور رسیدن به چنین دمایی، ترکیبی از فرآیندهای انبساطی و سردسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند و جهت رسیدن به شرایط بازیابی مایعات گازی چند روش عمده وجود دارد: جذب توسط مایعات نفتی، جذب سطحی، فرآیندهای سرمایشی و استفاده از غشاء [4]. روش‌های نامبرده عملکرد خوبی در استحصال میعانات هیدروکربوری دارند اما دارای معایبی نیز می‌باشند که از جمله آن می‌توان نیاز به تأسیسات نسبتاً بزرگ، سرمایه گذاری قابل ملاحظه و کارایی مکانیکی پیچیده اشاره نمود همچنین ممکن است دارای تأثیرات منفی بر محیط زیست نیز باشند. واحد جداسازی فراصوتی برای برطرف کردن بعضی از این معایب معرفی می‌شود [5].

واحدهای جداسازی فراصوتی در پنج تأسیسات گازی مختلف با ترکیب اجزاء گاز متفاوت و شرایط عملیاتی تا سال 1996 تست شده است. اولین تکنولوژی تجاری تصفیه گاز در خشکی با استفاده از جداکننده فراصوتی توسط شرکت Twister BV در دسامبر سال 2003 میلادی شروع بکار کرده است [6]. جداکننده 3S واحد دیگری است که مبنای آن تکنولوژی یکسان با ساختار متفاوت است. ایده جداکننده 3S توسط شرکت Translang Technologies Ltd مطرح شد [7]. بعدها یک واحد آزمایشی دیگر برای دبی جریان گاز طبیعی بیشتر در Calgary ساخته شد. هیچ یک از این تأسیسات توانایی کار در فشارهای خیلی زیاد را نداشتند. اولین جداکننده 3S صنعتی در Western Siberia راه اندازی شد. این جداکننده‌های سیکلونی گاز-مایع که تراکم و انبساط مجدد را در یک وسیله لوله‌ای ترکیب می‌کند، عملکرد ترمودینامیکی خیلی مشابهی نسبت به توربوآکسپندرها دارند. در هر دو واحد عملیاتی (جداکننده فراصوتی و توربوآکسپندر) افت دما اتفاق می‌افتد و همچنین فشار در توربوآکسپندر به توان شافت تبدیل می‌شود و در هر دو واحد فشار به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود [8 و 9]. جداکننده‌های فراصوتی Twister و 3S هر دو شامل یک نازل فراصوتی برای متراکم کردن خوراک گاز اشباع به سرعت‌های فراصوتی می‌باشند و در نتیجه دما و فشار پایین‌تر که حاصل آن میعان آب و هیدروکربن‌های سنگین است. جداسازی قطرات مایع به وسیله نیروهای گریز از مرکز با استفاده از دو روش متفاوت امکان پذیر است:



1. استفاده از یک پره یا تیغه در انتهای نازل و در ناحیه فراصوتی

2. استفاده از یک وسیله جریان گردابی در جلوی نازل

روش اول در طراحی Twister مورد استفاده قرار گرفته و روش دوم در جداکننده 3S استفاده شده است. در هر دو روش بعد از جدا شدن مایعات از گاز، گاز سبک در خروجی فروصوت خواهد شد و بخشی از فشار را می‌توان بازیابی کرد. واحد دیگری با تکنولوژی مشابه به طور آزمایشگاهی با هوای مرطوب به عنوان سیال و فشار 1 Mpa مورد بررسی قرار گرفته که بازیابی فشار در این سیستم کمتر از 75% بوده است [2].

در واحدهای جداسازی فراصوتی، دمای گاز بر مبنای اصول تراکم، بدون نیاز به مبرد تا مقادیر بیشتری کاهش می‌یابد. سرعت گاز در این تجهیز آنقدر زیاد است که از رسوب گرفتگی و ته نشین شدن جامدات و یخ جلوگیری می‌شود. سرماسازی در این روش خود به خودی می‌باشد، بنابراین حرارتی از دیواره‌ها انتقال نمی‌یابد و برخلاف سیستم‌های سرد سازی خارجی به تزریق بازدارنده تشکیل هیدرات و همچنین سیستم بازیابی بازدارنده نیازی نمی‌باشد. به علاوه دستیابی به نقاط شبنم آبی کنترل شده تا حدود 50- تا 60- درجه سانتی گراد بدون سرد سازی خارجی یا استفاده از تکنیک‌های جذب سطحی جامدات صورت می‌پذیرد [3].

نازل فراصوتی که بخش اصلی یک واحد جدا کننده فراصوتی را تشکیل می‌دهد، یک لوله است که وسط آن باریک می‌شود. نازل شامل سه بخش است: بخش هم‌گرا (ناحیه فروصوت)، گلوگاه (ناحیه بحرانی) و بخش واگرا (ناحیه فراصوت). در دبی ثابت جریان با تنگ شدن لوله، جریان شتاب می‌یابد. بنابراین نقش قسمت هم‌گرا، شتاب دادن به گاز و حفظ جریان یکنواخت و موازی می‌باشند. در شرایط آزمایشی، برای ایجاد سرعت صوت در گلوگاه که کمترین سطح مقطع را دارد، معمولاً شعاع ورودی نازل بزرگتر از $\sqrt{5}$ برابر قطر گلوگاه در نظر گرفته می‌شود و طول هم‌گرایی مساوی یا بزرگتر از قطر گلوگاه می‌باشد [10]. زمانی که شرایط ترمودینامیکی ورودی و تغییر سطح مقطع نازل به عنوان تابعی از طول نازل تعریف شوند، شرایط خروجی به شکل منحصر به فرد به دست خواهد آمد [11].

