

حساسیت‌سنجی پارامترهای مؤثر طراحی جداساز مافوق صوت ترکیبات گازی

کاوه قربانان* (استاد)

محمدرضا امینی‌مقام (دانشجوی دکتری)
دانشکده‌ی مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی مکانیک شریف، بهار ۱۴۰۰
دوره ۳-۳۷، شماره ۱، ص. ۱۱۱-۱۲۳، (پادداشت‌ش)

جداسازی ترکیبات، گازها یا فازهای مختلف از یکدیگر در صنایع از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است. در این مقاله به طراحی یک‌بعدی جداساز به روش نوین مافوق صوت به‌منظور جداسازی و خالص‌سازی گاز متان از ترکیب گاز طبیعی پرداخته شده است. در جداسازی مافوق صوت، با شتاب‌گیری جریان و کاهش دما و فشار، ترکیبات سنگین‌تر که دارای دمای میعان بالاتر هستند، سریع‌تر مایع شده و به واسطه‌ی چرخش جریان و نیروی گریز از مرکز از فاز گاز و ترکیبات سبک‌تر جدا می‌شوند. جداسازهای مافوق صوت بدون هیچ قطعه‌ی متحرک، دارای قابلیت اطمینان و طول عمر بالا هستند. در این پژوهش، پس از تعیین هندسه‌ی جداساز، اثرات تغییر در دما، فشار و ترکیب گاز ورودی بر روی عملکرد آن بررسی شده است و با تغییر زاویه‌ی پره‌های چرخاننده، شدت چرخش مورد نیاز برای دستیابی به بهترین جداسازی در شرایط کاری مختلف محاسبه شده است.

واژگان کلیدی: جداسازی، مافوق صوت، نازل همگرا - واگرا، جداساز چرخشی، متان.

ghorbanian@sharif.edu
m_amini@ae.sharif.edu

۱. مقدمه

فرایندهای جداسازی گاز یا فاز در بسیاری از صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. جداسازی در کاربردهای مختلف دارای مفاهیم متفاوتی است و در فازهای مختلفی نظیر جداسازی گاز - گاز، گاز - مایع و گاز - جامد صورت می‌گیرد. پیکاربردترین و در عین حال پیچیده‌ترین نوع جداسازی، جداسازی دوگاز از یکدیگر است. این نوع جداسازی در صنایع هوافضا، هسته‌یی، پزشکی و نفت و گاز دارای کاربرد است. گاز طبیعی استخراج شده از میدان‌ها شامل عناصر و ترکیبات و ناخالصی‌های مختلفی نظیر متان، اتان، پروپان، دی‌اکسیدکربن، بخار آب، هیدروکربن‌های سنگین و غیره است. وجود ناخالصی‌ها نظیر بخار آب، ذرات جامد و حتی هیدروکربن‌های سنگین، با کاهش دما منجر به میعان، تشکیل یخ، انسداد مسیر و اختلال در فرایند انتقال گاز می‌شود. از سوی دیگر، عناصر مختلف در کاربری‌های مختلف مورد توجه قرار دارند. به‌عنوان مثال، متان به‌عنوان سوختی اقتصادی مورد استفاده قرار می‌گیرد، از اتان در تولید پلی‌اتیلن استفاده شده و پروپان و بوتان به‌عنوان سوخت‌هایی با ارزش حرارتی بالا شناخته می‌شوند و از دی‌اکسیدکربن نیز در چرخه‌های فوق بحرانی استفاده می‌شود. از این‌رو ضروری است، تا پس از جداسازی ناخالصی‌ها از گاز طبیعی استخراج شده، عناصر و ترکیبات مختلف موجود در آن جداسازی شود.^[۱]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۳/۶، اصلاحیه ۱۳۹۹/۸/۲۵، پذیرش ۱۳۹۹/۱۰/۱۴.

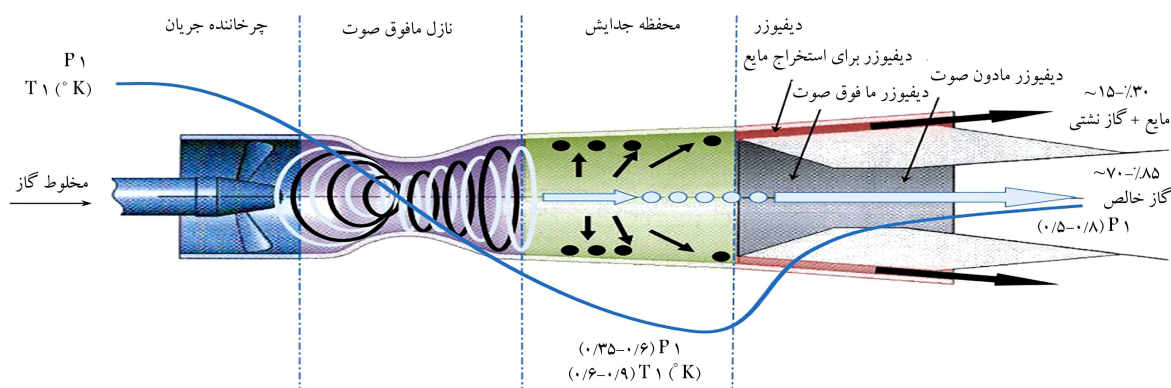
DOI:10.24200/J40.2021.55595.1549

به‌طور کلی، روش‌های جداسازی گازها را می‌توان در سه گروه عمده دسته‌بندی کرد:^[۲-۵]

- روش‌های جذب^۱ و حل^۲
- فیلترها^۳
- روش‌های فوق سرد^۴

روش‌های مذکور با وجود عملکرد و بازده مناسب جداسازی، دارای معایبی نیز هستند. از جمله معایب این روش‌ها می‌توان به تجهیزات و تأسیسات مورد نیاز نسبتاً بزرگ و حجیم، هزینه‌ی سرمایه‌گذاری بالا، فرایند پیچیده و اثرات مخرب زیست‌محیطی اشاره کرد.^[۶] در سالیان اخیر روش‌های نوین جداسازی مورد توجه ویژه قرار گرفته است. یکی از پرنویذترین این روش‌ها، جداسازی در شرایط مافوق صوت است.

جداساز مافوق صوت^۵ از یک نازل لاوال^۶ یا همگرا - واگرا و یک جداساز چرخشی یا گردبادی^۷ تشکیل شده است. همان‌گونه که در شکل ۱ نمایش داده شده است، جریان ورودی در بخش همگرای نازل شتاب می‌گیرد و سرعت در گلوگاه به سمت سرعت صوت میل می‌کند. با طراحی مناسب بخش خروجی، جریان پس از عبور از گلوگاه مافوق صوت شده و در بخش واگرای نازل نیز جریان شتاب می‌گیرد و دما و فشار سیال کاهش می‌یابد. در جداساز چرخشی با استفاده از چرخش و نیروی گریز از مرکز، فاز مایع از جریان گاز جدا می‌شود و در دیواره جمع می‌شود و از طریق مجراهای تعبیه شده در داخل دیوار تخلیه می‌گردد. به‌طور خلاصه می‌توان



شکل ۱. طرح‌واره‌ی جداساز مافوق صوت. [۸]

با توجه به مشکلات موجود و ناکارآمدی فرایند جداسازی فازهای مایع و گاز در این جداسازها، تحقیقات بر روی این روش متوقف شد. [۱۲] ایده‌ی نسل جدید جداسازهای مافوق صوت در سال ۱۹۹۶ توسط پُرسِت^{۱۲} مطرح شد. [۷] پُرسِت ساختار استفاده از یک جداسازی چرخشی در انتهای نازل همگرا - واگرا را مطرح کرد.

در ادامه به بررسی پژوهش‌ها و مطالعات صورت‌گرفته با رویکرد تحلیلی و یک‌بعدی پرداخته شده است؛ معمولاً در چنین مطالعاتی، به‌منظور ساده‌سازی روابط و دستیابی به نتایج مورد نظر، تنها به بررسی چند پدیده‌ی محدود پرداخته می‌شود و از اثرات سایر پدیده‌ها در میدان جریان صرف‌نظر می‌شود.

از اولین مدل‌های ریاضی منتشر شده در مقالات، می‌توان به مدل مولسون^{۱۳} و استاینکو^{۱۴} در سال ۲۰۰۵ اشاره کرد. [۱۴] آنها یک مدل فیزیکی جریان تقارن محوری گاز واقعی با یک جزء مایع‌شونده در نازل را با هندسه‌های مختلف ارائه کردند. نتایج حاکی از تفاوت‌های عمده بین پارمترهای جریان دوفاز با استفاده از مدل‌های گاز ایده‌آل و واقعی بود.

مالیشکینا^{۱۵} در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰ نتایج بررسی جریان چرخشی در جداساز مافوق صوت با استفاده از مدل اویلر دو‌بعدی را ارائه کرد. [۱۵] نتایج این تحقیق نشان داد که بازده خالص‌سازی وابسته به دما، فشار و عدد ماخ جریان در عبور از جداساز بوده و همچنین تابع جنس، ترکیب و نسبت فازهای مایع و گاز است. کریمی و عبدی در سال ۲۰۰۹ مدلی یک‌بعدی برای مدل‌سازی فرایند رطوبت‌زدایی در جداسازهای مافوق صوت ارائه دادند. [۱۶] نتایج حاکی از هم‌خوانی مناسب نتایج مدل یک‌بعدی با نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی است.

