



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

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Moosavian D.<sup>1</sup>

Mostofizadeh A.<sup>1\*</sup>

Ghassemi H.<sup>2</sup>

### 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.

<sup>1</sup> Department of Aerospace, Faculty of Aerospace Engineering, Malek Ashtar industrial University, Shahinshahr, Iran.

<sup>2</sup> 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: February 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.

## 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 و صنعت 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 مادون سرد باشد. اما در شرایط اتمسفر متعارفی جت خروجی از انژکتور به صورت دوفاز در می‌آید. در این پژوهش سعی گردید تا روش‌های مادون سرد 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 مادون سرد 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 ۹۰۰۰ تا ۲۶۰۰۰ 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 مادون سرد، منجر به تولید قطرات بسیار ریزی می‌شود که منطبق بر انتظار از چنین مایعی است.

**کلیدواژه‌ها:** جت مایع، مایع زمستیک، مایع مادون سرد، 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 زمستیک (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. انواع مختلفی از اتمایزهای 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<sup>[1]</sup>. 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<sup>[2]</sup>. 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 می‌کند. 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 نمی‌شکنند<sup>[3]</sup>. 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<sup>[4]</sup>. 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<sup>[5]</sup>. 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

مایع از طریق نگهداری در فشار کم پرداخته می شود. اکثر محققین از روش های سردسازی برای مادون سرد کردن نیتروژن مایع استفاده کرده اند و پیاده سازی این روش که نیاز به تجهیزات خاص سردسازی و مبدل گرما ندارد و به سهولت امکان پذیر است از جمله نوآوری های انجام شده است. مقاله حاضر دستاوردهای تجربی این پژوهش را منعکس می کند.

## ۲- خواص ترموفیزیکی نیتروژن مایع

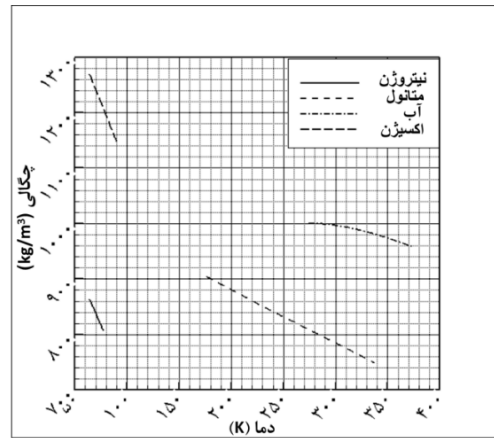
خواص ترموفیزیکی سیالات در فروپاشی و اتمیزاسیون نقش پررنگی دارند. فروپاشی یک جت ناشی از تاثیر نیروهای ایرودینامیکی و نیروهای اینرسی بر جت می باشد. در هریک از نیروها (که در قالب اعداد بی بعد رینولدز و وبر بررسی می شوند)، خواصی از سیال مانند چگالی، لزجت، و کشش سطحی وجود دارند. مایع با کشش سطحی کمتر، راحت تر تجزیه می شود. از طرف دیگر اثر کشش سطحی روی اندازه ی قطرات، حتی از طریق مقایسه ی ذرات در عکس های گرفته شده آشکار است. لزجت مایع نقش مهمی در بسیاری از جنبه های فروپاشی جت بازی می کند. افزایش لزجت، عدد رینولدز را کم می کند و همچنین از پیشروی هر ناپایداری طبیعی جلوگیری می کند. این ناپایداری ها، عامل اصلی فروپاشی جت مایع است. بنابراین اثر افزایش لزجت، به تأخیر انداختن شکست و افزایش اندازه ی قطرات است [11]. از همین رو، ابتدا به بررسی این خواص پرداخته می شود. این خواص با استفاده از نرم افزار رف پراپ [12] که توسط سازمان استاندارد و تکنولوژی آمریکا توسعه یافته، محاسبه شده و به صورت تابعی از دما در فشار ۱ بار در شکل های ۱ تا ۳ نشان داده شده اند. از آنجا که پژوهش حاضر در جهت توسعه ی موتورهای مایع با سوختی بر پایه متانول و اکسیدکننده اکسیژن مایع انجام شده است و همچنین برای مقایسه ی خواص ترموفیزیکی نیتروژن مایع با سیالات دیگر، خواص ترموفیزیکی اکسیژن مایع، آب و متانول هم در شکل های ۱ تا ۳ نشان داده شده است. همان طور که از این نمودارها مشخص است؛ چگالی اکسیژن مایع از دیگر سیالات بررسی شده به مراتب بیشتر است. همچنین لزجت نیتروژن مایع در نقطه ی جوش نرمالش (در فشار ۱ بار و دمای ۷۷ کلوین) به مراتب پایین تر از دیگر سیالات بررسی شده است. همان گونه که در این نمودار مشهود است، کشش سطحی آب بیشتر از متانول و کشش سطحی متانول بیشتر از نیتروژن مایع است. یکی از مهم ترین تفاوت های بین نیتروژن مایع و آب، گرمای تبخیر خیلی کم تر نیتروژن مایع نسبت به آب است. در نقطه ی جوش نرمال، گرمای تبخیر نیتروژن مایع ۱۹۸/۳ کیلوژول بر کیلوگرم است در حالی که 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 می رود اتمیزاسیون جت آب با اتمیزاسیون جت

