ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2022;22(05):323-333

Investigation of Sub Cooling Methods for Discharged Liquid Nitrogen Jet from Injector

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Moosavian D.[1]
Mostofizadeh A.[1*]
Ghassemi H.[2]

How to cite this article
Moosavian D, Mostofizadeh A, Ghassemi H. Investigation of Sub Cooling Methods for Discharged Liquid Nitrogen Jet from Injector. Modares Mechanical Engineering. 2022;22(05):323-333.

[1] Department of Aerospace, Faculty of Aerospace Engineering, Malek Ashtar industrial University, Shahinshahr, Iran.
[2] Department of Aerospace Engineering, Faculty of Mechanics, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Correspondence
Address: Department of Aerospace, Faculty of Aerospace Engineering, Malek Ashtar industrial University, Shahinshahr, Iran
ar.mostofi@gmail.com

Article History
Received: August 10, 2021
Accepted: Februry 01, 2021
ePublished: March 20, 2022

ABSTRACT

One of the problems in the experiment of breakup cryogenic liquid jet is the state of the discharged cryogenic liquid jet from the injector. In some applications, it is necessary jet to be in sub-cooled condition. However, at atmospheric conditions, the discharged cryogenic liquid jet becomes two-phase. In the present article, the methods for sub-cooling of the output nitrogen from the injector are investigated and a simple method to achieve this goal is presented and used. With this method, which is based on holding at low pressure, a sub-cooled liquid nitrogen jet with a temperature of about 7 K lower than the saturation temperature was obtained. Then, the behavior of the liquid nitrogen jet at high pressure and atmospheric pressure is evaluated. A high-speed camera was used to observe the behavior of the jet. The speed of the liquid jet is changed from 12 m/s to 34 m/s according to the Reynolds number from 90000 to 260000. When the liquid nitrogen jet is discharged into the environment under standard conditions, the jet becomes two-phase and expands. The larger the injector pressure difference, the greater the expansion of the jet; So that in the pressure difference of 6 and 13 bar, the diameter of the jet is 1.5 and 3.3 times the diameter of the injector, respectively. For pressure differences of less than 6 bar, the jet often enters the environment in the form of steam. In the test speed range, under the conditions provided for the liquid and the environment, the breakup of the sub-cooled liquid jet leads to the production of very small droplets that are consistent with the expectation of such a liquid.

Keywords Cryogenic Liquid, Sub-Cooled Liquid, Liquid Nitrogen, Thermodynamics of cryogenic liquid jet, Liquid Jet

CITATION LINKS

[1] Atomization and breakup of cryogenic propellants under high-pressure subcritical and supercritical conditions. [2] Initial growth rate and visual characteristics of a round jet into a sub-to supercritical environment of relevance to rocket, gas turbine, and diesel engines. [3] Cryogenic shear layers: experiments and phenomenological modeling of the initial growth rate under subcritical and supercritical conditions. International Journal of Heat and Fluid Flow. [4] Visual characteristics and initial growth rates of round cryogenic jets at subcritical and supercritical pressures. Physics of Fluids. [5] High-speed observations of cryogenic single and coaxial jets under subcritical and transcritical conditions. [6] Characterization of flashing phenomena with cryogenic fluid under vacuum conditions. [7] Numerical investigation on cryogenic liquid jet under transcritical and supercritical conditions. [8] Numerical simulation of subcooled and superheated jets under thermodynamic non-equilibrium. [9] Detached eddy simulation of the flow field and heat transfer in cryogenic nitrogen jet. [10] Simulation study on the cryogenic liquid nitrogen jets: Effects of equations of state and turbulence models. [11] Determination of Structure Temperature and Concentration in the Near Injector Region of Impinging Jets Using Holographic Techniques. [12] NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0. [13] A study of the sprays formed by impinging jets in laminar and turbulent flow. [14] Science and Engineering of Droplets.

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی روش‌های مادون سرد سازی جت نیتروژن مایع خروجی از انژکتور

سید داود موسویان
گروه هوافضا، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، ایران
علیرضا مستوفی‌زاده*
گروه هوافضا، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، ایران
حجت قاسمی
گروه هوافضا ، دانشکده مهندسی مکانیک ، دانشگاه علم وصنعت ایران، تهران، ایران

چکیده
یکی از مشکلاتی که در زمینه‌ی آزمایش شکست جت‌های مایعات زمستیک وجود دارد، حالت مایعات زمستیک خروجی از انژکتور است. در برخی کاربردها لازم است تا جت در حالت مایع مادون‌سرد باشد. اما در شرایط اتمسفر متعارفی جت خروجی از انژکتور به صورت دوفاز در می‌آید. در این پژوهش سعی گردید تا روش‌های مادون‌سرد سازی نیتروژن خروجی از انژکتور بررسی شود و یک روش ساده برای نیل به این مقصود ارائه و به کار برده شود. با این روش که بر پایه نگهداری در فشار کم استوار است، جت نیتروژن مایع مادون‌سرد با دما حدود ۷ کلوین پایین‌تر از دمای اشباع به دست آمد. سپس رفتار جت نیتروژن مایع، در محفظه‌ی آزمایش با فشار اتمسفر آزمایشگاه و بالاتر ارزیابی شد. برای بررسی رفتار جت از عکس‌برداری سریع استفاده شده است. سرعت جت‌های نیتروژن مایع از ۱۲ متر بر ثانیه تا ۳۴ متر بر ثانیه منطبق بر عدد رینولدز از ۹۰۰۰۰ تا ۲۶۰۰۰۰ تغییر داده شد. زمانی که جت نیتروژن مایع، در محیط با شرایط استاندارد تخلیه می‌شود، جت خروجی دوفاز و منبسط می‌گردد. هرچه اختلاف فشار انژکتور بیشتر شود میزان انبساط جت بیشتر می‌شود؛ طوری که در اختلاف فشار ۶ و ۱۳ بار قطر جت به ترتیب ۱/۵ و ۳/۳ برابر قطر انژکتور است. برای اختلاف فشارهای کمتر از ۶ بار، جت اغلب به صورت بخار وارد محیط می‌شود. در محدوده‌ی سرعت آزمایش، در شرایط تامین شده برای مایع و محیط، شکست جت مایع مادون‌سرد، منجر به تولید قطرات بسیار ریزی می‌شود که منطبق بر انتظار از چنین مایعی است.

کلیدواژه‌ها: جت مایع، مایع زمستیک، مایع مادون‌سرد، نیتروژن مایع، ترمودینامیک جت مایع زمستیک

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۲
*نویسنده مسئول: ar.mostofi@gmail.com