کو^{۱۶} و همکارانش در سال ۲۰۰۹ مدلی یک‌بعدی براساس نظریه‌های کلاسیک تشکیل هسته‌ی مایع و رشد قطرات ارائه کردند. [۱۷] این مدل برای ارزیابی اثرات شرایط مختلف فرایند و هندسه‌ی نازل بر روی توزیع اندازه‌ی قطرات استفاده شد. ما^{۱۷} و همکارانش در سال ۲۰۰۹ میلادی یک مدل اویلر دو - سیال برای بررسی میعان آنی^{۱۸} جریان بخار آب توسعه دادند. [۱۸] در این مطالعه بر روی میعان یک گاز خالص در جداساز مافوق صوت تمرکز شده است. بر طبق ادعای صورت‌گرفته، استفاده از جسم داخلی^{۱۹} علاوه بر کاهش فاصله‌ی ذرات مایع تا رسیدن به دیواره، موجب کاهش اتلاف با جلوگیری از جریان‌های غیرمعمولی، نظیر جریان با گردآیدان شدید در مرکز چرخش می‌شود. همچنین آنها در سال ۲۰۱۰ میلادی اثر محل افزودن ذرات خارجی بر روی میزان میعان جریان را با استفاده از نظریه‌ی تشکیل هسته‌ی غیرهمگون^{۲۰} مطالعه کردند. [۱۹] آنها پیشنهاد دادند که با افزودن ذرات مایع می‌توان میزان تشکیل مایع در جریان را به‌طور قابل ملاحظه‌ی افزایش داد. در این

مایع‌سازی و جداسازی گازها را در سرعت مافوق صوت ویژگی کلیدی و متمایزکننده‌ی این سامانه دانست. [۷]

جداساز مافوق صوت به‌صورت یک لوله‌ی ساده، کوتاه و سبک است که به دلیل عدم وجود هیچ قطعه‌ی متحرک یا دوران در آن، ویژگی‌هایی از جمله قابلیت اطمینان، سهولت و ارزانی ساخت، راه‌اندازی سریع، مصرف انرژی پایین و سازگاری با محیط زیست را دارد. [۹] این جداساز می‌تواند در کاربردهای مختلف نظیر رطوبت‌زدایی، جذب آلاینده‌های هوا، تنظیم نقطه‌ی شبنم^۸ سیال، فرایندهای شیمیایی و پتروشیمی شامل جداسازی عناصر سنگین، پردازش گاز در کف دریا و اقیانوس‌ها، جداسازی دی‌اکسیدکربن و هیدروژن سولفید و حذف جیوه استفاده شود.

در این مقاله، به طراحی یک‌بعدی نازل همگرا - واگرا و جداساز چرخشی یک نمونه جداساز مافوق صوت به‌منظور خالص‌سازی گاز متان پرداخته شده است. همچنین، حساسیت عملکرد و بازده سامانه‌ی جداساز نسبت به شرایط مختلف کاری، نظیر تغییر در دما، فشار و ترکیب گاز ورودی بررسی شده و بر این اساس شدت چرخش در شرایط کاری مختلف محاسبه شده است.

۲. پیشینه‌ی پژوهش

جداساز مافوق صوت حاصل ترکیب خاصیت کاهش دما در نازل همگرا - واگرا و اصول جداسازی گریز از مرکز است. ایده‌ی این روش جداسازی اولین بار بیش از نیم قرن پیش مطرح و در سال‌های بعد دست‌خوش تغییرات و اصلاحات فراوانی شد. در سال ۱۹۶۸، گرت^۹ سامانه‌ی برای جداسازی ترکیبات قابل میعان و سنگین از مخلوط گاز پیشنهاد داد. [۱۰] این سامانه متشکل از یک نازل همگرا - واگرا و یک مجرای منحنی متصل به انتهای آن بود. انبساط ترکیب گازها در نازل موجب کاهش دما و به تبع آن میعان اجزای سنگین ترکیب می‌شود و در مجرای منحنی، با توجه به سرعت مافوق صوت و اثر نیروی گریز از مرکز، بخش‌های مایع و گاز از یکدیگر جدا می‌شوند. لینهارت^{۱۰} در روشی مشابه توسط یک نازل همگرا جریان گاز حامل را تا رسیدن به سرعت صوت شتاب داد و سپس با عبور جریان از یک مجرای منحنی دارای سطوح منحرف‌کننده، ذرات را از گاز تمیز جدا کرد. [۱۱] در تحقیقی مرتبط توسط ناسیکاس^{۱۱} با عبور جریان از موج ضربه‌یی قائم، سرعت فاز گاز کاهش می‌یابد، در حالی که قطرات مایع با سرعت نسبتاً بالایی به حرکت خود ادامه خواهند داد. در ادامه با عبور جریان از یک مجرای منحنی، قطرات مایع به سمت دیواره‌ی خارجی می‌روند و با استفاده از یک صفحه‌ی جداساز تخلیه می‌شوند. [۱۲]

جدول ۱. مشخصات مخلوط گاز مورد بررسی.

اجزا	فرمول شیمیایی	نسبت مولی	Tc [K]	Pc [kPa]	MW [kg/kmol]
Methane	CH ₄	۰/۸۲	۱۹۰/۶	۴۵۹۹	۱۶/۰۴
Ethane	C ₂ H ₆	۰/۱۸	۳۰۵/۳	۴۹۴۰	۳۰/۰۷
Mixture	CH ₄ + C ₂ H ₆	۱/۰	۲۲۵/۰	۶۲۵۵	۱۸/۵۷

مدل سازی سه بعدی جریان چند - جزئی نشان داده شد که در بخش واگرای جداساز مافوق صوت، میعان آبی صورت می گیرد.

کستیر^{۲۱} در سال ۲۰۱۴ مدلی برای شبیه سازی عملکرد جریان مافوق صوت در نازل های همگرا - واگرا ارائه کرد.^[۲۰] در این مدل، محاسبات ترمودینامیکی مختلفی، نظیر تعیین شرایط تعادل فازی و محاسبه سرعت صوت در جریان غیر ایده آل، تک فاز و گاز چند جزئی صورت گرفته است. مشخصات ترمودینامیکی جریان با استفاده از معادله ی حالت پنگ-رابینسون^{۲۲} محاسبه شده است. محمودزاده وزیری و شاهسون در سال ۲۰۱۵ به بهینه سازی مؤلفه های محوری، شعاعی و محیطی جریان ورودی برحسب قدرت چرخش و شتاب گریز از مرکزی تولیدی در جداساز مافوق صوت پرداختند.^[۲۱] این مدل، که در آن جریان به صورت تک فاز در نظر گرفته شده است، نشان می دهد که افزایش فشار و کاهش دما موجب کاهش چرخش و شتاب گریز از مرکز می شوند. در این مدل معادلات بقای جرم و اندازه حرکت به صورت تقارن محوری و غیر لزج حل می شود.

سچی^{۲۳} و همکارانش در سال ۲۰۱۶ دو مدل ساده به منظور شبیه سازی پدیده های مختلف در جداساز مافوق صوت، نظیر شتاب گیری مافوق صوت در نازل، اثرات چرخش جریان و جداسازی فازهای مایع و گاز بر اثر نیروی گریز از مرکز ارائه دادند.^[۲۲] این مدل در طراحی اولیه ی یک بعدی جداساز مافوق صوت مورد استفاده قرار گرفت.

۳. طراحی یک بعدی جداساز مافوق صوت

همان گونه که اشاره شد، جداساز مافوق صوت را می توان به بخش های مختلفی تقسیم کرد و هر بخش را با توجه به شرایط و نوع جریان به صورت جداگانه بررسی کرد. به طور کلی این بخش ها عبارت اند از:

- چرخاننده ی جریان^{۲۴}
- نازل همگرا-واگرا
- جداساز چرخشی یا گردبادی
- دیفیوزر باز یافت فشار

در تحقیقات مختلف، طراحی های گوناگونی برای چرخاننده ارائه شده است. به طور کلی با توجه به مکان قرارگیری آن دو ساختار متفاوت را می توان متصور شد. در جداساز «تویستر ۱»،^{۲۵، ۲۵-۲۳} چرخاننده در جریان مافوق صوت در خروجی نازل همگرا - واگرا قرار گرفته است و در جداساز «۳S»^{۲۶} شرکت ENGO،^[۲۶] چرخاننده در بخش مادون صوت و در ورودی نازل همگرا - واگرا جانمایی شده است.

در نازل جداساز «تویستر ۱» جریان آرام و یکنواخت است، اما با عبور جریان مافوق صوت از چرخاننده و تبدیل جریان محوری به مماسی، موج های ضربه یی مایل متعددی تشکیل می شود که کنترل آنها بسیار دشوار است. در جداساز «۳S»

تولید سرعت چرخشی در بخش مادون صوت و بدون تشکیل موج ضربه یی صورت می گیرد. این امر موجب تداخل انبساط و چرخش در داخل نازل و پیچیدگی میدان جریان می شود. اما عبور جریان چرخشی از نازل همگرا - واگرا موجب افزایش شدت چرخش و بهبود جداسازی می شود، همچنین وقوع همزمان چرخش و میعان می تواند اثرات بازتخیر را کاهش دهد و موجب افزایش بازده جداسازی شود.^[۲۷]

با توجه به تحقیقات و مطالعات گسترده ی انجام شده در خصوص طراحی چرخاننده و همچنین ماهیت سه بعدی و پیچیده ی آن، طراحی چرخاننده در حیطه ی طراحی یک بعدی جداساز در این مقاله قرار ندارد. همچنین طراحی دیفیوزر باز یافت فشار پس از جداسازی فاز مایع، مشابه طراحی کلاسیک دیفیوزرهای تک فاز است و در این مقاله به آن پرداخته نمی شود. در نتیجه، در این مقاله به طراحی یک بعدی نازل همگرا - واگرا و جداساز چرخشی جداساز مافوق صوت پرداخته می شود.

۱.۳. طراحی فرایند جداسازی

پیش از طراحی هندسه ی جداساز، نیاز است تا فرایند جداسازی طراحی شود.

۱.۱.۳. مخلوط گاز

متان دارای بیشترین فراوانی در گاز طبیعی است و همچنین دارای سبک ترین وزن مولکولی و پایین ترین دمای بحرانی و دمای میعان (در فشار برابر) است.^[۲۲] از این رو، در این مقاله، استفاده از جداساز مافوق صوت برای جداسازی متان از ترکیب گاز طبیعی مورد توجه است.

در این راستا، به منظور ساده سازی، مخلوط چند جزئی گاز طبیعی را می توان به دو قسمت متان و سایر اجزا تقسیم کرد. همچنین در این مجموعه، اتان دارای سبک ترین جرم مولکولی و پایین ترین دمای بحرانی و دمای میعان است و دیرتر از سایر اجزا مایع می شود و تحت اثر چرخش دیرتر جدا می شود. در نتیجه می توان اتان را به عنوان نماینده ی دیگر اجزا (غیر از متان) انتخاب کرد. اتان سخت ترین جز برای جداسازی از متان است و هر زمان که اتان مایع و جدا شود، سایر اجزا نیز جدا شده اند.

بدین ترتیب، مشخصات مخلوط گاز مورد بررسی در این مقاله در جدول ۱ ارائه شده است.