هدف از این تحقیق، طرح یک روش دیگر برای فرآیند استحصال میعانات گازی است. سیستم پیشنهاد شده باید توانایی کار در شرایط فشار بالا را داشته باشد و بتواند آب را به طور انتخابی جدا نماید بدون اینکه بر ترکیبات هیدروکربنی گاز تاثیر گذارد. پس از ارزیابی راه حل‌های مختلف، یک روش جدید استفاده از سیستم‌های فراصوتی برای جداسازی گاز در شرایط فوق بحرانی انتخاب شده است. این بررسی درک خوبی از سیستم‌های فراصوتی به ویژه فرآیند استحصال میعانات گازی از جریان گاز در فشار بالا را میسر می‌سازد. مدلسازی عددی

گام اول برای طراحی حل یک نازل، پیش بینی رفتار جریانی که در طول نازل برقرار است، می‌باشد. بنابراین برای حل معادلات حاکم بر سیستم مانند معادلات پیوستگی و مومنتوم، به علاوه قانون‌های اول و دوم ترمودینامیک، یک برنامه MATLAB نوشته شده است. علاوه بر این یک معادله حالت (Peng Robinson) جهت محاسبه خواص ترمودینامیکی جریان گاز مانند چگالی، ویسکوزیتی، آنتالپی و آنتروپی، مورد نیاز است. شبیه ساز فرآیند HYSYS به منظور پیش بینی خواص گاز با استفاده از مدل‌های

ترمودینامیکی معمول و تکنیک‌های تخمین خواص سیال استفاده شده است. پارامترهای ورودی به HYSYS، اجزاء مولی گاز، دما و فشار ورودی و دبی جریان می‌باشند. آب آزاد به طور معمول در شرایط سرچاه وجود دارد و فرض بر این است که گاز تولید شده قبل از فرآورش اشباع می‌باشد [12]. شبیه سازی با ترکیب گاز خشک آغاز می‌شود. یک میکسر در شبیه سازی وارد شود تا خوراک گازی را با آب، اشباع نماید. گاز طبیعی می‌تواند مقادیر مختلفی از آب را در شرایط دما و فشاری متفاوت به همراه داشته باشد. ظرفیت اشباع گاز طبیعی با افزایش دما و کاهش فشار، افزایش می‌یابد. زمانی که جریان خشک، اشباع می‌شود، در ترکیب گاز، دمای ورودی و دبی جریان گاز تغییر ایجاد خواهد شد. میعان آب موجب کاهش در نقطه شبنم آبی و کاهش جزء مولی آب در گاز می‌شود. جریان در طول نازل، فوق بحرانی، پایا، یک بعدی و تراکم پذیر بدون انتقال حرارت فرض می‌شود.

معادلات حاکم

معادلات بقای جرم، مومنتوم، قانون اول و دوم ترمودینامیک به ترتیب در زیر آورده شده است:

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 = \dot{m} = cte \quad (1)$$

$$P_1 A_1 - P_2 A_2 = \dot{m} V_2 - \dot{m} V_1 + I_c \quad (2)$$

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 + \frac{V_2^2}{2} + \Phi_c \quad (3)$$

$$S_2 > S_1 \quad (4)$$

که در این معادلات ρ , A , V , $\dot{m}$, P , h , S , $I_c = (\frac{F_1 + P_2}{2})(A_1 - A_2)$ و $\Phi_c = \frac{fU}{\dot{m}}$ بترتیب دانسیته سیال، سطح مقطع نازل، سرعت سیال، دبی جریان، فشار، آنتالپی، آنتروپی، عبارت thrust و ترم اتلاف اصطکاکی هستند.

حل تمامی معادلات از راه تجزیه و تحلیل، اگر در عمل غیرممکن نباشد، یک فرآیند زمانبر است، بنابراین یک روش عددی (روش نیوتن-رافسون) برای طراحی نازل انتخاب شده است. با استفاده از این روش، معادلات غیرخطی را می‌توان برای پیش بینی پارامترهای مجهول نازل به طور همزمان حل کرد. در طراحی و آنالیز یک نازل فراصوتی، به طور معمول همیشه هدف پیش بینی دو پارامتر دما و فشار است. این متغیرها را می‌توان با تکرار نیوتنی تخمین زد. روش نیوتن رافسون دو متغیره را با ایجاد ماتریس زیر می‌توان بسط داد [13]:

$$\begin{bmatrix} T \\ P \end{bmatrix}^{n-1} = \begin{bmatrix} T \\ P \end{bmatrix}^n - \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial T} & \frac{\partial F_1}{\partial P} \\ \frac{\partial F_2}{\partial T} & \frac{\partial F_2}{\partial P} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

طراحی نازل

به منظور طراحی یک نازل بایستی داده‌های مورد نیاز: دما، فشار و دبی گاز ورودی، قطر و طول نازل و نیم زاویه هم‌گرایی و واگرایی در دسترس باشد [14 و 15]. الگوریتم ارائه شده در شکل 1 مراحل طراحی

