



Effects of Dimensionless Numbers on the Pintle Injector Performance

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mahdavi S.A.¹ MSc,
Ranjbar A.*¹ PhD,
Farshchi M.² PhD

How to cite this article

Mahdavi S.A, Ranjbar A, Farshchi M. Effects of Dimensionless Numbers on the Pintle Injector Performance. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(7):1761-1771.

ABSTRACT

Variable-area injectors are suitable for developing throttleable rocket engines because it is difficult to efficiently control thrust when fixed-area injectors are used. A pintle injector is a variable-area injector that can be used to control the mass flow rate of propellants. In practice, an injector plate containing several fixed-area injectors is replaced with a single pintle injector. In this research, a two-stage pintle injector is designed, manufactured, and tested for the effects of dimensionless numbers (Momentum ratio, Weber number, and discharge coefficient) on the injector's performance, including the spray angle change, which is an important characteristic of the spray. The tests were done at ambient temperature and pressure conditions. The Weber number ranged from 19 to 1830, and the ratio of the fuel to the oxidizer momentum was varied from 0.2 to 13. Water is used instead of the oxidizer as a central propellant, and the air is used instead of the fuel as an external propellant. Shadowgraph and photography were used to measure the spray angle and study the desired parameters. Empirical relationships between functional parameters and dimensionless numbers were obtained that can be used in the design process.

Keywords Variable-Area Injector; Pintle Injector; Momentum Ratio; Injection Angle

¹Heat & Fluids Department, Mechanical Engineering Faculty, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

²Propulsion Department, Aerospace Engineering Faculty, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Babol Noshirvani University of Technology, Shariati Street, Babol, Mozandaran, Iran. Postal Code: 4714871167
Phone: +98 (11) 32332071
Fax: +98 (11) 32332071
ranjbar@nit.ac.ir

Article History

Received: May 28, 2019
Accepted: December 31, 2019
ePublished: July 20, 2020

CITATION LINKS

[1] Atomization and sprays [2] Liquid Rocket Engine Injectors [3] Liquid-propellant rocket engine throttling: A comprehensive review [4] The Lunar module descent engine-a historical summary [5] A historical systems study of liquid rocket engine throttling capabilities [6] TRW pintle engine heritage and performance characteristics [7] Testing of the 650 klbf LOX/LH2 low cost pintle engine [8] Design and testing of non-toxic RCS thrusters for second generation reusable launch vehicle [9] Northrop grumman TR202 LOX/LH2 deep throttling engine technology project status [10] Space X: Making commercial spaceflight a reality [11] Characterization of pintle engine performance for nontoxic hypergolic bipropellants [12] Student design/build/test of a throttleable LOX-LCH4 thrust chamber [13] Numerical simulation of a pintle variable thrust rocket Engine [14] Optical measurements of ethanol/liquid oxygen rocket engine combustor with planar pintle Injector [15] Performance evaluation of rocket engine combustors using ethanol/liquid oxygen pintle injector [16] Injection condition effects of a pintle injector for liquid rocket engines on atomization performances [17] Effects of momentum ratio and weber number on spray half angles of liquid controlled pintle injector [18] Effects of opening distance on liquid-gas spray of pintle injector under atmospheric condition [19] Design Procedure of a movable pintle injector for liquid rocket engines [20] Experimental study of liquid sheet breakup in cross flow

تأثیر اعداد بدون بُعد بر عملکرد انژکتور پینتل و تغییر زاویه پاشش

سیدعسکری مهدوی MSc

گروه آموزشی حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

علی اکبر رنجبر PhD

گروه آموزشی حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

محمد فرشچی PhD

گروه آموزشی پیشران، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

چکیده

انژکتورهای با قابلیت تغییر سطح مقطع خروجی جریان، انتخاب مناسبی برای توسعه موتورهای راکت سوخت مایع گازخور (ترائل) هستند؛ زیرا زمانی که از انژکتورهای با سطح ثابت استفاده می‌شود، کنترل موثر تراست کار دشواری است. انژکتور پینتل که یک انژکتور دارای سطح متغیر است، می‌تواند دبی جرمی پیشران‌ها را کنترل نماید. در واقع می‌توان یک صفحه انژکتور بزرگ با تعداد زیاد انژکتور را با یک انژکتور تک‌المانی پینتل جایگزین نمود. در این مقاله، تلاش شده است تا ضمن معرفی و ارایه یک نمونه طراحی و ساخته شده این انژکتور دوپایه، تأثیر اعداد بدون بعد (نسبت مومنتم، عدد وبر و ضریب تخلیه) در عملکرد انژکتور و تغییر زاویه پاشش که یکی از مشخصه‌های مهم اسپری است، مورد بررسی قرار گیرد. آزمون‌ها در شرایط دما و فشار محیط انجام شد و عدد وبر در محدوده ۱۹ تا ۱۸۳۰ و نسبت مومنتم سوخت به اکسیدکننده بین ۰/۲ تا ۱۳ بوده است. از آب به‌جای اکسیدکننده به‌منظور پیشران مرکزی و از هوا به‌جای سوخت به‌منظور پیشران خارجی استفاده شده است. برای اندازه‌گیری زاویه اسپری و مطالعه اثر پارامترهای مورد نظر بر ساختار اسپری از روش سایه‌نگاری و عکس‌برداری استفاده شده است. همچنین با استفاده از نتایج حاصله، یک رابطه تجربی بین زاویه پاشش و اعداد بدون بعد بدست آمده و ارایه شده است.

کلیدواژه‌ها: انژکتور سطح متغیر، انژکتور پینتل، نسبت مومنتم، زاویه پاشش

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۰

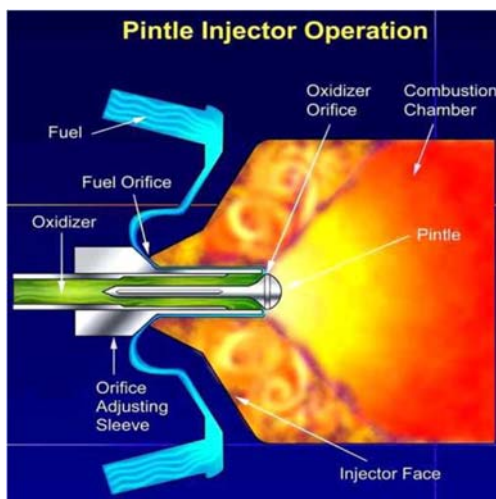
*نویسنده مسئول: ranjbar@nit.ac.ir

مقدمه

انژکتور وظیفه پاشش سوخت به درون محفظه احتراق در نسبتی مناسب و شرایط صحیح برای دستیابی به احتراقی خوب و پایدار را بر عهده دارد. به‌منظور تأمین احتراق پایدار در محفظه، لازم است تا اختلاط بین سوخت و اکسیدکننده به نحو مطلوب انجام گیرد. در واقع، بازده ماکزیمم موتور در کنار طراحی بهینه انژکتور حاصل می‌شود. طراحی و انتخاب انژکتورها به‌دلیل تأثیر زیادی که بر کارایی و پایداری موتور دارند، یکی از مهم‌ترین مراحل در طراحی موتور سوخت مایع هستند [1]. بازده احتراق در یک موتور سوخت مایع به کارایی انژکتور در اتمیزاسیون سوخت و اکسیدکننده، توزیع و اختلاط مناسب آنها در محفظه احتراق بستگی دارد. برای طراحی و انتخاب یک انژکتور مناسب برای محفظه احتراق، پارامترهایی چون نوع سوخت و اکسیدکننده (خوداشتعال،

انباشت‌پذیر و کرایوژنیک)، حالت سوخت و اکسیدکننده (مایع، گاز)، سیستم خنک‌کاری محفظه، طول محفظه احتراق، شرایط عملکردی (فشار و دما)، تراست ثابت یا متغیر، محدودیت اُفت فشار و عمر موتور مورد توجه قرار می‌گیرند. این پارامترها به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر عملکرد محفظه احتراق، انتقال حرارت، انتخاب مواد بدنه محفظه و پایداری احتراق موثر هستند [2]. یکی از پارامترهایی که به آن اشاره شد، قابلیت تغییر تراست است. با توجه به الزامات ماموریت، در موارد خاصی شامل فرود زمینی راکت و مانورهای فضایی، درجه و میزان مشخصی از تراست توسط سیستم پیشران اعمال می‌شود. به‌طور دقیق از نظر سیستم تزریق و پاشش، انژکتور پینتل به‌علت داشتن مشخصه پایداری احتراق و نوع طراحی، انتخاب معمول در این مورد است.