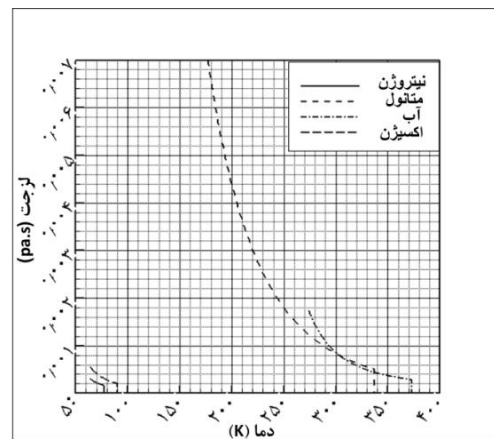
تکنیک سایه نگاری و اندازه گیری دما، ویژگی های تبخیر ناگهانی (زاویه اسپری، رفتار حرارتی و انجماد اسپری) را بررسی و دریافتند که مافوق گرم شدن اسپری باعث افزایش زاویه اسپری می شود [6]. در بررسی جت های مایعات زمستیک تعدادی از محققان از روش های عددی کمک گرفتند. از جمله ی این افراد می توان به لی و همکاران 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 ضخیم تر است. در شرایط فوق بحرانی، لایه اختلاط دارای عرض بزرگتر نسبت به همتای گذر بحرانی خود است [7]. لیراس و همکاران در سال ۲۰۱۸ جت های مادون سرد و مافوق گرم را در شرایط نامتعادل ترمودینامیکی با استفاده از روش های دینامیک سیالات محاسباتی شبیه سازی کردند. آنها همچنین مطالعاتی برای بررسی ویژگی های جریان و میزان بخار تولید شده در جت مایع زمستیک انجام دادند، که نشان می داد می توان از روش عددی آنها برای بررسی فرایند کاهش ناگهانی فشار در جت مایع زمستیک استفاده کرد [8]. زیانگونگ 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 جت های نیتروژن مایع و فوق بحرانی افزایش می یابد [9]. ما و همکاران در سال ۲۰۲۱ جت های نیتروژن مایع را با استفاده از معادله حالت سیال واقعی در شرایط فوق بحرانی/ گذر بحرانی شبیه سازی کردند. نتایج بررسی آنها نشان می داد که در حل عددی، انتخاب معادله حالت سیال واقعی نسبت به مدل آشفستگی مهم تر است. بنابراین برای مطالعه جت نیتروژن مایع با استفاده از معادله حالت سیال واقعی می توان با انتخاب یک مدل آشفستگی ساده تر در زمان محاسبه صرفه جویی کرد [10].