۲.۱.۳. شرایط کاری

محدودیت ها و فرضیات حاکم بر فرایند عبارت اند از:

- جریان ورودی به جداساز در دمای محیط برابر با ۲۸۸ کلوین
- بیشترین فشار ورودی به جداساز در حدود ۱۰ مگاپاسکال
- فرایند انبساط در نازل همگرا - واگرا به صورت آیزنتروپیک
- نسبت فشار نازل همگرا - واگرا بیشینه برابر ۵۰

دو فرض اول به دلیل محدودیت های عملیاتی در نظر گرفته شده اند. مورد سوم برای ساده سازی فرایند طراحی و مورد آخر نیز به منظور پایداری جریان در داخل نازل و پرهیز از وقوع موج ضربه یی قائم در نظر گرفته شده است.

مرکز لوله باشد و از دیواره دورتر باشد، زمان بیش‌تری برای جدایش و رسیدن قطره به دیواره نیاز است. از این‌رو، در این پژوهش فقط کوچک‌ترین و دورترین قطرات به‌عنوان معیار جداسازی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

در این میان، با توجه به مشخصات میدان جریان، یک شعاع بحرانی^{۳۳} برای قطرات تعریف می‌شود به نحوی که قطرات با شعاع کمتر از شعاع بحرانی از بین رفته و مجدداً به فاز گاز بازمی‌گردند. در نتیجه، این شعاع بحرانی را می‌توان به‌عنوان کوچک‌ترین شعاع پایدار قطرات مایع در طیف مختلف قطرات در نظر گرفت. پُرسْت^[۳۴] به‌منظور محاسبه شعاع بحرانی، معادله‌ی ۱ را ارائه کرده است.

$$r^* = \frac{2\sigma}{\rho_l R_v T \ln(S)} \quad (۱)$$

در این معادله r^* شعاع بحرانی، σ تنش سطحی قطره، ρ_l چگالی فاز مایع و R_v ثابت گازها برای فاز گاز است. پارامتر S یا نسبت اشباع^{۳۴} نیز برای هر جزء ترکیب به‌صورت نیز تعریف می‌شود.

$$S_k = \frac{y_{v_k}}{y_{eq,v_k}} \quad (۲)$$

در این رابطه y_{v_k} نسبت مولی جزء k ام ترکیب در فاز گاز (در شرایط موجود و غیر تعادل) و y_{eq,v_k} نسبت مولی آن جزء در فاز گاز در شرایط تعادلی را نشان می‌دهند. هنگامی که S_k بزرگ‌تر از واحد باشد، میعان جزء k ام می‌تواند اتفاق بیفتد. اندیوا^{۳۵} با استفاده از آزمایش‌های تجربی، برای محاسبه تنش سطحی در معادله‌ی ۱ برای مخلوط متان و اتان در دماهای مختلف، معادله‌ی زیر را ارائه کرده است.^[۳۱]

$$\sigma = \sigma_0 + A(T) y_{l_{meth}} + B(T) y_{l_{meth}}^2 \quad (۳)$$

در این معادله، σ_0 تنش سطحی در اتان خالص، $y_{l_{meth}}$ نسبت مولی متان در فاز مایع، $A(T)$ و $B(T)$ توابعی بر حسب دما هستند که در معادلات ۴ و ۵ ارائه شده‌اند. مقدار σ_0 نیز وابسته به دما است که از طریق معادله‌ی ۶ قابل محاسبه است. در این روابط T_c دمای بحرانی اتان است. مقدار سایر پارامترها نیز به شرح زیر است:

$$A(T) = 0.4778597 - 0.0006641T + 1.635922 \times 10^{-5}T^2 \quad (۴)$$

$$B(T) = -0.013588 + 1.115972 \times 10^{-4}T - 2.15913 \times 10^{-7}T^2 \quad (۵)$$

$$\sigma_0 = \alpha t^\mu (1 + \beta t) \quad (۶)$$

$$t = 1 - \frac{T}{T_c}$$

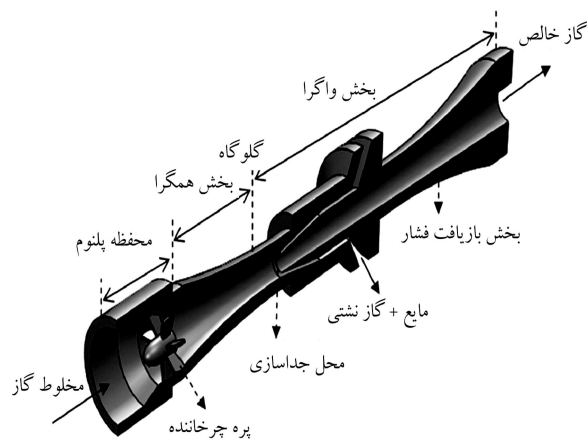
$$\alpha = 60.57 mN/m$$

$$\beta = -0.245 \quad (۷)$$

$$\mu = 1/3$$

طول محفظه‌ی جداساز باید به‌گونه‌ی تعیین شود تا کوچک‌ترین قطره پایدار زمان کافی برای رسیدن به دیواره را داشته باشد. برای محاسبه‌ی این زمان، از روش زمان پرواز^{۳۶} پیشنهاد شده توسط هلدیچ^{۳۷} استفاده می‌شود.^[۳۲] در این روش زمان حرکت قطره‌ی با قطر D_d در راستای شعاعی از شعاع r_0 تا شعاع r_1 در سرعت زاویه‌ی ω از رابطه‌ی ۸ محاسبه می‌شود.

$$t_{radial} = \frac{18\mu_v}{D_d(\rho_l - \rho_v)\omega^2} \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) \quad (۸)$$



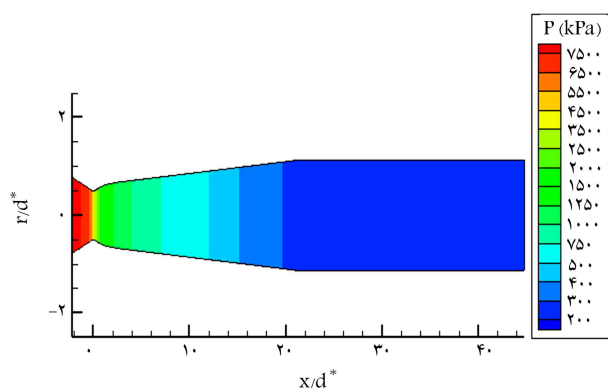
شکل ۳. نمونه‌ی جداساز مافوق صوت با چرخاننده‌ی پره‌دار در ورودی نازل.^[۲۹]

در این پژوهش چرخاننده‌ی پره‌دار^{۳۲} در ورودی نازل مورد استفاده قرار گرفته است. این نوع چرخاننده به جریان زاویه می‌دهد و مؤلفه‌ی سرعت در راستای مماسی (سرعت چرخشی) ایجاد می‌کند. با توجه به این‌که زاویه‌ی پره در طول شعاع از مرکز تا دیواره ثابت است، این مؤلفه‌ی سرعت چرخشی در راستای شعاع یکسان خواهد بود اما سرعت زاویه‌ی جریان با نزدیک شدن به سمت دیواره کاهش خواهد یافت. نمونه‌ی از این چیدمان و طرح‌واره‌ی چرخاننده پره‌دار در شکل ۳ نمایش داده شده است.

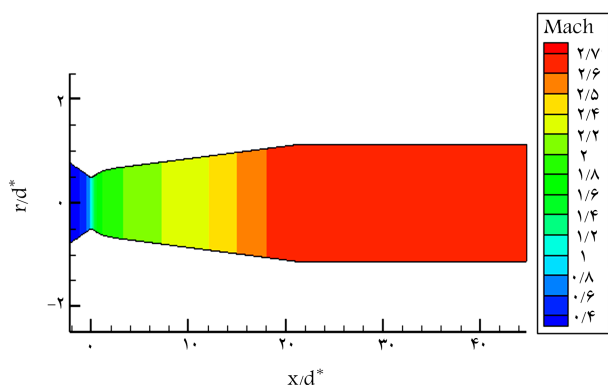
از آنجایی‌که عبور جریان چرخشی از نازل همگرا - واگرا و تغییر شدت چرخش و مؤلفه‌های سرعت در هر سه راستا پدیده‌ی پیچیده و به ذات سه‌بعدی است، امکان بررسی آن در مدل ساده یک‌بعدی ارائه شده در این مقاله وجود ندارد. از این‌رو، در این پژوهش از اثرات چرخش جریان در طول نازل صرف نظر می‌شود و جریان چرخشی از انتهای نازل و هنگام ورود به محفظه‌ی جدایش بررسی می‌شود.^[۱۶] عبور جریان چرخشی از نازل همگرا - واگرا موجب افزایش شدت چرخش می‌شود، همچنین وقوع هم‌زمان چرخش و میعان اثرات بازتبخیر را کاهش می‌دهد.^[۲۷] صرف‌نظر کردن از این اثرات موجب کاهش بازده جداسازی و افزایش طول مورد نیاز محفظه‌ی جدایش برای رسیدن قطرات مایع به دیواره می‌شود. افزایش طول محفظه‌ی جدایش اگرچه موجب افزایش افت ناشی از اصطکاک دیواره می‌شود، اما اثر مخرب چشم‌گیری بر روی جداسازی ندارد و از این‌رو با این ساده‌سازی طراحی جداساز برای بدینانه‌ترین حالت صورت گرفته و در عمل هندسه‌ی به دست آمده دارای عملکرد به نسبت بهتری خواهد بود.

با این توضیحات، در این پژوهش، چرخاننده به‌صورت یک صفحه با ضخامت صفر در خروجی نازل و ورودی محفظه‌ی جدایش در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب جریان داخل نازل کاملاً محوری و بدون چرخش است و در ورودی به محفظه‌ی جدایش سرعت مماسی یا چرخشی یکنواخت در طول شعاع در آن ایجاد می‌شود. این فرضیات در مدل‌ها و مطالعات یک‌بعدی دیگر، نظیر مطالعات سچی و همکارانش^[۲۲] نیز مورد استفاده قرار گرفته است. سرعت و زاویه‌ی چرخش در نظر گرفته شده در ورودی محفظه‌ی جدایش در مدل یک‌بعدی متناظر با زاویه‌ی پره‌های چرخاننده تعبیه شده در ورودی نازل نیست و صرفاً به‌عنوان معیاری برای مقایسه‌ی میزان چرخش جریان مورد استفاده قرار گرفته است.

