

تحلیل تجربی مشخصات اسپری خروجی از یک انژکتور جریان چرخشی

سید مصطفی حسینی علی پور*

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
دانشجوی دکترای، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

حدیثه کریمایی

فتح اله امی

چکیده

در این مقاله چند نمونه از یک نوع انژکتور جریان چرخشی با چهار ورودی مماسی که به روش بایول طراحی و با روش تراشکاری ساخته شده است تست شده است. این انژکتور به صورت جریان چرخشی می باشد و به سبب افت فشار در محور میانی انژکتور، هوای بیرون به داخل انژکتور مکیده شده و یک حفره هوا در مرکز انژکتور شکل می گیرد. بنابراین افشانه یک پایه اما با عملکرد دوفازی می باشد و از این رو چتر پاششی به صورت یک مخروط توخالی با لایه نازک ایجاد می نماید. تست های عملکردی به منظور تعیین مشخصات عملکردی این انژکتورها و تشخیص انژکتور قابل قبول در آزمایشگاه پیشران انجام شده است. مراحل و روش تست های عملکردی به منظور کنترل کیفیت ساخت انژکتورها به طور کامل بیان گردیده و پارامترهای مهم معرفی شده اند. نتایج حاصل از تست تجربی با مقادیر در نظر گرفته شده در مرحله طراحی مقایسه شده است. به این ترتیب می توان انژکتور مناسب از نظر ساخت و نزدیک ترین به پیش بینی طراحی را مشخص نمود. از نتایج تست انژکتور انتخاب شده می توان برای صحت گذاری نتایج عددی و همچنین انجام تست های میکروسکوپی انژکتور استفاده نمود. نتایج این بررسی ها در مقاله به تفصیل ارائه و بحث گردیده است.

واژه های کلیدی: انژکتور جریان چرخشی، طراحی انژکتور، دستگاه تست اسپری، عملکرد انژکتور، مخروط اسپری.

Experimental Analysis of the Spray Characteristics of a Swirl Injector

S. M. Hosseinalipour

H. Karimaei

F. Ommi

Mechanical engineering faculty, Iran University of science and technology, Tehran, Iran

Mechanical engineering faculty, Iran University of science and technology, Tehran, Iran

Mechanical engineering faculty, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran

Abstract

In this paper, 5 samples of a swirl injector with tangential inlets, which have been designed and manufactured by using machining process, have been tested. In the mentioned injector due to pressure drop inside it, an air core forms in injector center. Its operation is as two-phase and therefore it forms a hollow cone spray in the shape of very thin layer. In order to detect acceptable injector among them, characterization tests have been done in propulsion laboratory for all sample injectors. Methods of experimental characterization have been described in detail to control manufacturing quality in current paper and important parameters introduced. Experimental results have been compared with design points. Finally, one injector has been selected as a suitable and nearer to theoretical design injector. Using the selected injector in microscopic tests can be applied to validation of future numerical results. The results are discussed in detail in the paper.

Key word: Swirl injector, injector design, atomization setup, characterization, spray cone.

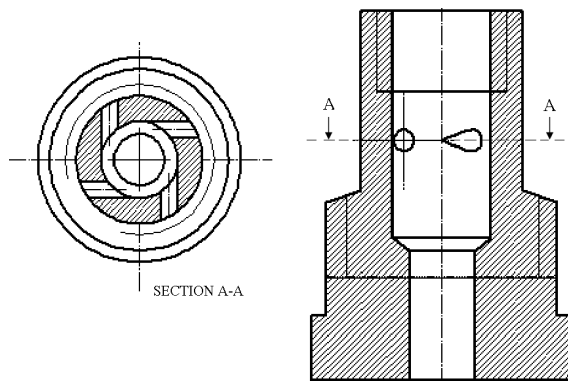
۱-مقدمه

فرآیند شکل گیری حفره هوا و توسعه آن با زمان درون یک انژکتور با دو ورودی مماسی به صورت تجربی و عددی توسط دش ۲۰۰۱ [۲] و همکاران مطالعه شده است. آزمایش ها با نازل های شیشه ای و آب انجام شده است. شبیه سازی با استفاده از روش حجم محدود به صورت دوبعدی و با تقارن محوری با شبکه بندی بی سازمان انجام شده است. نتایج نشان می دهد که شکل حفره هوا و زاویه لایه سیال هنگام خروج از اریفیس برای انژکتور به خوبی شبیه سازی شده و با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارد.

برتومی و همکاران ۲۰۰۱ [۳] با استفاده از تکنیک تصویربرداری به توصیف شکست لایه سیال حلقوی و صفحه ای پرداختند. آنها نشان دادند که در لایه سیال حلقوی بدون حضور جریان هوا، اثرات کشش سطحی تمایل به بستن استوانه سیال دارد و از طرفی با حضور جریان خیلی کم سرعت هوا، حباب های بزرگی در خروجی انژکتور مشاهده می شوند.