۱- مقدمه
مایعات زَمُستیک (برنهاده فارسی کلمه cryogenic) در موارد گوناگونی مانند سردسازی و خنک‌کاری سامانه‌های الکترونیک، نگهداری مواد زیستی در دماهای بسیار پایین، تولید گاز با حجم زیاد، مایع‌سازی گازهایی مانند متان و گاز طبیعی، و موتورهای پیشرانش مایع به‌کار گرفته می‌شوند. هلیوم، نیتروژن، اکسیژن، آرگون، دی‌اکسیدکربن، و متان از متداول‌ترین مایعات زمستیک می‌باشند. در این میان اکسیژن مایع، کاربرد ویژه‌ای در موتورهای پیشران مایع در نقش اکسیدکننده دارد. جت‌های مایع زمستیک، کاربردهای مختلفی دارند. انوع مختلفی از اتمایزرهای موتورهای پیشران مایع براساس جت بنا شده‌اند؛ یا در شکل یک جت ساده و یا برخورد جت‌ها به یکدیگر یا سطوح جامد. از این رو مطالعه‌ی رفتار جت‌ها، یک نیاز اساسی می‌باشد. کارهای بسیار زیادی در زمینه‌ی فروپاشی جت مایع زمستیک انجام شده است. مایر و همکاران در سال ۱۹۹۸ فرایند پاشش، اختلاط و احتراق اکسیژن مایع همراه با هیدروژن گازی را در محفظه‌ای با فشار بالا مطالعه کردند[1]. چهرودی و همکاران در سال ۱۹۹۹ نرخ رشد و ویژگی‌های بصری جت مایع زمستیک، در محیط مادون تا فوق بحرانی را مطالعه کردند. آنها در تحقیقات خود متوجه شدند که با افزایش فشار جت، رژیم شکست جت از حالت کلاسیک به رژیم شکست باد ثانویه القایی تغییر می‌کند. در رژیم شکست باد ثانویه القایی، جت مایع به صورت واگرا در می‌آید و لیگامنت‌ها و قطراتی از سطح آن جدا می‌شود. رژیم اتمیزاسیون کامل، کمی قبل از فشار بحرانی اتفاق می‌افتد؛ در این حالت جت، به صورت جت گازی در نظر گرفته می‌شود[2]. آنها همچنین در سال ۲۰۰۲ جت نیتروژن با دمای ۱۱۰-۹۰ کلوین را در محفظه آزمایش با دمای فوق بحرانی ۳۰۰ کلوین و فشارهای مادون و فوق بحرانی مورد مطالعه قرار دادند. عکس‌های گرفته شده توسط آنها مرزهای تغییر رژیم به دلیل تغییر چگالی را مشخص می‌کرد. در پایین‌ترین فشار محفظه‌ی آزمایش، جت مایع سطحی پایدار دارد که در پایین‌دست دچار پیچش می‌گردد. در فشار کاهیده (نسبت فشار محفظه به فشار بحرانی) ۰/۴۳، ناپایداری‌ها تشدید و در فشار کاهیده ۰/۶۳، لیگامنت و قطرات از روی سطح جت جدا می‌شود. در فشار کاهیده ۱/۰۳، قطرات قابل تشخیصی دیده نمی‌شود و تنها لیگامنت‌های نخ مانندی روی سطح جت شکل می‌گیرد که به قطرات نمی‌شکند[3]. چهرودی و همکاران همچنین در سال ۲۰۰۲ لایه‌های برشی زمستیک را به صورت تجربی و مدل‌سازی، تحت شرایط مادون و فوق بحرانی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج کار آنها نشان می‌داد که با افزایش فشار محفظه‌ی آزمایش، رفتار سیال پاشیده شده، از رفتار اسپری شبیه جت به رفتار اسپری گازی تغییر می‌کند. این تغییر رفتار جت را می‌توان به کاهش کشش سطحی و انتالپی، زمانی که فشار محفظه‌ی آزمایش به فشار بحرانی نزدیک می‌شود نسبت داد[4]. تانی و همکاران در سال ۲۰۱۵ جت زمستیک (نیتروژن مایع) را در شرایط گذر بحرانی و مادون بحرانی بررسی و در هر دو حالت، هسته‌ی تاریکی از نیتروژن متراکم را مشاهده کردند. در شرایط مادون بحرانی، هسته‌ی تاریک مایع به قطرات ریز متلاشی می‌شود اما در شرایط گذر بحرانی به قطرات متلاشی نمی‌شود بلکه به روشی مشابه با اختلاط آشفته پخش می‌شود[5]. لو و همکاران در سال ۲۰۱۶ پدیده تبخیر ناگهانی جت نیتروژن مایع را در شرایط خلاء بررسی کردند. این پدیده زمانی اتفاق می‌افتد که فشار جت مایع به صورت ناگهانی کاهش می‌یابد. آنها با کمک

تکنیک سایه‌نگاری و اندازه‌گیری دما، ویژگی‌های تبخیر ناگهانی (زاویه اسپری، رفتار حرارتی و انجماد اسپری) را بررسی و دریافتند که مافوق گرم شدن اسپری باعث افزایش زاویه اسپری می‌شود[6]. در بررسی جت‌های مایعات زمستیک تعدادی از محققان از روش‌های عددی کمک گرفتند. از جمله‌ی این افراد می‌توان به لی و همکاران اشاره کرد که در سال ۲۰۱۸ تزریق و اختلاط جت نیتروژن در محیط نیتروژن گازی با شرایط گذر بحرانی و فوق بحرانی را بررسی کردند. در شرایط گذر بحرانی، هر چه دمای جت مایع بالاتر باشد، لایه اختلاط ضخیم‌تر است. در شرایط فوق بحرانی، لایه اختلاط دارای عرض بزرگتر نسبت به همتای گذر بحرانی خود است[7]. لیراس و همکاران در سال ۲۰۱۸ جت‌های مادون‌سرد و مافوق‌گرم را در شرایط نامتعادل ترمودینامیکی با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی کرند. آنها همچنین مطالعاتی برای بررسی ویژگی‌های جریان و میزان بخار تولید شده در جت مایع زمستیک انجام دادند، که نشان می‌داد می‌توان از روش عددی آنها برای بررسی فرایند کاهش ناگهانی فشار در جت مایع زمستیک استفاده کرد[8]. زیاگونگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ میدان جریان و انتقال حرارت جت نیتروژن را در دو حالت مایع و فوق بحرانی به صورت عددی بررسی کردند و دریافتند با افزایش فشار ورودی، فرکانس نوسانات دما و سرعت انتقال حرارت در جت‌های نیتروژن مایع و فوق بحرانی افزایش می‌یابد[9]. ما و همکاران در سال ۲۰۲۱ جت‌های نیتروژن مایع را با استفاده از معادله حالت سیال واقعی در شرایط فوق بحرانی/ گذر بحرانی شبیه‌سازی کردند. نتایج بررسی آنها نشان می‌داد که در حل عددی، انتخاب معادله حالت سیال واقعی نسبت به مدل آشفتگی مهم‌تر است. بنابراین برای مطالعه جت نیتروژن مایع با استفاده از معادله حالت سیال واقعی می‌توان با انتخاب یک مدل آشفتگی ساده‌تر در زمان محاسبه صرفه‌جویی کرد[10].

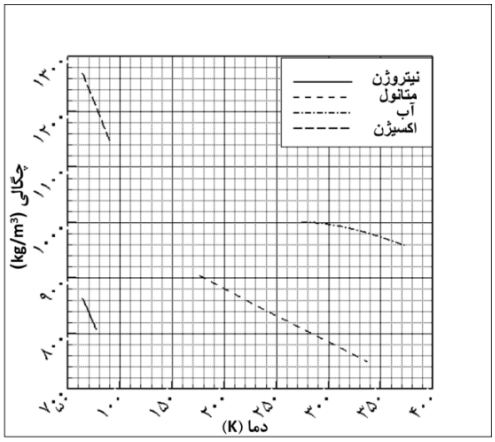
پژوهش حاضر در جهت توسعه‌ی موتورهای راکت مایع بر پایه سوخت متانول و اکسیدکننده‌ی اکسیژن مایع انجام شده است. از آنجایی که نیتروژن مایع هم از نظر هزینه‌ی تولید و هم از نظر ایمنی جایگزین آزمایشگاهی مناسبی برای اکسیژن مایع می‌باشد در این بررسی از نیتروژن مایع کمک گرفته می‌شود. هنگام کار، نیتروژن مایع زمستیک اغلب به صورت ذخیره در مخازن، در شرایط تولیدی در اختیار است. در اغلب موارد، شرایط ترمودینامیکی حاکم بر جت نیتروژن مایع به‌گونه‌ای است که مایع در بدو ورود به محیط، تغییر فاز می‌دهد و دیگر به شکل مایع کامل نیست. از این رو امکان دسترسی به جت مایع نیتروژن در محیط آزمایشگاهی بسیار دشوار است. از دیدگاه ترمودینامیکی، بایستی شرایطی را به‌وجود آورد که در آن، نیتروژن به صورت مایع مادون‌سرد وارد محیط شود. برای دست‌یابی به این شرایط، پژوهشی انجام شده است که طی آن، ضمن مرور روش‌های به‌دست آوردن چنین مایعی، به تشریح و پیاده‌سازی روش مادون‌سرد کردن نیتروژن مایع از طریق نگهداری در فشار کم پرداخته می‌شود. اکثر محققین از روش‌های سردسازی برای مادون‌سرد کردن نیتروژن مایع استفاده کرده‌اند و پیاده‌سازی این روش که نیاز به تجهیزات خاص سردسازی و مبدل گرما ندارد و به سهولت امکان‌پذیر است از جمله نوآوری‌های انجام شده است. مقاله حاضر دستاوردهای تجربی این پژوهش را منعکس می‌کند.