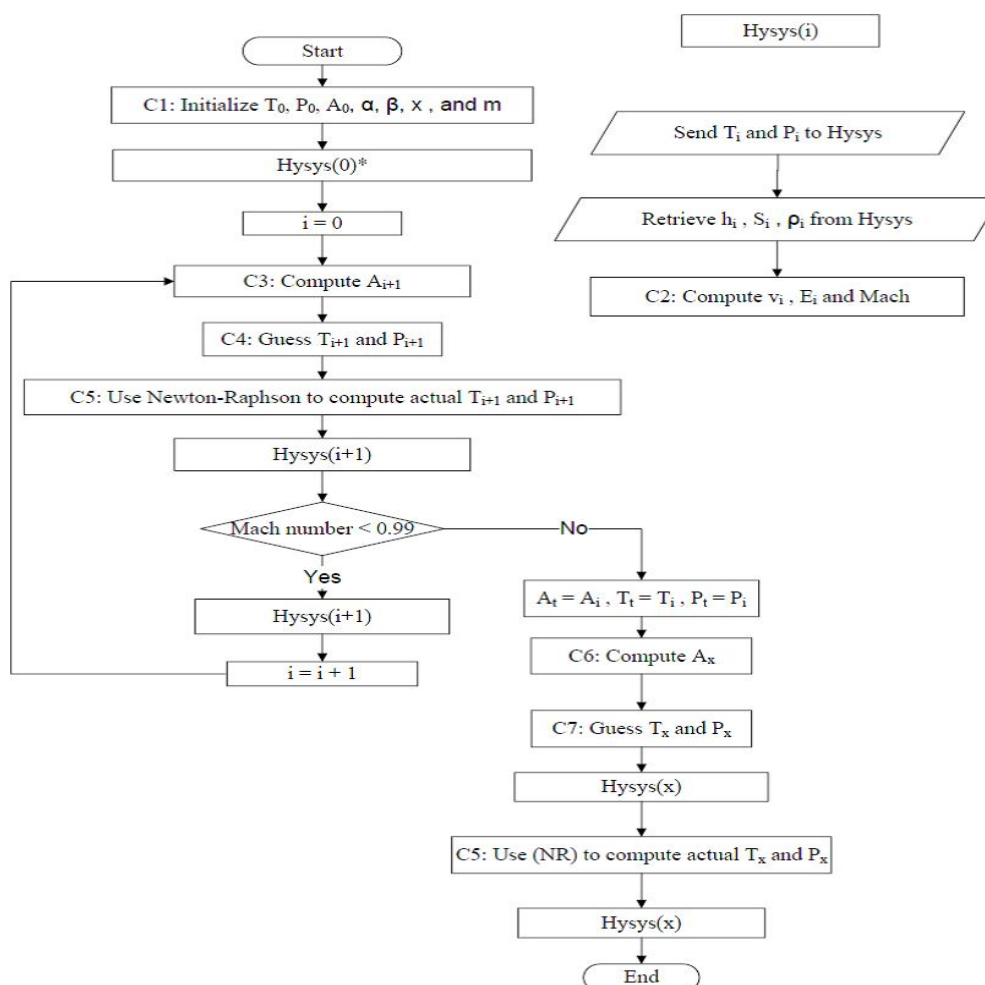


نازل را شرح می‌دهد. در این الگوریتم، در مرحله C1 برنامه از کاربر وارد کردن شرایط جریان ورودی و پارامترهای ساختاری ثابت نازل را درخواست می‌نماید. این پارامترها دما، فشار و دبی ورودی، مساحت سطح مقطع ورودی و نیم زاویه‌های هم‌گرایی و واگرایی می‌باشند. شرایط اولیه جریان به شبیه‌ساز HYSYS وارد می‌شود و با دوباره به دست آوردن چگالی، آنتالپی و آنتروپی از HYSYS و استفاده از معادله پیوستگی، سرعت جریان را می‌توان محاسبه کرد. در مرحله C2 سرعت جریان، صوت و عدد ماخ محاسبه خواهند شد و چیدمان معادلات لازم برای استفاده در روش نیوتن-رافسون شکل خواهد گرفت. در مرحله C3، A_{i+1} با داشتن A_i به عنوان مساحت سطح مقطع مرحله قبل، به دست می‌آید. در این بررسی، فرض شده است که سطح مقطع نازل با تغییر طول به صورت خطی تغییر می‌کند، β و α به ترتیب نیم زاویه واگرایی و هم‌گرایی هستند. مرحله C4 از کاربر یک حدس اولیه برای فشار و دما به منظور استفاده در روش نیوتن-رافسون درخواست می‌کند. استفاده از روش نیوتن-رافسون برای محاسبه دما و فشار واقعی در مرحله C5 انجام خواهد شد. این فرآیند تا زمانی که عدد ماخ بزرگتر از 0/99 که خیلی به یک نزدیک است، برسد، ادامه می‌یابد. آخرین سطح مقطع، گلوگاه نازل خواهد بود. از آنجائیکه طول کل نازل و گلوگاه نازل معلوم هستند، طول‌های هم‌گرایی (L-C) و واگرایی (L-D) می‌تواند حساب شود. همان‌طور که در مرحله C6 نشان داده شده است، مساحت سطح مقطع خروجی نازل (A_x)، قطر گلوگاه (D_x) و نیم زاویه واگرایی نازل به دست خواهد آمد. با داشتن مساحت سطح مقطع خروجی، فشار و دما و سایر خواص جریان در خروجی نازل را می‌توان مشخص کرد.

پیش‌بینی ایجاد موج ضربه‌ای

پس از طراحی نازل، زمان به دست آوردن خواص مانند دما، فشار و پیش‌بینی محل موج ضربه‌ای (اگر اتفاق بیفتد) است. زمانی که نازل هم‌گرا می‌شود جریان منبسط می‌گردد و دما و فشار با استفاده از روش نیوتن-رافسون، قابل پیش‌بینی هستند. سایر خواص مانند چگالی، سرعت و عدد ماخ، با استفاده از دما و فشار، محاسبه خواهند شد. با کاهش دما و فشار، آب موجود در جریان شروع به میعان می‌نماید و آب باقی مانده در فاز بخار از HYSYS بازگردانی می‌شود. بعد از گلوگاه، بسته به فشار برگشتی نازل، فشار ممکن است بازبایی شود بدون هیچ‌گونه انبساط دیگر یا ممکن است کمتر منبسط شود و فراصوت شود. بنابراین، مایع بیشتری در فاز مایع جدا خواهد شد. اگر جریان در قسمت واگرایی نازل، فراصوت باشد، بسته به فشار برگشتی، ممکن است موج ضربه‌ای رخ دهد. موج ضربه‌ای ممکن است در داخل و یا خارج از قسمت واگرایی نازل رخ دهد. در این فرآیند تعداد کمی از موقعیت‌های ضربه در طول‌های مختلف گلوگاه نازل در قسمت واگرایی نازل فرض شده است. از آنجائی که دما و فشار در طول نازل قبل از ضربه در هر سطح مقطع پیش‌بینی شده است، در نتیجه خواص بالا دست موج ضربه‌ای معلوم می‌باشند. مایعات میعان شده باید قبل از ضربه جدا شوند. این فرآیند در HYSYS با استفاده از یک جداکننده شبیه‌سازی شده است. یک جریان بخار خروجی از بالای جداکننده، به قسمت واگرایی نازل بعد از ضربه وارد می‌شود. یک دسته از خواص جریان بالا دست ضربه به دست می‌آید. خواص جریان در بقیه نازل با توجه به خواص پایین

دست ضربه به دست خواهد آمد. در نهایت خواص خروجی، شامل درصد بازیابی فشار که در سطح مقطع خروجی نازل پیش بینی شده بود، حالا معلوم می شود.