انژکتور پینتل، یک نوع انژکتور سطح متغیر است که در موتورهای موشک سوخت مایع استفاده می‌شود و از سال ۱۹۵۰ به‌منظور به‌کارگیری در موتورهای با قابلیت ترائل (تغییر تراست) توسعه پیدا کرد. این انژکتور به‌عنوان انژکتور اصلی سفینه فضایی موشک ماه‌نورد آپولو مورد استفاده قرار گرفته بود [3-6]. کاسیان و همکاران، ضمن دسته‌بندی روش‌های با امکان تغییر تراست در موتورهای راکت سوخت مایع، استفاده از انژکتورهای سطح متغیر را نیز به‌عنوان یکی از روش‌های موثر در تغییر دبی پیشران‌ها و در نتیجه قابلیت تغییر تراست موتور معرفی نمودند [3]. شکل ۱ نحوه عملکرد انژکتور پینتل را نشان می‌دهد. اگرچه این انژکتور در اوایل عصر فضا توسعه داده شد، عمدتاً در کنار انژکتورهای سطح ثابت مانند انژکتور محوری برشی، انژکتور پیچشی محوری و انژکتورهای برخوردی تا این اواخر استفاده شده‌اند. به هر حال، انژکتورهای سطح متغیر (خصوصاً انژکتور پینتل)، با توجه به مزیت‌های مرتبط با آنها در خصوص موتورهای نسبتاً جدیدتر، به‌تازگی به‌عنوان نسل بعدی انژکتورها مورد توجه هستند. با این وجود، بسیاری از جزئیات نتایج تحقیقات مطالعات پیشین آزمایشگاه فضایی TRW و شرکت تکنولوژی فضایی نورثروپ گرومن (Northrop Grumman) سابق منتشر نشده است [6-9].

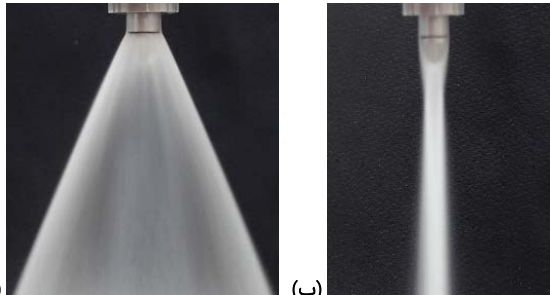


شکل ۱) تصویر شماتیک نحوه عملکرد انژکتور پینتل [3]

عملکرد انژکتور پینتل در تست سرد در شکل ۲ آورده شده است. به منظور درک بهتر نحوه عملکرد انژکتور پینتل، جریان هر کدام از پیشران‌ها به صورت مجزا در نازل‌های مربوطه (الف و ب) و در نهایت ترکیب آنها (ج) در شکل ۲ ارائه شده است. در این آزمایش برای نمایش واضح‌تر پیشران‌ها، به جای جریان بیرونی هوا از آب استفاده شده است.



(الف)



(ج)

(ب)

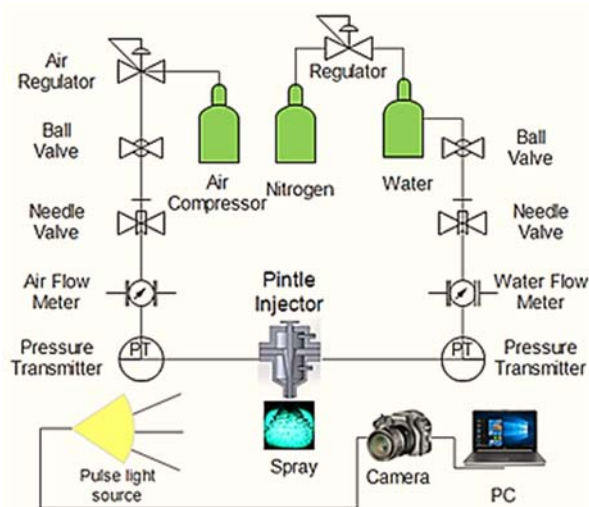
شکل ۲) نحوه عملکرد انژکتور پینتل در تست سرد پاشش آب-آب: الف) فقط جریان شعاعی (داخلی)، ب) فقط جریان محوری (بیرونی)، ج) ترکیب دو جریان شعاعی و محوری

معمولاً دو نوع انژکتور پینتل در منابع گزارش می‌شود؛ در نوع اول (شکل ۱) که موضوع بررسی این تحقیق نیز است، پیشران سوخت گازی (هوا در تحقیق حاضر) در مجرای حلقوی بیرونی به صورت محوری جریان داشته و در مجرای درونی اکسیدکننده مایع (آب در این مقاله) با عبور از مجرای حلقوی به صورت محوری و رسیدن به انحنای نوک پینتل، منحرف شده و به جریان سوخت گازی برخورد کرده و چتر پاشش را تشکیل می‌دهند. شکل ۱، نشان‌دهنده جریان پیوسته و ۳۶۰ درجه از سوخت گازی و اکسیدکننده مایع است که از هوا به عنوان سوخت گازی و از آب به عنوان اکسیدکننده مایع استفاده شده است. در نوع دیگر انژکتور پینتل، جریان محوری سوخت و جریان شعاعی اکسیدکننده به جای عبور از مسیر پیوسته، از تعداد مشخصی شکاف عبور کرده و پس از برخورد با هم، چتر پاشش را تشکیل می‌دهند (شکل ۳). لازم به ذکر است که در انژکتورهای دارای شکاف برای تغییر دبی از یک قطعه متحرک استوانه‌ای در قسمت داخل انژکتور استفاده می‌شود که توسط یک محرک (عملگر مکانیکی؛ Actuator) به حرکت درآمده و میزان لازم از سطح شکاف‌ها را برای عبور پیشران‌ها برای ایجاد تراست مورد نظر، تنظیم می‌نماید^[9].

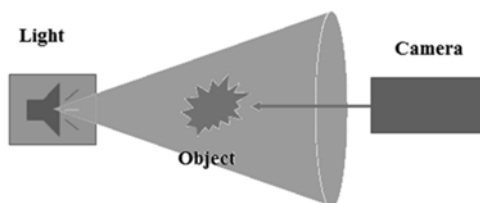
اخیراً موتورهای کم‌هزینه گازخور توسعه پیدا کردند و چون انژکتورهای متداول با یک سطح ثابت دارای بازده نسبتاً کم در سطوح تراست پایین هستند، تجهیزاتی برای برقراری شرایط بهینه انژکتور در تمامی سطوح تراست مورد نیاز است. یک انژکتور پینتل می‌تواند هر دو عامل مقدار و سرعت پاشش را برای حفظ شرایط اسپری خوب در نرخ‌های پایین جریان پیشران کنترل کند. علاوه بر این، چون انژکتور پینتل دارای محدوده وسیع زاویه پاشش است، یک انژکتور می‌تواند تمام محفظه احتراق را پوشش دهد. این به این معنی است که صفحه انژکتور سنگین شامل المان‌های انژکتور بسیار، می‌تواند با یک المان انژکتور پینتل جایگزین شود، در نتیجه هزینه‌های تولید کاهش می‌یابد. محققان کمپانی اسپیس ایکس (SpaceX) با نشان دادن انژکتور پینتل در چندین موتور مانند جراثوپر، کسترل و مرلین، ثابت کردند که انژکتور پینتل، قابلیت تبدیل شدن به انژکتوری که بیشترین ترجیح را در آینده دارد، است^[10].