۲- خواص ترموفیزیکی نیتروژن مایع

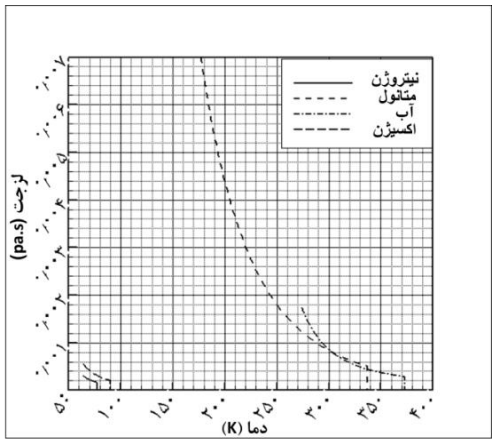
خواص ترموفیزیکی سیالات در فروپاشی و اتمیزاسیون نقش پررنگی دارند. فروپاشی یک جت ناشی از تاثیر نیروهای ایرودینامیکی و نیروهای اینرسی بر جت می‌باشد. در هریک از نیروها (که در قالب اعداد بی‌بعد رینولدز و وبر بررسی می‌شوند)، خواصی از سیال مانند چگالی، لزجت، و کشش سطحی وجود دارند. مایع با کشش سطحی کمتر، راحت‌تر تجزیه می‌شود. از طرف دیگر اثر کشش سطحی روی اندازه‌ی قطرات، حتی از طریق مقایسه‌ی ذرات در عکس‌های گرفته شده آشکار است. لزجت مایع نقش مهمی در بسیاری از جنبه‌های فروپاشی جت بازی می‌کند. افزایش لزجت، عدد رینولدز را کم می‌کند و همچنین از پیشروی هر ناپایداری طبیعی جلوگیری می‌کند. این ناپایداری‌ها، عامل اصلی فروپاشی جت مایع است. بنابراین اثر افزایش لزجت، به تأخیر انداختن شکست و افزایش اندازه‌ی قطرات است[11]. از همین رو، ابتدا به بررسی این خواص پرداخته می‌شود. این خواص با استفاده از نرم‌افزار رف‌پراپ[12] که توسط سازمان استاندارد و تکنولوژی آمریکا توسعه‌یافته، محاسبه شده و به صورت تابعی از دما در فشار ۱ بار در شکل‌های ۱ تا ۳ نشان داده شده‌اند. از آنجا که پژوهش حاضر در جهت توسعه‌ی موتورهای مایع با سوختی بر پایه متانول و اکسیدکننده اکسیژن مایع انجام شده است و همچنین برای مقایسه‌ی خواص ترموفیزیکی نیتروژن مایع با سیالات دیگر، خواص ترموفیزیکی اکسیژن مایع، آب و متانول هم در شکل‌های ۱ تا ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که از این نمودارها مشخص است؛ چگالی اکسیژن مایع از دیگر سیالات بررسی شده به مراتب بیشتر است. همچنین لزجت نیتروژن مایع در نقطه‌ی جوش نرمالش (در فشار ۱ بار و دمای ۷۷ کلوین) به‌مراتب پایین‌تر از دیگر سیالات بررسی شده است. همان‌گونه که در این نمودار مشهود است، کشش سطحی آب بیشتر از متانول و کشش سطحی متانول بیشتر از نیتروژن مایع است. یکی از مهم‌ترین تفاوت‌های بین نیتروژن مایع و آب، گرمای تبخیر خیلی کم‌تر نیتروژن مایع نسبت به آب است. در نقطه‌ی جوش نرمال، گرمای تبخیر نیتروژن مایع ۱۹۸/۳ کیلوژول بر کیلوگرم است درحالی‌که گرمای تبخیر آب ۲۲۵۵ کیلوژول بر کیلوگرم است[13].

از آنجایی که خصوصیات ترموفیزیکی نیتروژن مایع با آب متفاوت است و همچنین پایین بودن دمای اشباع نیتروژن مایع نسبت به آب انتظار می‌رود اتمیزاسیون جت آب با اتمیزاسیون جت

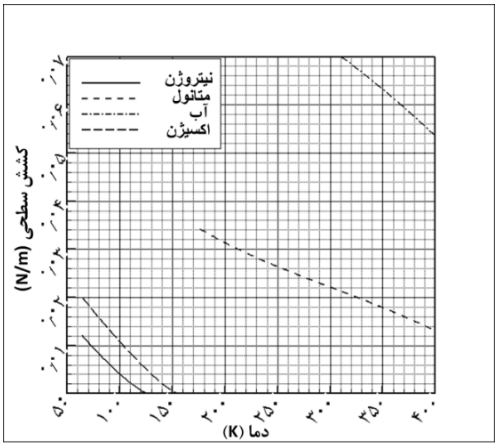
نیتروژن مایع متفاوت باشد و پدیده‌های ترمودینامیکی و انتقال حرارتی در اتمیزاسیون جت نیتروژن مایع اهمیت زیادی داشته باشد.



شکل ۱) نمودار چگالی برحسب دما در فشار ۱ بار، برای آب، متانول، نیتروژن مایع و اکسیژن مایع



شکل ۲) نمودار لزجت برحسب دما در فشار ۱ بار، برای آب، متانول، نیتروژن مایع و اکسیژن مایع



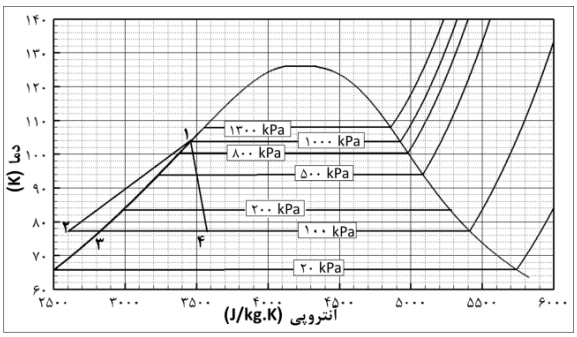
شکل ۳) نمودار کشش سطحی برحسب دما در نقطه اشباع در فشار ۱ بار، برای آب، متانول، نیتروژن مایع و اکسیژن مایع

۳- تئوری آزمایش (بیان مسئله)

مایع زمستیک ذخیره شده در مخازن، هنگام ورود به محیط اطراف، با انبساط مواجه می‌شود. از این رو بعد از خروج از مجاری خروجی (انژکتور)، ممکن است به صورت جزئی یا کاملا تبخیر شود. این مسئله برای جت مایع زمستیک نیز وجود دارد. به همین دلیل تامین یک جت مایع زمستیک با دشواری همراه است. یک راه غلبه بر این مسئله، مادون‌سرد سازی مایع است؛ طوری که سیال پس از ورود به محیط در شرایط زیر اشباع قرار داشته باشد. در این بخش برای درک بهتر مسئله، شرایط پر کردن مخزن و فرایندهای ترمودینامیکی طی شده در آن و انژکتور، برای نیتروژن مایع، مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس چند روش پیشنهادی مادون‌سرد سازی مایع در خروجی انژکتور ارزیابی می‌شود.

۳-۱- حالت نیتروژن مایع در مخزن

مخزن نگه‌داری نیتروژن مایع، یک مخزن دو جداره است که برای کاهش انتقال گرما بین دو جداره آن خلاء شده است. برای پر کردن مخزن، لوله‌ی تغذیه به ورودی مخزن وصل و برای خروج گازها و بخارات، یک مسیر تخلیه باز می‌گردد. بنابراین مخزن در فشار اتمسفریک (۱ بار) پر می‌شود. مایع با ورود به مخزن شروع به جوشش و خنک‌کاری مخزن می‌کند. گاز نیتروژن حاصل از خنک‌کاری، از خروجی گاز خارج شده و با پر شدن مخزن، مایع اشباع نیتروژن در فشار ۱ بار و دمای ۷۷ کلوین (نقطه ۱ در شکل ۴) داخل مخزن باقی می‌ماند. به‌دلیل بسته بودن شیرهای ورودی و خروجی مخزن و انتقال کم گرما، مقداری از مایع تبخیر شده و باعث افزایش فشار مخزن تا نقطه‌ی دلخواه (مثلا ۱۰ بار) می‌شود (نقطه ۲ در شکل ۴). این فرایند به آرامی و روی خط مایع اشباع (حالت ۱ به ۲ در شکل ۴) انجام می‌شود. در این حالت مایع داخل مخزن، نیتروژن مایع اشباع در فشار ۱۰ بار و دمای ۱۰۴ کلوین است. حال اگر بعد از پر شدن، مخزن توسط بخار نیتروژن فشارگذاری شود و فشار آن به ۱۰ بار رسانده شود، یک فرایند دما ثابت (فرایند ۱ به ۳ در شکل ۴) طی خواهد شد و مایع داخل مخزن، نیتروژن مایع مادون سرد در فشار ۱۰ بار و دمای ۷۷ کلوین خواهد بود. با توجه به اینکه، به کمک یک شیر اطمینان، فشار مخزن در ۱۰ بار ثابت نگه داشته می‌شود، مایع داخل مخزن در اثر انتقال گرما یک



شکل ۴) نمودار دما - انتروپی نیتروژن

فرایند فشار ثابت را طی می‌کند (فرایند ۳ به ۲ در شکل ۴) و به حالت مایع اشباع (نقطه ۲ در شکل ۴) می‌رسد. در این حالت، دمای مایع در خروجی مخزن در فشار ۱۰ بار، ۱۰۴ کلوین خواهد بود.