سلام ۲۰۰۲ [۴] شکست اولیه توربولانسی جت را به کمک روش های تجربی مورد بررسی قرار داد. پارک و لی ۲۰۰۳ [۵] و ونگ ۲۰۰۳

فرآیند اتمیزاسیون را می توان بصورت فرآیندی که در آن حجمی از مایع به تعداد زیاد قطره تبدیل می شود تعریف کرد. اتمایزهای چرخان که اسپری مخروط توخالی تولید می کنند، عموماً در راکت های سوخت مایع استفاده می شوند. این اتمایزها یک اسپری به صورت لایه نازک سیال که به علت چرخش اولیه به صورت یک صفحه مخروطی شکل توخالی پخش می شود را تولید می کنند. وارد شدن سیال با سرعت زاویه ای بالا به درون محفظه چرخش اتمایزر، باعث ایجاد چرخش در آن می گردد که در نتیجه در قسمت مرکزی فضای درونی انژکتور، ناحیه ای عاری از سیال یا به اصطلاح حفره هوا به وجود می آید و فیلم سیال نازک به دیواره می چسبد. لایه سیال و زاویه اسپری از مهمترین پارامترها در تعیین توزیع پاشش قطرات می باشند. اطلاع از مکانیزم اتمیزاسیون، زاویه اسپری، ضخامت لایه سیال، طول شکست و غیره، برای مثال جهت فرآیند احتراق و پایداری در محفظه مورد استفاده قرار می گیرد. [۱]



شکل ۱ - شماتیک انژکتور طراحی شده



شکل ۲ - دو نما از نمونه‌ای از انژکتور ساخته شده به همراه پیچ آب‌بند انتهایی انژکتور

جدول ۱ - ابعاد مهم انژکتور

پارامتر	مقدار
طول راهه‌های ورودی	۲/۷ میلی‌متر
قطر راهه‌های ورودی	۱/۲۷ میلی‌متر
طول نازل خروجی	۸ میلی‌متر
قطر نازل خروجی	۴ میلی‌متر

در آزمایشگاه معمولاً انژکتور را با آب تست می‌کنند لذا مشخصات سیال در محاسبات همان مشخصات آب است که می‌بایست با در نظر گرفتن دمای محیط آزمایشگاه بکار رود. این نوع انژکتور زمانی که در محفظه احتراق استفاده می‌گردد به عنوان انژکتور اکسیدایزر^۳ استفاده می‌شود. از آنجا که خصوصیات اکسیژن مایع به آب نزدیک است معمولاً از آب برای انجام تست سرد انژکتور استفاده می‌گردد. معمولاً در آزمایشگاه دما برابر ۲۰ درجه سانتیگراد است.

ضریب دبی و زاویه اسپری در آزمایشگاه قابل تعیین است. با توجه به مشخصات معلوم انژکتور که بر مبنای محاسبات تئوری طراحی و ساخته شده است و مقدار معلوم دبی از آزمایش، به کمک رابطه زیر [۹]:

$$\dot{m}_{\phi D} = \mu_{\phi} F_c \sqrt{2 \Delta p_{\phi} \rho^*} \quad (1)$$

^۳ Oxidizer

[۶] با استفاده از سیستم PDPA سرعت و قطر قطرات اسپری را اندازه‌گیری کردند. همچنین نقید و همکاران ۲۰۱۱ [۷] مطالعه تحلیلی و تجربی روی شکست لایه مایع انجام دادند و اثرات شکل انژکتور و فشار اسپری را بر مشخصه‌های لایه مایع برای چهار انژکتور مختلف بررسی کردند.

در مطالعه حاضر، یک انژکتور جریان چرخشی با ورودی‌های مماسی که بر اساس روش بایول^۱ [۸] طراحی و ساخت داخل شده است، مورد تست قرار می‌گیرد. به دلیل خطاهای ساخت که در این ابعاد کوچک ممکن است پیش بیاید و همچنین تکرار ناپذیر بودن صافی سطح داخلی نازل انژکتور، پنج نمونه یکسان از یک نقشه تهیه شده تا با انجام تست‌های عملکرد، انژکتور مناسب و نزدیک به پیش-بینی طراحی برای انجام تست‌های میکروسکوپی^۲ انژکتور شناسایی گردد.