در جداسازی تحت اثر نیروی گریز از مرکز، به قطرات کوچک‌تر نیروی کمتری وارد شده و جداسازی آنها دشوارتر است. از طرف دیگر، هرچه قطره نزدیک‌تر به



شکل ۴. تغییرات فشار در طول نازل و محفظه‌ی جدایش.



شکل ۵. تغییرات عدد ماخ در طول نازل و محفظه‌ی جدایش.

۴. بررسی اثر تغییر در جریان ورودی

در این بخش، به بررسی اثر تغییر در دما، فشار و ترکیب جریان ورودی به جداساز بر روی عملکرد آن پرداخته می‌شود. در تمام این بخش از هندسه‌ی نازل طراحی شده بر اساس جریان ورودی مشخص شده در جدول ۲ استفاده شده و در طول بررسی‌ها ثابت است. مشخصات هندسی این نازل در جدول ۴ ارائه شده است.

۱.۴. تأثیر بر روی فاز مایع

با تغییر دما، فشار یا ترکیب گاز ورودی به نازل با هندسه‌ی ثابت، رفتار انبساط و شتابگیری و شرایط ترمودینامیکی جریان خروجی از نازل تغییر می‌کند. این تغییر شرایط منجر به تغییر در حجم فاز مایع و همچنین قطر قطرات تشکیل شده می‌شود. در شکل‌های ۷ تا ۹ تغییرات کیفیت جریان خروجی از نازل و حداقل قطر پایدار قطرات تشکیل شده با تغییر دما، فشار و ترکیب گاز ورودی نسبت به شرایط طراحی نازل نمایش داده شده است. در این شکل‌ها، نقطه‌ی طراحی نازل با علائم پُررنگ متمایز شده است.

در شکل ۷ مشاهده می‌شود، افزایش دمای ورودی به نازل، منجر به افزایش دما و کاهش فشار خروجی از نازل می‌شود و میزان میعان و به تبع آن حجم فاز مایع کاهش می‌یابد. همچنین این امر موجب کاهش نسبت اشباع و چگالی فاز مایع شده و طبق رابطه‌ی ۱ موجب افزایش قطر بحرانی قطرات می‌شود. با افزایش دما از ۲۷۳ تا ۳۰۳ کلوین ($\pm 5\%$ نسبت به دمای طراحی)، کیفیت گاز از ۸۴۲٪ تا ۸۹۱٪ افزایش می‌یابد (تقریباً $\pm 3\%$ نسبت به شرایط طراحی)، همچنین کمینه‌ی

در این رابطه μ_v لزجت فاز گاز و ρ_l و ρ_v به ترتیب چگالی فاز مایع و گاز است. همچنین زمان عبور یک قطره با سرعت محوری v_{axial} در لوله‌ی به طول L از رابطه‌ی ۹ محاسبه می‌شود.

$$t_{axial} = \frac{L}{V_{axial}} \quad (9)$$

به منظور جدایش مناسب قطرات، حداقل طول مورد نیاز محفظه‌ی جدایش از برابر قرار دادن t_{axial} و t_{radial} حاصل می‌شود.

همان‌گونه که در رابطه‌ی ۸ نشان داده شده است، حرکت شعاعی قطرات و زمان رسیدن آنها به دیواره و در نتیجه طول محفظه‌ی جدایش به شدت وابسته به سرعت زاویه‌ی جریان است. سرعت زاویه‌ی جریان وابسته به سرعت مماسی یا چرخشی جریان در هر شعاع است و از رابطه‌ی ۱۰ محاسبه می‌شود. نسبت سرعت مماسی به سرعت محوری جریان شدت چرخش ω نامیده می‌شود. [۲۱] در چرخاننده‌های پره‌دار این پارامتر معادل تانژانت زاویه‌ی پره یا همان زاویه‌ی چرخش جریان است (رابطه ۱۱ و ۱۲).

$$\omega = \frac{V_{\theta}}{r} \quad (10)$$

$$S = \frac{V_{\theta}}{V_{axial}} \quad (11)$$

$$\tan(\theta_{swirl}) = \frac{V_{\theta}}{V_{axial}} = s \quad (12)$$

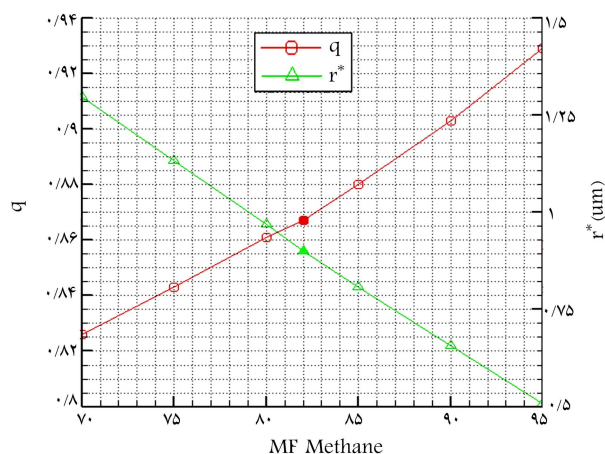
در این مقاله با توجه به سرعت و رینولدز بالای جریان از لایه‌ی مرزی در داخل محفظه‌ی جدایش صرف نظر شده و جریان در داخل محفظه جدایش نیز آیزنتروپیک فرض شده است. [۲۱] در این صورت، عدد ماخ، دما و فشار جریان در طول محفظه جدایش با سطح مقطع ثابت، بدون تغییر بوده است و فقط حرکت قطرات به سمت دیوار و جدایش فاز مایع از گاز اتفاق می‌افتد. [۲۲] در شکل‌های ۴ و ۵ نمونه‌ی از تغییرات فشار و عدد ماخ جریان از ورودی نازل تا انتهای محفظه‌ی جدایش ارائه شده است.

در شکل ۶ طول بی‌بعد مورد نیاز محفظه‌ی جدایش بر حسب شدت چرخش برای شرایط جریان ورودی ثابت نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در شدت چرخش پایین (معادل حدود زاویه‌ی چرخش ۱۵ درجه) طول مورد نیاز محفظه‌ی جدایش حدود ۱۰۰ برابر قطر گلوگاه نازل است. با افزایش شدت چرخش این طول به سرعت کاهش پیدا می‌کند و برای شدت چرخش برابر با یک (زاویه چرخش ۴۵ درجه) به کمتر از ۱۰ برابر قطر گلوگاه می‌رسد. با افزایش بیشتر شدت چرخش، طول محفظه‌ی جداساز با سرعت کمتری کاهش پیدا می‌کند و برای شدت چرخش برابر با ۱/۷ (معادل زاویه‌ی چرخش حدود ۶۰ درجه) به حدود ۲/۶ برابر قطر گلوگاه می‌رسد.

در این محاسبات شدت و زاویه‌ی چرخش در طول شعاع ثابت در نظر گرفته شده است (پره‌ی چرخاننده با زاویه‌ی ثابت) و از افت شدت چرخش جریان در طول محفظه‌ی جداساز نیز صرف نظر شده است. با این توضیحات، مشخصات هندسی محفظه‌ی جدایش طراحی شده به شرح جدول ۵ خواهد بود.

جدول ۵. مشخصات هندسی محفظه‌ی جدایش.

d/d^*	A/A^*	S	θ_{swirl}	L/d^*	L/d
۲/۲۶۸	۵/۱۴۴	۰/۵۷۷	۳۰ deg	۲۳/۴۳	۱۰/۳۳



شکل ۹. کیفیت گاز خروجی و کمینه‌ی قطر قطرات بر حسب ترکیب ورودی.

جدول ۶. مقایسه‌ی تأثیر تغییر مشخصات جریان ورودی بر خروجی نازل.

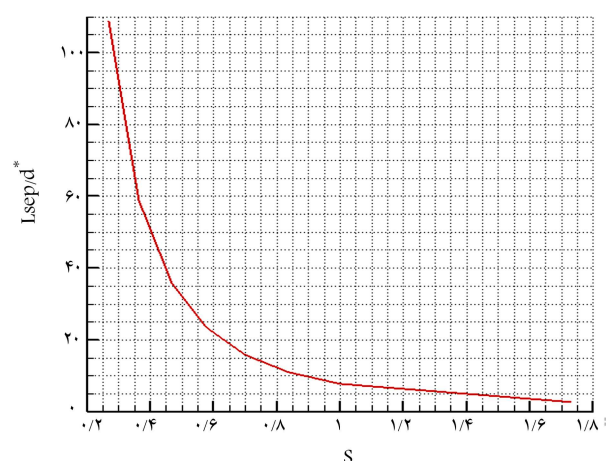
پارامتر تغییر کرده	Δ	Δq [%]	Δr^* [%]	$\Delta q / \Delta$	$\Delta r^* / \Delta$
T	۱۰٫۴	۵٫۷	۵۸٫۲	۰٫۵۴	۵٫۵۹
P	۱۹٫۴	-۲٫۰	-۲۳٫۱	-۰٫۱۰	-۱٫۱۹
MF Methane	۳۰٫۵	۱۱٫۹	-۸۷٫۵	۰٫۳۹	-۲٫۸۷

قطرات مطابق با رابطه‌ی ۱ کاهش می‌یابد. با تغییر $\pm 10\%$ فشار ورودی نسبت به فشار طراحی (775° کیلو پاسکال) از 7000 تا 8500 کیلو پاسکال، کیفیت گاز فقط $\pm 1\%$ نسبت به نقطه‌ی طراحی تغییر داشته (876° تا 859°) و کمینه‌ی قطر پایدار قطرات نیز دارای تغییر در بازه‌ی 17013 تا 805° میکرون ($12/5\%$ +) تا $9/5\%$ (-) است.