۳-۲- حالت نیتروژن مایع در خروجی انژکتور

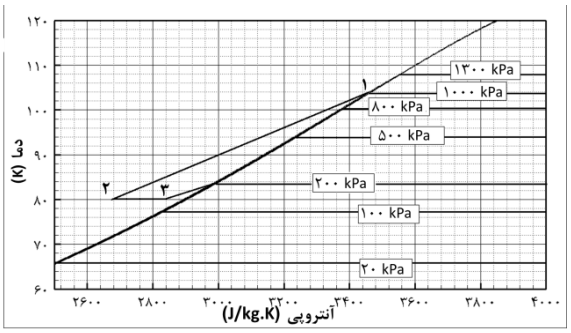
سیال داخل مخزن، نیتروژن مایع اشباع در فشار ۱۰ بار و دمای ۱۰۴ کلوین می‌باشد. فرایند ترمودینامیکی عبور مایع از انژکتور و خروج آن را می‌توان یک فرایند انتالپی ثابت انگاشت. زمانی که انژکتور به مخزن نیتروژن مایع اشباع در فشار ۱۰ بار وصل می‌شود و فشار پایین‌دست انژکتور ۱ بار است، مایع فرایند انتالپی ثابت ۲ به ۴ در شکل ۴ را در انژکتور طی می‌کند و خروجی انژکتور دو فاز خواهد بود. اگر فشار پایین‌دست انژکتور افزایش یابد، باز هم خروجی انژکتور در ناحیه‌ی دوفاز قرار دارد؛ اما حجم مایع در مخلوط افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش فشار پایین‌دست انژکتور، نمی‌توان خروجی انژکتور را مایع مادون‌سرد یا مایع اشباع کرد.

۳-۳- روش‌های مایع مادون‌سرد سازی خروجی انژکتور

برای آن‌که در آزمایشات، مایع مادون‌سرد وجود داشته باشد لازم است تا دمای مایع، کم‌تر از دمای اشباع در فشار محیط باشد. به طور طبیعی انتظار می‌رود با کاهش دمای مایع یا افزایش فشار محیط آزمایش بتوان این شرایط را فراهم کرد. کاهش دمای مایعات زمستیک به تجهیزات خاص سردسازی نیاز دارد که معمولا در دسترس نیست. افزایش فشار محیط آزمایش نیز با دشواری کار در شرایط پرفشار همراه است. در ادامه به سه روش ساده مادون‌سرد سازی مایع زمستیک، بی‌نیاز از تجهیزات متداول سردسازی اشاره می‌شود. در دو روش نخست به مبادله‌گر گرما نیاز است ولی روش سوم که در مطالعه‌ی حاضر به کار برده شده، به تجهیزات خاصی نیاز ندارد.

۳-۳-۱- سرد کردن نیتروژن مایع توسط نیتروژن مایع

در این روش با استفاده از یک مبدل گرما و نیتروژن مایع اشباع در فشار ۱ بار و دمای ۷۷ کلوین می‌توان نیتروژن مایع اشباع داخل مخزن در فشار ۱۰ بار و دمای ۱۰۴ کلوین را قبل از ورود به انژکتور خنک کرد. در یک مبدل گرما، نیتروژن مایع اشباع در دمای ۱۰۴ کلوین (فشار زیاد) با دادن گرما به مایع اشباع در دمای ۷۷ کلوین، تا حدود ۸۰ کلوین خنک و مادون‌سرد می‌شود (فرایند ۱ به ۲ در شکل ۵). اگر آزمایشات در محفظه‌ای با فشار بیشتر از فشار اشباع در دمای ۸۰ کلوین انجام شود، آنگاه در آن محفظه، نیتروژن، مایع مادون‌سرد خواهد بود. به عنوان مثال، اگر فشار محفظه آزمون ۲ بار باشد در این صورت سیال داخل انژکتور فرایند انتالپی ثابت را درحالت مایع مادون‌سرد طی می‌کند و خروجی انژکتور، مایع نیتروژن مادون سرد در فشار ۲ بار و دمای ۸۰ کلوین می‌شود که این دما ۳/۶ کلوین کم‌تر از دمای اشباع در فشار ۲ بار است. مایر[1] در سال ۱۹۹۸ و چهرودی[2] در سال ۱۹۹۹ از جمله افرادی بوند که از این شیوه برای مایع مادون‌سرد سازی جت نیتروژن خروجی از انژکتور استفاده کردند.



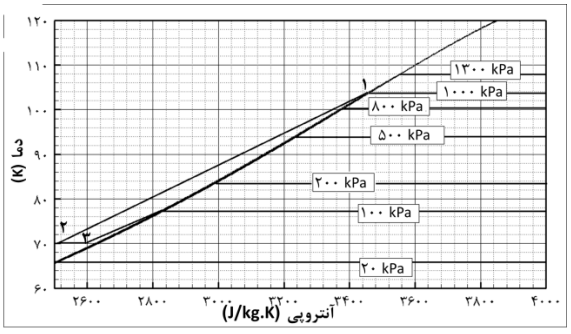
شکل ۵) مراحل مایع‌سازی خروجی انژکتور با سرد کردن نیتروژن مایع توسط نیتروژن مایع روی نمودار دما - انتروپی

۳-۳-۲- سرد کردن نیتروژن مایع با هلیوم مایع

دمای مایع اشباع نیتروژن و هلیوم در فشار ۱ بار به ترتیب ۷۷ کلوین و ٤/۲ کلوین است. در این روش باتوجه به این اختلاف دما با استفاده از یک مبدل می‌توان نیتروژن مایع اشباع داخل مخزن، در فشار ۱۰ بار و دمای ۱۰٤ کلوین را قبل از ورود به انژکتور خنک کرد. در این مبدل گرما، نیتروژن مایع اشباع در دمای ۱۰٤ کلوین (فشار زیاد) با گرما دادن به هلیوم مایع اشباع در دمای ٤/۲ کلوین، تا حدود ۷۰ کلوین و پایین‌تر خنک می‌شود (فرایند ۱ به ۲ در شکل ٦). اگر آزمایشات در محفظه‌ای با فشار بیشتر از فشار اشباع در دمای ۷۰ کلوین انجام شود، آنگاه نیتروژن در آن محفظه، یک مایع مادون‌سرد خواهد بود. به عنوان مثال، اگر فشار محفظه‌ی آزمون ۱ بار باشد در این صورت سیال داخل انژکتور فرایند انتالپی ثابت را درحالت مایع مادون‌سرد طی می‌کند و خروجی انژکتور، مایع نیتروژن مادون‌سرد در فشار ۱ بار و دمای ۷۰ کلوین می‌شود که این دما ۷ کلوین کم‌تر از دمای اشباع در فشار ۱ بار است. به دلیل در دسترس نبودن هلیوم با این شرایط در کشور، نمی‌توان از این روش استفاده کرد.

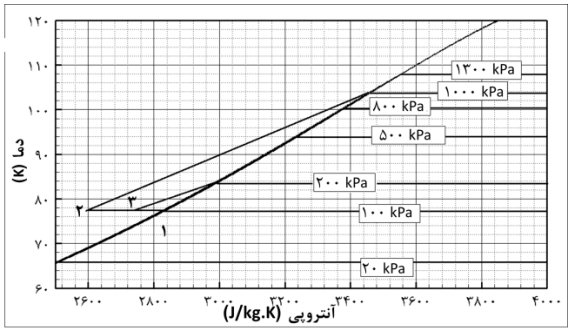
۳-۳-۳- مادون‌سرد کردن نیتروژن مایع از طریق نگهداری در فشار کم

اساس این روش به نگهداشتن مایع نیتروژن در دمای اشباع فشار اتمسفریک است. از این رو، با باز نگهداشتن شیر خروج گاز به مدت طولانی، نیتروژن داخل مخزن به صورت مایع اشباع در فشار ۱ بار



شکل ۶) مراحل مایع‌سازی خروجی انژکتور با سرد کردن نیتروژن مایع توسط هلیوم مایع روی نمودار دما - انتروپی

و دمای ۷۷ کلوین باقی می‌ماند. هنگام آزمایش، فشار مخزن تا ۱۰ بار بالا برده می‌شود تا نیتروژن داخل مخزن، مایع مادون سرد در فشار ۱۰ بار ولی در دمای ۷۷ کلوین شود (فرایند ۱ به ۲ در شکل ۷). فرایند خروج مایع از انژکتور یک فرایند انتالپی ثابت است که طی آن فشار مایع در خروج از انژکتور کاهش می‌یابد. حال اگر آزمایشات در محفظه‌ای با فشاری بیش از ۱ بار انجام شود (به عنوان مثال ۲ بار) در این صورت سیال داخل انژکتور فرایند ۲ به ۳ در شکل ۷ را طی می‌کند و خروجی انژکتور، مایع نیتروژن مادون سرد در فشار ۲ بار و دمای ۷۷ کلوین است. این دما ٦/٦ کلوین پایین‌تر از دمای اشباع در فشار ۲ بار است.