۲- مشخصات انژکتور مورد مطالعه

اساس طراحی انژکتورهای جریان چرخشی بر مبنای گردش سیال مایع به دور محفظه انژکتور می‌باشد که برای انژکتور مورد مطالعه به صورت مماسی است. همانطور که قبلاً گفته شد، انژکتور مورد مطالعه بر اساس روش بایول طراحی شده است. این انژکتور تک پایه می‌باشد و فقط ورودی برای یک نوع سیال را دارد اما عملکرد آن به دلیل تشکیل حفره هوا درون آن به صورت دوفازی می‌باشد. این انژکتور دارای دبی جرمی ۰/۰۶ kg/s در اختلاف فشار ۴/۵ بار با زاویه مخروط اسپری ۱۰۰ درجه می‌باشد. ۵ نمونه از این انژکتور ساخته شده است. شمایی از این انژکتور در نرم‌افزار Solid Work ترسیم شده که به صورت شکل ۱ می‌باشد. در شکل ۲ تصویری از انژکتور ساخته شده به همراه پیچ آب‌بند انتهایی انژکتور، قابل مشاهده می‌باشد. در جدول ۱ ابعاد مهم این انژکتور، ارائه شده‌اند.

۳- تست‌های عملکرد

در این بخش روش‌های بررسی عملکرد انژکتور (شامل تعیین منحنی مشخصه، توزیع حجمی اسپری و زاویه مخروط اسپری) به منظور کنترل عملکرد آنها، معرفی شده‌اند و پس از معرفی سامانه تست اسپری، نتایج تجربی ارائه شده‌اند.

۳-۱- روش بررسی

کنترل عملکرد انژکتورها در آزمایشگاه پیشران‌ش دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است. به کمک انجام این تست‌ها در صورت نیاز، انژکتور مورد مطالعه تصحیح می‌گردد. پارامترهای اصلی و مشخصه‌های عملکردی طراحی عبارتند از [۸ و ۹]:

- ✓ دبی جرمی عبوری انژکتور $\dot{m}_{\phi}$ به علت اختلاف فشار دو طرف آن (Δp)
- ✓ زاویه راس مخروط اسپری (2α)
- ✓ پاشش یکنواخت سیال در محفظه یا ثبات دبی پاشش
- ✓ پاشش یکسان سیال روی چتر اسپری

^۱ Bayvel

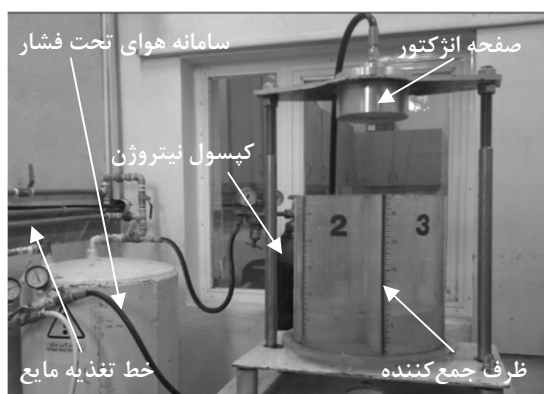
^۲ Microscopic

معمول‌ترین تست عملکرد، اندازه‌گیری دبی جرمی جریان بر حسب فشار است. این منحنی برای هر تعداد انژکتوری که ساخته شده است باید ترسیم گردد و با هم مقایسه گردند. هرکدام که تمایز زیادی با بقیه داشت را باید از رده خارج فرض نمود. پارامترهای دیگر، زاویه مخروط اسپری و توزیع جرمی یا حجمی (برای بررسی تقارن اسپری) باشد. بنابراین به یک روشی باید توزیع جرمی یا حجمی را درآورد که همانطور که قبلاً در مورد آن بحث گردید می‌توان به کمک یک کلکتور چند قطاعی و کلکتور با دوایر هم‌مرکز و یا یک مجموعه از لوله‌های آزمایش که در محل‌های معینی نصب و اسپری را جمع می‌کنند، این کار را انجام داد. سپس هرکدام از لوله‌های آزمایش که اسپری را جمع کرده‌اند را باید وزن کرده و یا اندازه‌گیری حجم نمود (با رعایت ملاحظات اندازه‌گیری) و در صورتی که از کلکتور چند قطاعی و همچنین با دوایر هم‌مرکز استفاده می‌شود باید وزن هر کدام از قطعات را اندازه‌گیری کرد. با رسم نمودارهای توزیع جرم یا حجم، می‌توان متقارن بودن اسپری را بررسی نمود. این بررسی برای همه انژکتورها انجام می‌گیرد.

چک نمودن تقارن زاویه مخروط اسپری و اندازه‌گیری این زاویه به سادگی با عکس‌برداری امکان‌پذیر و قابل اندازه‌گیری است. بعضی از مشخصه‌ها نظیر ثبات دبی اسپری و شکل کلی اسپری نیز به صورت چشمی قابل رویت هستند و اگر رگه‌ای بر روی چتر پاشش باشد قابل مشاهده است.