پژوهش حاضر در جهت توسعه ی موتورهای راکت مایع بر پایه سوخت متانول و اکسیدکننده ی اکسیژن مایع انجام شده است. از آنجایی که نیتروژن مایع هم از نظر هزینه ی تولید و هم از نظر ایمنی جایگزین آزمایشگاهی مناسبی برای اکسیژن مایع می باشد در این بررسی از نیتروژن مایع کمک گرفته می شود. 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 به گونه ای است که مایع در بدو ورود به محیط، تغییر فاز می دهد 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 به وجود آورد که در آن، نیتروژن به صورت مایع مادون سرد وارد محیط شود. برای دستیابی به این شرایط، پژوهشی انجام شده است که طی آن، ضمن مرور روش های به دست آوردن چنین مایعی، به تشریح و پیاده سازی روش مادون سرد کردن نیتروژن

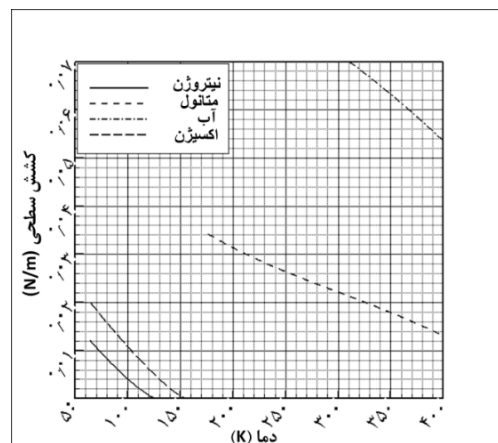
نیترژن مایع متفاوت باشد و پدیده‌های ترمودینامیکی و انتقال حرارتی در اتمیزاسیون جت نیترژن مایع اهمیت زیادی داشته باشد.



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



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



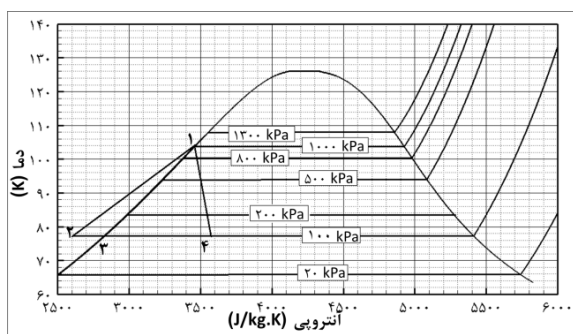
شکل ۳) نمودار کشش سطحی برحسب دما در نقطه اشباع در فشار ۱ بار، برای آب، متانول، نیترژن مایع و اکسیژن مایع

### ۳- تئوری آزمایش (بیان مسئله)

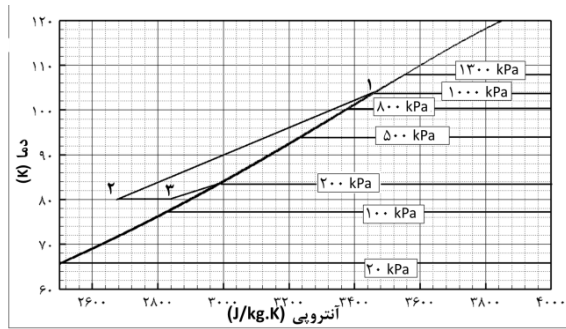
مایع زمستیک ذخیره شده در مخزن، هنگام ورود به محیط اطراف، با انبساط مواجه می‌شود. از این رو بعد از خروج از مجاری خروجی (انژکتور)، ممکن است به صورت جزئی یا کاملاً تبخیر شود. این مسئله برای جت مایع زمستیک نیز وجود دارد. به همین دلیل تامین یک جت مایع زمستیک با دشواری همراه است. یک راه غلبه بر این مسئله، مادون سرد 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 نیترژن مایع، مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس چند روش پیشنهادی مادون سرد سازی مایع در خروجی انژکتور ارزیابی می‌شود.

#### ۳-۱- حالت نیترژن مایع در مخزن

مخزن نگه‌داری نیترژن 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 نیترژن حاصل از خنک‌کاری، از خروجی گاز خارج شده و با پر شدن مخزن، مایع اشباع نیترژن در فشار ۱ بار و دمای ۷۷ کلوین (نقطه ۱ در شکل ۴) داخل مخزن باقی می‌ماند. به دلیل بسته بودن شیرهای ورودی و خروجی مخزن و انتقال کم گرما، مقداری از مایع تبخیر شده و باعث افزایش فشار مخزن تا نقطه‌ی دلخواه (مثلاً ۱۰ بار) می‌شود (حالت ۱ به ۲ در شکل ۴). این فرایند به آرامی و روی خط مایع اشباع مخزن، نیترژن مایع اشباع در فشار ۱۰ بار و دمای ۱۰۴ کلوین است. حال اگر بعد از پر شدن، مخزن توسط بخار نیترژن 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، نیترژن 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 نیترژن