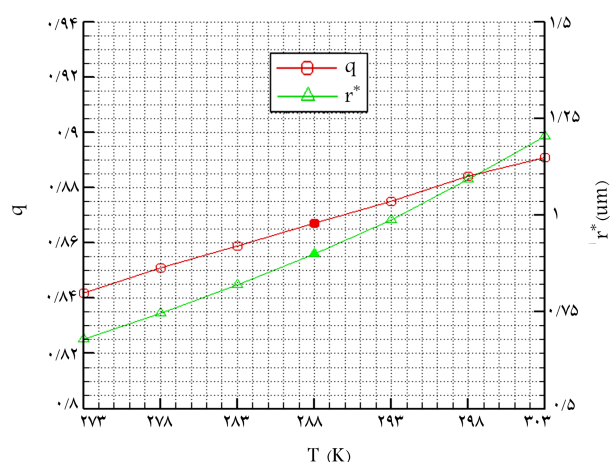
در شکل ۹ با افزایش نسبت مولی متان در گاز ورودی از $7/7$ تا $9/5$ ($\pm 15\%$ نسبت به 82° در نقطه‌ی طراحی)، کیفیت گاز خروجی از 826° به 929° افزایش یافته است (از 5% تا 7% +)، در این شرایط، برخلاف حالت‌های قبلی که تغییرات کیفیت و کمینه‌ی قطر قطره در یک راستا بود، با وجود افزایش کیفیت گاز خروجی، کمینه‌ی قطر پایدار قطرات از 1297 میکرون (44% +) به 508 میکرون (56% -) کاهش پیدا می‌کند. با افزایش نسبت مولی متان در ترکیب گاز ورودی، میزان ناخالصی در ورودی و حجم فاز مایع نیاز به جدا کردن کاهش می‌یابد. در نتیجه، حجم فاز گاز در جریان خروجی افزایش می‌یابد. با توجه به سبک‌تر بودن متان و پایین‌تر بودن مقدار γ نسبت به اتان، با افزایش میزان متان در ترکیب گاز ورودی، میزان تیرید و کاهش دما در طول نازل افزایش می‌یابد و دمای جریان خروجی کاهش پیدا می‌کند. در ادامه، با وجود کاهش حجم فاز مایع، مقدار بیشتری از اتان مایع می‌شود و خلوص متان افزایش می‌یابد. این امر همچنین موجب افزایش نسبت اشباع و در نتیجه کاهش حداقل قطر پایدار قطرات می‌شود.

به‌منظور مقایسه‌ی میزان اثرگذاری هریک از پارامترهای بررسی شده در بالا، شیب تغییرات نرمال شده‌ی کیفیت گاز جریان خروجی و کمینه‌ی قطر پایدار قطرات نسبت به دما، فشار و ترکیب متان در ورودی (نسبت به شرایط طراحی) در جدول ۶ ارائه شده است.

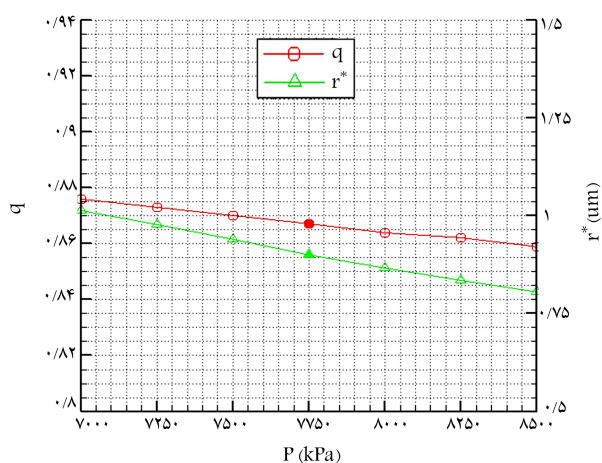
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تغییر در دمای جریان ورودی دارای بیشترین تأثیر بر روی کیفیت گاز جریان خروجی و کمینه‌ی قطر پایدار قطرات است، پس از



شکل ۶. طول مورد نیاز محفظه‌ی جدایش بر حسب شدت چرخش.



شکل ۷. کیفیت گاز خروجی و کمینه‌ی قطر قطرات بر حسب دمای ورودی.



شکل ۸. کیفیت گاز خروجی و کمینه‌ی قطر قطرات بر حسب فشار ورودی.

قطر قطرات از 678° میکرون تا 1203 میکرون افزایش می‌یابد (تقریباً 25% - تا 33% + نسبت به شرایط طراحی).

در شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش فشار ورودی به نازل، فشار و دمای خروجی از نازل به نحوی افزایش می‌یابد که میزان میعان و حجم فاز مایع افزایش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش نسبت اشباع و دمای جریان، حداقل قطر پایدار

آن تغییر در ترکیب گاز ورودی نیز دارای تأثیر قابل توجهی بر روی این پارامترهاست، اما تأثیر تغییرات فشار در مقایسه با سایر پارامترها چشم‌گیر نیست.

۲.۴. تأثیر بر روی محفظه‌ی جدایش

همان‌گونه که اشاره شد، با تغییر مشخصات جریان ورودی به نازل، مشخصات ترمودینامیکی، میدان جریان و قطر قطرات در خروجی از نازل و ورودی به محفظه‌ی جدایش تغییر خواهد کرد. از این رو بر اساس رابطه‌ی ۸، زمان مورد نیاز قطرات برای رسیدن به دیواره و جدایش از فاز گاز و به تبع آن طول مورد نیاز محفظه‌ی جدایش نیز دست‌خوش تغییر خواهد شد. در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ تغییرات طول مورد نیاز محفظه‌ی جدایش بر حسب تغییرات دما، فشار و ترکیب گاز ورودی به نازل، برای شدت چرخش ثابت (برابر با 577° /معادل زاویه‌ی چرخش 3° درجه) نمایش داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش دمای ورودی طول مورد نیاز محفظه‌ی جدایش کاهش می‌یابد و با افزایش فشار و نسبت مولی متان در جریان ورودی، طول مورد نیاز محفظه‌ی جدایش افزایش می‌یابد. مقدار نرمال شده‌ی این تغییرات (نسبت به نقطه‌ی طراحی) در جدول ۷ ارائه شده است. به ترتیب تغییرات دما، ترکیب گاز و فشار ورودی دارای بیشترین تأثیر بر روی طول مورد نیاز محفظه‌ی جدایش هستند.

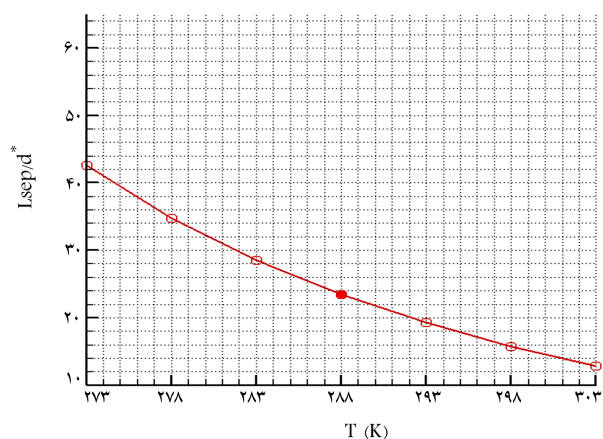
۳.۴. جداساز با هندسه‌ی ثابت

در بخش‌های قبلی نشان داده شد که با تغییر شرایط جریان ورودی به نازل جداساز مافوق صوت، شرایط جریان خروجی از نازل، میزان میعان و قطر قطرات تشکیل شده و به تبع آنها طول مورد نیاز محفظه‌ی جدایش به چه گونه تغییر خواهد کرد. اما در عمل پس از ساخت جداساز مافوق صوت و در شرایط بهره‌برداری، امکان تغییر طول محفظه جدایش وجود ندارد و روند جدایش باید به نحوی دیگر کنترل شود. از آنجایی که کنترل جریان از طریق تغییر در دیواره و هندسه‌ی نازل یا محفظه‌ی جدایش بسیار دشوار و پرهزینه است، معقول‌ترین روش برای کنترل جدایش تغییر زاویه‌ی پره‌های چرخاننده و شدت چرخش جریان است. همان‌طور که در شکل ۶ نمایش داده شده است، تغییر شدت چرخش تأثیر قابل توجهی بر روی طول محفظه‌ی جدایش دارد و از این طریق می‌توان اثرات ناشی از تغییر در مشخصات جریان ورودی را جبران کرد. تغییرات شدت چرخش مورد نیاز بر حسب تغییرات دما، فشار و ترکیب گاز ورودی به منظور حفظ طول محفظه‌ی جدایش برابر با طول طراحی شده (جدول ۵) در شکل‌های ۱۳-۱۵ نمایش داده شده است.

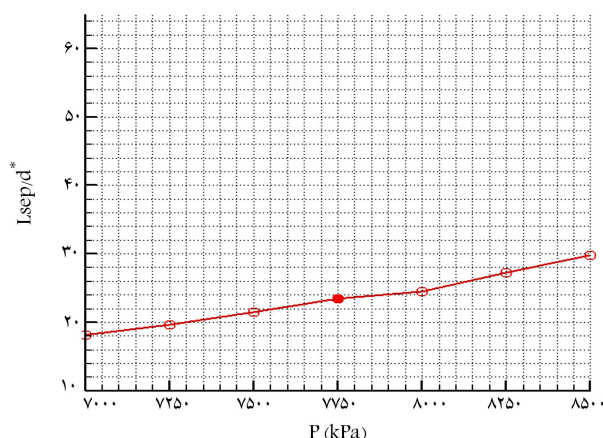
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، برای حفظ طول محفظه‌ی جدایش با افزایش دمای ورودی باید شدت چرخش و زاویه‌ی پره‌ی چرخاننده کاهش یابد و با افزایش فشار و نسبت مولی متان در ورودی باید شدت چرخش و زاویه‌ی پره‌ی چرخاننده افزایش یابد. در جدول ۸ بازه‌ی عملکردی مورد نیاز پره‌ی چرخاننده و شدت چرخش جریان برای جبران اثرات تغییر در شرایط ورودی و شیب تغییرات مورد نیاز آن نمایش داده شده است.

همان‌گونه که انتظار می‌رفت، با توجه به تأثیرگذاری بیشتر تغییرات دمای ورودی بر روی عملکرد نازل و طول مورد نیاز محفظه‌ی جدایش، حساسیت زاویه‌ی پره‌ی چرخاننده به تغییرات دما بیش از سایر پارامترهاست.

