



Experimental study and 3D numerical simulation of the effect of pressure ratio on flow divergence efficiency of a linear aerospike nozzle

Navid Heshmati^{1*}, Zahra Hosseinipour²

¹ Faculty of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

² Faculty of New Technologies and Aerospace Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Nozzle
Supersonic Flow
Conical Nozzle
Aerospike Nozzle
Nozzle Divergence Efficiency

ABSTRACT

In this study, the effect of the nozzle pressure ratio on the divergence efficiency of a linear aerospike nozzle has been investigated experimentally and numerically. To compare with conventional nozzles, a conical nozzle with the same design conditions as the Aerospike nozzle was used. The used nozzles are the type of plate nozzles, and the supersonic flow coming out of them was investigated by Schilleren's imaging technique. The comparison of Schilleren's experimental images with the results of the numerical solution showed the accuracy of the three-dimensional numerical simulation. The effect of the nozzle pressure ratio on the distribution of the supersonic flow areas of the nozzle outlet was observed. The results showed that the deviation of the flow from the axial mode with increasing the pressure ratio from 3 to 9 for the conical nozzle is three times more than the Aerospike nozzle. Also, by using the divergence efficiency relationship, it was shown that the efficiency of the Aerospike nozzle has fewer changes with changes in pressure ratio, and in values much lower than the design pressure ratio, it has a favorable efficiency of about 98%. The adaptability of the linear aerospike nozzle in changes in the pressure ratio is greater than that of the conical nozzle, so that reducing the pressure ratio by half of the design pressure ratio in the conical nozzle reduces the divergence efficiency by 10%, while this amount for the aerospike nozzle is less than 3 percent.



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* Corresponding author

E-mail address: N.heshmati@email.kntu.ac.ir (N. Heshmati)

Received 1 April 2024; Accepted 4 May 2024

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: Heshmati N, Hosseinipour Z. Experimental study and 3D numerical simulation of the effect of pressure ratio on flow divergence efficiency of a linear aerospike nozzle, The Journal of Engine Research. 2023 Nov 22;70(3):53-61. doi: [10.22034/ER.2024.2025793.1045](https://doi.org/10.22034/ER.2024.2025793.1045)

مطالعه تجربی و شبیه‌سازی عددی سه بعدی تأثیر نسبت فشار بر بازده واگرایی جریان یک افشانه گوه‌ای خطی

نوید حشمتی^{۱*}، زهرا حسینی‌پور^۲

^۱ دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
^۲ دانشکده فناوری‌های نوین و مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

در این مطالعه تأثیر نسبت فشار افشانه بر بازدهی واگرایی یک افشانه گوه‌ای خطی به طور تجربی و عددی بررسی شده است. برای مقایسه با افشانه‌های متداول یک افشانه مخروطی با شرایط طراحی مشابه افشانه گوه‌ای استفاده شد. افشانه‌های مورد استفاده از نوع افشانه‌های صفحه‌ای بوده که جریان فراصوت خروجی از آنها توسط روش تصویربرداری شیلین بررسی شد. مقایسه تصاویر تجربی شیلین با نتایج حل عددی صحت شبیه‌سازی عددی سه بعدی انجام گرفته را نشان داد. تأثیر نسبت فشار افشانه بر توزیع نواحی جریان فراصوت خروجی افشانه مشاهده شد. نتایج نشان داد انحراف جریان از حالت محوری با افزایش نسبت فشار از مقدار ۳ تا ۹ برای افشانه مخروطی سه برابر بیشتر از افشانه گوه‌ای است. همچنین با بهره‌گیری از رابطه بازدهی واگرایی نشان داده شد که بازدهی افشانه گوه‌ای تغییرات کمتری با تغییرات نسبت فشار دارد و در مقادیر بسیار کمتر از نسبت فشار طراحی نیز دارای بازدهی مطلوب حدود ۹۸ درصد است. تطبیق پذیری افشانه گوه‌ای خطی در تغییرات نسبت فشار نسبت به افشانه مخروطی بیشتر بوده به طوری که کاهش نسبت فشار به مقدار نیمی از نسبت فشار طراحی در افشانه مخروطی سبب کاهش بازدهی واگرایی تا ۱۰ درصد می‌شود در حالی که این مقدار برای افشانه گوه‌ای کمتر از ۳ درصد است.