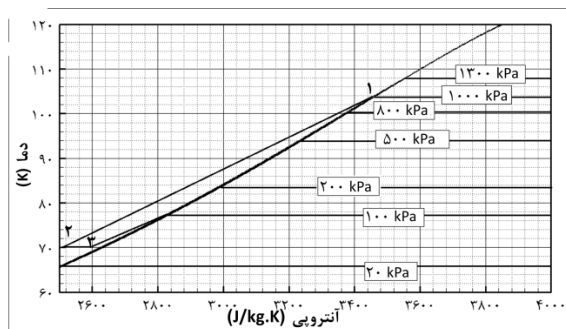
شکل ۵) مراحل مایع سازی خروجی انژکتور با سرد کردن نیتروژن مایع توسط نیتروژن مایع روی نمودار دما - انتروپی

### 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 ۴/۲ کلوین است. در این روش باتوجه به این اختلاف دما با استفاده از یک مبدل می توان نیتروژن مایع اشباع داخل مخزن، در فشار ۱۰ بار و دمای ۱۰۴ کلوین را قبل از ورود به انژکتور خنک کرد. در این مبدل گرما، نیتروژن مایع اشباع در دمای ۱۰۴ کلوین (فشار زیاد) با گرما دادن به هلیوم مایع اشباع در دمای ۴/۲ کلوین، تا حدود ۷۰ کلوین و پایین تر خنک می شود (فرایند ۱ به ۲ در شکل ۶). اگر آزمایشات در محفظه ای با فشار بیشتر از فشار اشباع در دمای ۷۰ کلوین انجام شود، آنگاه نیتروژن در آن محفظه، یک مایع مادون سرد خواهد بود. به عنوان مثال، اگر فشار محفظه ای آزمون ۱ بار باشد در این صورت سیال داخل انژکتور فرایند انتالپی ثابت را در حالت مایع مادون سرد طی می کند و خروجی انژکتور، مایع نیتروژن مادون سرد در فشار ۱ بار و دمای ۷۰ کلوین می شود 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، نمی توان از این روش استفاده کرد.

### ۳-۳-۳- مادون سرد 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 مایع سازی خروجی انژکتور با سرد کردن نیتروژن مایع توسط هلیوم مایع روی نمودار دما - انتروپی

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

### ۳-۲- حالت نیتروژن مایع در خروجی انژکتور

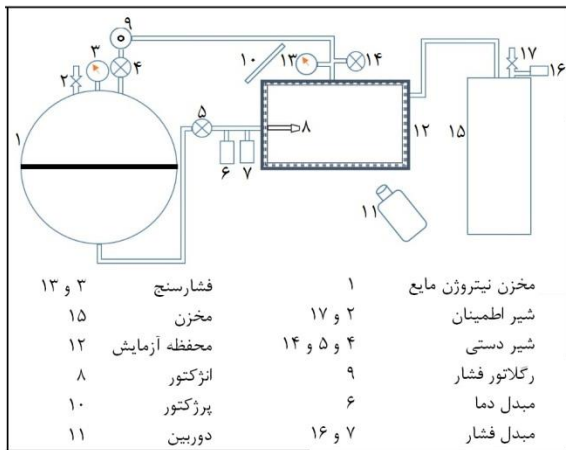
سیال داخل مخزن، نیتروژن مایع اشباع در فشار ۱۰ بار و دمای ۱۰۴ کلوین می باشد. فرایند ترمودینامیکی عبور مایع از انژکتور و خروج آن را می توان یک فرایند انتالپی ثابت انگاشت. زمانی که انژکتور به مخزن نیتروژن مایع اشباع در فشار ۱۰ بار وصل می شود و فشار پایین دست انژکتور ۱ بار است، مایع فرایند انتالپی ثابت ۲ به ۴ در شکل ۴ را در انژکتور طی می کند و خروجی انژکتور دو فاز خواهد بود. اگر فشار پایین دست انژکتور افزایش یابد، باز هم خروجی انژکتور در ناحیه ی دوفاز قرار دارد؛ اما حجم مایع در مخلوط افزایش می یابد. بنابراین با افزایش فشار پایین دست انژکتور، نمی توان خروجی انژکتور را مایع مادون سرد یا مایع اشباع کرد.