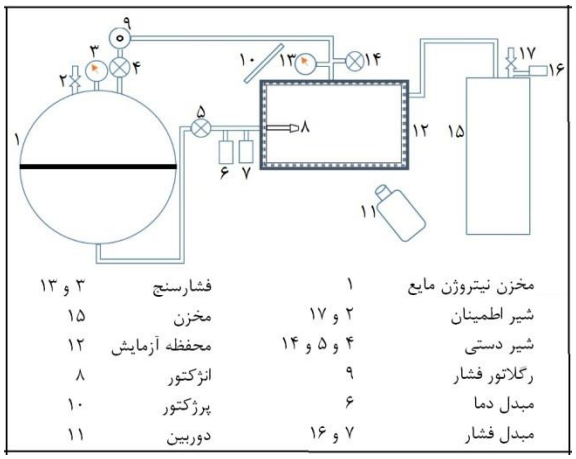


شکل ۷) مادون‌سرد کردن نیتروژن مایع از طریق نگهداری در فشار کم روی نمودار دما - انتروپی

۴- تجهیزات آزمایش‌ها

طرح‌واره‌ای از تجهیزات آزمایش در شکل ۸ نشان داده شده است. برای نگه‌داری نیتروژن مایع، از یک مخزن کروی زمستیک دوجداره استفاده شده است. مخازن مایعات زمستیک مجهز به تجهیزاتی هستند که می‌توان به راحتی فشار مخزن را افزایش یا کاهش داد. این تجهیزات عبارتند از شیر فشارگذاری، شیر تخلیه‌ی گاز، شیر اطمینان، شیر خروج مایع، و اواپراتور هوایی. با باز کردن شیر خروج مایع زمستیک، نیتروژن مایع در لوله‌های رابط جریان پیدا می‌کند و به انژکتور داخل محفظه‌ی آزمایش می‌رسد. با کمک سنسورهای دما و فشار در خط تغذیه‌ی نیتروژن مایع و کامپیوتر داده‌برداری، می‌توان دما و فشار نیتروژن مایع را اندازه‌گیری و ثبت کرد.

محفظه‌ی آزمایش یک مکعب مستطیل با ابعاد ۶۰×۲۰×۲۰ سانتی‌متر است. محفظه‌ی آزمایش مجهز به دو پنجره از جنس پلکسی گلاس به ابعاد ۳۰×۲۰ سانتی‌متر برای بررسی بصری، عکس‌برداری و نورپردازی، دریچه‌ی دسترسی، شیر تخلیه‌ی اضطراری فشار، شیر تخلیه‌ی مایعات، اتصالات فشارگذاری و نشان‌دهنده‌ی فشار است. به‌منظور کاهش انتقال حرارت، تمام لوله‌ها و اتصالات خط تغذیه‌ی نیتروژن مایع و محفظه‌ی آزمایش کاملا عایق شده‌اند.



شکل ۸) طرح‌واره تجهیزات آزمایش

فشارگذاری محفظه‌ی آزمایش توسط گاز نیتروژن موجود در مخزن زمستیک انجام می‌شود. به دلیل اینکه تبخیر نیتروژن مایع پاشیده شده در هنگام آزمایش، باعث افزایش فشار محفظه نشود، محفظه‌ی آزمایش به یک مخزن بزرگ ۳۰۰ لیتری مجهز به شیر اطمینان و سنسور فشار، وصل شده است.

یک منبع نور به صورت پس‌زمینه، به همراه یک دوربین عکس‌برداری سریع PCO hs1200 برای ثبت تصاویر استفاده شده است. زمان نورگیری دوربین به منظور ثبت لحظه‌ای تصاویر ۵ میکروثانیه تنظیم شده است.

در این آزمایش از یک انژکتور سوزنی فلزی با قطر داخلی ۰/۹ میلی‌متر و طول ۴ سانتی‌متر استفاده گردیده است. از آن‌جایی که شرایط جریان قبل از برخورد مثل آرام یا آشفته بودن، اثرات مهمی روی اتمیزاسیون دارد[14]، سطح داخلی و خروجی این انژکتور کاملا صیقلی شده است تا جای ممکن زبری سطح باعث به‌وجود آمدن اغتشاشات روی جت نشود. نسبت طول به قطر بالا (۴۴)، برای این انژکتورها باعث می‌شود جریان خروجی از این انژکتورها، دارای توسعه‌یافتگی باشد. انژکتور توسط یک سازه‌ی نگهدارنده در داخل محفظه‌ی آزمایش نگهداری می‌شود.

برای دست‌یابی به جت‌هایی با سرعت دلخواه، عملکرد انژکتورها توسط جریان آب و متانول بررسی شده است. سرعت خروجی از انژکتور باتوجه به دبی‌های به‌دست آمده در زمان مشخص، در هر فشار مخزن محاسبه می‌شود. جهت محاسبه‌ی سرعت واقعی جت‌ها از روابط زیر استفاده می‌شود.

$$Q = \frac{V}{\Delta t} \quad (۱)$$

$$u = \frac{Q}{A} \quad (۲)$$

که در آن V حجم سیال اندازه‌گیری شده در بازه زمانی Δt، Q دبی جریان، A مساحت سطح خروجی انژکتور و u سرعت واقعی خروجی از انژکتور است. برای افزایش اطمینان، در هر فشار، ۳ بار دبی‌سنجی و سرعت متوسط محاسبه می‌شود. دقت وسایل اندازه‌گیری زمان و حجم (کرنومتر و استوانه‌ی مدرج ۱۰۰mLit)، به

ترتیب ۰/۵ s و ۱ mLit است. مدت زمان دبی‌گیری ۲۰s و حجم متوسط اندازه‌گیری شده ۲۰۰ mLit درنظر گرفته می‌شود. در نتیجه میزان خطای مربوط به اندازه‌گیری زمان ۲/۵% و خطای مربوط به اندازه‌گیری حجم، ۰/۵% و در مجموع ۳% خطا در محاسبه‌ی سرعت وجود دارد. نتایج محاسبه‌ی خطا نشان می‌دهد خطای مربوط به اندازه‌گیری حجم، دارای سهم کمتری از خطای کل است. خوانش فشار سیال توسط یک مبدل فشار با عدم دقت کمتر از ۰/۱% انجام شده است.

ضریب تخلیه‌ی یک انژکتور ساده را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد.

$$C_d = \frac{u}{\sqrt{2(p_1-p_2)/\rho}} \quad (۳)$$

که در آن p1-p2 اختلاف فشار قبل و بعد از انژکتور، ρ چگالی سیال و Cd ضریب تخلیه انژکتور می‌باشد. باتوجه به اینکه نیتروژن مایع در شرایط استاندارد (فشار ۱ بار و دمای ۲۹۸ کلوین) به حالت گازی در می‌آید روش دبی‌سنجی برای اندازه‌گیری سرعت جت نیتروژن امکان‌پذیر نیست. برای مشخص کردن سرعت جت نیتروژن مایع بر حسب اختلاف فشار انژکتور، فرض می‌شود که ضریب تخلیه‌ی انژکتور برای سیالات مختلف تغییر نکند. دراین‌صورت با استفاده از رابطه ضریب تخلیه و معلوم بودن مقدار اختلاف فشار، ضریب تخلیه‌ی انژکتور و چگالی نیتروژن مایع اشباع در نقطه‌ی جوش نرمال (۸۰۸/۹ کیلوگرم بر مترمکعب) می‌توان سرعت جت نیتروژن مایع را بر حسب اختلاف فشار انژکتور محاسبه کرد.

در شکست جت‌ها، اعداد بدون بعد رینولدز و وبر نقش مهمی دارند. این اعداد بر طبق روابط زیر محاسبه شده‌اند.

$$Re = \frac{\rho_{uD}}{\mu} \quad (۴)$$

$$We = \frac{\rho_{u^2D}}{\sigma} \quad (۵)$$

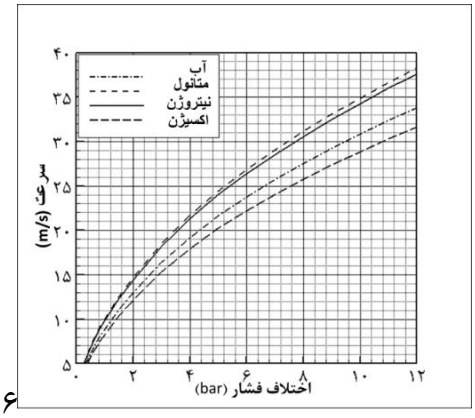
که در این روابط Re عدد رینولدز، We عدد وبر، ρ چگالی سیال، μ لزجت سیال، σ کشش سطحی سیال، D قطر انژکتور و u سرعت خروجی انژکتور است.