شکل 1. الگوریتم طراحی نازل

نتایج و بحث

یک گاز خشک با ترکیبی که در جدول 1 نشان داده شده، در این شبیه سازی استفاده شده است. فرض شده است که میدان جریان تراکم پذیر، پایا و یک بعدی می باشد. مقدار آب گاز طبیعی به شرایط جریان و معادله حالت مورد استفاده، بستگی دارد. جریان گاز خشک در شبیه سازی HYSYS با استفاده از معادله حالت مناسب اشباع شده است. همچنین شرایط ورودی جریان گاز در جدول 1 آورده شده است. رفتار جریان گاز در نازل فراصوت شامل توزیع ویژگی ها در طول نازل، موقعیت موج ضربه ای و بازده جداسازی میعانات به عنوان تابعی از متغیرهای مختلف مانند طول نازل، معادله حالت، فشار، دما و دبی جریان و فشار برگشتی در نازل بررسی می شوند.



برای طراحی یک نازل فراصوتی در این شرایط، قطر ورودی نازل و نیم زاویه همگرایی و واگرایی ثابت در نظر گرفته می‌شود (جدول 2). در این طراحی طول کلی نازل نیز ثابت می‌باشد. طول نازل به طور دلخواه انتخاب شده است اما در محدوده‌ی به‌دست آمده با مراحل زیر قرار دارد. برای هر شرایط ورودی و ساختار نازل، یک سطح مقطع منحصر به فرد که در آن جریان مسدود می‌شود وجود دارد (محاسبه سرعت صوت). بنابراین، قسمت همگرایی در هر نازل ثابت است اما قسمت واگرا با تغییر در طول کلی نازل تغییر می‌نماید. محدوده کوچک‌تر برای طول نازل جایی است که نازل به یک نازل هم‌گرای محض تبدیل می‌شود و طول کلی نازل فاصله بین ورودی نازل و گلوگاه می‌باشد. محدوده بالاتر طول، بلندترین طولی است که در هر دبی جریان کم‌تر از دبی طراحی، فشار خروجی نباید از فشار ورودی بیشتر باشد. با استفاده از پارامترهای ثابت در ساختار نازل و یک جریان گاز با فشار، دما و دبی ورودی جریان می‌توان یک نازل را طراحی کرد. جدول 2 مشخصات طراحی نازل با طول ثابت 0/12 متر را نشان می‌دهد.

زمانی که سیستم معادلات حاکم حل می‌شوند، توزیع خواص در طول نازل معلوم خواهد شد. برای هر نازل طراحی شده، خواص بازیابی شده و خواص طراحی منحصر به فردی وجود دارد. موقعیت‌های مختلف موج ضربه‌ای با انتخاب فشارهای برگشتی مختلف قابل پیش بینی است. فشار برگشتی بیشتر منجر به فشار بازیابی بیشتر می‌شود. با این وجود، فشار برگشتی نمی‌تواند بیشتر از فشار بازیابی شده نازل باشد. فشار بازیابی بیشتر موجب می‌شود تا موج ضربه‌ای زودتر در نازل اتفاق بیافتد. بنابراین می‌تواند مکان مکان موج ضربه‌ای انتخاب شود مانند شرایط جریان که می‌توان در فاز متراکم گاز در منحنی فازی نگه داشته شود و بنابراین یک جداسازی انتخابی به دست می‌آید که آب از میعانات به طور انتخابی قابل تفکیک است.

جدول 1. ترکیبات و شرایط جریان گاز ورودی آزمایشی

ترکیبات جریان گاز ورودی	کسر مولی
متان	0/97407
اتان	0/01550
پروپان	0/00421
ایزوبوتان	0/00110
نرمال بوتان	0/00160
ایزوپنتان	0/00080
نرمال پنتان	0/00060
نرمال هگزان	0/00100
نرمال هپتان	0/00090
آب	0/00023
دما (°C)	20
فشار (Mpa)	30
دبی مولی جریان (Kgmol/hr)	5001

جدول 2. ساختار نازل

مشخصه	اندازه (m)
قطر ورودی	۰/۰۴۰
قطر خروجی	۰/۰۳۰
قطر گلوگاه	۰/۰۲۱
طول هم‌گرایی	۰/۰۸۲
طول واگرایی	۰/۰۳۸
طول کل	۰/۱۲۰
نیم زاویه هم‌گرایی	۶/۸۵ درجه
نیم زاویه واگرایی	۳ درجه

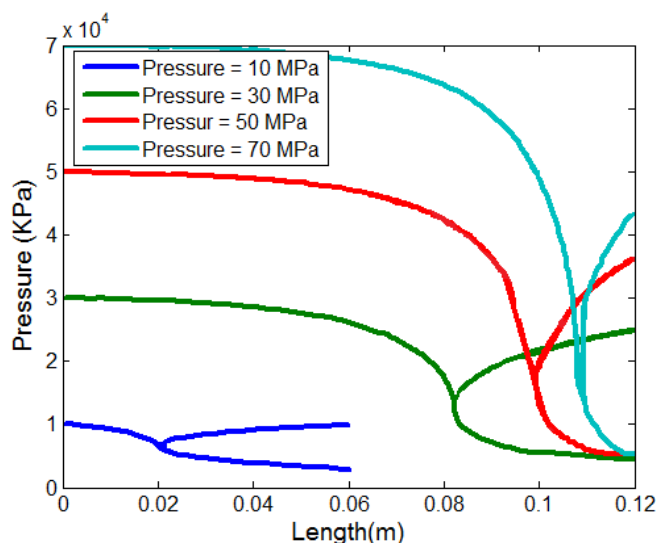
تاثیر فشار ورودی

چهار جریان گاز خشک با دمای برابر و فشارهای متفاوت برای نازل تعریف می‌شوند و با آب اشباع می‌شوند. اشباع جریان موجب تغییر جزئی در دما و دبی جریان شده و ظرفیت جریان برای حمل آب با افزایش فشار ورودی، کاهش می‌یابد. این جریان‌ها برای نازل طراحی شده با استفاده از شرایط جریان آزمایشی تعریف می‌شوند. برای جریان‌های با فشار بیشتر از جریان آزمایشی (جریان‌های شماره 3 و 4) عدد ماخ در گلوگاه کمتر از یک می‌باشد، که این به معنی کافی نبودن دبی جریان برای دستیابی به شرایط فراصوتی برای یک نازل با ساختار مشخص است. مولفه نیوتن-رافسون برنامه، واگرا می‌شود و برای جریان شماره 1 (فشار کمتر از جریان آزمایشی) موفق به محاسبه عدد ماخ در گلوگاه نمی‌شود. بنابراین، یا باید دبی جریان به شکلی تنظیم شود که جریان در گلوگاه مسدود شود و یا نازل مناسب برای هر شرایط جریان طراحی شود.