گروه‌های تحقیقاتی فراوانی شامل دانشگاه پوردو و دانشگاه علوم و فنون دفاع ملی چین تلاش کرده‌اند تا یک موتور انژکتور پینتل توسعه دهند که تفاوت آنها در شرایط پاشش و مطالعات طراحی بوده است. آستین و همکاران، عملکرد احتراق یک انژکتور پینتل نوع شکاف‌دار را تحت شرایط پارامترهای اصلی متفاوت از قبیل نسبت مومنتم و طول مشخصه محفظه، بدون در نظر گرفتن اثرات تغییر هندسه بررسی کردند^[11]. برد و همکاران، یک انژکتور پینتل اکسیژن مایع در مرکز ساختند و طراحی آن را به منظور دستیابی به پاشش یکنواخت، بهبود بخشیدند^[12]. یو و همکاران، شبیه‌سازی عددی محفظه احتراق انژکتور پینتل را با استفاده از دی‌متیل‌هیدرازین نامتقارن و N_2O_4 بررسی کردند و دو ناحیه بازچرخش در محفظه را شناسایی کردند^[13]. ساکاکو و همکاران، یک انژکتور پینتل را با استفاده از اتانول و اکسیژن مایع مطالعه کردند. آنها یک بررسی تجربی روی انژکتور پینتل مسطح (که یک انژکتور پینتل متقارن محوری ساده بود) انجام دادند^[14, 15]. کو و همکاران از دانشگاه هوافضای کره، تحقیقات گسترده‌ای از سال ۲۰۱۵ در زمینه طراحی، ساخت، تست و شبیه‌سازی انژکتور و موتور پینتل انجام دادند. در تحقیقات آنها ابتدا یک طرح ساده برای انژکتور پینتل متحرک پیشنهاد شد و تلاش شد تا پارامترهای بدون بعد موثر پیدا و معرفی شوند. در گزارش‌های آنان، نسبت مومنتم و عدد وبر برای تعیین تغییرات زاویه اسپری و قطر متوسط ساتر^[16, 17] مطرح شدند. در کارهای انجام‌شده، نقطه انتقال سطح مینیمم در محل عبور جریان که یک مشخصه ویژه مهم انژکتور پینتل متحرک است^[18]، مشخص شد. در نهایت برای یافتن اثرات زاویه نوک پینتل روی عملکرد اسپری، یک تست پاشش انجام شد و روابط عملکرد انژکتور در شرایط مختلف پاشش به صورت تجربی به دست آمد. با استفاده از نتایج این آزمایشات، یک الگوریتم برای طراحی محفظه احتراق $500N$ با یک انژکتور پینتل به منظور دستیابی به عملکرد بهینه ایجاد شد^[19]. نحوه

پشت سوژه که بین منبع نور و دوربین قرار دارد، سایه سوژه روی لنز دوربین نقش می‌بندد. این سوژه می‌تواند همان قطرات یا جت مایع حاصل از پاشش باشد. به همین دلیل تصاویر ثبت شده در این روش، شامل یک زمینه نورانی (ناشی از تابش نور) و یک زمینه تاریک (شامل سایه)، مانع ایجاد شده است. پدیده در این روش معمولاً در یک اتاق تاریک اتفاق افتاده و زمانی که نور پالسی فرستاده می‌شود، در زمان پهنای پالسی فرستاده شده، نور به پدیده و دوربین رسیده و به علت آنکه در زمان‌های دیگر، دوربین نورگیری نداشته، پدیده به‌طور کامل در زمان پهنای پالس فریز و صفحه دیجیتالی دوربین ثبت می‌شود.



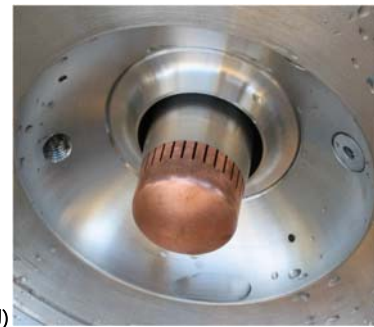
شکل ۴) نقشه مختصر P&ID (Piping and Instrumentation Diagram) امکانات آزمایشگاهی پاشش انژکتور



شکل ۵) شماتیکی از سیستم تصویربرداری^[20]

مکانیزم تغییر سطح انژکتور

به‌منظور ایجاد حرکت خطی قطعه متحرک پینتل در انژکتور برای تغییر سطح جریان پشیران مرکزی، از یک مدول خطی مدل استفاده شده است. محرک این مدول نیز، یک گیربکس دستی است که به‌صورت مجزا تهیه و به مدول متصل شده است. در ساخت مدول نیز از یک میله بال اسکرو با قطر خارجی ۱۴mm و گام ۲mm به‌ازای هر یک دور چرخش میله، استفاده شده است. با هر دور چرخش دستگیره گیربکس در خروجی مدول، حرکت خطی معادل ۱/۱mm به دقت ۱/۱۰mm ایجاد شده که این میزان حرکت به قطعه متحرک پینتل به‌منظور باز و بسته کردن نازل برای تغییر سطح عبور جریان مرکزی انژکتور (آب) و در نتیجه تغییر



(الف)



(ب)

شکل ۳) تصویر انژکتور پینتل دارای تعدادی شکاف در تست سرد با آب؛ الف: نمونه تراست بالا، ب: نمونه تراست پایین

تجهیزات و چیدمان آزمایشگاهی استفاده شده

یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در روند توسعه و طراحی انژکتور، انجام آزمون‌های تجربی است. این آزمون‌ها علاوه بر ایجاد پایگاه داده‌ای مناسب برای طراحی‌های بعدی، این امکان را نیز فراهم می‌کند که بتوان فرضیات انجام شده در آزمون‌های مورد نیاز در طول طراحی انژکتور را اعتبارسنجی و در صورت نیاز اصلاح کرد. با توجه به همین منطق یک آزمونگر برای آزمون پاشش انژکتورهای مختلف در آزمایشگاه پاشش و احتراق دانشکده هوافضای دانشگاه صنعتی شریف ایجاد شده است.

امکانات آزمایشگاهی میز آزمونگر پاشش انژکتور پینتل شامل تجهیزاتی است که در شکل ۴ مشاهده می‌شود. به‌منظور تحت فشار قراردادن مخزن آب از یک مخزن نیتروژن استفاده می‌شود؛ این کار به‌دلیل جلوگیری از نوسانات تامین آب از روش‌های دیگر مانند استفاده از آب شهری یا پمپاژ آب است. برای تامین هوای مورد نیاز از یک مخزن هوای فشرده که فشار مورد نیاز آن توسط یک دستگاه کمپرسور تامین می‌شود، استفاده شده است.

روش اپتیکی

برای ثبت نتایج هر آزمون از روش سایه‌نگاری پالسی به‌وسیله یک دستگاه دوربین عکاسی نیکون D7100 با لنز ماکرو مدل 105mm و یک دستگاه منبع نور پالسی که قادر به ایجاد نور یکنواخت است، استفاده شده است. در این دستگاه تولید نور از یک LED خاص با قدرت بالا و با نور سبز استفاده شده است. برای همسان‌سازی دوربین و نور پالسی از یک همسان‌ساز استفاده شده است. وظیفه این قسمت این است که زمانی که نور پالسی فرستاده می‌شود، دوربین در همان زمان عکس‌برداری از پدیده را انجام دهد. در روش سایه‌نگاری مطابق شکل ۵، با تاباندن نور از

صورتی که تصمیم بر استفاده از این روتامترها در شرایط دیگر باشد، باید از ضریب تصحیح استفاده نمود و در انتخاب این روتامترها باید محدوده دبی مورد اندازه‌گیری را مد نظر قرار داد. اندازه‌گیری فشار توسط گیج فشار آب و هوا انجام می‌شود (شکل ۹). شایان ذکر است در اندازه‌گیری فشار آب برای کاهش نوسان و افزایش دقت اندازه‌گیری، از گیج فشار روغنی استفاده شده است. ضمناً فشار اندازه‌گیری شده، اختلاف فشار پشت انژکتور با اتمسفر محلی (خروجی انژکتور) است.

همان‌گونه که در بخش مقدمه به آن اشاره شد، طراحی و ساخت این نازلها معمولاً به دو روش کلی انژکتورهای دارای شکاف و انژکتورهای دارای مجرای حلقوی انجام می‌شود. لیکن در گزارشها و مقالات موجود، تنها تصاویر شماتیک خروجی انژکتور به نمایش درآمده و از نقشه داخلی و اصول طراحی مطلبی به اشتراک گذاشته نمی‌شود.

در این تحقیق، عملکرد انژکتور پینتل حلقوی (شکل ۱۰) مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات هندسی نمونه ساخته‌شده این انژکتور مطابق جدول ۱ است و شرایط تست و خواص سیالات مطابق جدول ۲ است.



(ب)



(الف)

شکل ۸ الف: روتامتر آب؛ ب: روتامتر هوا



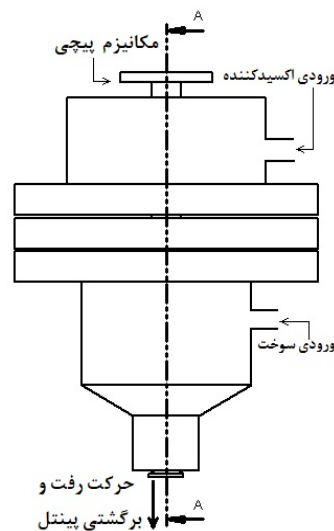
(ب)



(الف)

شکل ۹ الف: گیج فشار هوا (خشک)؛ ب: گیج فشار آب (روغنی)

دبی پیشران مرکزی انژکتور منتقل می‌شود. شایان ذکر است که در نمونه اولیه ساخته‌شده این انژکتور برای حرکت خطی قطعه متحرک مرکزی، از مکانیزم پیچ ساده استفاده شده بود. به این ترتیب که انتهای قطعه مرکزی رزوه شده و در صورت پیچاندن آن، در خروجی نازل حرکت خطی به اندازه گام پیچ ایجاد می‌شود (شکل ۶). شکل ۷ نمونه ساخته‌شده طرح اولیه است که در آن اتصال پیچی بدنه با مکانیزم اتصال فلنجی (شکل ۶) جایگزین شده است.