اطلاعات مقاله

کلیدواژه‌ها:

افشانه
جریان فراصوت
افشانه مخروطی
افشانه گوه‌ای
بازده واگرایی افشانه



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* نویسنده مسئول

پست الکترونیکی: N.heshmati@email.kntu.ac.ir (نوید حشمتی)

دریافت ۱۳ فروردین ۱۴۰۳؛ پذیرش ۱۵ اردیبهشت ۱۴۰۳

شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۲۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

Cite this article: Heshmati N, Hosseinipour Z. Experimental study and 3D numerical simulation of the effect of pressure ratio on flow divergence efficiency of a linear aerospike nozzle, The Journal of Engine Research. 2023 Nov 22;70(3):53-61. doi: 10.22034/ER.2024.2025793.1045

۱- مقدمه

یک افشانه فراصوت ابزاری جهت تبدیل انرژی یک جریان گاز به انرژی جنبشی است که انرژی جنبشی خروجی افشانه عموماً تحت عنوان مفهوم رانش ایجاد شده توسط افشانه بررسی می‌گردد. عوامل زیادی بر این فرآیند تبدیل انرژی در افشانه تأثیر می‌گذارند که سبب ایجاد مفهوم بازدهی افشانه می‌گردد که این بازده معیاری جهت مقایسه و بررسی شرایط عملکردی افشانه در فرآیند ایجاد رانش است. بازده افشانه خود می‌تواند تابعی از حاصلضرب چندین ضریب بازدهی خاص مربوط به افشانه باشد که یکی از آنها ضریب بازده واگرایی افشانه^۱ است. بازده واگرایی بیانگر نسبت گشتاور محوری جریان خروجی افشانه به گشتاور محوری جریان در حالت افشانه آرمانی است که تمام جریان خروجی آن محوری است. با در نظر گرفتن شرایط عملکردی یک افشانه آرمانی که بردار خروجی نیروی رانش عمود بر صفحه خروجی افشانه است واگرایی جریان سبب کاهش بازدهی افشانه می‌گردد. واگرایی جریان خروجی افشانه از حالت معیار عموماً به دلیل کاهش فشار محیط افشانه اتفاق می‌افتد که کاهش فشار محیط و به بیانی افزایش نسبت فشار افشانه^۲ سبب انبساط بیشتر جریان در خروجی شده و واگرایی جریان در خروجی افشانه را تشدید می‌کند. یکی از موارد کاهش بازدهی افشانه جدایش جریان از دیواره نیز است [۱]. یکی از راه‌های مقابله با کاهش بازدهی واگرایی استفاده از افشانه‌های تطبیق پذیر با ارتفاع و محیط نظیر زنگوله‌ای دوگانه^۳ و گوه‌ای^۴ است. در مقاله حاضر تأثیر تغییرات نسبت فشار افشانه بر مقدار واگرایی جریان یک افشانه گوه‌ای خطی بررسی می‌گردد. جهت مقایسه افشانه گوه‌ای با افشانه‌های متداول یک افشانه مخروطی نیز در شرایط مشابه آزمایش می‌شود تا بین دو طرح افشانه نیز مقایسه‌ای انجام پذیرد. افشانه‌های مورد استفاده دارای دو ویژگی می‌باشند که یکی استفاده از جریان گاز سرد و دیگری مقطع خروجی چهارضلعی است که در ادامه موارد اهمیت و کاربردهای هر ویژگی توضیح داده می‌شود.

یکی از گسترده ترین دسته بندی‌های افشانه‌های فراصوت افشانه‌هایی با جریان گاز غیراحتراقی اند که اصطلاحاً تحت عنوان افشانه جریان گاز سرد شناخته می‌شوند. در مطالعه دامیترسکو^۵ و همکاران [۲]، تأثیر هندسه بر روی عملکرد افشانه سرد بررسی شد. در این مطالعه دو نوع هندسه متفاوت در سه شرایط دمای ورودی متفاوت بررسی شده و نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که کاهش دمای ورودی منجر به کاهش عملکرد افشانه می‌شود. افشانه با طرح دیواره زنگوله‌ای^۶ در شرایط طراحی عملکرد بهتری دارد حتی اگر عدد ماخ در افشانه مخروطی بیشتر از افشانه زنگوله‌ای در همان شرایط باشد. یکی از متداول ترین روش‌های طراحی نقشه افشانه زنگوله‌ای روش طراحی افشانه راتو^۷ است [۳]. روش طراحی افشانه راتو با به کارگیری حساب تغییرات روشی برای طراحی نقشه دیواره یک افشانه با رانش بهینه به دست می‌دهد.