طول هم‌گرایی نازل با افزایش فشار ورودی افزایش یافته، در حالی که قطر گلوگاه کاهش می‌یابد. نازل طراحی شده برای جریان شماره 1 نسبت به نازل‌های سایر جریان‌ها بسیار کوچکتر است. از آنجائیکه طول نازل برای جریان شماره 1 متفاوت است، مقایسه‌ای بین توزیع فشار در نازل‌های طراحی شده برای جریان آزمایشی و جریان شماره 3 و 4 انجام می‌شود. شکل 2 مقایسه بین توزیع فشار در نازل‌های طراحی شده برای سه جریان مذکور را نشان می‌دهد. برای این مقایسه، طول کل نازل 0/12m در نظر گرفته شده است. شکل 2 همچنین توزیع فشار در طول نازل با طول کلی 0/06m برای جریان شماره 1 را نشان می‌دهد. فشار بازیابی شده و فشار طراحی برای هر حالت، محاسبه شده است. این دو فشار محدوده فشار خروجی نازل به شکل درصد بازیابی فشار ورودی را معلوم می‌سازد. برای دبی جریان یکسان، یک نازل کوتاه برای جریان شماره 1 جایی که فشار کم است طراحی شده است. با افزایش فشار، فشار بازیابی نازل کاهش می‌یابد، این به معنی آن است که برای بازیابی فشار به میزان یکسان برای جریانی با فشار کمتر، نیاز به نازل

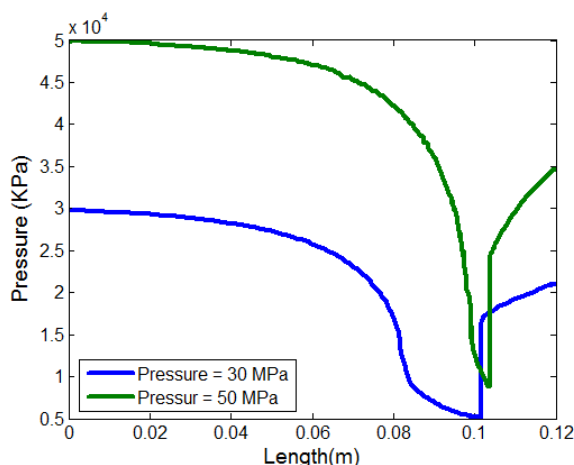


طویل تری است. برای جریان شماره 3 و طول نازل 0/12m، بازیابی 70% فشار ورودی هرگز اتفاق نمی افتد و بنابراین یک نازل با طول بیشتر لازم است.

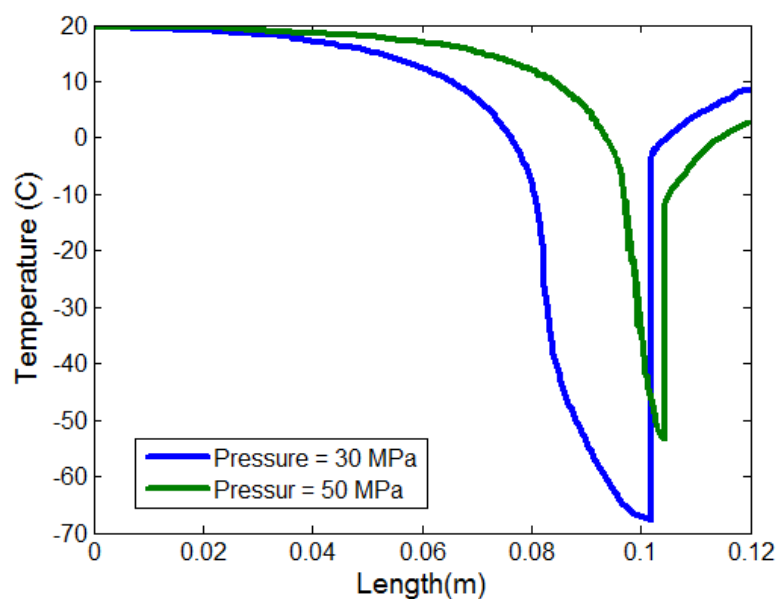


شکل 2. توزیع فشار در طول نازل طراحی شده برای بررسی تاثیر فشار

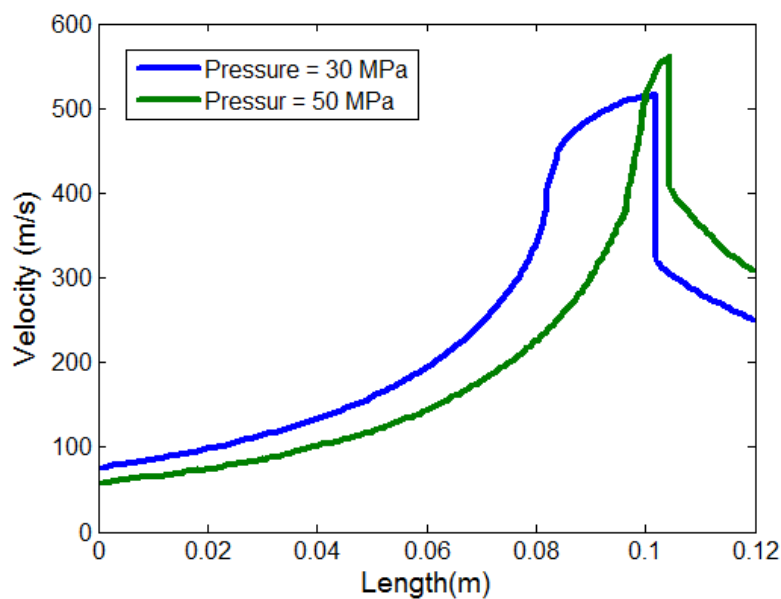
یک نازل 0/12 متری با توانایی بازیابی 70% فشار ورودی برای جریان آزمایشی و جریان شماره 3 می توان طراحی نمود. شکل های 3 تا 5 توزیع فشار، دما و سرعت به علاوه مکان موج ضربه ای در طول یک نازل با طول 0/12m با بازیابی 70% فشار ورودی برای جریان آزمایشی و جریان شماره 3 را نشان می دهند. افزایش فشار ورودی موجب می شود که مسدود شدن جریان دیرتر اتفاق بیافتد و بنابراین گلوگاه برای جریان آزمایشی در 68/50% طول کلی می باشد و با افزایش فشار ورودی از 30 تا 70Mpa به 82/85% و 90% طول کلی، افزایش می یابد. همان طور که اشاره شد دستیابی به بازیابی 70% فشار ورودی برای نازل طراحی شده برای جریان شماره 3 امکان پذیر نمی باشد ولی موج ضربه ای در داخل بخش واگرایی نازل 0/12 متری برای جریان آزمایشی و جریان شماره 3 در 85/85% و 86/69% طول کلی نازل اتفاق می افتد.