۳-۲- دستگاه تست انژکتور

دستگاه تست اتمیزاسیون از پنج مجموعه اصلی سامانه تغذیه مایع (آب)، سامانه هوای تحت فشار، انژکتور و فیکسچر مربوطه (صفحه انژکتور)، ظرف جمع‌کننده مایع و سامانه عکس‌برداری تشکیل شده است. خط تغذیه مایع (آب شهری) علاوه بر مخزن مایع، دارای فیلتر و پمپ فشار بالا نیز می‌باشد. همچنین از یک منبع ذخیره دیگر از جنس استیل به عنوان منبع تحت فشار استفاده می‌شود. یک کپسول نیتروژن با فشار بالا نیز برای تامین فشار منبع ذخیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. تصویر دستگاه تستی که آزمایشات به وسیله آن انجام شده‌اند در شکل ۵ و شماتیک آن در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. بر روی این شکل‌ها قسمت‌های مختلف دستگاه مشخص شده‌اند. در این دستگاه تست، فشار کنترل می‌گردد و دبی را باید اندازه گرفت.



شکل ۵ - تصویر دستگاه تست اتمیزاسیون (آزمایشگاه پیش‌رانش تربیت مدرس)

که در آن $\dot{m}_{\phi D}$ دبی واقعی انژکتور، μ_{ϕ} ضریب دبی، F_c سطح مقطع دهانه خروجی انژکتور، Δp_{ϕ} اختلاف فشار در دو طرف انژکتور و ρ^* چگالی سیال عامل^۱ می‌باشد. ضریب دبی محاسبه می‌شود و با مقدار ضریب دبی طراحی مقایسه می‌گردد. در صورت نزدیک بودن، کیفیت انژکتور از این نظر مورد تایید است.

برای تست یکنواختی اسپری از یک ظرف مدل شعبه‌ای (دوایر متحدالمرکز) به صورت شکل ۳ استفاده می‌شود [۸ و ۹]. این ظرف به صورت لوله‌هایی با قطاع هم‌مرکز و با مساحت مشابه می‌باشد و توزیع چگالی شعاعی اسپری را بدست آورد. همچنین در شکل ۴ یک ظرف مدل هشت قطاعی مشاهده می‌شود که همه قطاع‌های آن یکسان بوده و یکنواختی چگالی محیطی جت سیال را می‌توان به کمک آن بررسی نمود [۸ و ۹]. این جمع‌کننده‌های قطاعی می‌توانند ۶، ۸ یا ۱۰ قطاعی باشند. در تحقیق حاضر از مدل ۶ قطاعی استفاده شده است. غیر یکنواختی محیطی به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$I = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{\bar{q}} \times 100 [\%] \quad (2)$$

که q حجم مایع جمع‌آوری شده در هر قطاع است. به منظور مقایسه-پذیری نتایج، سیال باید در فاصله یکسان از انژکتور و اختلاف فشار مشابه جمع شود. در فاصله زیاد از انژکتور، به خاطر درهم‌کنش گاز-سیال درصد غیر یکنواختی افزایش می‌یابد.

معمولاً در چهار سطح فشار تست انجام می‌گیرد و نمودار توزیع چتر اسپری برای فشارهای مختلف ترسیم می‌گردد [۸ و ۹]. همچنین می‌توان نمودار تجربی دبی جرمی نسبت به فشار در انژکتور را رسم نمود. با افزایش فشار مشاهده می‌گردد که دبی به سمت مقدار ثابتی میل می‌کند.