یکی دیگر از دسته بندی‌های کلی افشانه‌های فراصوت افشانه‌هایی با سطح مقطع خروجی چهارضلعی اند که به اصطلاح تحت عنوان افشانه‌های صفحه ای یا دو بعدی شناخته می‌شوند [۴-۷]. این افشانه‌ها در کاربردهایی نظیر مهار بردار رانش افشانه به دلیل تطابق بهتری که خروجی جریان این افشانه‌ها با سازوکارهای تغییر بردار رانش داراست استفاده می‌شوند. در مطالعه وو و دانگ کیم^۸ [۸] سیستم مهار بردار رانش در افشانه فراصوت دوبعدی بررسی شد و مشاهده شد نسبت شار گشتاور تزریق تأثیر قابل توجهی روی عملکرد سیستم مهار بردار رانش دارد. افشانه‌های دو بعدی در مواردی مانند رانشگرهای الکتریکی و پلاسمایی فضایی نیز کاربرد دارند [۹، ۱۰]. در افشانه‌های دو بعدی در کنار شکل دیواره دو بعدی افشانه نسبت منظری افشانه نیز مطرح می‌گردد. نسبت منظری افشانه

1 Divergence Coefficient

2 Nozzle Pressure Ratio

3 Dual Bell

4 Aerospike

5 Dumitrescu

6 Bell Nozzle

7 Rao

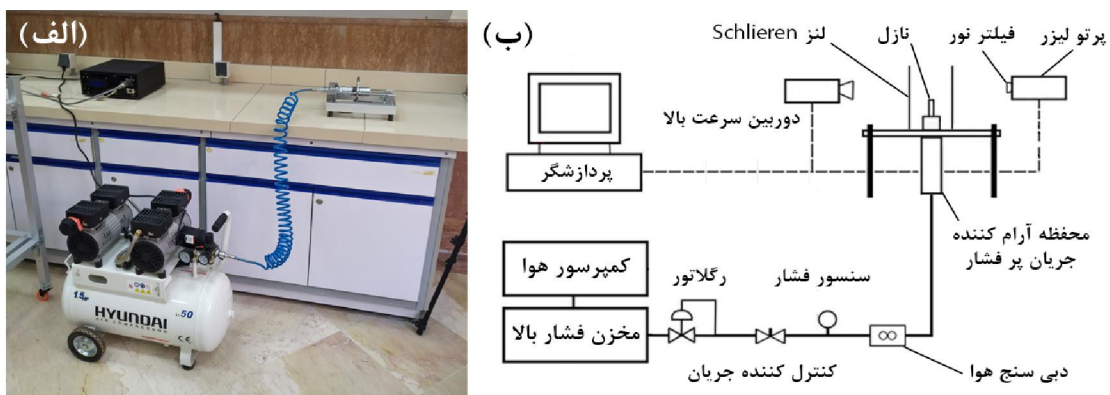
8 Wu and Dong Kim

برابر با عمق افشانه بر اندازه ارتفاع خروجی افشانه است. تحقیق تجربی موروگسان^۱ و همکاران [۱۱] که درباره جریان فواره یک افشانه دو بعدی با ماخ ۱٫۵ از یک افشانه همگرا-واگرا با نسبت منظری برابر با ۲ و ۳ است به وضوح نشان می‌دهد که تأثیر نسبت منظری در میدان جریان پیرامون خروجی افشانه غالب است. مطالعه بوگادی و اسریدهار^۲ [۱۲] نشان می‌دهد شیب‌های انبساطی در خروجی می‌توانند به عنوان محرک‌های اختلاط جریان استفاده شوند تا فاصله طولی هسته جریان فواره فراصوت را کاهش دهند.