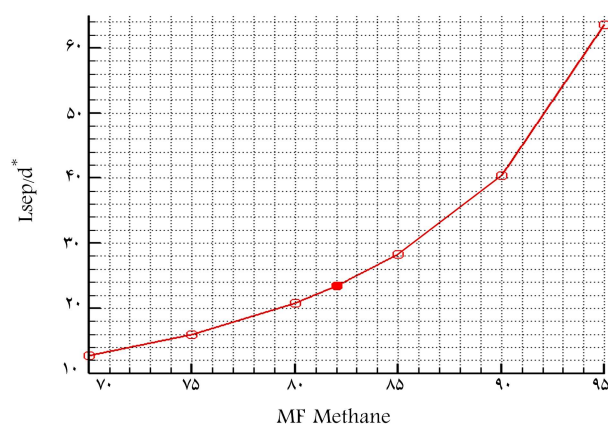
از آنجایی که تغییر شرایط جریان ورودی اغلب به صورت توأم اتفاق می‌افتد، زاویه‌ی پره‌ی چرخاننده باید به گونه‌ی تنظیم شود که تأثیرات هم‌زمان و گاهی متضاد تغییر در مشخصات جریان ورودی را جبران کند. در ادامه نقشه‌های تغییر شدت



شکل ۱۰. طول محفظه‌ی جدایش بر حسب دمای ورودی.

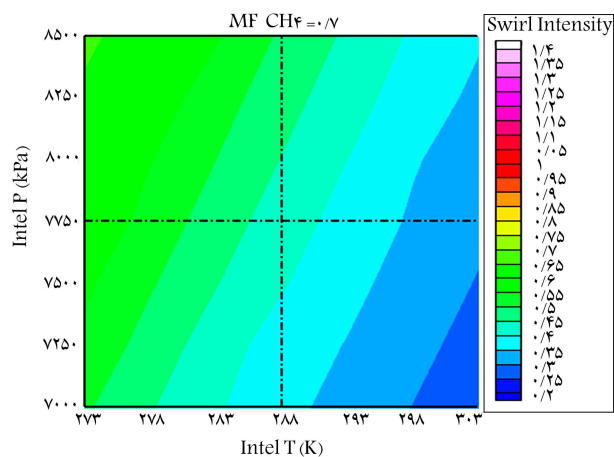


شکل ۱۱. طول محفظه‌ی جدایش بر حسب فشار ورودی.

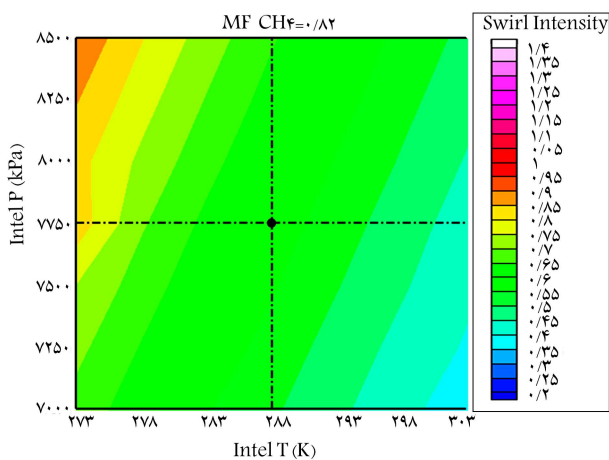


شکل ۱۲. طول محفظه‌ی جدایش بر حسب ترکیب ورودی.

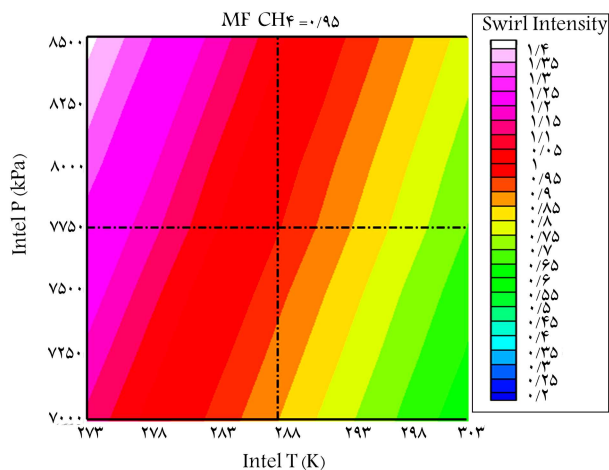
چرخش مورد نیاز برای جبران تغییرات هم‌زمان مشخصات جریان ورودی به منظور حفظ طول محفظه‌ی جدایش برابر با طول طراحی شده (جدول ۵) در شرایط مختلف نمایش داده شده است. در این کانتورها دمای قثا و ورودی در بازه‌ی ۲۷۳ تا ۳۰۳ کلوین، فشار ورودی در بازه‌ی ۷۰۰۰ تا ۸۵۰۰ کیلوپاسکال و نسبت مولی متان در گاز ورودی در بازه‌ی ۷۰ تا ۹۵ درصد تغییر کرده و محدودیت عملیاتی برای شدت چرخش در نظر گرفته نشده است. همچنین مقدار هر پارامتر در شرایط طراحی (جدول ۲) توسط خطوط خط‌چین مشخص شده است.



شکل ۱۶. شدت چرخش برحسب دما و فشار در نسبت مولی متان ۰/۷۰.

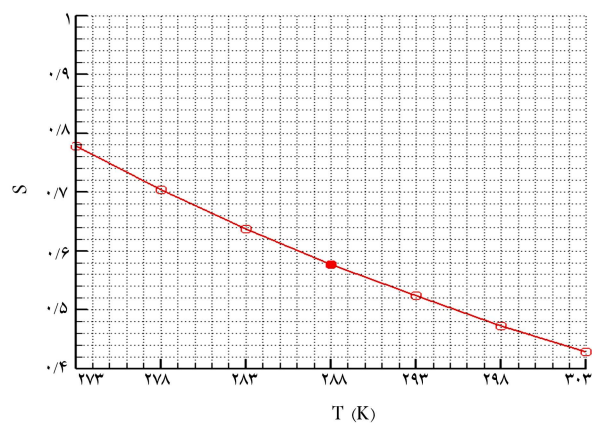


شکل ۱۷. شدت چرخش برحسب دما و فشار در نسبت مولی متان ۰/۸۲ (شرایط طراحی).

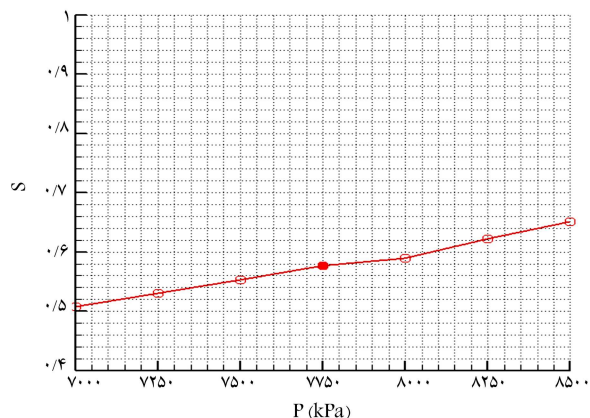


شکل ۱۸. شدت چرخش برحسب دما و فشار در نسبت مولی متان ۰/۹۵.

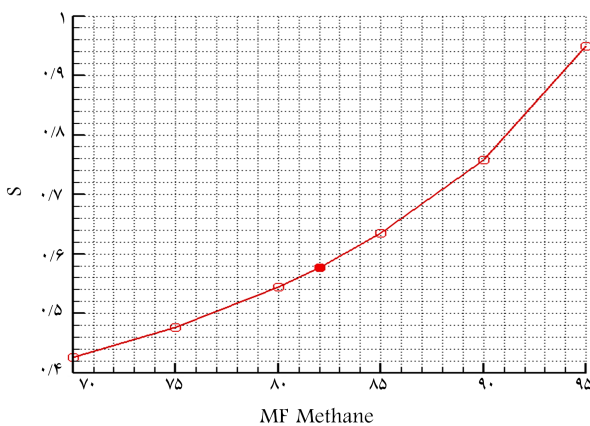
در شکل‌های ۱۶-۱۸ کانتورهای تغییر شدت چرخش مورد نیاز بر حسب تغییرات دما و فشار ورودی برای سه مقدار نسبت مولی گاز متان در ورودی نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش فشار و کاهش دما شدت چرخش مورد نیاز افزایش می‌یابد، اما تأثیرگذاری تغییرات فشار بر روی شدت چرخش



شکل ۱۳. شدت چرخش بر حسب دمای ورودی.



شکل ۱۴. شدت چرخش بر حسب فشار ورودی.



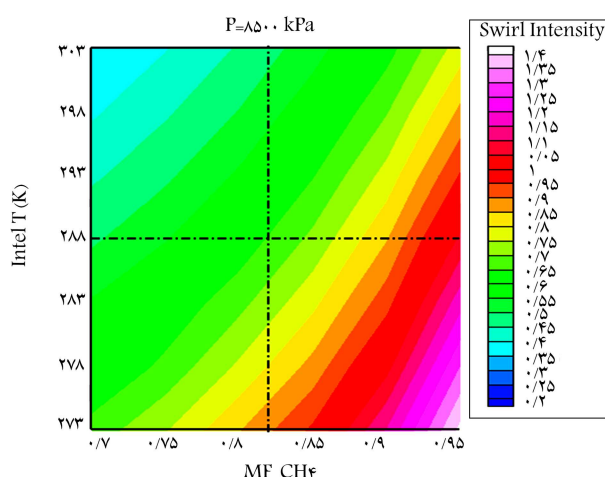
شکل ۱۵. شدت چرخش بر حسب ترکیب ورودی.

جدول ۷. مقایسه‌ی تأثیر تغییر مشخصات جریان ورودی بر طول محفظه‌ی جدایش.

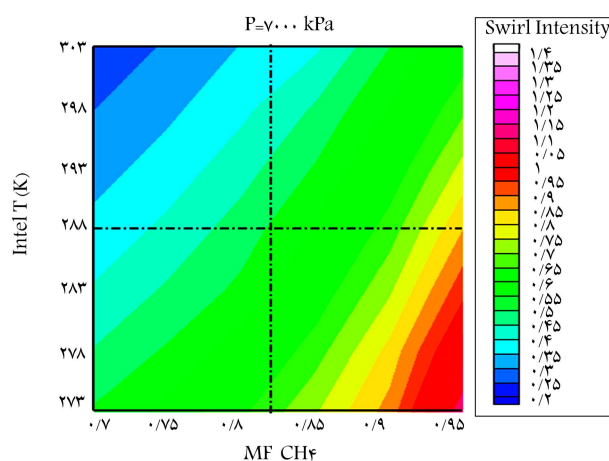
پارامتر تغییر کرده	Δ [%]	$\Delta L_{sep}/d^*$ [%]	$\frac{\Delta L_{sep}/d^*}{\Delta}$
T	۱۰/۴	-۱۲۷/۰	-۱۲/۱۹
P	۱۹/۴	۴۹/۸	۲/۵۷
MF Methane	۳۰/۵	۲۱۷/۲	۷/۱۲

جدول ۸. مقایسه‌ی بازه‌ی عملیاتی پرده‌ی چرخاننده و شدت چرخش به‌منظور جبران تأثیر تغییر مشخصات جریان ورودی.