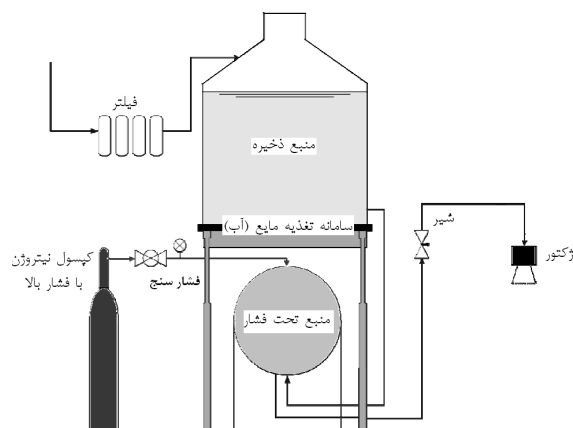


شکل ۳ - جمع‌کننده شعبه‌ای



شکل ۴ - جمع‌کننده قطاعی

¹ Working Fluid



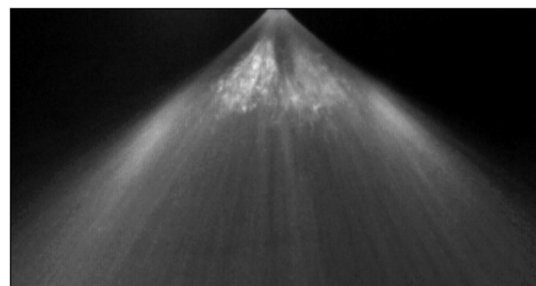
شکل ۶ - شماتیک دستگاه تست اتمیزاسیون

۳-۳- اندازه‌گیری تجربی

همه پنج انژکتور به نوبت بر روی صفحه انژکتور که در شکل ۵ نشان داده شده است، نصب شده‌اند. کنترل پاشش بر اساس تنظیم فشار و سپس باز نمودن شیر کنترل انجام می‌گیرد. دبی‌سنج در سامانه وجود ندارد بنابراین برای اندازه‌گیری دبی جرمی از کرومومتر استفاده شده است و بر اساس حجم مایعی که جمع شده، دبی محاسبه شده است. برای افزایش دقت در محاسبه دبی، بازه زمانی پاشش به اندازه کافی طولانی و در هر مرحله برابر ۱ دقیقه در نظر گرفته شده است. هر کدام از انژکتورها در پنج سطح فشار با دو مرتبه تکرار تست شده‌اند یعنی مجموعاً ۵۰ مرحله تست انجام گرفته است. در هر مرحله از تست، ارتفاع مایع جمع شده در هر قطعه از ظرف شش قطعی ثبت گردیده است و برای اندازه‌گیری زاویه اسپری، عکس گرفته شده است. لازم به ذکر است این تست‌ها از نوع ماکروسکوپیک^۱ هستند.

۳-۳-۱- تقارن اسپری

در شکل ۷ تصویری از اسپری سیال از یک نمونه از انژکتور ساخته شده، قابل مشاهده می‌باشد. شکل ۸ و شکل ۹ محیطی اسپری برای انژکتور شماره ۴ و ۵ را نشان می‌دهد. این توزیع از برآورد حجم سیال جمع شده در هر قطعه در پنج فشار اسپری مختلف (۰/۵، ۱/۵، ۲/۵، ۳/۵ و ۴/۵ بار) بدست آورده شده است.

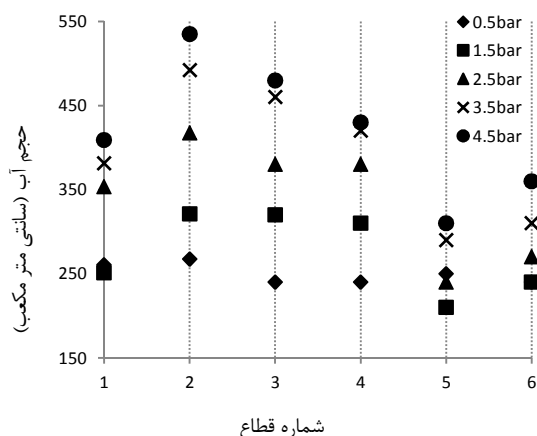


شکل ۷ - تصویر اسپری سیال از انژکتور ساخته شده

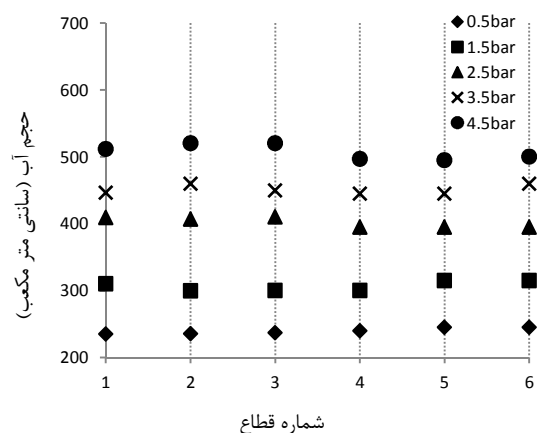
انژکتور ۵ از نظر توزیع محیطی اسپری بسیار غیر یکنواخت می‌باشد و انژکتور ۴ یکنواخت‌ترین توزیع محیطی اسپری را در میان

انژکتورها به خود اختصاص داده است. از اینرو توزیع محیطی اسپری تنها برای همین دو انژکتور ارائه شده است. البته لازم به ذکر است که از بررسی شکل توزیع محیطی اسپری به نظر می‌رسد که انژکتور ۵ دارای یک عیب هندسی در یک سمت انژکتور باشد چرا که در سمت قطعه ۵ و ۶ حجم سیال جمع‌شده نسبت به بقیه قطعه‌ها خیلی کم است. پس از بررسی مشخص گردید این عدم تقارن اسپری در این انژکتور مربوط به اشکال در سوراخکاری یکی از راهه‌های ورودی انژکتور بوده است و بدین ترتیب این انژکتور رد شده است. در شکل ۸ کاملاً واضح است که در هر سطح فشار، حجم سیال هر قطعه تا چه حد با دیگر قطعه‌ها تفاوت دارد. در ادامه بر روی میزان غیریکنواختی اسپری همه انژکتورها به صورت کمی به تفکیک بحث شده است.

بالعکس در شکل ۸ قابل مشاهده است که در هر سطح فشار، حجم مایع جمع شده در کل قطعه‌ها به هم نزدیک است. البته اختلافی که مشاهده می‌شود می‌تواند دلایل متفاوتی داشته باشد. عدم همراستایی محور انژکتور با محور ظرف جمع‌کننده، خطا در جمع کردن کل قطرات در فشارهای بالا (تشکیل مه از قطرات ریز و حرکت به سمت بالا)، خطای مساوی بودن حجم قطعه‌های ظرف جمع‌کننده و درجه‌بندی ظرف جمع‌کننده و مواردی از این قبیل می‌تواند در این اختلاف حجم موثر باشد.