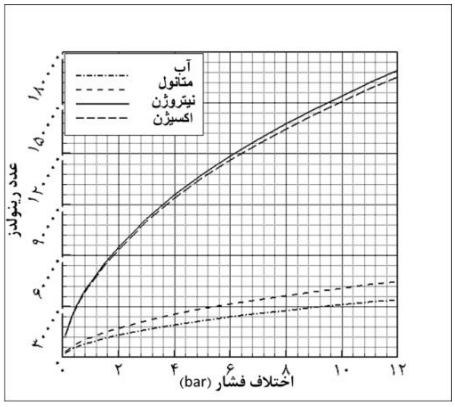
نمودار سرعت جت خروجی، عدد رینولدز، عدد وبر و ضریب تخلیه‌ی انژکتور برحسب اختلاف فشار انژکتور برای آب، متانول، نیتروژن مایع، و اکسیژن مایع در شکل‌های ۹ تا ۱۲ نشان داده شده است. در عمل، برای هر آزمایش، فقط اختلاف فشار دو سر انژکتور سنجیده می‌شود. با استفاده از منحنی شکل ۹ این اختلاف فشار به سرعت جت خروجی تبدیل می‌شود. در محاسبه عدد وبر، کشش سطحی و چگالی برای آب و اتانول در شرایط متعارفی و برای اکسیژن مایع و نیتروژن مایع نیز در دمای اشباع اتمسفریک به کار رفته است. برای محاسبه عدد رینولدز نیز لزجت آب و اتانول در شرایط متعارفی و لزجت اکسیژن مایع و نیتروژن مایع نیز در دمای اشباع اتمسفریک به کار رفته است.

عدد رینولدز نشان دهنده‌ی نسبت نیروی اینرسی به نیروی لزجت است. از آنجایی که رژیم (آرام یا آشفته بودن) یک جریان وابسته به تعامل این نیروها است، با استفاده از عدد رینولدز می‌توان رژیم جریان‌هایی مانند جریان درون لوله‌ها یا جریان روی سطوح تخت را تعیین کرد. اما در جت، علاوه بر دو نیروی اینرسی و لزجت، نیروی کشش سطحی و متعاقب آن عدد وبر نیز حضور دارد. یک جت مایع در تقابل با پیرامون گازی خود است. از این رو محیط نیز در آشفته‌سازی جت‌ها نقش بازی‌خواهد کرد. به این عوامل بایستی نقش زبری سطح داخلی مسیر جریان و کیفیت لبه خروج جت و همچنین دیگر نقش‌آفرینان بالادست جت را افزود. با این وجود شاید یک معیار برای مشخصه‌سازی‌های آینده، ضریب تخلیه جت باشد. در منحنی شکل ۹ مشخص است که حساسیت ضریب تخلیه به اختلاف فشار انژکتور، در مقادیر کم اختلاف فشار زیاد است. برای اختلاف فشار بیشتر از ۵ بار این حساسیت کم می‌شود.

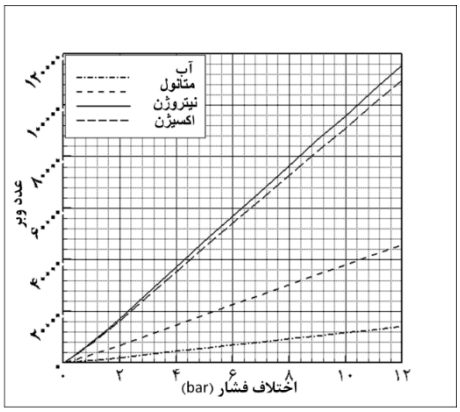
۵- نتایج و بحث

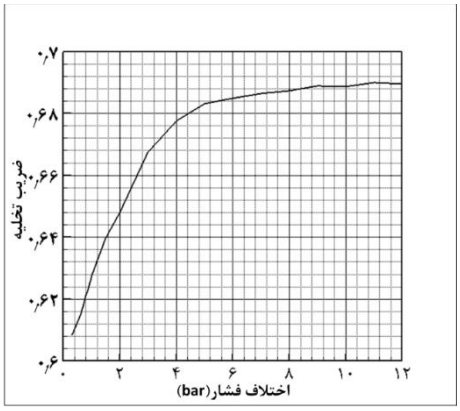
یکی از روش‌های ساده‌ی بدست آوردن جت نیتروژن مایع کامل، مادون‌سرد کردن نیتروژن مایع از طریق نگهداری در فشار کم است.





شکل ۹) نمودار سرعت جت خروجی برحسب اختلاف فشار انژکتور برای آب، متانول، نیتروژن مایع و اکسیژن مایع **شکل ۱۰)** نمودار عدد رینولدز جت خروجی برحسب اختلاف فشار انژکتور برای آب، متانول، نیتروژن مایع و اکسیژن مایع



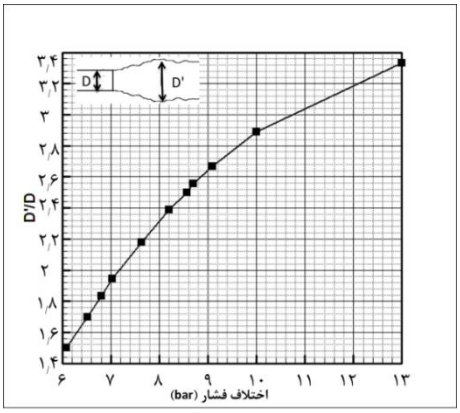


شکل ۱۱) نمودار عدد وبر جت خروجی برحسب اختلاف فشار انژکتور برای آب،**شکل ۱۲)** ضریب تخلیه انژکتور بر حسب اختلاف فشار انژکتور متانول، نیتروژن مایع و اکسیژن مایع

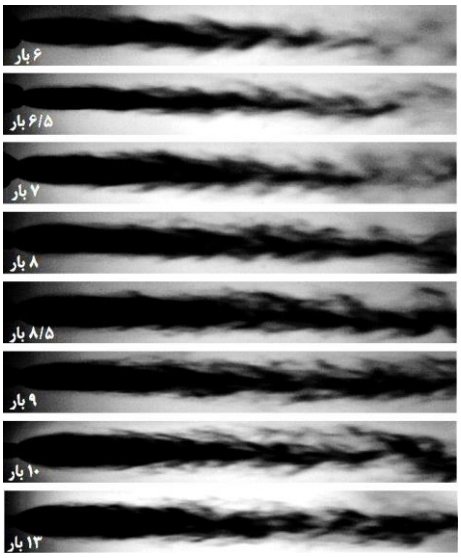
با توجه به اینکه این روش نیاز به تجهیزات خاص سردسازی و مبدل گرما ندارد، استفاده از این روش به سهولت امکان‌پذیر است. در این بخش، ابتدا رفتار جت نیتروژن مایع خروجی از یک انژکتور سوزنی در شرایط متعارفی بررسی می‌شود. سپس با استفاده از روش مادون‌سرد کردن نیتروژن مایع از طریق نگهداری در فشار کم که جت نیتروژن مایع خروجی از انژکتور به صورت مایع مادون‌سرد در می‌آید، در شرایط محفظه‌ی آزمایش با فشار ۲ بار و دمای ۲۹۸ کلوین، و محفظه‌ی آزمایش پیش‌سرد شده تا دمای ۷۷ کلوین با فشار ۲ بار مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در هر مرحله حداقل ۳ بار آزمایشات تکرار می‌شود تا از قطعیت نتایج اطمینان حاصل شود. در استخراج ابعاد جت (طول و قطر مقاطع مختلف) از پردازش تصاویر استفاده شده است. برای تعیین دقیق ابعاد، از یک طول مرجع که مقدار آن از قبل معلوم بوده استفاده شده است. از این رو، ضریب تبدیل پیکسل به طول، با دقت کمتر از ۰/۰۲ پیکسل بر میلی‌متر سنجیده شده است.