### ۳-۳- روش های مایع مادون سرد سازی خروجی انژکتور

برای آن که در آزمایشات، مایع مادون سرد وجود داشته باشد لازم است تا دمای مایع، کم تر از دمای اشباع در فشار محیط باشد. به طور طبیعی انتظار می رود 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 مادون سرد سازی مایع زمستیک، بی نیاز از تجهیزات متداول سردسازی اشاره می شود. در دو روش نخست به مبادله گر گرما نیاز است ولی روش سوم که در مطالعه ی 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 می توان 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 مادون سرد می شود (فرایند ۱ به ۲ در شکل ۵). اگر آزمایشات در محفظه ای با فشار بیشتر از فشار اشباع در دمای ۸۰ کلوین انجام شود، آنگاه در آن محفظه، نیتروژن، مایع مادون سرد خواهد بود. به عنوان مثال، اگر فشار محفظه آزمون ۲ بار باشد در این صورت سیال داخل انژکتور فرایند انتالپی ثابت را در حالت مایع مادون سرد طی می کند و خروجی انژکتور، مایع نیتروژن مادون سرد در فشار ۲ بار و دمای ۸۰ کلوین می شود 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 بودند که از این شیوه برای مایع مادون سرد سازی جت نیتروژن خروجی از انژکتور استفاده کردند.



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 کاملاً صیقلی شده است تا جای ممکن زبری سطح باعث به وجود 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.

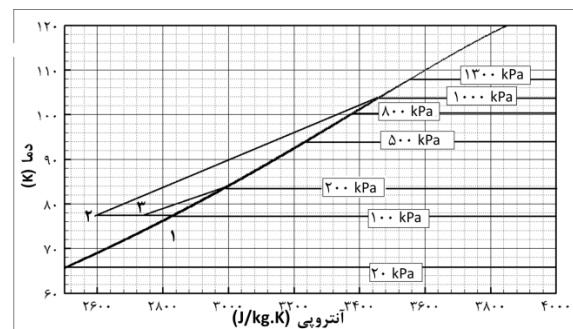
برای دستیابی به جت‌هایی با سرعت دلخواه، عملکرد انژکتورها توسط جریان آب و متانول بررسی شده است. سرعت خروجی از انژکتور با توجه به دبی‌های به دست آمده در زمان مشخص، در هر فشار مخزن محاسبه می‌شود. جهت محاسبه‌ی سرعت واقعی جت‌ها از روابط زیر استفاده می‌شود.

$$Q = \frac{V}{\Delta t} \quad (1)$$

$$u = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

که در آن  $V$  حجم سیال اندازه‌گیری شده در بازه زمانی  $\Delta t$ ،  $Q$  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 ۱۰۰ml)، به

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 ۶/۶ کلوین پایین‌تر از دمای اشباع در فشار ۲ بار است.



شکل ۷ مادون سرد 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.

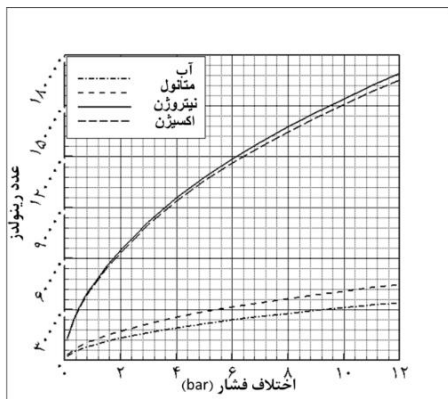
مخفظه‌ی آزمایش یک مکعب مستطیل با ابعاد ۲۰×۲۰×۶۰ سانتی‌متر است. محفظه‌ی آزمایش مجهز به دو پنجره از جنس پلکسی گلاس به ابعاد ۲۰×۳۰ سانتی‌متر برای بررسی بصری، عکس‌برداری و نورپردازی، دریچه‌ی دسترسی، شیر تخلیه‌ی اضطراری فشار، شیر تخلیه‌ی مایعات، اتصالات فشارگذاری و نشان‌دهنده‌ی فشار است. به منظور کاهش انتقال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

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 آشسته 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 بازی خواهد 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، مادون سرد 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

ترتیب ۰/۵ s و ۱ mlit است. مدت زمان دبی‌گیری ۲۰s و حجم متوسط اندازه‌گیری شده ۲۰۰ mlit در نظر 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.