پارامتر تغییر کرده	محدوده تغییر	Δ [%]	θ_{Swirl}	S	$\frac{\Delta \theta}{\Delta}$	$\frac{\Delta S}{\Delta}$
T	۲۷۳-۳۰۳	۱۰۴	۳۷٫۹-۲۳٫۲	۰٫۷۷۹-۰٫۴۲۸	-۴٫۷۲	-۵٫۸۳
P	۷۰۰۰-۸۵۰۰	۱۹٫۴	۲۶٫۹-۳۳٫۱	۰٫۵۰۷-۰٫۶۵۱	۱٫۰۶	۱٫۲۸
MF Methane	۷۰-۹۵	۳۰٫۵	۲۳٫۱-۴۳٫۵	۰٫۴۲۶-۰٫۹۴۹	۲٫۲۳	۲٫۹۷



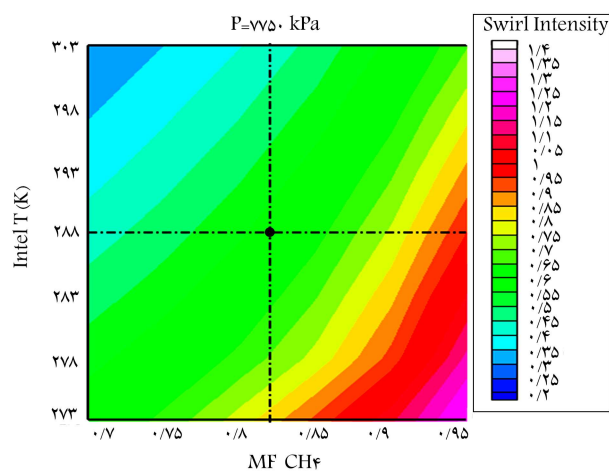
شکل ۲۱. شدت چرخش برحسب دما و نسبت مولی متان در فشار ۸۵۰۰.



شکل ۱۹. شدت چرخش برحسب دما و نسبت مولی متان در فشار ۷۰۰۰.

داده شده است. همان‌گونه که در این کانتورها مشاهده می‌شود، به‌منظور جبران اثرات کاهش دما و افزایش نسبت مولی متان در گاز ورودی، نیاز به افزایش شدت چرخش جریان در محفظه‌ی جدایش است. در این شرایط نیز با تغییر مقدار فشار ورودی نسبت به شرایط طراحی، حساسیت شدت چرخش به تغییرات دما و ترکیب گاز افزایش می‌یابد.

در شکل‌های ۲۲-۲۴ کانتورهای تغییر شدت چرخش مورد نیاز بر حسب تغییرات دما و نسبت مولی گاز متان در ورودی برای سه مقدار فشار ورودی نمایش داده شده است. در این کانتورها تغییر شدت چرخش مورد نیاز برحسب تغییرات فشار ورودی ناچیز است و در دماهای بالاتر شدت چرخش با افزایش فشار تقریباً ثابت می‌ماند. با افزایش نسبت مولی گاز متان در ورودی نیز شدت چرخش مورد نیاز افزایش می‌یابد، اما حساسیت شدت چرخش به ترکیب گاز ورودی نیز با افزایش دما دچار کاهش خواهد شد.



شکل ۲۰. شدت چرخش برحسب دما و نسبت مولی متان در فشار ۷۷۵۰ (شرایط طراحی).

۵. جمع‌بندی

در این مقاله طراحی یک‌بعدی جداساز مافوق صوت با هدف جداسازی و خالص‌سازی متان در ترکیب گاز طبیعی مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، ابتدا به طراحی فرایند جداسازی مناسب به لحاظ ترمودینامیکی برای رسیدن به بهترین ترکیب فازها در خروجی و دما و فشار متناسب با این شرایط در ورودی و خروجی نازل پرداخته شده است. فرایند مناسب برای خالص‌سازی متان در جدول ۲ ارائه شده است. در ادامه هندسه‌ی نازل متناسب با فرایند انبساط مورد نیاز طراحی شده است. از آنجایی‌که عملکرد نازل در نواحی نزدیک به خط اشباع و دوفاز است، امکان

بسیار کمتر از تغییرات دماست. همچنین حساسیت شدت چرخش به تغییرات دما و فشار در شرایط ترکیب گاز ورودی برابر با شرایط طراحی، کمتر از حساسیت آن در شرایط گاز ورودی با ترکیبات دیگر است. مشاهده می‌شود که افزایش نسبت مولی متان در گاز ورودی نسبت به شرایط طراحی (شکل ۱۸) موجب افزایش بیشتر حساسیت چرخش به دما و فشار ورودی در مقایسه با کاهش نسبت مولی متان در گاز ورودی (شکل ۱۶) می‌شود.

در شکل‌های ۱۹-۲۱ کانتورهای تغییر شدت چرخش مورد نیاز بر حسب تغییرات دما و نسبت مولی گاز متان در ورودی برای سه مقدار فشار ورودی نمایش

نظر گرفته شده است و میعان به صورت آنی خواهد بود. طول محفظه‌ی جدایش بر اساس بیشترین زمان مورد نیاز قطرات برای رسیدن به دیواره تعیین می‌شود. بدین منظور کوچک‌ترین قطر پایدار قطرات محاسبه و زمان مورد نیاز این قطرات برای جداسازی محاسبه می‌شود. در ادامه، تأثیرات تغییر در شرایط گاز ورودی بر روی عملکرد جداساز مطالعه شده است.

همان‌گونه که گزارش شد، با افزایش دمای ورودی، طول مورد نیاز محفظه‌ی جدایش کاهش می‌یابد و با افزایش فشار و نسبت مولی متان در جریان ورودی، طول مورد نیاز محفظه‌ی جدایش افزایش می‌یابد. در مجموع تغییرات دما، ترکیب گاز و فشار ورودی به ترتیب دارای بیشترین تأثیر بر روی طول مورد نیاز محفظه‌ی جدایش هستند (جدول ۷). به منظور جبران اثرات تغییر در شرایط ورودی، می‌توان با تغییر زاویه‌ی پره‌ی چرخاننده‌ی جریان و شدت چرخش، طول مورد نیاز جداسازی روکنترل کرد و معادل با طول محفظه‌ی جدایش طراحی شده تنظیم نمود. در نتیجه شدت چرخش مورد نیاز برای جبران اثر تغییرات در ورودی در جداساز با هندسه‌ی ثابت محاسبه شده است. در انتها نیز تغییر هم‌زمان متغیرهای ورودی و شدت چرخش مورد نیاز برای جداسازی بهینه نمایش داده شده است.

نتایج حاکی از آن است که با افزایش فشار و کاهش دما شدت چرخش مورد نیاز افزایش می‌یابد، اما تأثیرگذاری تغییرات فشار بر روی شدت چرخش بسیار کمتر از تغییرات دماست. همچنین، حساسیت شدت چرخش به تغییرات دما و فشار در شرایط ترکیب گاز ورودی برابر با شرایط طراحی، کمتر از حساسیت آن در شرایط گاز ورودی با ترکیبات دیگر است. همچنین، افزایش نسبت مولی متان در گاز ورودی نسبت به شرایط طراحی موجب افزایش بیشتر حساسیت چرخش به دما و فشار ورودی در مقایسه با کاهش نسبت مولی متان در گاز ورودی می‌شود (شکل‌های ۱۶-۱۸). در ادامه، به منظور جبران اثرات افزایش نسبت مولی متان در گاز ورودی و کاهش دما در ورودی، نیاز به افزایش شدت چرخش جریان در محفظه‌ی جدایش است. در این شرایط نیز با تغییر مقدار فشار ورودی نسبت به شرایط طراحی، حساسیت شدت چرخش به تغییرات دما و ترکیب گاز افزایش می‌یابد (شکل‌های ۱۹-۲۲). تغییر شدت چرخش مورد نیاز برحسب تغییرات فشار ورودی ناچیز است و در دماهای بالاتر شدت چرخش با افزایش فشار تقریباً ثابت می‌ماند. با افزایش نسبت مولی گاز متان در ورودی نیز شدت چرخش مورد نیاز افزایش می‌یابد، اما حساسیت شدت چرخش به ترکیب گاز ورودی نیز با افزایش دما دچار کاهش خواهد شد (شکل‌های ۲۲-۲۴).