شکل ۶ شماتیکی از طرح اولیه انژکتور پینتل



شکل ۷ تصویر نمونه اولیه ساخته‌شده انژکتور پینتل

تجهیزات داده‌برداری

به‌منظور اندازه‌گیری مقدار دبی عبوری از مجرای آب و هوا در انژکتور، مطابق شکل ۸ از روتامتر آب (برحسب لیتر بر ساعت) و هوا (برحسب متر مکعب بر ساعت) استفاده شده است. از مزایای این روتامترها، سادگی نصب و نگهداری و قیمت و دقت مناسب است. قابلیت تحمل فشار بالای فیزیکی از دیگر مزایای این روتامتر است. این روتامتر برای اندازه‌گیری دبی مایع یا گازی که مشخصات آن بر نشان‌دهنده حک شده است، به‌کار می‌رود. در

$$We = \frac{\rho_{gas} \times (V_{gas} - V_{liq})^2 \times L_{open}}{\sigma_{liq}} \quad (2)$$

در رابطه ۲، عبارت L_{open} نشان‌دهنده طول بازشدگی پینتل است که کنترل‌کننده دبی جریان مایع (پیشران مرکزی) است. بیشتر مشخصه‌های اسپری در انژکتور پینتل وابسته به این فاصله است. یکنواختی لایه مایع در فاصله بازشدگی کمتر از ۰/۲mm ایجاد نمی‌شود. لذا در تست‌ها مقادیر بیشتر از این مقدار در نظر گرفته شده است. ضریب تخلیه، به‌صورت نسبت دبی واقعی \dot{m}_{actual} (اندازه‌گیری‌شده) به دبی جریان ایده‌آل \dot{m}_{id} تعریف می‌شود. دبی جریان ایده‌آل به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$\dot{m}_{id} = A_n \times \sqrt{2 \times \rho_{liq} \times \Delta P_{liq}} \quad (3)$$

در نتیجه رابطه ضریب تخلیه و دبی واقعی مطابق رابطه ۴ و ۵ محاسبه می‌شوند.

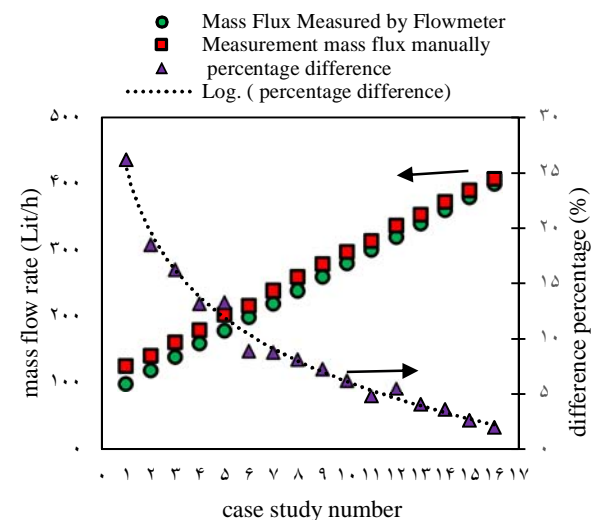
$$C_d = \frac{\dot{m}_{actual}}{\dot{m}_{id}} = \frac{\dot{m}_{actual}}{A_n \times \sqrt{2 \times \rho_{liq} \times \Delta P_{liq}}} \quad (4)$$

$$\dot{m}_{actual} = C_d \times A_n \times \sqrt{2 \times \rho_{liq} \times \Delta P_{liq}} \quad (5)$$

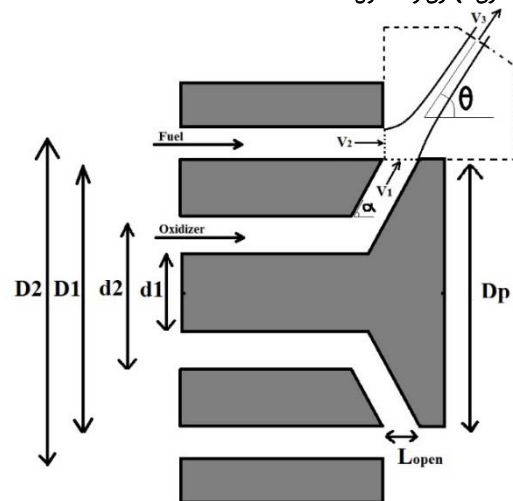
در روابط فوق، A_n نشان‌دهنده سطح خروجی نازل است که با تغییر طول بازشدگی، این سطح نیز تغییر می‌کند.

نتایج تست‌های انجام‌شده

با عنایت به اهمیت اندازه‌گیری دقیق پارامترهای عملکردی انژکتور همچون دبی و فشار، برای تعیین ضریب تخلیه نازل که یکی از موارد قابل توجه در طراحی است، لازم است که تا حد امکان از صحت کارکرد تجهیزات تعیین دبی و فشار جریان سیال اطمینان حاصل کرد. برای این کار می‌توان از روش کالیبره کردن فشارسنج‌ها و فلومترها و همچنین محاسبه دستی دبی مایع استفاده کرد. محاسبه دستی دبی مایع، با استفاده از یک ظرف مدرج و اندازه‌گیری زمان جمع‌آوری آب انجام شده که نتیجه این آزمایش مطابق نمودار ۱ در تصحیح دبی اندازه‌گیری‌شده توسط فلومتر آب به‌کار رفته است. جدول ۳ شرایط اجرای این آزمون را نشان می‌دهد.



نمودار ۱) مقایسه دبی اندازه‌گیری شده به‌وسیله فلومتر و دستی



شکل ۱۰) تصویر شماتیک نوک انژکتور پینتل

جدول ۱) مشخصات هندسی انژکتور پینتل مورد مطالعه

مقدار	عنوان متغیر	متغیر
۹	$D_2 (mm)$	قطر خارجی سوخت
۸	$D_1 (mm)$	قطر داخلی سوخت
۱۳/۳۵	$A_o (mm^2)$	مساحت مجرای خارجی
۴/۵	$d_2 (mm)$	قطر خارجی اکسیدایزر
۳	$d_1 (mm)$	قطر داخلی اکسیدایزر
۸/۸۳	$A_i (mm^2)$	مساحت ثابت مجرای داخلی
۸	$D_p (mm)$	قطر نوک پینتل
۴۰	$\alpha (^{\circ})$	زاویه پینتل
۰/۳-۰/۶	$L_{open} (mm)$	طول بازشدگی پینتل

جدول ۲) شرایط عملکرد انژکتور پینتل مورد مطالعه

مقدار و محدوده	عنوان متغیر	متغیر
۱/۵ و ۱، ۰/۵	$\Delta P_{water} (bar)$	فشار گنج آب
۱ و ۰/۷، ۰/۵، ۰/۳	$\Delta P_{air} (bar)$	فشار گنج هوا
۰/۸۸	$P_{atm} (bar)$	فشار محیط
۲۵	$T (^{\circ}C)$	دمای محیط
۱۰۰۰	$\rho_{water} (kg/m^3)$	چگالی آب
مطابق با رابطه تعیین می‌شود.	$\rho_{air} = \frac{P}{RT} (kg/m^3)$	چگالی هوا
۰/۰۷۲۸	$\sigma_{water} (N/m)$	کشش سطحی آب
$1/002 \times 10^{-7}$	$\mu_{water} (N.s/m^2)$	ویسکوزیته آب
$1/8 \times 10^{-6}$	$\mu_{air} (N.s/m^2)$	ویسکوزیته هوا