شکل ۸ - توزیع محیطی اسپری برای انژکتور شماره ۵



شکل ۹ - توزیع محیطی اسپری برای انژکتور شماره ۴

¹ Macroscopic

شماره ۴ مقایسه شده است که انطباق خوب و قابل قبولی مشاهده می‌شود. عدم انطباق کامل در فشارهای بالا به دلیل ناتوانی در جمع نمودن کلیه قطرات اسپری می‌باشد. درصد خطای میانگین انحراف منحنی حاصل از آزمون نسبت به پیش‌بینی طراحی در این جدول برای همه سطوح اختلاف فشار نشان داده شده است.

جدول ۴ - دبی جرمی بر حسب اختلاف فشار دو طرف انژکتور

شماره انژکتور	۱	۲	۳	۴	۵
سطح فشار (بار)	نرخ دبی جرمی کل (kg/s)				
۰/۵	۰/۰۲۴۴	۰/۰۲۲۸	۰/۰۲۴۳	۰/۰۲۶۵	۰/۰۲۴۱
۱/۵	۰/۰۳۵۸	۰/۰۲۸۴	۰/۰۳۳۸	۰/۰۳۴۱	۰/۰۳۰۲
۲/۵	۰/۰۴۲۵	۰/۰۳۶۸	۰/۰۴۰۷	۰/۰۴۳۸	۰/۰۳۷۳
۳/۵	۰/۰۴۹۴	۰/۰۴۲۳	۰/۰۴۷۸	۰/۰۴۹۵	۰/۰۴۳۱
۴/۵	۰/۰۵۴۲	۰/۰۴۵۲	۰/۰۵۱۵	۰/۰۵۵۴	۰/۰۴۶۲

مطابق با رابطه (۲) [۹] غیر یکنواختی محیطی (%) برای انژکتورها قابل تعریف می‌باشد. غیر یکنواختی محیطی برای دو نمونه از انژکتورها در همه سطوح فشار تست شده، در جدول ۲ و جدول ۳ ارائه شده است. نتایج نشان داده است که درصد غیر یکنواختی محیطی برای انژکتور ۴ نسبت به بقیه انژکتورها کمتر بوده و زیر ۱۰٪ است. این میزان در انژکتورهای ۱، ۳ و ۵ خیلی زیاد بوده و عملاً این انژکتورها کیفیت مناسبی از نظر ساخت نداشته‌اند و برای تست‌های میکروسکوپی قابل استفاده نیستند.

۳-۳-۲- منحنی دبی جرمی - اختلاف فشار

همانطور که قبلاً گفته شد، با استفاده از کرومومتر و اندازه‌گیری حجم مایع جمع شده در جمع‌کننده، برای هر سطح فشار، دبی جرمی و دبی حجمی قابل محاسبه می‌باشد.

جدول ۲ - درصد غیر یکنواختی محیطی اسپری از انژکتور شماره ۵ در سطوح فشار مختلف

فشار (بار)					
	۰/۵	۱/۵	۲/۵	۳/۵	۴/۵
غیر یکنواختی محیطی (%)	۱۱	۴۰	۵۲	۵۱/۵	۵۳/۵

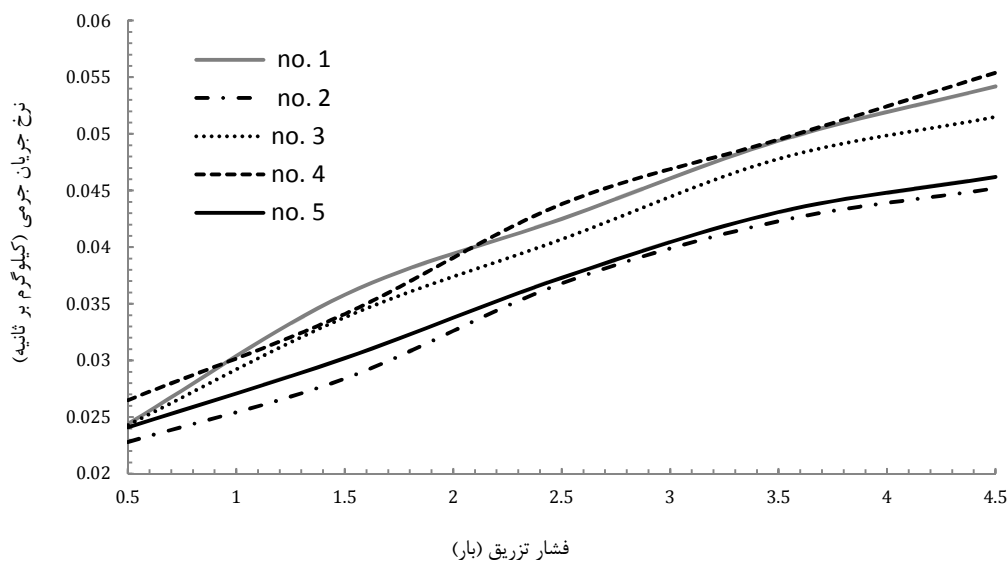
جدول ۳ - درصد غیر یکنواختی محیطی اسپری از انژکتور شماره ۴ در سطوح فشار مختلف