۲- تجهیزات آزمایش تجربی

۲-۱- مجموعه دستگاه آزمایش تجربی

در شکل ۱ مجموعه دستگاه آزمایش تجربی نشان داده شده است. جریان گاز توسط تنجار در مخزن فشار قوی ذخیره شده و جریان پرفشار بالادست افشانه را تأمین می‌کند. جریان در خروجی افشانه پس از گذر از شیر قطع و مهار کننده جریان و فشارسنج وارد محفظه آرامش جریان متصل به افشانه فراصوت می‌شود. محفظه آرامش بالادست افشانه به نوعی نقش آرام کننده و یکنواخت کننده جریان پرفشار خروجی از افشانه را انجام می‌دهد. افشانه‌ها توسط اتصال پیچ به محفظه آرامش متصل می‌شوند تا آزمایش تجربی مربوط به هر کدام انجام شود. اندازه‌گیری شار هوا توسط شارسنج انجام می‌شود که بیشینه دامنه اندازه‌گیری آن ۹۴ لیتر بر دقیقه بوده و حداکثر خطای آن نیز ۲ درصد (در بیشینه مقدار اندازه‌گیری) است. اندازه‌گیری فشار هوای جریان توسط گیج فشار انجام می‌شود که دامنه اندازه‌گیری آن ۰٫۱ بار تا ۱۰ بار بوده و حداکثر خطای آن ۲ درصد است. مهار مقدار شار هوای عبوری توسط تنظیم‌کننده جریان به نام HPC-312 ساخت شرکت HPC انجام می‌شود که عمل تغییر شار جریان عبوری را با کمترین افت فشار ممکن انجام می‌دهد.



شکل ۱ الف) نمای از اتصال مجموعه افشانه به مخزن پرفشار در آزمایشگاه ب) شماتیک مجموعه تجهیزات آزمایش تجربی

مجموعه تصویربرداری شیلین^۳ شامل یک منبع نور نقطه‌ای، عدسی برای خطی‌سازی پرتوی نور، دو عدسی بزرگنمایی ناحیه آزمون، تیغه نور برای صاف کردن جریان نور نامطلوب و دوربین سرعت تند با نرخ تصویربرداری ۲۰ هزار عکس در ثانیه است. دو عدسی مخصوص بزرگنمایی در دو طرف ناحیه تصویربرداری قرار گرفته اند و عدسی خطی‌ساز نیز بین این دو عدسی و پرتوی نور است. پرتوی نور پس از عبور از عدسی خطی‌ساز به صورت یک پرتوی کاملاً خطی درآمده که به اولین عدسی بزرگنمایی وارد می‌شود و پس از ایجاد یک دسته پرتوی موازی نوره ناحیه آزمون وارد می‌گردند. اختلاف چگالی ناشی از امواج فراصوتی ماخ تشکیل شده سبب ناهمگونی این دسته پرتوی نور