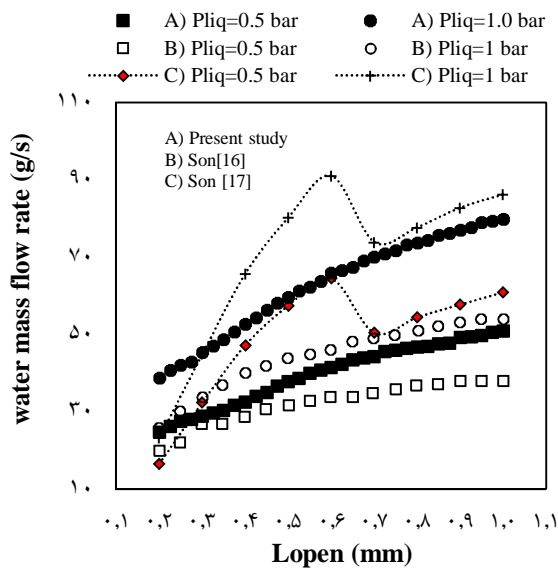
پارامترهای مهم طراحی

یکی از مهم‌ترین متغیرهای طراحی انژکتور پینتل، عدد بدون بعد نسبت مومنتم (TMR) است که به‌صورت نسبت مومنتم جریان محوری (هوا) به جریان شعاعی (آب) مطابق رابطه زیر تعریف شده است.

$$TMR = \frac{\dot{m}_g \times V_g}{\dot{m}_l \times V_l} = \frac{\dot{m}_{air} \times V_{air}}{\dot{m}_{water} \times V_{water}} \quad (1)$$

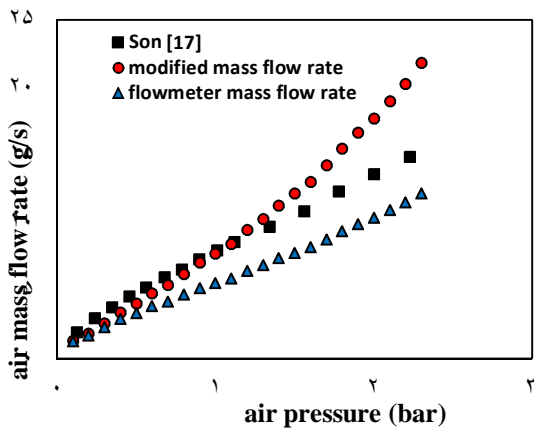
پارامتر مهم دیگر در طراحی این انژکتور، عدد بدون بعد وبر است که به‌صورت نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی و به شکل رابطه ۲ تعریف می‌شود.

و میزان اختلاف داده‌ها به علت اختلاف موجود در چگونگی طراحی مجرای آب، فرآیند ساخت یا دقت اندازه‌گیری است.



نمودار ۲) اندازه‌گیری دبی جرمی آب با تغییر طول بازشدگی و فشار

در نمودار ۳، دبی جرمی هوا در محدوده اُفت فشار بین ۰/۱ و ۲/۳ bar در ۳ حالت اندازه‌گیری به وسیله فلومتر هوا، مقادیر اصلاح شده بر اساس نرم‌افزار کالیبره کردن دستگاه فلومتر و مقادیر گزارش شده توسط تیم کره‌ای [16] با مشخصات هندسی همانند انژکتور مورد بررسی در این تحقیق، ارایه شده است. روتامترها معمولاً بر اساس دما و فشار خاصی که روی بدنه آن حک شده است، کالیبره می‌شوند. در صورت تغییر دما و فشار سیال نسبت به شرایط اولیه، باید از نرم‌افزار کالیبره کردن دستگاه فلومتر که بر مبنای رابطه $Q_2 = Q_1 \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}$ و در نظر گرفتن شرایط موجود در تست عمل می‌نماید، استفاده کرد. علت اختلاف نتایج ارایه شده در اندازه‌گیری توسط فلومتر و مقادیر حاصل از نرم‌افزار در فشارهای بالاتر، تراکم‌پذیری هوا و وابستگی شدید چگالی هوا به فشار است.



نمودار ۳) مقادیر دبی جرمی هوا بر مبنای اُفت فشار جریان هوا

جدول ۳) شرایط آزمون محاسبه دبی توسط فلومتر و اندازه‌گیری دستی

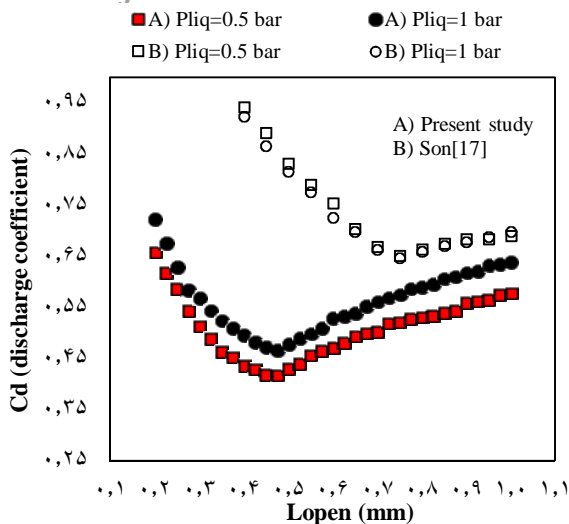
متغیر	عنوان	مقدار و محدوده
فشار گیج آب	$\Delta P_{water}(bar)$	۰/۴-۲/۵
فشار گیج هوا	$\Delta P_{air}(bar)$	-
طول بازشدگی پینتل	$L_{open}(mm)$	۰/۳
دبی حجمی فلومتر	$Q_f(Lit/h)$	۱۰۰ (۴۰۰)
حجم مخزن مدرج	$V(Lit)$	۲
زمان پرشدن مخزن مدرج	$t(s)$	۱۷/۶۵ - ۵۷/۰۵
دبی حجمی اندازه‌گیری شده دستی	$Q_m(Lit/h)$	۱۲۶/۲۰۵-۴۰۷/۹۳۲

دبی مایع در محدوده ۱۰۰ لیتر بر ساعت تا ۴۰۰ لیتر بر ساعت و با افزایش ۲۰ لیتر بر ساعت در هر مرحله توسط فلومتر اندازه‌گیری شده و به صورت دستی نیز زمان پرشدن مخزن ۲ لیتری محاسبه شد (نمودار ۱). دبی تعیین شده توسط فلومتر مقداری کمتر از دبی تعیین شده به صورت دستی است. مقدار درصد این اختلاف در نمودار ۱ و در محور عمودی سمت راست مشخص شده است. با افزایش مقدار دبی، این اختلاف اندازه‌گیری از حدود ۲۶٪ به حدود ۲٪ کاهش می‌یابد. بنابراین فلومتر آب در دبی‌های بالاتر، دقیق‌تر است. شرایط انجام آزمایش تغییرات دبی جرمی آب با تغییر طول بازشدگی در جدول ۴ بیان شد.

جدول ۴) شرایط آزمون محاسبه دبی مایع با تغییر طول بازشدگی پینتل

متغیر	عنوان	مقدار و محدوده
فشار گیج آب	$\Delta P_{water}(bar)$	۱ و ۰/۵
فشار گیج هوا	$\Delta P_{air}(bar)$	-
طول بازشدگی پینتل	$L_{open}(mm)$	۰/۲-۱
قطر خارجی آب [17]	$d_2(mm)$	۴
قطر داخلی آب [17]	$d_1(mm)$	۳
قطر خارجی هوا [17]	$D_2(mm)$	۱۳/۵
قطر داخلی هوا [17]	$D_1(mm)$	۱۲
ابعاد هندسی [16]	هندسه	مطابق جدول ۱
دبی جرمی اندازه‌گیری شده (تحقیق حاضر)	$\dot{m}_l(g/s)$	۲۵-۸۰
دبی جرمی [16]	$\dot{m}_l(g/s)$	۱۶-۹۰
دبی جرمی [17]	$\dot{m}_l(g/s)$	۲۰-۵۵

روند تغییرات دبی جرمی آب با تغییر طول بازشدگی پینتل و با توجه به وجود ارتباط مستقیم دبی جرمی با فشار و سطح خروجی نازل طبق رابطه ۵، نشان می‌دهد که با افزایش فشار در طول بازشدگی ثابت و همچنین با افزایش طول بازشدگی در فشار ثابت آب، مقدار دبی جرمی افزایش می‌یابد، لیکن شیب افزایش به مرور کم شده و تمایل به ثابت ماندن با توجه به ثابت بودن سطح داخلی مجرای آب وجود دارد (نمودار ۲). در این نمودار نتایج آزمایش تیم کره‌ای [16, 17] بررسی شد. آنان ابتدا در انژکتوری با هندسه مشابه با تحقیق [16]، کاهش دبی در طول بازشدگی $L_{open} = ۰/۶mm$ را ارایه کردند، ولی در گزارش بعدی و در انژکتوری با هندسه مطابق جدول ۴ این تغییر کاهش را اصلاح نمودند [17]. محدوده تغییرات دبی در دو انژکتور با ابعاد هندسی مشابه دارای تشابه خوبی بوده