۵-۱- جت نیتروژن مایع در محفظه با شرایط متعارفی

برای بررسی جت نیتروژن مایع در شرایط متعارفی، جت خروجی از انژکتور در محیط آزمایشگاه با شرایط متعارفی (فشار ۱ بار و دما ۲۹۸ کلوین) تخلیه می‌گردد. این جت در این شرایط یک جت دوفاز است که علاوه بر پدیده‌های سیالاتی، پدیده‌های انتقال حرارت و ترمودینامیک نیز به شدت بر رفتار آن تاثیر می‌گذارد. در این بررسی فشار بالادست از ۵/۵ بار تا ۹/۵ بار تغییر داده شد. همچنین لوله‌های رابط مخزن نیتروژن مایع و انژکتور به طور کامل عایق نشده‌اند. گرمای منتقل شده به نیتروژن مایع داخل خطوط تغذیه باعث تبخیر جزئی می‌شود. بنابراین علاوه بر پدیده‌های ترمودینامیکی، انتقال گرما هم باعث تشدید دوفاز شدن جت می‌شود. در اختلاف فشارهای کم، دبی خروجی از انژکتور کم و زمان توقف مایع در لوله‌های رابط زیاد است؛ بنابراین مایع داخل لوله‌ها زمان بیشتری برای تبادل گرما با دیواره لوله دارد و حجم مایع در مخلوط کاهش می‌یابد. اختلاف فشار دوسر انژکتور باعث می‌شود جت دوفاز هنگام خروج از انژکتور برای تطبیق خود با فشار محیط، منبسط شود و قطر جت از قطر انژکتور بیشتر شود. شکل ۱۳ نسبت حداکثر قطر جت دوفاز نیتروژن به قطر داخلی انژکتور را بر حسب اختلاف فشار انژکتور نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود هرچه اختلاف فشار انژکتور بیشتر شود میزان انبساط جت بیشتر می‌شود. به طوری که دراختلاف فشار ۶ بار قطر جت ۱/۵ برابر قطر انژکتور است اما دراختلاف فشار ۱۳ بار قطر جت ۳/۳ برابر قطر انژکتور است. برای اختلاف فشارهای کمتر از آن چه که در این شکل نشان داده شده، جت اغلب به صورت بخار و به همراه قطرات به طور گسیخته وارد محیط می‌شود. شکل ۱۴ تصاویری از چنین جت‌هایی که تحت اختلاف فشار مختلف وارد محفظه آزمایش شده‌اند را نشان می‌دهد. تبخیر جت از محیط پیرامونی جت صورت می‌گیرد و باعث می‌شود در پایین‌دست، قطر هسته‌ی تاریک جت (که حجم مایع در آن زیادتر است) کم شود و شکل برگ نوک‌تیز (مانند برگ اوکالیپتوس) بگیرد. همچنین در پایین‌دست، لایه‌ها و لیگامنت‌های شبه انگشتی شکل می‌گیرد. این لایه‌ها و لیگامنت‌ها که به شکل دندانه‌اره‌ای روی سطح جت ظاهر و به سمت بالادست جریان شکل گرفته‌اند، سطح جت را افزایش و تبخیر را تسهیل می‌کنند. این ساختار ناشی از درگ محیط ساکن بر جت می‌باشد. در پایین‌دست، امواج سینوسی جت



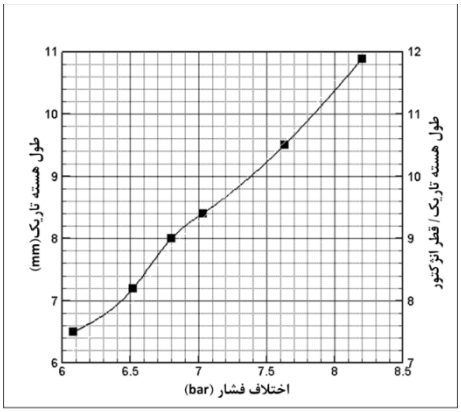
شکل ۱۳) نمودار حداکثر قطر جت دوفاز نیتروژن در خروجی بر حسب اختلاف فشار انژکتور



شکل ۱۴) جت نیتروژن مایع دوفاز در شرایط متعارفی (فشار ۱ بار و دما ۳۰۰کلوین) در فشار های مختلف

را به خوبی می‌توان مشاهده کرد. در نهایت جت در اثر انتقال گرما تبخیر و محو می‌شود. تصاویر شکل ۱۴ نشان می‌دهند که با افزایش اختلاف فشار، هسته مرکزی جت، قبل از تبخیر، نفوذ بیشتری دارد. شکل ۱۵ طول هسته تاریک مرکزی جت را بر حسب اختلاف فشار انژکتور نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نمودار دیده می‌شود هرچه اختلاف فشار انژکتور بیشتر شود طول هسته تاریک جت بیشتر می‌شود و در اختلاف فشار ۸/۳ بار طول هسته تاریک به حدود ۱۱ میلی‌متر می‌رسد.

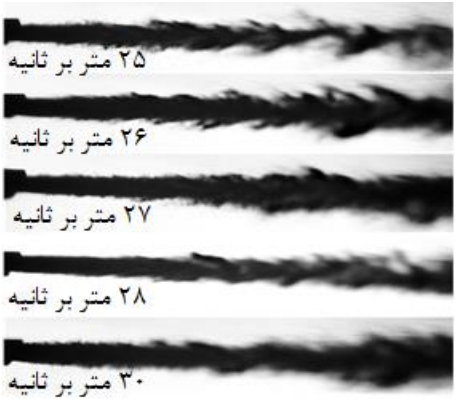
مقایسه این جت‌ها (جت‌های مایع اشباع یا نزدیک اشباع) با جت مایعات متداول (مادون سرد) نشان می‌دهد که بدنه جت از استحکام کافی در مقابل نیروهای ایرودینامیکی برخوردار نبوده و توسط این نیروها مضمحل می‌شود. لازم با ذکر است تغییر دما و همچنین تغییر فاز جت هنگام عبور از گذرگاه‌ها باعث می‌شود تا نتوان اطلاع دقیقی از چگالی و لزجت آن داشت. از این رو نمی‌توان درباره سرعت جت همچنین عدد رینولدز جت خروجی قضاوت دقیقی داشت.



شکل ۱۵) نمودار طول هسته تاریک جت نیتروژن مایع بر حسب اختلاف فشار انژکتور

۵-۲- جت نیتروژن مایع مادون‌سرد در محفظه‌ی با فشار ۲ بار و دمای ۲۹۸ کلوین

در این مرحله از آزمایش با استفاده از روش مادون‌سرد کردن نیتروژن مایع از طریق نگهداری در فشار ۱ بار، جت نیتروژن مایع خروجی از انژکتور به صورت مایع مادون‌سرد در می‌آید و رفتار آن در محیطی با فشار ۲ بار و دمای ۲۹۸ کلوین، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این محیط خروجی انژکتور، نیتروژن مایع مادون‌سرد در فشار ۲ بار و دمای ۷۷ کلوین است. برای بررسی مدل‌های شکست، سرعت جت از ۲۳ متر بر ثانیه تا ۳۴ متر بر ثانیه و عدد رینولدز از ۹۲۰۰۰ تا ۱۳۶۰۰۰ تغییر داده شد. در محدوده‌ی سرعت مورد بررسی رژیم جت خروجی از انژکتور، با توجه به نتایج به دست آمده، آشفته است. انتقال گرما از محیط به جت مایع به دلیل بالا بودن دمای محیط قابل توجه است و روی رفتار جت تاثیر می‌گذارد. شکل ۱۶ تصاویری از جت‌های نیتروژن مایع با سرعت‌های مختلف در محفظه‌ی آزمایش با فشار ۲ بار و دمای ۲۹۸ کلوین را نشان می‌دهد. در هر کدام از تصاویر، با استفاده از نمودار شکل‌های ۹ تا ۱۱ می‌توان مشخصات جت (سرعت، عدد رینولدز و عدد وبر جت) را بر حسب اختلاف فشار انژکتور بدست آورد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، جت خروجی به صورت مایع مادون‌سرد در می‌آید. در این محدوده‌ی سرعت، نیروهای آیرودینامیکی روی سطح جت، بعد از خروجی انژکتور، ناپایداری‌های موجی را به‌وجود می‌آورد. در فاصله‌ی کمی بعد از خروجی انژکتور، نیروی برشی ناشی از سرعت نسبی جت و گاز محیط، لیگامنت‌های کوچکی روی سطح جت شکل می‌دهد که قطرات از آنها جدا می‌شود. این قطرات موازی سطح جت حرکت می‌کنند تا تبخیر گردند. مدل شکست بالادست جت نیتروژن مایع، مدل شکست ناشی از باد اولیه است که چهرودی در فشار مادون بحرانی محفظه‌ی آزمایش مشاهده کرد[3,4]. در پایین‌دست، جت در اثر تبخیر کمی منبسط می‌شود. همچنین در پایین‌دست، لایه‌ها و لیگامنت‌های شبه انگشتی شکل می‌گیرد. این لایه‌ها و لیگامنت‌ها که به شکل دندانه‌اره‌ای روی سطح جت ظاهر، و به سمت بالادست جریان شکل گرفته‌اند،



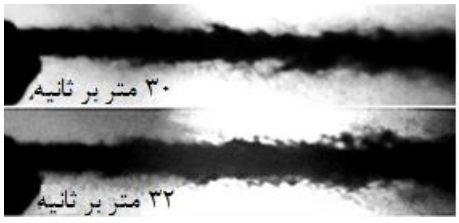
شکل ۱۶) اتمیزاسیون جت‌های نیتروژن مایع با سرعت‌های مختلف در محفظه‌ی آزمایش با فشار ۲ بار و دمای ۲۹۸ کلوین

سطح جت را افزایش و تبخیر را تسهیل می‌کنند. این تغییر فاز ناشی از دریافت گرمای محیط است. در پایین‌دست، امواج سینوسی جت را به خوبی می‌توان مشاهده کرد. درنهایت جت در اثر انتقال گرما تبخیر و محو می‌شود.