فشار (بار)					
	۰/۵	۱/۵	۲/۵	۳/۵	۴/۵
غیر یکنواختی محیطی (%)	۱۰	۷	۵	۶/۵	۹

در جدول ۴ دبی جرمی بر حسب اختلاف فشار دو طرف انژکتور برای همه انژکتورها محاسبه و ارائه شده است. در شکل ۱۰ نیز دبی جرمی بر حسب فشار برای همه انژکتورها ترسیم گردیده است. همانطور که مشاهده می‌شود منحنی دبی-فشار برای دو انژکتور به هم نزدیک و برای سه انژکتور دیگر نیز به یکدیگر نزدیک است. در انژکتور ۵ و ۲، دبی جرمی از مقدار دبی جرمی طراحی دور است و این می‌تواند حتی ناشی از مشکلی در سوراخکاری راه‌های کوچک ورودی باشد. بنابراین این دو انژکتور از نقطه طراحی دور بوده و از رده خارج تلقی می‌شوند.

۳-۳-۳- مشاهدات

این مشاهدات در خصوص شکل ظاهری اسپری و همچنین زاویه مخروط اسپری می‌باشد. زاویه مخروط اسپری به کمک عکس‌برداری معمولی اندازه‌گیری گردیده است. در جدول ۵ مشاهدات برای هر پنج انژکتور ارائه شده است. در جدول ۶ زاویه مخروط اسپری بر حسب اختلاف فشار دو طرف انژکتور شماره ۴ ترسیم شده است. با افزایش فشار مشاهده می‌شود که زاویه بازشدگی بیشتر شده است. از یک مقدار فشاری به بعد دیگر تغییری در زاویه مخروط ایجاد نخواهد شد. در جدول ۷ دبی جرمی تئوری بر حسب فشار با همین پارامتر از انژکتور



شکل ۱۰ - نمودار دبی جرمی بر حسب اختلاف فشار برای هر پنج انژکتور

جدول ۵ - مشاهدات برای پنج انژکتور

مشاهدات					فاکتورها
انژکتور ۵	انژکتور ۴	انژکتور ۳	انژکتور ۲	انژکتور ۱	
×	✓	✓	✓	×	تقارن زاویه مخروط (برابر بودن دو نیم زاویه)
✓	×	✓	×	✓	رگه‌دار بودن مخروط اسپری
×	✓	✓	✓	✓	تشکیل پوسته کامل سیال در فشارهای کم
۹۸	۱۰۰	۱۰۱	۱۰۱	۹۸	اندازه زاویه مخروط (درجه) در فشار ۳.۵ بار
۵	۱	۱	۱	۴	اختلاف دو نیم زاویه مخروط اسپری (درجه)

✓ به معنای بله و X به معنای خیر می‌باشد.

جدول ۶ - زاویه مخروط اسپری بر حسب اختلاف فشار دو طرف

انژکتور شماره ۴					
اختلاف فشار (بار)	۰/۵	۱/۵	۲/۵	۳/۵	۴/۵
زاویه مخروط اسپری (درجه)	۸۹	۹۳	۹۷	۱۰۰	۱۰۱/۵

جدول ۷ - درصد خطای میانگین دبی جرمی بر حسب اختلاف

فشار برای انژکتور شماره ۴ نسبت به پیش‌بینی طراحی					
اختلاف فشار (بار)	۰/۵	۱/۵	۲/۵	۳/۵	۴/۵
خطا %	۷/۸	۰/۱	-۰/۳	-۴/۸	-۶/۱

با توجه به مشخصات معلوم انژکتور که بر مبنای محاسبات تئوری، طراحی و ساخته شده است و مقدار معلوم دبی از آزمایش، به کمک رابطه (۱) ضریب دبی محاسبه می‌گردد که برای انژکتور شماره ۴ حدود ۸٪ با محاسبات طراحی فاصله دارد و قابل قبول می‌باشد. نهایتاً با توجه به بحث‌های فوق، انژکتور شماره ۴ به عنوان انژکتوری که نزدیکترین مشخصه‌های خروجی جریان را به انژکتور طراحی شده دارد تشخیص داده شده است که مناسب برای انجام تست‌های مشخصات میکروسکوپی اسپری می‌باشد.