¹ Murugesan

² Bogadi and Sridhar

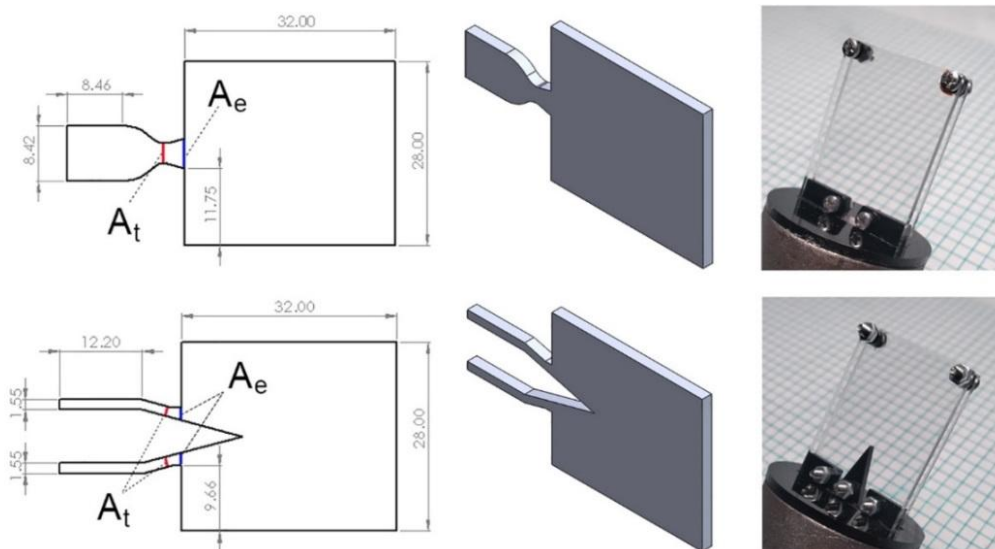
³ Schlieren

موازی شده که این ناهمگونی وارد عدسی بزرگنمایی ثانویه شده و به صورت یک پرتو خطی وارد عدسی دوربین تصویربرداری می‌شود. پیش از ورود پرتو نهایی به عدسی دوربین تیغه ای سبب صاف کردن جریان نامطلوب نور شده و آن دسته از نواحی آزمون که دارای اختلاف چگالی گشته اند را به صورت نواحی تاریک در تصویر نهایی آشکار می‌سازد.

۲-۲- افشانه‌های فراصوت

در این مطالعه دو نوع افشانه گوه‌ای و همگرا-واگرا (مخروطی) استفاده شده است. هندسه و نمونه ساخته شده افشانه‌های مورد استفاده در شکل ۲ مشاهده می‌گردد. مساحت گلوگاه هر دو افشانه برابر با ۶ میلی متر مربع است. مساحت خروجی افشانه مخروطی برابر ۹ میلی متر مربع و نسبت مساحت آن نیز برابر ۱,۴۷ است. عمق افشانه‌های مورد استفاده ۲ میلی متر است. دو سمت افشانه و فضای پیرامون آن توسط شیشه کوارتز به ضخامت ۲ میلی متر قرار گرفته است تا دسترسی بصری به خروجی افشانه و محیط پیرامون آن جهت تحلیل جریان امکان پذیر باشد.

ناحیه پیرامون خروجی افشانه دیواره قرار دارد و صفحات روبرو و بالا و پایین محیط افشانه خروجی اند و جریان از این نواحی به محیط وارد می‌شود. نسبت منطری افشانه یعنی مقدار عمق به ارتفاع خروجی افشانه برای افشانه ها برابر ۲,۳ است. نسبت فشار طراحی هر دو افشانه نیز برابر با ۶ است.