نمودار ۴) وابستگی ضریب تخلیه انژکتور به فشار و طول بازشدگی نازل آب

جدول ۶) شرایط آزمون تغییرات ضریب تخلیه آب با تغییر طول بازشدگی

مقدار و محدوده	عنوان	متغیر
۱ و ۰/۵	$\Delta P_{water} (bar)$	فشار گنج آب
۰	$\Delta P_{air} (bar)$	فشار گنج هوا
۰/۲-۱	$L_{open} (mm)$	طول بازشدگی پینتل

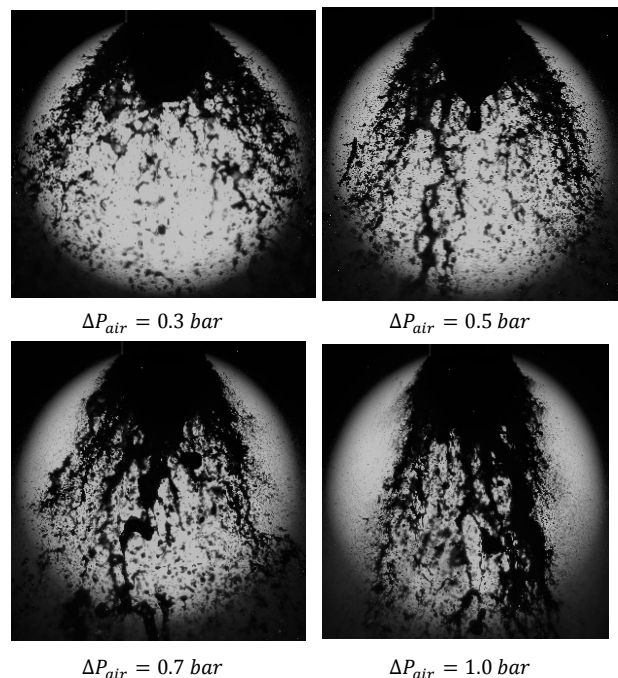
مطابق نمودار ۴، در فشارهای مختلف (در تحقیق حاضر)، ابتدا با افزایش طول بازشدگی از $L_{open} = 0.2 mm$ تا $0.475 mm$ ضریب تخلیه کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد. این مساله نشانگر وجود یک نقطه گذرا برای مساحت در مجرای داخلی انژکتور است. هنگام رسیدن طول بازشدگی به این فاصله مطابق رابطه ۶، سطح ایجادشده در خروجی با سطح ثابت داخلی برابر می‌شود.

$$\begin{cases} L_{open} < 0.475 mm \Rightarrow A_n = A_{min} \\ L_{open} \geq 0.475 mm \Rightarrow A_n = A_i = 8.83 mm^2 \end{cases} \quad (6)$$

مطابق شکل ۱۰، تا قبل از نقطه گذرا، مساحت خروجی A_{min} که در اثر بازشدن پینتل ایجاد می‌شود، به‌علت کم‌تر بودن معیار مساحت نازل (A_n) در رابطه ۴ قرار می‌گیرد و بعد از عبور طول بازشدگی از $L_{open} = 0.475 mm$ ، به‌علت افزایش سطح خروجی نسبت به سطح ثابت مرکزی، سطح مرکزی A_i به‌عنوان کمترین سطح خروجی در نظر گرفته می‌شود. ضمناً در نمودار ۴ مقایسه‌ای بین نتایج این تحقیق و نتایج تیم کره‌ای سن و همکاران [17] انجام شده است که با توجه به اختلافی که در سطح مقطع خروجی دو انژکتور وجود دارد، تشابه نسبتاً خوبی در روند تغییرات ضریب تخلیه دو انژکتور وجود دارد. نقطه گذرای مساحت در گزارش آنان [17] در طول بازشدگی $L_{open} = 0.475 mm$ است.

چگونگی تغییرات زاویه پاشش انژکتور با تغییرات نسبت مومنتم هوا به آب بر اساس داده‌های جداول ۷ و ۸ نشان می‌دهد که با افزایش فشار هوا در شرایط فشار ثابت آب و طول بازشدگی ثابت، نسبت مومنتم افزایش یافته و زاویه پاشش کاهش می‌یابد (نمودار ۵). در نسبت مومنتم‌های کمتر، افزایش طول بازشدگی

در این قسمت تصاویر اخذشده از پدیده پاشش به‌وسیله سیستم اپتیکی و تاثیر تغییر پارامترهای مختلف روی ساختار اسپری نشان داده می‌شود. شکل ۱۱، بیانگر تصاویر اخذشده از پاشش در شرایط قیدشده در جدول ۵ است. در این تصاویر به‌وضوح، کاهش زاویه پاشش با افزایش فشار هوا و بهبود کیفیت قطرات تولیدی در اثر افزایش نیروهای آیرودینامیکی، مشاهده می‌شود. افزایش فشار هوای ورودی به انژکتور در فشار ثابت آب ورودی، نشان‌دهنده افزایش نسبت مومنتم هوا به آب و نیز افزایش عدد وبر است. پارامتر بسیار مهمی که دقت طراحی و ساخت انژکتور را نشان می‌دهد، ضریب تخلیه مایع است. ضریب تخلیه بالاتر، به معنی اُفت فشار کمتر در شرایط یکسان بوده که این عامل موجب بهبود عملکرد انژکتور خواهد شد. تغییرات ضریب تخلیه انژکتور نسبت به تغییر فاصله بازشدگی نوک پینتل مطابق جدول ۶ در نمودار ۴ نشان داده می‌شود.



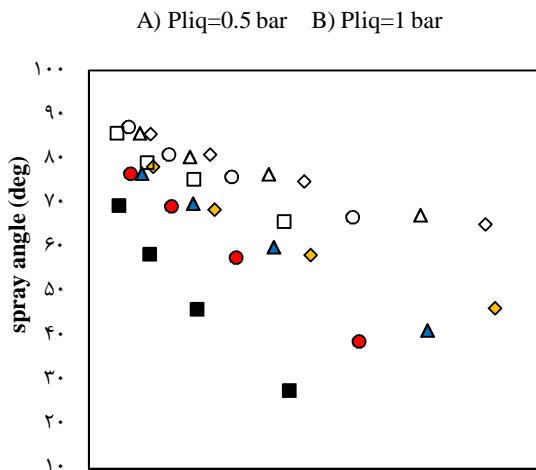
شکل ۱۱) تصاویر پاشش بر اساس شرایط قیدشده در جدول ۵

جدول ۵) شرایط آزمون تصویربرداری از پاشش (در همه زوایا $L_{open} = 0.5 mm$ است.)

پیک	ΔP_i (bar)	ΔP_{gas} (bar)	V_l (M/S)	V_{gas} (M/S)	TMR	We	زاویه (درجه)
۱۴	۰/۵	۰/۳	۴/۳	۱۳۰	۱/۹	۱۵۰	۲۶
۱۴	۰/۵	۰/۵	۴/۳	۱۶۵	۳/۵	۲۸۵	۲۰
۱۴	۰/۵	۰/۷	۴/۳	۲۰۲	۶/۱	۴۹۷	۶۰
۱۴	۰/۵	۱	۴/۳	۲۴۹	۱۱/۱	۹۰۲	۴۱
۱۵	۱	۰/۳	۶/۷	۱۳۰	۰/۷۷	۱۴۴	۸۶
۱۵	۱	۰/۵	۶/۷	۱۶۴	۱/۴۵	۲۷۶	۸۰
۱۵	۱	۰/۷	۶/۷	۲۰۲	۲/۵	۴۸۴	۲۶
۱۵	۱	۱	۶/۷	۲۴۸	۴/۵	۸۸۴	۱۷

جدول ۸) شرایط آزمون تعیین زاویه پاشش در فشار $\Delta P_l = 1 \text{ bar}$

زاویه (درجه)	We	TMR	ΔP_{gas} (bar)	L_{open} (mm)
۸۵/۸	۸۴/۹	۰/۹	۰/۳	۰/۳
۷۹/۲	۱۶۳/۴	۱/۶	۰/۵	۰/۳
۷۵/۴۶	۲۸۷/۱	۲/۸	۰/۷	۰/۳
۶۵/۸۶	۵۲۵/۳	۵	۱	۰/۳
۸۷/۲۶	۱۱۵/۱	۰/۸	۰/۳	۰/۴
۸۱/۰۶	۲۲۰/۷	۱/۶	۰/۵	۰/۴
۷۶	۳۸۶/۸	۲/۷	۰/۷	۰/۴
۶۷/۸۴	۷۰۶/۳	۴/۹	۱	۰/۴
۸۵/۷۶	۱۴۴/۵	۰/۸	۰/۳	۰/۵
۸۰/۵	۲۷۶/۸	۱/۴	۰/۵	۰/۵
۷۶/۵۴	۴۸۴/۹	۲/۵	۰/۷	۰/۵
۶۷/۲۴	۸۸۴/۹	۴/۵	۱	۰/۵
۸۵/۶۴	۱۷۱/۴	۰/۶	۰/۳	۰/۶
۸۱	۳۲۹/۱	۱/۲	۰/۵	۰/۶
۷۴/۹	۵۷۷/۶	۲	۰/۷	۰/۶
۶۵/۳	۱۰۵۵/۵	۳/۷	۱	۰/۶