۳-۳-۴- تحلیل خطای اندازه‌گیری

تحلیل خطای^۱ آزمایش بر مبنای فرمول ریاضی برای اندازه‌گیری دبی به صورت زیر است:

$$Q = \frac{V}{t} \rightarrow \log Q = \log V - \log t \quad (3)$$

برای اندازه‌گیری درصد خطای آزمایش بایستی از معادله فوق مشتق گرفت:

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{dV}{V} + \frac{dt}{t} \quad (4)$$

که dV و dt دقت اندازه‌گیری مقادیر و یا کمترین مقداری است که با ابزارهای حجم و زمان‌سنجی می‌توان اندازه گرفت که مطابق جدول ۸ می‌باشد.

جدول ۸ - خطای پارامترهای قابل اندازه‌گیری آزمایش

متغیر	دقت اندازه‌گیری	میزان اندازه‌گیری هر مرحله	منبع خطا
حجم	۱۰ CC	۳۰۰ CC (میانگین)	ظرف مدرج
زمان	۰/۵ S	۶۰ S	عکس‌العمل انسان

لذا خطای اندازه‌گیری دبی به صورت زیر است:

$$\frac{dV}{V} + \frac{dt}{t} = \frac{10}{300} + \frac{0.5}{60} \cong 4\% \quad (5)$$

بنابراین حدوداً ۴ درصد خطا در اندازه‌گیری دبی وجود دارد.

۴- نتیجه‌گیری

همواره جهت صحت‌گذاری نتایج شبیه‌سازی یک اسپری، به مشخصات یک انژکتور واقعی شامل الگوی پاشش، زاویه مخروط

اسپری، منحنی دبی جرمی بر حسب اختلاف فشار دو سر انژکتور نیاز است. برای این منظور یک انژکتور جریان چرخشی با چهار ورودی مماسی و از نوع یک‌پایه (با عملکرد دوفازی)، که به روش بایول طراحی شده و پنج نمونه از آن ساخته شده است، تست تجربی شده است. انژکتور به صورت جریان چرخشی می‌باشد و چتر پاششی به صورت یک مخروط توخالی با لایه نازک ایجاد می‌نماید. این نوع انژکتورها عموماً در راکت‌های سوخت مایع استفاده می‌شوند. عموماً به منظور سهولت و ایمنی در انجام تست‌های سرد از آب استفاده می‌شود.

تست‌های عملکردی به منظور بررسی کارکرد این انژکتورها و تشخیص انژکتور مناسب (نزدیک به نقطه طراحی) در آزمایشگاه انجام شده است. مراحل و روش این بررسی و اندازه‌گیری تجربی به طور کامل در متن بیان شده است و با مقداری که در مرحله طراحی در نظر گرفته شده بود مقایسه شده است. آنچه از دیدگاه کاربردی مورد توجه است، منحنی دبی جرمی بر حسب اختلاف فشار دو سر انژکتور، زاویه مخروط اسپری در خروج از انژکتور و برخی مشخصه‌های دیگر است که برای انژکتور مناسب از لحاظ کیفیت ساخت باید نتایج تجربی با مشخصه‌های طراحی همخوانی خوبی داشته باشد که این امر محقق شده است.

۵- مراجع

- [1] Hosseinalipour S.M., Karimaei H., prediction of air core and injection angle of a swirl injector using 3D analysis, 2nd proceeding of gas turbine, GTC92-20-01, Iran, Tehran, 2012. (in persian)
- [2] Dash S.K., Halder M.R., Peric M., and Som S.K., Formation of Aircore in Nozzles With Tangential Entry, Journal of Fluid Engineering, Vol. 123, December 2001.
- [3] Berthoumieu P. and Lavergne G., Video Techniques Applied to the Characterization of Liquid Sheet Breakup, Journal of Visualization, Vol. 4, No.3, pp. 267-275, 2001.
- [4] Sallam K.A., Dai Z. and Faeth, G.M., Liquid Breakup at the Surface of Turbulent Round Liquid Jets in Still Gases, International Journal of Multiphase Flow 28, pp. 427-449, 2002.
- [5] Park S. W., Lee C. S., MACROSCOPIC STRUCTURE AND ATOMIZATION CHARACTERISTICS OF HIGH-SPEED DIESEL SPRAY, International Journal of Automotive Technology, Vol. 4, No. 4, pp. 157-164, 2003.
- [6] Hwang J. S., Ha J. S. and No S. Y., Spray characteristics of DME in conditions of common rail injection system (II). Int. J. Automotive Technology 4, 3, pp. 119-124, 2003.
- [7] El-Sayed Negeed R., Hidaka S., Kohno M., Takata Y., Experimental and analytical investigation of liquid sheet breakup characteristics, International Journal of Heat and Fluid Flow 32, pp. 95-106, 2011.
- [8] Bayvel L., Orzechovski z., liquid atomization, Taylor&Francis, 1993.
- [9] Ommi F., space propulsion and rocket, besat publication, 2009. (in persian)

¹ Error Analysis