شکل 3. توزیع فشار و مکان موج ضربه ای در طول نازل طراحی شده با 70% بازیابی فشار

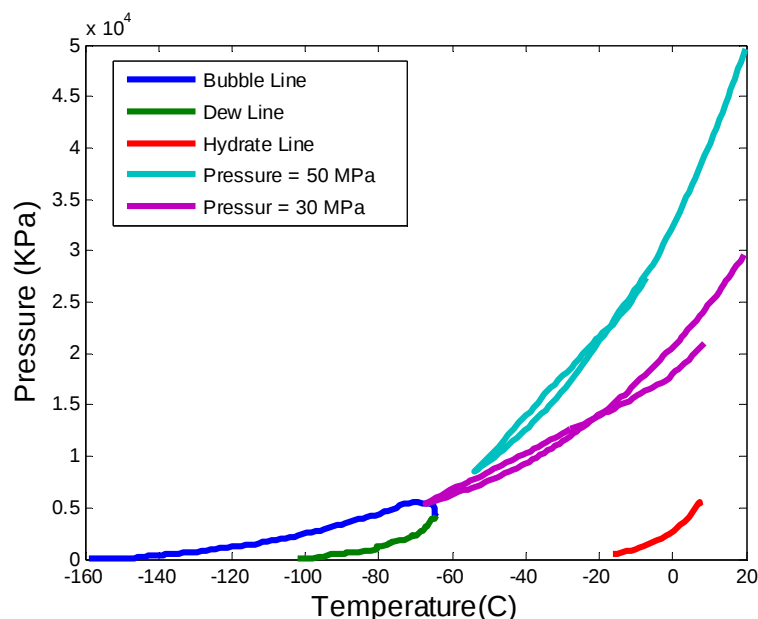


شکل 4 توزیع دما و مکان موج ضربه‌ای در طول نازل طراحی شده با 70% بازیابی فشار



شکل 5 توزیع سرعت و مکان موج ضربه‌ای در طول نازل طراحی شده با 70% بازیابی فشار

شکل 6 نمودار فازی و توزیع دما-فشار در طول نازل طراحی شده با بازیابی 70% فشار ورودی را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که در جریان شماره 3، با نگه داشتن فشار و دما در بالای نمودار فازی در یک فاز چگال می‌توان به جداسازی انتخابی آب و میعانات گازی رسید.



شکل 6 نمودار فازی و توزیع فشار-دما برای نازل طراحی شده با بازیابی 70% فشار ورودی

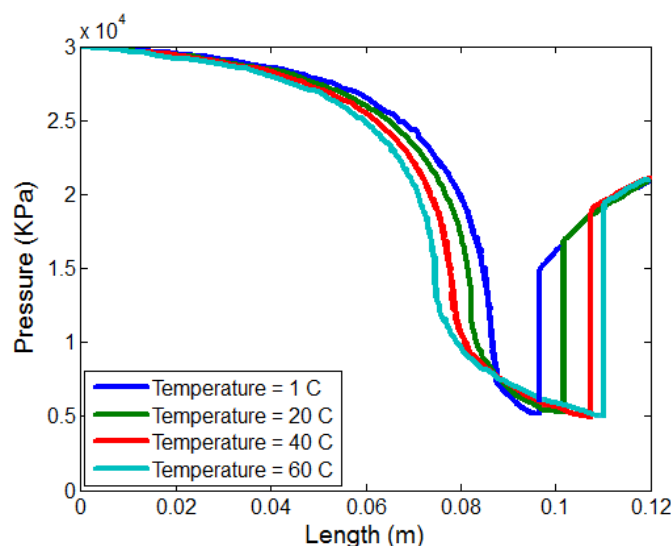
تأثیر دمای ورودی

چهار جریان خشک با فشارهای یکسان و دماهای متفاوت تعریف و با آب اشباع شده، که با افزایش دما مقدار آب همراه جریان، افزایش می‌یابد. این جریان‌ها برای نازل طراحی شده با استفاده از جریان آزمایشی تعریف می‌شوند. برای جریان‌های با دمای کم‌تر از دمای جریان آزمایشی (جریان شماره 1)، عدد ماخ در گلوگاه کم‌تر از یک خواهد شد که به این معنی است که دبی جریان برای این شرایط جریان و ساختار نازل، کافی نمی‌باشد. مرحله روش نیوتن-رافسون برای یافتن عدد ماخ در گلوگاه برای جریان‌های شماره 3 و 4 (دمای بالاتر از دمای جریان آزمایشی) هم‌گرا نمی‌شود. بنابراین یا دبی جریان باید به گونه‌ای تنظیم شود که جریان در گلوگاه مسدود شود و یا یک نازل مخصوص برای هر یک از شرایط جریان طراحی گردد. برای داشتن جریان مسدود شده در گلوگاه نازل در شرایط ورودی مختلف و دبی‌های ثابت، یک نازل مخصوص برای هر حالت باید طراحی شود. طراحی یک نازل برای هر یک از شرایط فشار و دما با یک دبی ورودی ثابت، نشان می‌دهد که طول بخش هم‌گرای نازل با افزایش دمای ورودی، افزایش می‌یابد.