۱۰ ۱۱ ۲۱ ۳۱ ۴۱ ۵۱ ۶۱ ۷۱ ۸۱ ۹۱ ۱۰۱ ۱۱۱

Webwr number

- A) Lopen=0.3 mm ● A) Lopen=0.4 mm ▲ A) Lopen=0.5 mm
- ◆ A) Lopen=0.6 mm □ B) Lopen=0.3 mm ○ B) Lopen=0.4 mm
- △ B) Lopen=0.5 mm ◇ B) Lopen=0.6 mm

نمودار ۶) وابستگی زاویه پاشش به عدد وبر

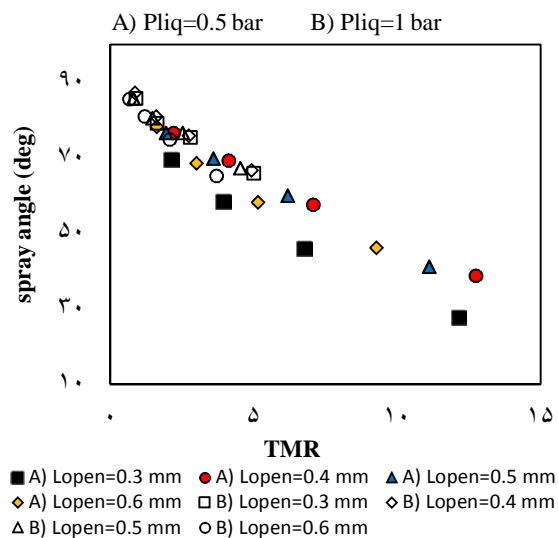
در منابع موجود، روابط تجربی برای بررسی ارتباط میان ویژگی‌های اسپری همچون طول شکست اولیه، زاویه پاشش و قطر متوسط قطرات با اعداد بدون بعد ارایه شده است که می‌توانند با پیش‌بینی نتایج تجربی، به کاهش هزینه طراحی و دقت ساخت مجدد انژکتور کمک کنند. سن و همکاران [17] رابطه $\alpha = 38.86 \times \left(\frac{TMR}{We}\right)^{-0.096}$ را برای نیم‌زاویه پاشش ارایه کردند. همچنین در تحقیقی دیگر [19]، آنها رابطه زیر را برای نیم‌زاویه پاشش با شرایط زیر پیشنهاد کردند:

$$\alpha = 90 \times (\xi) \times \exp\left[\frac{s-0.2}{1+(K/90)^P} - s\right]$$

$$\xi = \frac{90-\theta_{pt}}{90}, \quad s = 1.15 + 1.35 \times \xi, \quad P = 1.3 + 0.9 \times \xi$$

پینتل از ۳/۰ تا ۴۷۵mm/۰ موجب افزایش زاویه پاشش و به‌مرور از ۵/۰ تا ۶mm/۰ زاویه پاشش کاهش می‌یابد. این مساله موجب تایید وجود نقطه گذرا در مرکز انژکتور است که باعث ایجاد رفتار خاصی در تغییرات مشخصه‌های اسپری می‌شود؛ لذا باید این نقطه را به‌دقت شناسایی و کنترل کرد.

میزان وابستگی زاویه پاشش انژکتور به عدد وبر مطابق جدول ۷ و ۸ نشان می‌دهد که با افزایش فشار هوا در شرایط فشار ثابت آب، عدد وبر افزایش یافته و زاویه پاشش کاهش می‌یابد (نمودار ۶). نکته قابل توجه این است که همانند نمودار ۵، در فشارهای کمتر هوا از طول بازشدگی نوک پینتل ۳/۰ تا ۴mm/۰، ابتدا با افزایش عدد وبر شیب افزایش زاویه، کم شده و سپس از ۵/۰ تا ۶mm/۰ زاویه پاشش کاهش می‌یابد.



نمودار ۵) وابستگی زاویه پاشش به نسبت مومنتم هوا به آب

جدول ۷) شرایط آزمون تعیین زاویه پاشش در فشار $\Delta P_l = 0.5 \text{ bar}$

زاویه (درجه)	We	TMR	ΔP_{gas} (bar)	L_{open} (mm)
۶۹/۵	۸۹	۲/۱	۰/۳	۰/۳
۵۸/۴۴	۱۶۹/۵	۳/۹	۰/۵	۰/۳
۴۶/۰۴	۲۹۵/۸	۶/۷	۰/۷	۰/۳
۲۷/۶۶	۵۳۸	۱۲/۱	۱	۰/۳
۷۶/۶۶	۱۲۰/۱	۲/۲	۰/۳	۰/۴
۶۹/۳	۲۲۸/۲	۴/۱	۰/۵	۰/۴
۵۷/۶۶	۳۹۷/۵	۷/۱	۰/۷	۰/۴
۳۸/۸	۷۲۲	۱۲/۷	۱	۰/۴
۷۶/۶۶	۱۵۰/۳	۱/۹	۰/۳	۰/۵
۶۹/۸۶	۲۸۵/۴	۳/۶	۰/۵	۰/۵
۶۰/۰۸	۴۹۷/۱	۶/۲	۰/۷	۰/۵
۴۱/۲	۹۰۲/۹	۱۱/۱	۱	۰/۵
۷۸/۳۴	۱۷۹/۲	۱/۶	۰/۳	۰/۶
۶۸/۵۶	۳۴۰/۸	۳	۰/۵	۰/۶
۵۸/۳	۵۹۴/۱	۵/۱	۰/۷	۰/۶
۴۶/۲۲	۱۰۷۹/۸	۹/۲	۱	۰/۶

- بیشترین مقدار زاویه پاشش در انژکتور پینتل مورد آزمایش، با توجه به زاویه نوک پینتل (۴۰ درجه در این نمونه) برابر ۱۰۰ درجه بوده و در حالتی اتفاق می‌افتد که از هوا به‌عنوان پیشران بیرون استفاده نشود.

- افزایش فشار هوا در شرایط فشار ثابت آب و طول بازشدگی ثابت پینتل، باعث افزایش نسبت مومنتم و عدد وبر و در نتیجه موجب کاهش زاویه پاشش می‌شود.

- افزایش فشار آب موجب کاهش نسبت مومنتم و کاهش عدد وبر و در نتیجه افزایش زاویه پاشش می‌شود.

- افزایش طول بازشدگی در فشار ثابت آب و هوا، ابتدا تا طول $L_{open} = 0.475 \text{ mm}$ موجب افزایش زاویه پاشش و سپس افزایش بیشتر طول بازشدگی موجب کاهش زاویه پاشش می‌شود.

- علاوه بر ضریب تخلیه، عدد وبر و نسبت مومنتم پارامترهای بدون بعد مهم دیگر در شناسایی این انژکتور هستند که تاثیر تغییرات آنها در زاویه پاشش، متناسب با نقطه گذرای سطح مجرای مرکزی که توسط تغییر طول بازشدگی ایجاد می‌شود، است.

- یک رابطه تجربی برای پیش‌بینی و تخمین نتایج از طریق رگرسیون داده‌ها به‌دست آمد که هم‌پوشانی نسبتاً خوبی بین این رابطه و داده‌های حاصل از تست وجود دارد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان مقاله از کارکنان و دانشجویان دانشکده هوافضای دانشگاه صنعتی شریف، خصوصاً آقایان دکتر محمدرضا مراد و دکتر محمد فراهانی به‌علت دراختیار قراردادن تعدادی از تجهیزات مورد نیاز و آقایان مهندس سجاد رضایت و مهندس مصطفی قربان‌حسینی به‌علت همکاری در راه‌اندازی میز آزمون و آموزش نحوه اجرای تست‌ها در آزمایشگاه پاشش و احتراق تشکر می‌نمایند. همچنین از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل به‌علت تامین بودجه پژوهشی تحقیق حاضر، قدردانی می‌شود.

تاییدیه اخلاقی: موردی ذکر نشد.

تعارض منافع: موردی ذکر نشد.