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

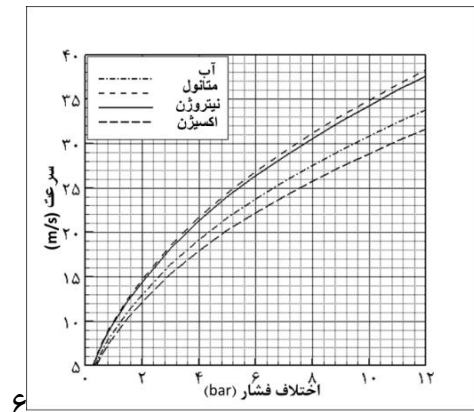
که در آن  $p_1 - p_2$  اختلاف فشار قبل و بعد از انژکتور،  $\rho$  چگالی سیال و  $C_d$  ضریب تخلیه انژکتور می‌باشد. باتوجه به اینکه نیتروژن مایع در شرایط استاندارد (فشار ۱ بار و دمای ۲۹۸ کلوین) به حالت گازی در می‌آید روش دبی‌سنجی برای اندازه‌گیری سرعت جت نیتروژن امکان‌پذیر نیست. برای مشخص کردن سرعت جت نیتروژن مایع بر حسب اختلاف فشار انژکتور، فرض می‌شود که ضریب تخلیه‌ی انژکتور برای سیالات مختلف تغییر نکند. در این صورت 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.

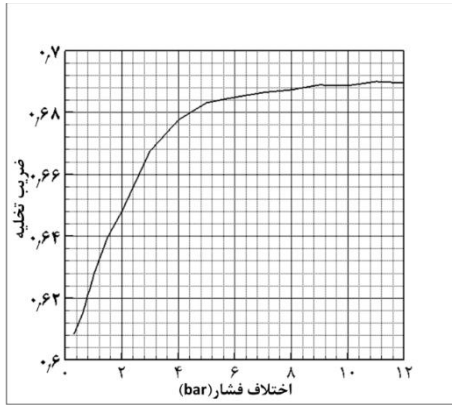
در شکست جت‌ها، اعداد بدون بعد رینولدز و وبر نقش مهمی دارند. این اعداد بر طبق روابط زیر محاسبه شده‌اند.

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (۴)$$

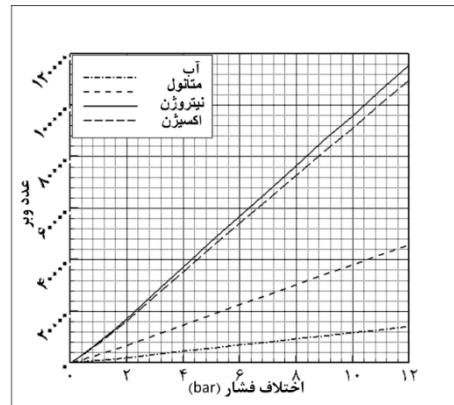
$$We = \frac{\rho u^2 D}{\sigma} \quad (۵)$$

که در این روابط  $Re$  عدد رینولدز،  $We$  عدد وبر،  $\rho$  چگالی سیال،  $\mu$  لزجت سیال،  $\sigma$  کشش سطحی سیال،  $D$  قطر انژکتور و  $u$  سرعت خروجی انژکتور است.