شکل ۲ هندسه و نمونه ساخته شده افشانه‌های مورد استفاده در آزمایش تجربی

۳- شبیه‌سازی عددی سه بعدی

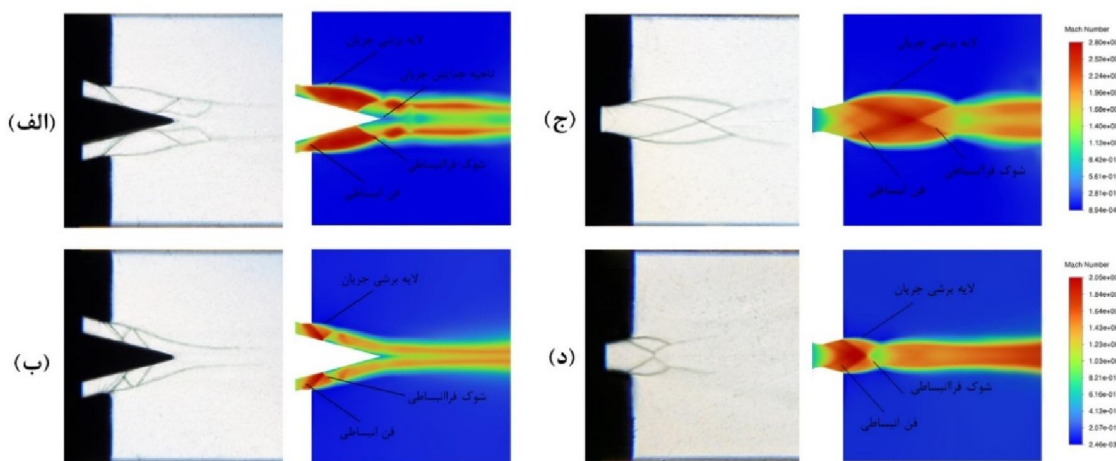
۳-۱- شبکه بندی هندسه و شرایط مرزی

برای شبکه بندی هندسه از نرم افزار انسیس مشینگ استفاده شده است. هندسه هر دو افشانه به طور کلی با اندازه سلول ۰,۳ میلی‌متر و به دلیل حساسیت جریان در گلوگاه این ناحیه با اندازه خانه ۰,۱ میلی‌متر شبکه بندی شده است. شرایط مرزی مساله شامل یک ورودی فشار برابر ۴۸۰ کیلوپاسکال و دمای سکون ۳۰۰ کلوین و شدت آشفتگی جریان در ورودی (Turbulent Intensity) نیز ۱۰ درصد در نظر گرفته شد. ناحیه خروجی فشار برابر فشار محیط و با توجه به ارتفاع محل آزمایش از سطح دریا برابر ۸۰ کیلوپاسکال و دیواره‌های افشانه نیز به عنوان شرط مرزی دیواره مساله در نظر گرفته شد. حل عددی مساله RANS و به صورت سه بعدی و پایا انجام شده و الگوی آشفتگی مورد استفاده نیز $k-\omega$ SST است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- تأثیر نسبت فشار بر عدد ماخ جریان فراصوت افشانه

در شکل ۳ تصاویر مربوط به آزمایش تجربی افشانه‌ها با استفاده از روش تصویربرداری شیلیرن مشاهده می‌گردد. خطوط تاریک در تصاویر شیلیرن نشان دهنده نواحی تغییر چگالی قابل توجه مانند شوک‌های مایل و فن انبساطی است. در کنار تصاویر تجربی نقشه‌های عدد ماخ حاصل از شبیه‌سازی نیز مشاهده می‌گردد. نواحی مربوط به پنکه انبساطی و ضربه فرا انبساطی و لایه برشی جریان در این نقشه‌ها مشخص شده است. مکان هندسی نواحی مشخص در تصاویر تجربی با نقشه‌های عدد ماخ حاکی از تطابق حل عددی با نتایج تجربی است که می‌توان صحت حل عددی را در شبیه‌سازی آزمایش تجربی مشاهده کرد. بررسی و مقایسه تصاویر شیلیرن با نقشه عدد ماخ روشی مرسوم و متداول در صحت سنجی شبیه‌سازی عددی جریان‌های افشانه‌های فراصوت با تصاویر شیلیرن مربوط به آزمایش تجربی است [۱۳]. با بررسی تصاویر و نقشه‌ها می‌توان تأثیر افزایش نسبت فشار افشانه بر ماهیت جریان افشانه را مشاهده کرد. افزایش نسبت فشار افشانه از ۳ به مقدار ۹ سبب افزایش ناحیه محیط پیرامونی متاثر از جریان شده و سطح مقطع خروجی جریان را افزایش می‌دهد. همچنین همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود افزایش نسبت فشار سبب جدایش جریان در ناحیه انتهایی مخروط افشانه گوه‌ای شده است که نشان دهنده اهمیت تعیین فشار بهینه جهت جلوگیری جدایش جریان از سطح افشانه است. نکته قابل ذکر دیگر در شکل ۳-الف و شکل ۳-ب حفظ ماهیت محوری بودن جریان خروجی انتهایی افشانه با تغییر نسبت فشار است که نشان دهنده ماهیت فیزیکی مطلوب افشانه گوه‌ای در تطابق با تغییرات نسبت فشار است. تأثیر افزایش نسبت فشار بر گسترش دامنه متاثر از جریان افشانه و افزایش واگرایی میدان جریان مربوط به افشانه همگرا-واگرا در شکل ۳-د و ۳-ج مشخص است.