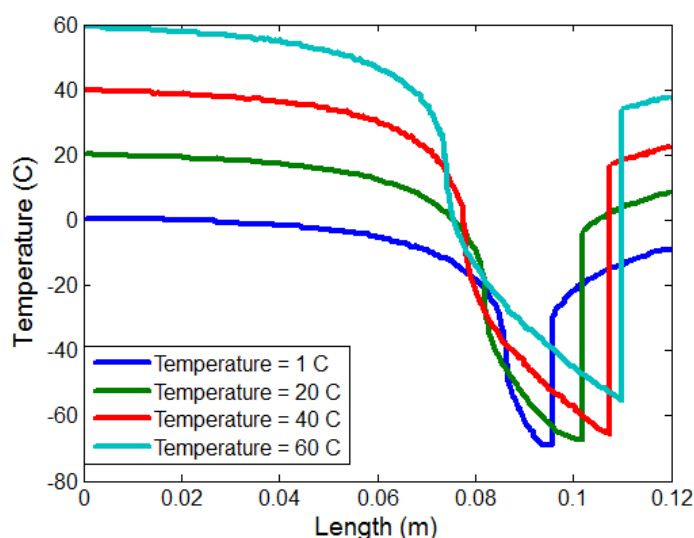
شکل‌های 7، 8 و 9 به ترتیب توزیع فشار، دما و سرعت در طول نازل با بازیابی 70% فشار ورودی را نشان می‌دهند. مکان موج ضربه‌ای در هر نازل در شکل مشخص شده است. در حالی که فشار ورودی و دبی جریان ثابت هستند، با افزایش دمای ورودی، طول بخش هم‌گرایی نازل کاهش می‌یابد و جریان در نازل زودتر مسدود شده و مکان موج ضربه‌ای به سمت جلوی خروجی نازل جابه جا می‌شود. بنابراین فاصله بین گلوگاه نازل و موج ضربه‌ای افزایش می‌یابد. زمانی که دمای ورودی از 60 تا 10 °C کاهش می‌یابد، مساحت سطح مقطع گلوگاه حدود 14/24% کاهش می‌یابد و سطح مقطع خروجی نازل 29% کاهش می‌یابد. در نازل با جریان شماره 1 به عنوان سیال مورد بررسی، فاصله بین گلوگاه نازل و مکان موج ضربه‌ای 47/9% طول

نازل است و این فاصله با افزایش دما تا 60°C حدود $19/32\%$ طول نازل، طولانی تر خواهد شد. با افزایش دمای ورودی از 1°C تا 60°C ، مکان گلوگاه از 72% طول کلی به $16/62\%$ طول کلی نازل تغییر می یابد. بنابراین جریان تا حدود 10% طول کلی، زودتر مسدود می شود. در شرایط یکسان، مکان موج ضربه ای از $58/79\%$ طول کلی به $66/91\%$ طول کلی نازل تغییر می یابد.

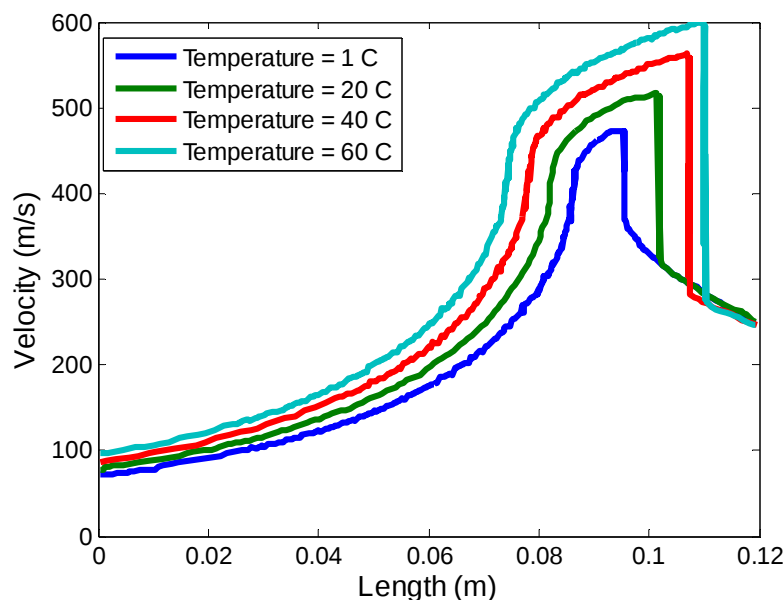
همان طور که در شکل 10 می توان مشاهده نمود، زمانی که معیار طراحی بر روی بازیابی 70% فشار ورودی تنظیم شده باشد، انبساط فشار کمتری با دما رخ می دهد. در دمای 60°C ، شرایط جریان در ناحیه تک فاز نمودار فازی خواهد بود و بنابراین، فاز آب تنها فاز مایع است و آب می تواند به طور انتخابی بدون تاثیر گذاری بر اجزاء هیدروکربنی جریان گاز، جدا شود.



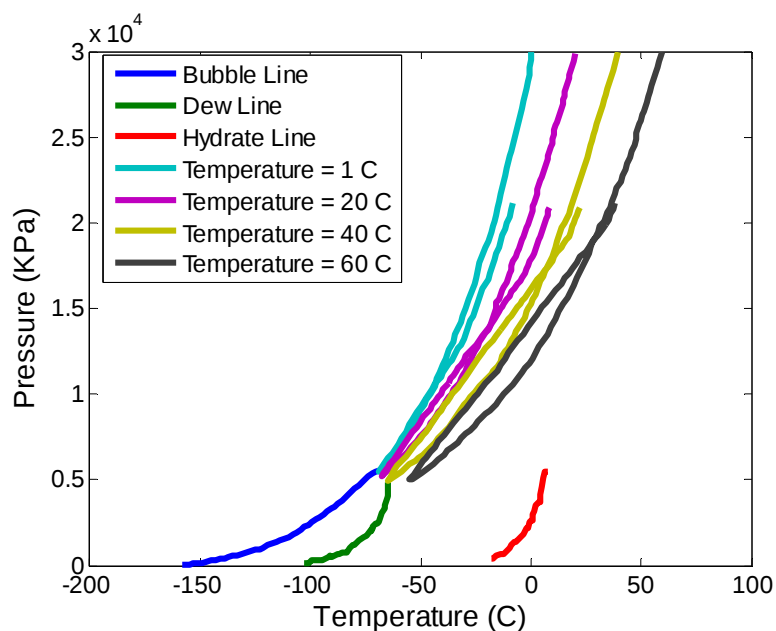
شکل 7 توزیع فشار و مکان موج ضربه ای در طول نازل طراحی شده با بازیابی 70% فشار ورودی