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

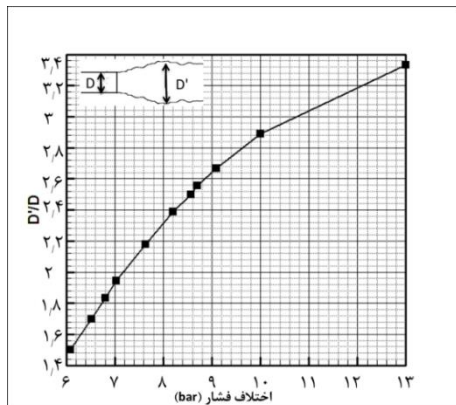


محیط، منبسط شود و قطر جت از قطر انژکتور بیشتر شود. شکل ۱۳ نسبت حداکثر قطر جت دوفاز نیتروژن به قطر داخلی انژکتور را بر حسب اختلاف فشار انژکتور نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود هرچه اختلاف فشار انژکتور بیشتر شود میزان انبساط جت بیشتر می‌شود. به طوری که در اختلاف فشار ۶ بار قطر جت ۱/۵ برابر قطر انژکتور است اما در اختلاف 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 پایین دست، قطر هسته‌ی تاریک جت (که حجم مایع در آن زیادتر است) کم شود و شکل برگ نوک‌تیز (مانند برگ اوکالیپتوس) بگیرد. همچنین در پایین دست، لایه‌ها و لیگامنت‌های شبه انگشتی شکل می‌گیرد. این لایه‌ها و لیگامنت‌ها که به شکل دندان‌اره‌ای 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 پایین دست، امواج سینوسی جت

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 مادون سرد کردن نیتروژن مایع از طریق نگهداری در فشار کم که جت نیتروژن مایع خروجی از انژکتور به صورت مایع مادون سرد 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 تأثیر 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



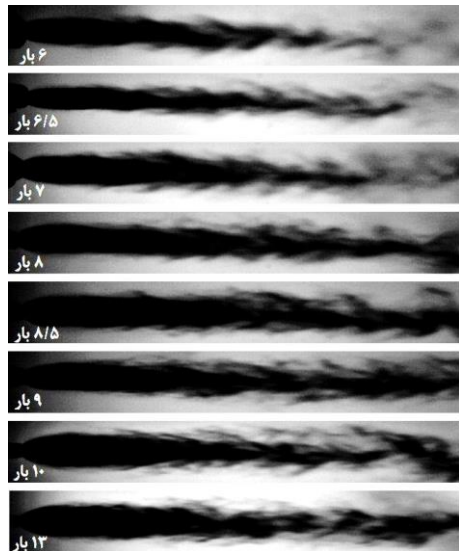
شکل ۱۳) نمودار حداکثر قطر جت دوفاز نیتروژن در خروجی بر حسب اختلاف فشار انژکتور



۵-۲- جت نیتروژن مایع مادون سرد در محفظه ی با فشار ۲ بار و دمای ۲۹۸ کلوین

در این مرحله از آزمایش با استفاده از روش مادون سرد کردن نیتروژن مایع از طریق نگهداری در فشار ۱ بار، جت نیتروژن مایع خروجی از انژکتور به صورت مایع مادون سرد در می آید و رفتار آن در محیطی با فشار ۲ بار و دمای ۲۹۸ کلوین، مورد بررسی قرار می گیرد. در این محیط خروجی انژکتور، نیتروژن مایع مادون سرد در فشار ۲ بار و دمای ۲۷ کلوین است. برای بررسی مدل های شکست، سرعت جت از ۲۳ متر بر ثانیه تا ۳۴ متر بر ثانیه و عدد رینولدز از ۹۲۰۰۰ تا ۱۳۶۰۰۰ تغییر داده شد. در محدوده ی 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 می گذارد.

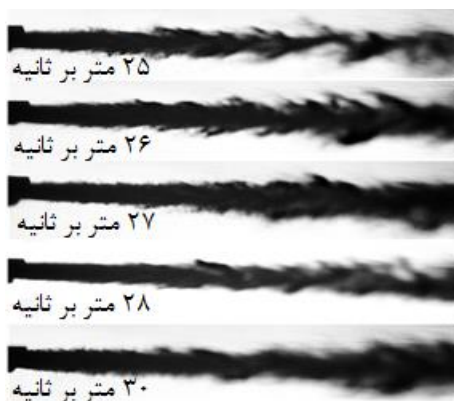
شکل ۱۶ تصاویری از جت های نیتروژن مایع با سرعت های مختلف در محفظه ی آزمایش با فشار ۲ بار و دمای ۲۹۸ کلوین را نشان می دهد. در هر کدام از تصاویر، با استفاده از نمودار شکل های ۹ تا ۱۱ می توان مشخصات جت (سرعت، عدد رینولدز و عدد وبر جت) را بر حسب اختلاف فشار انژکتور بدست آورد. همان طور که در این شکل دیده می شود، جت خروجی به صورت مایع مادون سرد در می آید. در این محدوده ی سرعت، نیروهای آیرودینامیکی روی سطح جت، بعد از خروجی انژکتور، ناپایداری های موجی را به وجود می آورد. در فاصله ی کمی بعد از خروجی انژکتور، نیروی برشی ناشی از سرعت نسبی جت و گاز محیط، لیگامنت های کوچکی روی سطح جت شکل می دهد که قطرات از آنها جدا می شود. این قطرات موازی سطح جت حرکت می کنند تا تبخیر گردند. مدل شکست بالادست جت نیتروژن مایع، مدل شکست ناشی از باد اولیه است که چهرودی در فشار مادون بحرانی محفظه ی آزمایش مشاهده کرد<sup>[3,4]</sup>. در پایین دست، جت در اثر تبخیر کمی منبسط می شود. همچنین در پایین دست، لایه ها و لیگامنت های شبه انگشتی شکل می گیرد. این لایه ها و لیگامنت ها که به شکل دنداناره ای روی سطح جت ظاهر، و به سمت بالادست جریان شکل گرفته اند،