سهم نویسندگان: سیدعسکری مهدوی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۳۴٪)؛ علی‌اکبر رنجبر (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۳۳٪)؛ محمد فرشچی (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۳۳٪).

منابع مالی: بودجه توسط دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل تامین شده است.

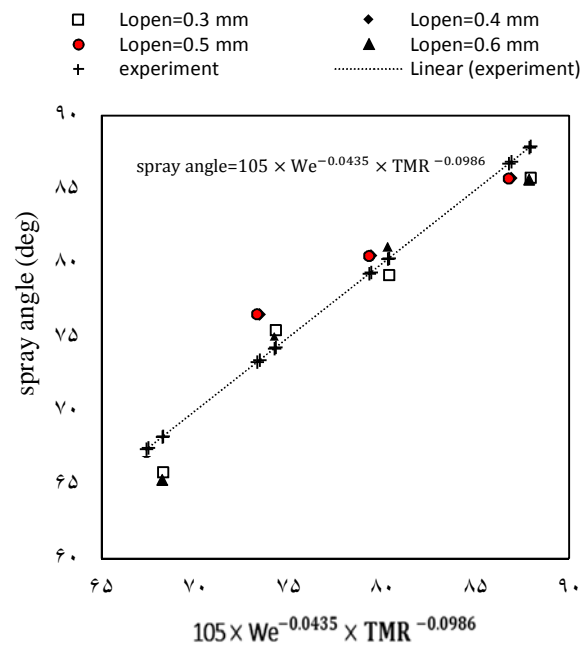
فهرست علائم

ΔP	اُفت فشار (bar)
P	فشار (bar)
T	دما (K)
\dot{m}	دبی جرمی (kg/s)
Q	دبی حجمی (m^3/s)
L_{open}	طول بازشدگی نوک پینتل (mm)
A_{min}	سطح مقطع مینیمم عبور جریان (mm^2)
A_i	سطح مقطع مجرای مرکزی اکسیدکننده (mm^2)

در رابطه فوق، θ_{pt} زاویه نوک پینتل است. در این تحقیق نیز یک رابطه تجربی بین زاویه پاشش، نسبت مومنتم و عدد وبر با استفاده از روش رگرسیون توانی به‌دست آمد که مطابق زیر ارایه شده است.

$$\text{spray angle} = 105 \times We^{-0.0435} \times TMR^{-0.0986} \quad (6)$$

چگونگی این ارتباط میان پارامترهای مختلف در نمودار ۷ نشان داده شد. میانگین خطا بین داده‌های آزمایشگاهی و رابطه تجربی مطابق نمودار ۷ برابر ۲٪ است که نشان‌دهنده پیش‌بینی خیلی خوب زاویه پاشش توسط این رابطه است.



نمودار ۷) رابطه تجربی بین زاویه پاشش، نسبت مومنتم و عدد وبر در شرایط $\Delta P_{water} = 1 \text{ bar}$

نتیجه‌گیری

در این تحقیق تلاش شده است تا ضمن معرفی یک نمونه انژکتور پینتل و تجهیزات میز آزمون، عوامل اثرگذار در عملکرد آن و زاویه پاشش که یکی از مشخصه‌های مهم اسپری است، مورد بررسی قرار گیرد. آزمون پاشش با استفاده از تکنیک سایه‌نگاری و عکس‌برداری انجام شده است و از محتوای تحقیق می‌توان موارد زیر را به اختصار به‌عنوان نتیجه ذکر کرد:

- ضریب تخلیه آب، ابتدا با افزایش طول بازشدگی تا 0.475 mm L_{open} ، کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد. علت این مساله این است که همواره سطح مینیمم خروج جریان مایع در مجرای مرکزی اکسیدکننده (آب) تعیین‌کننده ویژگی‌های انژکتور همچون ضریب تخلیه، سرعت جریان و زاویه پاشش است. این سطح همان‌گونه که در مقدمه متن به آن اشاره شده است، در فاصله مذکور دارای نقطه گذرا است که تغییراتی در ویژگی‌های یادشده در قبل و بعد از آن ایجاد می‌شود.

throttling engine technology project status. 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 25-28 July 2010, Nashville, TN. Reston: AIAA; 2010.

10- Seedhouse E. Space X: Making commercial spaceflight a reality. New York: Springer; 2013. pp. 156-165.

11- Austin BL, Heister SD, Anderson WE. Characterization of pintle engine performance for nontoxic hypergolic bipropellants. Journal of Propulsion and Power. 2005;21(4):627-635.

12- Bedard M, Feldman T, Rettenmaier A, Anderson W. Student design/build/test of a throttleable LOX-LCH4 thrust chamber. 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 30 July 2012-01 August 2012, Atlanta, Georgia. Reston: AIAA; 2012.

13- Yue CG, Chang XL, Yang SJ, Zhang YH. Numerical simulation of a pintle variable thrust rocket Engine. In: Yu Y, Yu Z, Zhao J, editors. Computer Science for Environmental Engineering and EcoInformatics, CSEEE 2011, Communications in Computer and Information Science. 159th vol. Berlin: Springer; 2011.

14- Sakaki K, Kakudo H, Nakaya S, Tsue M, Isochi H, Suzuki K, et al. Optical measurements of ethanol/liquid oxygen rocket engine combustor with planar pintle injector. 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, July 27-29 2015, Orlando, FL. Reston: AIAA; 2015.

15- Sakaki K, Kakudo H, Nakaya S, Tsue M, Kanai R, Suzuki K, et al. Performance evaluation of rocket engine combustors using ethanol/liquid oxygen pintle injector. 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, July 25-27, 2016, Salt Lake City, UT. Reston: AIAA; 2016.

16- Son M, Yu K, Koo J, Kwon OC, Kim JS. Injection condition effects of a pintle injector for liquid rocket engines on atomization performances. Journal of ILASS-Korea. 2015;20(2):114-120.

17- Son M, Yu K, Koo J, Kwon OC, Kim JS. Effects of momentum ratio and weber number on spray half angles of liquid controlled pintle injector. Journal of Thermal Science. 2015;24:37-43.

18- Yu K, Son M, Koo J. Effects of opening distance on liquid-gas spray of pintle injector under atmospheric condition. Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences. 2015;43(7):585-592. [Korean]

19- Son M, Radhakrishnan K, Koo J, Kwon OC, Kim HD. Design Procedure of a movable pintle injector for liquid rocket engines. Journal of Propulsion and Power. 2017;33(4).

20- Olyaei Gh, Kebriaee A. Experimental study of liquid sheet breakup in cross flow. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(4):845-853. [Persian]

سطح مقطع مجرای خارجی سوخت (mm^2)	A_o
سطح مقطع معیار در رابطه ۴	A_n
نسبت مومنتم هوا به آب	TMR
عدد وبر	We
سرعت (m/s)	V
قطر (mm)	D
قطر (mm)	d
ضریب تخلیه	C_d
علامه یونانی	
چگالی (kg/m^3)	ρ
لزجت دینامیکی (kg/m.s)	μ
کشش سطحی	σ
زاویه پاشش	α

منابع

1- Lefebvre A. Atomization and sprays. Boca Raton: CRC Press; 1989.

2- Gill GS, Nurick WH. Liquid Rocket Engine Injectors. Washington: NASA; 1976. Report no: NASA-SP-8089. Contract no: NAS3-12014.

3- Casiano MJ, Hulka JR, Yang V. Liquid-propellant rocket engine throttling: A comprehensive review. Journal of Propulsion and Power. 2010;26(5):897-923.

4- Gilroy R, Sackheim R. The Lunar module descent engine-a historical summary. 25th Joint Propulsion Conference, 12-16 July 1989, Monterey, CA, USA. Reston: AIAA; 1989.

5- Betts EM, Jr Frederick RA. A historical systems study of liquid rocket engine throttling capabilities. 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 25-28 July 2010, Nashville, TN. Reston: AIAA; 2010.

6- Dressler GA, Bauer JM. TRW pintle engine heritage and performance characteristics. 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 24-28 July 2000, Las Vegas, NV, USA. Reston: AIAA; 2000.

7- Gavitt KR, Mueller TJ. Testing of the 650 kJf LOX/LH2 low cost pintle engine. 37th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 08-11 July 2001, Salt Lake City, UT, USA. Reston: AIAA; 2001.

8- Calvignac J, Dang L, Tramel TL, Passeur L. Design and testing of non-toxic RCS thrusters for second generation reusable launch vehicle. 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 20-23 July 2003, Huntsville, Alabama. Reston: AIAA; 2003.

9- Gromski JM, Majamaki AN, Chianese SG, Weinstock VD, Kim TS. Northrop grumman TR202 LOX/LH2 deep