شکل 8 توزیع دما و مکان موج ضربه ای در طول نازل طراحی شده با بازیابی 70% فشار ورودی



شکل 9 توزیع سرعت و مکان موج ضربه‌ای در طول نازل طراحی شده با بازیابی 70٪ فشار ورودی



شکل 10 نمودار فازی و توزیع فشار در طول نازل طراحی شده با بازیابی 70٪ فشار ورودی

نتیجه گیری

جداسازی میعانات گازی یک فرآیند مهم در صنایع گاز طبیعی به شمار می‌رود. بنابراین نیاز به ارائه یک مدل که قابلیت کار در فشارهای بالا، سازگاری با محیط زیست و امکان جداسازی انتخابی را داشته باشد احساس می‌شود که مدل پیشنهادی علاوه بر برآورده کردن موارد ذکر شده امکان استفاده برای کاربردهای

مختلف و نیاز به سرمایه گذاری و هزینه عملیاتی کمی را دارد. در زیر به نتایج حاصل از تحقیق حاضر اشاره شده است:

✓ زمانی که یک نازل طراحی می شود، افزایش در فشار ورودی نازل، موجب افزایش در طول نازل و طول هم گرایی نازل و کاهش قطر گلوگاه می شود. زمانی که دبی نازل تعیین شده است، ظرفیت جریان با فشار ورودی افزایش می یابد. ثابت نگه داشتن فشار برگشتی، در یک درصد ثابت از بازیابی فشار ورودی، موجب می شود که برای فشار ورودی بالاتر، موج ضربه ای زودتر در نازل اتفاق بیافتد. در هر دو حالت فشار طراحی نازل با افزایش فشار ورودی ثابت می ماند ولی فشار بازیابی با افزایش فشار ورودی کاهش می یابد.

✓ طراحی یک نازل برای دماهای ورودی بالاتر، باعث ایجاد قطر گلوگاه بزرگتر و طول هم گرایی کمتر در نازل می شود. نتایج بررسی نازل نشان می دهد که ظرفیت جریان به طور معکوس با فشار ورودی تغییر می یابد، برای هر دو طراحی و بررسی یک نازل، فشار طراحی نازل با تغییر دمای ورودی ثابت می ماند ولی فشار بازیابی با افزایش دمای ورودی، افزایش می یابد. برای فشار بازیابی یکسان مکان موج ضربه ای با افزایش دمای ورودی به جلوی خروجی نازل جابه جا می شود.

✓ برای هر نازل یک حداکثر دبی جریان امکان پذیر وجود دارد. برای دبی های کمتر از این مقدار حداکثر، نازل در گلوگاه مسدود نمی شود و بنابراین جریان در طول نازل فروصوت خواهد بود. اگر داشتن جریان مسدود شده در گلوگاه برای دبی های کمتر مطلوب است، نازل طول هم گرایی بیشتر و قطر گلوگاه کمتری خواهد داشت. برای دبی های بیشتر یک نازل با طول هم گرایی کمتر و قطر گلوگاه بزرگتر باید طراحی شود.

✓ حضور اصطحکاک درون نازل تأثیر قابل توجهی بر رفتار جریان در نازل ندارد. با این وجود می تواند بر مکان موج ضربه ای در بخش واگرای نازل تأثیر بگذارد. برای جریان انتخاب شده در این بررسی، موج ضربه ای در جریان با اصطحکاک در مقایسه با جریان بدون اصطحکاک در نازل، دیرتر پیش بینی شده است.

منابع

- [1] Berger B. D., and Anderson K. E., Gas handling and field processing, 3rd Ed, Pennwell Corp, Tulsa, OK, 1980.
- [2] Liu H., Liu Z., Feng Y., Gu K., and Yan T., Characteristic of a supersonic swirling dehydration system of natural gas, Chinese Journal of Chemical Engineering, Vol. 13, pp. 9-12, 2005.
- [3] Mohitpour M., Golshan H., and Murray A., Pipeline design & construction: A practical approach, 3rd Ed, ASME press, NY, 2007.
- [4] Stewart M., Surface production operations: Design of gas-handling systems and facilities, 3rd Ed, Gulf Professional Publishing, 2014.
- [5] Beronich E. L., Hawboldt K., and Abdi M., Recovering natural gas liquids in Atlantic Canada's offshore petroleum production projects, The 85th Annual Convention of the Gas Processors Association, Grapevine, TX, March 5-8, 2006.



- [6] Brouwer J. M., and Epsom H. D., Twister supersonic gas conditioning for unmanned platforms and subsea gas processing, In Offshore Europe 2003 Aberdeen, SPE 83977.
- [7] Alfeyorov V., Bagirov L., Imayev S., Lacey J., Dmitriy L., and Feygin, V., Supersonic gas conditioning: First commercial offshore experience, Oil & Gas Journal, May 2005.
- [8] Schinkelshoek P., and Epsom H., Supersonic gas conditioning-low pressure TWISTER for NGL recovery, The 85th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 1-4 May, 2006.
- [9] Brouwer J. M. et al., Supersonic gas conditioning: First commercial offshore experience, Proceedings of the 83th Annual Convention Gas Processors Association, Tulsa, OK, 2004.
- [10] Man H. C., Duan J., and Yue, T. M., Design and characteristic of supersonic nozzle for high gas pressure laser cutting, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 63, pp. 217-222, 1997.
- [11] Moraitis C. S., and Akritidis C. B. Optimization of the operation of a drying heat pump using superheated steam, Drying Technology, Vol. 15, pp. 635-649, 1997.
- [12] Kidnay A. J., Parrish W. R., and McCartney D. G., Fundamentals of natural gas processing, 2nd Ed, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006.
- [13] Hollis R. B., Real-gas flow properties for NASA Langley research center aerothermodynamics facilities complex wind tunnels, NASA Langley Technical Report Server, Hampton, Virginia, USA, 1996.
- [14] Khan M. A., Sardiwal S. K., Sharath M. V. S., and Chowdary D. H., Design of a supersonic nozzle using method of characteristics, International Journal of Engineering and Technology, Vol. 2, pp. 19-24, 2013.
- [15] Khezzar L., and Benayoune M., Application of a design method of a supersonic nozzle, Journal of Engineering and Applied Sciences, 1997.