۵-۳- جت نیتروژن در محفظه‌ی آزمایش پیش سرد شده تا دمای ۷۷ کلوین و فشار ۲ بار

برای بررسی رفتار جت، سرعت جت از ۲۳ متر بر ثانیه تا ۳۴ متر بر ثانیه و عدد رینولدز از ۹۲۰۰۰ تا ۱۳۶۰۰۰ تغییر داده شد. جت خروجی از انژکتور با استفاده از روش مادون‌سرد کردن نیتروژن مایع از طریق نگهداری در فشار ۱ بار، به حالت مایع مادون‌سرد در فشار ۲ بار و دمای ۷۷ کلوین در می‌آید. به دلیل هم‌دما بودن محفظه‌ی آزمایش و جت، انتقال گرما به جت مایع ناچیز است و تنها نیروهای ایرودینامیکی بر رفتار جت حاکم است.

در محدوده‌ی سرعت مورد آزمایش، سطح جت کاملا مواج است. دامنه‌ی امواج سینوسی که ناشی از نیروهای ایرودینامیکی اعمال شده روی سطح جت است، رشد می‌کند. این امواج در نقطه‌ی عطف نازک شده و به لیگامنت‌ها و قطرات متلاشی می‌شود. هیومن این مدل شکست را مدل شکست ناشی از باد اولیه معرفی[14] و چهرودی در فشار مادون بحرانی محفظه‌ی آزمایش آن را مشاهده کرد[3,4]. همچنین لیگامنت‌های کوچکی روی سطح جت شکل می‌گیرند و قطرات از آنها جدا می‌شوند و موازی سطح جت حرکت می‌کنند. شکل ۱۷ آغاز اتمیزاسیون جت‌های نیتروژن مایع در محفظه‌ی آزمایش پیش‌سرد شده تا دمای ۷۷ کلوین و فشار ۲ بار با سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد. با گذشت زمان و با دریافت حتی مقادیر بسیار کم حرارت تمایل به تبخیر جت دیده می‌شود. به دلیل نزدیکی بسیار زیاد حالت مایع جت به مایع اشباع، انتظار می‌رود که شکست ایرودینامیکی جت منجر به تولید قطرات بسیار ریزی در حد رطوبت شود. این موضوع در ابرناکی تصاویر در پایین دست جت، عیان است.



ب

شکل ۱۷) اتمیزاسیون جت‌های نیتروژن مایع در محفظه‌ی آزمایش پیش‌سرد شده تا دمای ۷۷ کلوین و فشار ۲ بار با سرعت‌های مختلف

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ضمن مرور روش‌های مادون‌سرد کردن نیتروژن خروجی از انژکتور، به تشریح و پیاده‌سازی روش مادون‌سرد کردن نیتروژن مایع از طریق نگهداری در فشار کم پرداخته شده است. رفتار جت نیتروژن مایع خروجی از انژکتور سوزنی، در محفظه‌ی آزمایش با فشار بالاتر از فشار اشباع و در محیط آزمایشگاه با شرایط متعارفی مورد ارزیابی قرار گرفته است. سرعت جت نیتروژن مایع از ۱۲ متر بر ثانیه تا ۳۴ متر بر ثانیه و عدد از ۹۲۰۰۰ تا ۱۳۶۰۰۰ تغییر داده شد. با استفاده از تصویربرداری سریع از جت‌ها نتایج زیر بدست می‌آید.

۱- زمانی که جت نیتروژن مایع خروجی از انژکتور، در محیط آزمایشگاه با شرایط استاندارد تخلیه شود، پدیده‌های ترمودینامیکی و انتقال گرما سبب می‌شود جت خروجی دوفاز گردد. اختلاف فشار انژکتور باعث می‌شود جت دوفاز هنگام خروج از انژکتور برای تطبیق خود با فشار محیط، منبسط شود و قطر جت از قطر انژکتور بیشتر شود. هسته‌ی تاریک جت، شکل برگ نوک‌تیز (مانند برگ اوکالیپتوس) به خود می‌گیرد.

۲- با استفاده از روش مادون‌سرد کردن نیتروژن مایع از طریق نگهداری در فشار کم، جت نیتروژن مایع خروجی از انژکتور در محفظه‌ی آزمایش با فشار بالا به صورت مایع مادون‌سرد در می‌آید.

۳- در محدوده‌ی سرعت آزمایش، بعد از خروجی انژکتور، روی سطح جت نیتروژن مایع مادون‌سرد در محفظه‌ی آزمایش با دمای ۲۹۸ کلوین و فشار ۲ بار، ناپایداری‌های موجی و لیگامنت‌هایی روی سطح جت شکل می‌گیرد که قطرات از آنها جدا می‌شود. در پایین‌دست، در اثر تبخیر نیتروژن مایع، جت کمی منبسط می‌شود. همچنین در پایین‌دست، لایه‌ها و لیگامنت‌ها که به شکل دندانه‌اره‌ای روی سطح جت ظاهر، و به سمت بالادست جریان شکل گرفته‌اند، سطح جت را افزایش و تبخیر را تسهیل می‌کنند. در نهایت جت در اثر انتقال گرما، تبخیر و محو می‌شود.

۴- در محدوده‌ی سرعت آزمایش، مدل شکست جت نیتروژن مایع مادون‌سرد در محفظه‌ی آزمایش با دمای ۷۷ کلوین و فشار ۲ بار، مدل شکست ناشی از باد اولیه است. همچنین لیگامنت‌های ریزی روی سطح جت شکل می‌گیرند و قطرات از آنها جدا می‌شوند و موازی سطح جت جلو می‌آیند.

تشکر و قدردانی: بخشی از هزینه‌های آزمایش‌های گزارش شده در این مقاله، توسط شرکت پیشران زمهریر تامین شده است. نویسندگان بدین وسیله مراتب سپاس‌خود را اعلام می‌دارند.

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده و محتوای ادبی مقاله منتج از فعالیت علمی خود نویسندگان است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافعی با پایان نامه/رساله و طرح پژوهشی ندارد.

سهم نویسندگان: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع مالی: منابع مالی توسط نویسندگان تامین شده است.

منابع

1- Mayer WO, Schik AH, Vielle B, Chauveau C, Gokalp I, Talley DG, Woodward RD. Atomization and breakup of cryogenic propellants under high-pressure subcritical

and supercritical conditions. Journal of Propulsion and Power. 1998;14(5):835-42.
2- Chehroudi B, Talley D, Coy E. Initial growth rate and visual characteristics of a round jet into a sub-to supercritical environment of relevance to rocket, gas turbine, and diesel engines. In37th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 1999 (p. 206).
3- Chehroudi B, Cohn R, Talley D. Cryogenic shear layers: experiments and phenomenological modeling of the initial growth rate under subcritical and supercritical conditions. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2002;23(5):554-63.
4- Chehroudi B, Talley D, Coy E. Visual characteristics and initial growth rates of round cryogenic jets at subcritical and supercritical pressures. Physics of Fluids. 2002;14(2):850-61.
5- Tani H, Teramoto S, Okamoto K. High-speed observations of cryogenic single and coaxial jets under subcritical and transcritical conditions. Experiments in Fluids. 2015;56(4):1-3.
6- Luo M, Haidn OJ. Characterization of flashing phenomena with cryogenic fluid under vacuum conditions. Journal of propulsion and power. 2016;32(5):1253-63.
7- Li L, Xie M, Wei W, Jia M, Liu H. Numerical investigation on cryogenic liquid jet under transcritical and supercritical conditions. Cryogenics. 2018;89:16-28.
8- Lyras K, Dembele S, Schmidt DP, Wen JX. Numerical simulation of subcooled and superheated jets under thermodynamic non-equilibrium. International Journal of Multiphase Flow. 2018;102:16-28.
9- Wu X, Huang Z, Dai X, McLennan J, Zhang S, Li R. Detached eddy simulation of the flow field and heat transfer in cryogenic nitrogen jet. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020;150:119275.
10- Ma J, Liu H, Liu L, Xie M. Simulation study on the cryogenic liquid nitrogen jets: Effects of equations of state and turbulence models. Cryogenics. 2021;117:103330.
11- Poulikakos D. Determination of Structure Temperature and Concentration in the Near Injector Region of Impinging Jets Using Holographic Techniques. ILLINOIS UNIV AT URBANA MECHANICAL ENGINEERING LAB; 1996.
12- Lemmon EW, Bell IH, Huber ML, McLinden MO. NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, National Institute of Standards and Technology. Standard Reference Data Program, Gaithersburg. 2018.
13- Dombrowski ND, Hooper PC. A study of the sprays formed by impinging jets in laminar and turbulent flow. Journal of Fluid Mechanics. 1964;18(3):392-400.
14- Huimin, L. Science and Engineering of Droplets, Noyes Publication Park Ridge, New Jersey, U.S.A. 1981.