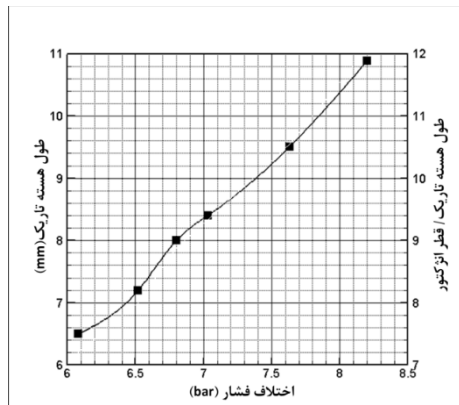
شکل ۱۴) جت نیتروژن مایع دوفاز در شرایط متعارفی (فشار ۱ بار و دما ۳۰۰ کلوین) در فشار های مختلف

را به خوبی می توان مشاهده کرد. در نهایت جت در اثر انتقال گرما تبخیر و محو می شود. تصاویر شکل ۱۴ نشان می دهند 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 می دهد. همان طور که در این نمودار دیده می شود هرچه اختلاف فشار انژکتور بیشتر شود طول هسته تاریک جت بیشتر می شود و در اختلاف فشار ۸/۳ بار طول هسته تاریک به حدود ۱۱ میلی متر می رسد.

مقایسه این جت ها (جت های مایع اشباع یا نزدیک اشباع) با جت مایعات متداول (مادون سرد) نشان می دهد که بدنه جت از استحکام کافی در مقابل نیروهای آیرودینامیکی برخوردار نبوده و توسط این نیروها مضمحل می شود. لازم با ذکر است تغییر دما و همچنین تغییر فاز جت هنگام عبور از گذرگاه ها باعث می شود تا نتوان اطلاع دقیقی از چگالی و لزجت آن داشت. از این رو نمی توان درباره سرعت جت همچنین عدد رینولدز جت خروجی قضاوت دقیقی داشت.



شکل ۱۶) اتمیزاسیون جت های نیتروژن مایع با سرعت های مختلف در محفظه ی آزمایش با فشار ۲ بار و دمای ۲۹۸ کلوین



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

آزمایش با فشار بالاتر از فشار اشباع و در محیط آزمایشگاه 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 دندان‌اره‌ای 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 سپاس خود 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

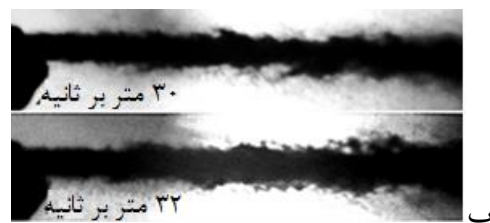
1- Mayer WO, Schik AH, Vielle B, Chauveau C, Gokalp I, Talley DG, Woodward RD. Atomization and breakup of cryogenic propellants under high-pressure subcritical

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. در نهایت جت در اثر انتقال گرما تبخیر و محو می‌شود.

## ۵-۳- جت نیتروژن در محفظه‌ی آزمایش پیش‌سرد 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 کاملاً 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.



**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

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. In 37th 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- Poulidakos 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.