واژه‌نامه

A : مساحت مقطع جداساز

$A(T)$: تابع محاسبه‌ی تنش سطحی قطره

$B(T)$: تابع محاسبه‌ی تنش سطحی قطره

D : قطر قطره

L : طول در راستای محوری

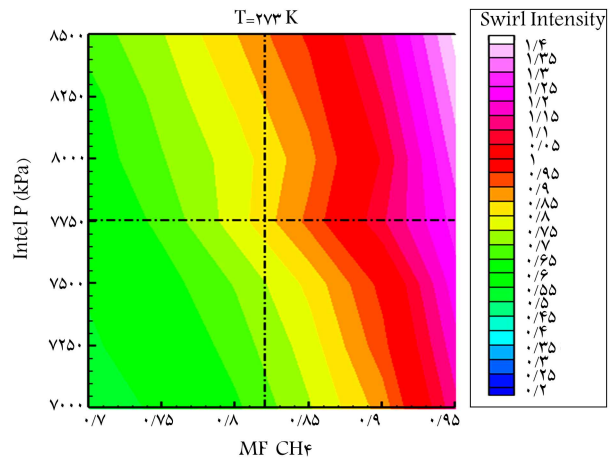
$Mach$: عدد ماخ

MF : نسبت مولی

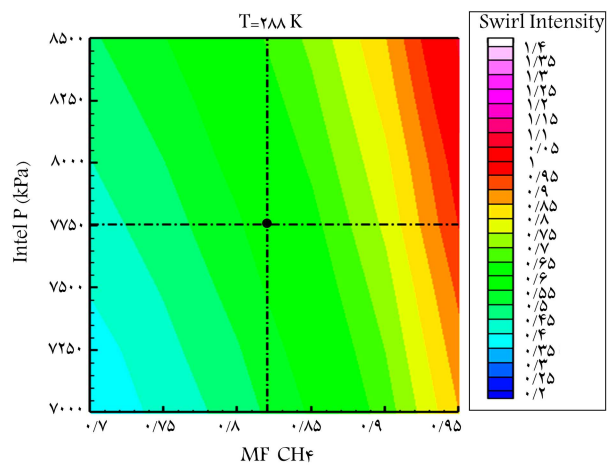
MW : جرم مولی

P : فشار

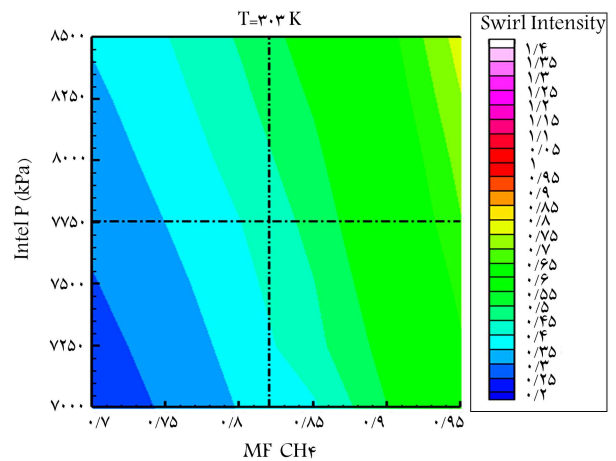
PR : نسبت فشار



شکل ۲۲. شدت چرخش برحسب فشار و نسبت مولی متان در دمای ۲۷۳.



شکل ۲۳. شدت چرخش برحسب فشار و نسبت مولی متان در دمای ۲۸۸ (شرایط طراحی).



شکل ۲۴. شدت چرخش برحسب فشار و نسبت مولی متان در دمای ۳۰۳.

استفاده از مدل گاز ایده‌آل و معادلات مربوط به آن وجود ندارد و از مدل گاز واقعی به همراه تغییرات γ در طول نازل استفاده شده است. در طراحی نازل از اثرات لزجت و لایه‌ی مرزی صرف نظر شده است و جریان آیزنتروپیک فرض می‌شود. در طراحی جداساز چرخشی، جریان خروجی از نازل به صورت فوق اشباع در

R : ثابت گاز

S : نسبت اشباع، شدت چرخش جریان

T : دما؛

d : قطر مقطع جداساز

k : شمارنده‌ی اجزای ترکیب

q : کیفیت گاز (نسبت فاز گاز به کل)

r : شعاع قطره، مختصات در راستای شعاع جداساز

s : انتروپی

t : زمان، دمای بی‌بعد

x : مختصات در راستای محور جداساز

y : نسبت مولی

• حروف یونانی

α : ثابت محاسبه‌ی تنش سطحی قطره

β : ثابت محاسبه‌ی تنش سطحی قطره

γ : نسبت ظرفیت‌های حرارتی

μ : لزجت، ثابت محاسبه‌ی تنش سطحی قطره

ρ : چگالی

σ : تنش سطحی قطره

ω : سرعت زاویه‌یی

• زیرنویس‌ها

axial: در راستای محوری

c : شرایط بحرانی

d : قطره

in : ورودی به نازل

l : فاز مایع

liq : فاز مایع

radial: در راستای شعاعی

sep: شرایط جداسازی، محفظه‌ی جدایش

swirl: چرخش جریان

swirler: چرخاننده‌ی جریان

v : فاز گاز

vap : فاز گاز

θ : مختصات در راستای مماسی جداساز

• بالانویس

*: مقطع گلوگاه نازل، قطره در شرایط بحرانی

پانویس‌ها

1. adsorption
2. dissolve
3. membranes
4. cryogenics
5. supersonic separators
6. laval nozzle
7. cyclone separator
8. dew point control
9. Garret
10. Linhardt
11. Nasikas
12. Prast
13. Molleson
14. Stassenko
15. Malyshkina
16. Koo
17. Ma
18. spontaneous condensation
19. inner-core
20. heterogeneous nucleation
21. Castier
22. peng-robinson
23. Secchi
24. swirler
25. Twister I
26. supersonic swirl separator: 3S
27. Foelsch
28. circular arc
29. radial curve

30. transition curve
31. separation chamber
32. vanned swirler
33. critical radius
34. saturation ratio
35. Andbaeva
36. time of flight
37. Holdich
38. swirl intensity

منابع (References)

1. Mokhatab, S., Poe, W.A. and Speight, J.G., *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing*, 2nd Ed, Burlington Gulf Professional Publishing (2012).
2. Malyshkina, M.M. "The procedure for investigation of the efficiency of purification of natural gases in a supersonic separator", *High Temperature*, **48**, pp. 244-250 (2010).
3. Panel on Separation Technology for Industrial Reuse and Recycling. "National research council, separation technologies for the industries of the future", Washington D.C.: National Academy Press (1998).
4. Gas Processors Suppliers Association., *In GPSA Engineering Data Book*, 12th ed., Tulsa, Gas Processors Suppliers Association, pp. 1-13 (2004).

5. Manning, F.S. and Thompson, R. "In oilfield processing of petroleum", *Natural Gas, Tulsa, Pennwell Corp*, **1**, pp. 19-30 (1991).
6. Arnold, K. and Stewart, M., *In Surface Production Operations*, 2nd ed., **2**: Design of Gas Handling Facilities, Houston, Gulf Professional Publishing, pp. 46-60 (1999).
7. Prast, B., van Dam, R.A., Willems, J.H. and et al. "Formation of nano-sized water droplets in a supersonic expansion flow", *Journal of Aerosol Science*, **27**(1), pp. S147-S148 (1996).
8. Gilberton International. "New solutions for gas processing (Test)", [Online]. Available: <https://gilbertoninternational.com/technologies/new-solutions-for-gas-processing-test/>. (Accessed 02 05 2020).
9. Eriqitai, J., Han, R. and Duan and Wu, M. "Performance of dual-throat supersonic separation device with porous wall structure", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **22**(4), pp. 370-382 (2014).
10. Garrett, R.L., Oehlschlager, W.K. and Tomich, J.F. "Vapor-liquid separation at supersonic velocities", *Journal of Engineering Industry*, **90**(4), pp. 6.9-612 (1968).
11. Lindhardt, H.D. and Beveridge, J.H. "Curved duct separator for removing particulate matter from a carrier gas", US Patent US4292050A, 29 September (1981).
12. Nasikas, A. "Method and mechanism for the supersonic separation of droplets from a gas stream", US Patent US5306330A, 26 April (1994).
13. Haghighi, M., Hawboldt, K.A. and Abedinzadegan Abdi, M. "Supersonic gas separators: review of latest developments", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **27**(1), pp. 109-121 (2015).
14. Molleson, G.V. and Stasenko, A.L. "An axisymmetric flow of a mixture of real gases with a condensing component", *High Temperature*, **43**, pp. 419-428 (2005).
15. Malyshkina, M.M. "The structure of gasdynamic flow in a supersonic separator of natural gas", *High Temperature*, **46**, pp. 69-76 (2008).
16. Karimi, A. and Abedinzadegan Abdi, M. "Selective dehydration of high-pressure natural gas using supersonic nozzles", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **48**, (1), pp. 560-568 (2009).
17. Koo, A. Brooks, G.A. and Nagle, M. "Nucleation and growth of Mg condensate during supersonic gas quenching", *Journal of Crystal Growth*, **310**(10), pp. 2659-2667 (2008).
18. Ma, Q.-F., Hu, D.-P., Jiang, J.-Z. and et al. "A turbulent eulerian multi-fluid model for homogeneous nucleation of water vapour in transonic flow", *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, **23**(3), pp. 221-231 (2009).
19. Ma, Q.-F., Hu, D.-P., Jiang, J.-Z. and et al. "Numerical study of the spontaneous nucleation of self-rotational moist gas in a converging-diverging nozzle", *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, **24**(1-2), pp. 29-36 (2010).
20. M. Castier. "Modeling and simulation of supersonic gas separations", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **18**, pp. 304-311 (2014).
21. Mahmoodzadeh Vaziri, B. and Shahsavand, A. "Optimal selection of supersonic separators inlet velocity components via maximization of swirl strength and centrifugal acceleration", *Separation Science and Technology*, **50**(5), pp. 752-759 (2015).
22. Secchi, R., Innocenti, G. and Fiaschi, D. "Supersonic swirling separator for natural gas heavy fractions extraction: 1D model with real gas EOS for preliminary design", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **34**, pp. 197-215 (2016).
23. Brouwer, J. and Epsom, H. "Twister supersonic gas conditioning for unmanned platforms and subsea gas processing", in *Offshore Europe Conference* (2003).
24. Betting, M., Van Holten, T., Tjeenk Willink, C.A. and et al. "Nozzle for supersonic gas flow and an inertia separator", US Patent US6513345B1, (04 February 2003).
25. Betting, M. and Epsom, H. "Supersonic separator gains market acceptance", *World Oil*, **254**, pp. 197-200 (April 2007).
26. Alferov, V.I., Baguirov, L.A., Feygin, V.I. and et al. "Method of and apparatus for the separation of components of gas mixtures and liquefaction of a gas", US Patent US6372019B1, (16 April 2002).
27. Cao, X. and Bian, J. "Supersonic separation technology for natural gas processing: a review", *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, **136**, pp. 138-151 (2019).
28. K. Foelsch. "The analytical design of an axially symmetric laval nozzle for a parallel and uniform jet", *Journal of The Aeronautical Sciences*, **16**(3), pp. 161-166 (1949).
29. Mahmoodzadeh Vaziri, B. and Shahsavand, A. "Analysis of supersonic separators geometry using generalized radial basis function (GRBF) artificial neural networks", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **13**, pp. 30-41 (2013).
30. Prast, B., Lammers, B. and Betting, M. "CFD for supersonic Gas Processing", in *Fifth International Conference on CFD in the Process Industries*, CSIRO, Melbourne, Australia (2006).
31. Andbaeva, V.N. and Khotienkova, M.N. "Experimental study of surface tension of ethane-methane solution in temperature range 213-283 K", *Thermophysics and Aeromechanics volume*, **20**, pp. 385-389 (2013).
32. Holdich, G.R., *Fundamentals of Particle Technology*, Leicestershire, U.K.: Midland Information Technology and Publishing (2002).