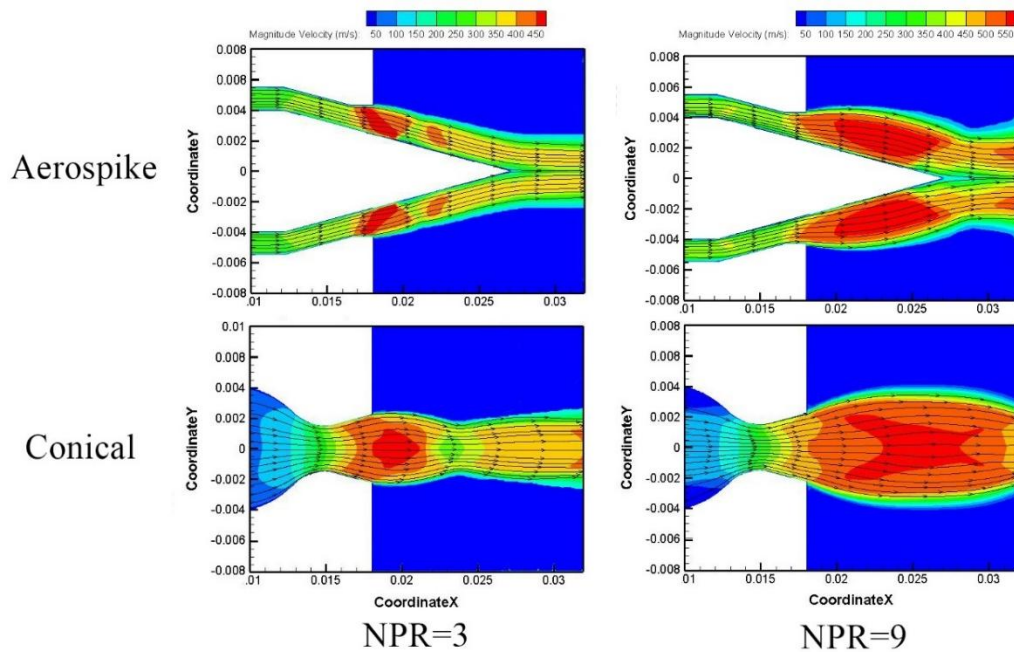


شکل ۳ تصاویر شیلیرن مربوط به آزمایش تجربی در کنار نقشه عدد ماخ حاصل از شبیه‌سازی عددی (الف) افشانه گوه‌ای در نسبت فشار ۹ (ب) افشانه گوه‌ای در نسبت فشار ۳ (ج) افشانه همگرا-واگرا در نسبت فشار ۹ (د) افشانه همگرا-واگرا در نسبت فشار ۳

۴-۲- تأثیر نسبت فشار بر واگرایی میدان جریان

در شکل ۴ نقشه‌های سرعت جریان به همراه خطوط جریان مربوط به هر دو افشانه همگرا-واگرا و گوه‌ای در دو نسبت فشار ۳ و ۹ نشان داده شده است. پدیده متداول افزایش واگرایی میدان جریان با افزایش نسبت فشار در صفحه خروجی افشانه همگرا-واگرا قابل مشاهده است که سبب کاهش بازدهی افشانه در نسبت فشارهای قوی

می‌گردد. بررسی خطوط جریان نشان داد که افزایش نسبت فشار از ۳ به ۹ سبب افزایش نیم زاویه انحراف لایه برشی بیرونی جریان از ۹,۴ درجه به ۲۸,۷ درجه می‌شود که به عبارتی مقدار انحراف جریان محوری تا حدود ۳ برابر افزایش یافته است.



شکل ۴ نقشه سرعت جریان به همراه خطوط جریان هر دو افشانه مخروطی و گوه‌ای در نسبت فشار ۳ و ۹

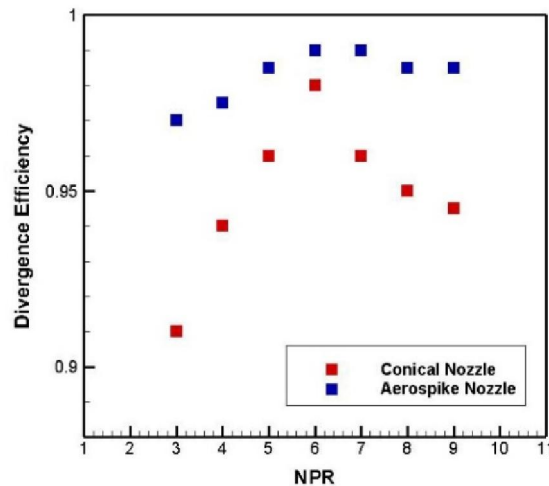
در مقابل جریان در صفحه خروجی افشانه گوه‌ای با افزایش فشار ماهیت محوری خود را تقریباً حفظ کرده و جریان خروجی افشانه دچار واگرایی نامطلوب از نظر بازدهی نشده است به طوری که نیم زاویه انحراف لایه برشی بیرونی جریان از ۴,۳ درجه در نسبت فشار ۳ به مقدار ۷,۶ درجه در نسبت فشار ۹ می‌رسد که نسبت به افشانه مخروطی دارای تغییرات بسیار کمتری است. به جهت مقایسه دقیق تر و کمی تأثیر نسبت فشار بر واگرایی جریان از تعریف بازدهی واگرایی جریان در افشانه فراصوت استفاده می‌کنیم که طبق رابطه زیر تعریف می‌شود [۱۴]:

$$C_{\theta} = \frac{F_{G_{Axial}}}{F_{G_{Ideal}}} \quad (1)$$

که C_{θ} ضریب بازدهی واگرایی افشانه و $F_{G_{Axial}}$ تکانه محوری جریان خروجی افشانه و $F_{G_{Ideal}}$ تکانه جریان یک افشانه آرمانی که تمام جریان آن محوری است (یک افشانه در شرایط کاری محاسباتی) است. با استفاده از تعریف معادله ۱ و انجام محاسبات نمودار شکل ۵ به دست می‌آید که نشان دهنده بازده واگرایی هر دو افشانه مخروطی و گوه‌ای در محدوده نسبت فشار ۳ تا ۹ است.

همانطور که مشاهده می‌شود در افشانه مخروطی با افزایش نسبت فشار از ۳ تا نسبت فشار ۶ مقدار بازدهی افزایش می‌یابد تا به مقدار حداکثر خود در نسبت فشار ۶ که متناظر با نسبت فشار محاسباتی است می‌رسد. علت کمتر بودن بازدهی افشانه در نسبت فشارهای کمتر از ۶ ایجاد امواج ضربه ای مایل در خروجی افشانه است که در مقادیر بسیار پایین نسبت فشار افشانه دارای پدیده جدایش جریان نیز است. با افزایش نسبت فشار به مقادیر بیش از مقدار محاسباتی به دلیل واگرایی جریان و انحراف جریان از حالت محوری مقدار بازدهی واگرایی افشانه کاهش می‌یابد. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که افشانه گوه‌ای در بازه کمترین مقادیر نسبت فشار دارای بازدهی مطلوب بالای ۹۷ درصد بوده و با

تغییرات نسبت فشار دارای کمترین مقدار تغییرات بازدهی نسبت به افشانه مخروطی بوده و می‌توان آن را نمونه یک افشانه تطبیق پذیر با تغییر شرایط محیط در نظر گرفت که در هر نسبت فشار کاری مقدار بازدهی واگرایی آن در محدوده مطلوب است.



شکل ۵ بازدهی واگرایی جریان خروجی افشانه در صفحه خروجی مربوط به هر دو افشانه مخروطی و گوه‌ای در نسبت فشار ۳ تا ۹

۵- نتیجه گیری

با مقایسه تصاویر شیلینر مربوط به آزمایش تجربی با نقشه عدد ماخ حاصل از شبیه‌سازی تطابق حل عددی با تجربی حاصل گردید. تأثیر نسبت فشار افشانه بر توزیع مکانی نواحی جریان فراسوت مشخص و جدایش جریان در افشانه گوه‌ای در نسبت فشارهای بیش از نسبت فشار محاسبه ای مشاهده گردید. همچنین نتایج نشان داد افزایش نسبت فشار سبب افزایش زاویه انحراف جریان خروجی افشانه نسبت به حالت محوری می‌شود که این مقدار برای افزایش نسبت فشار ۳ تا ۹ برای افشانه مخروطی سه برابر بیشتر از افشانه گوه‌ای است. با استفاده از رابطه بازدهی واگرایی نشان داده شد که افشانه گوه‌ای تطبیق پذیری بیشتری در تغییرات نسبت فشار افشانه نسبت به افشانه مخروطی دارد به طوری که کاهش نسبت فشار به مقدار نیمی از نسبت فشار طراحی در افشانه مخروطی سبب کاهش بازدهی واگرایی تا ۱۰ درصد شده در حالی که این مقدار برای گوه‌ای کمتر از ۳ درصد است.

تشکر و قدردانی

مطالعه فوق در آزمایشگاه احتراق و پیشرانس دانشکده فناوری‌های نوین و مهندسی هوافضا دانشگاه شهید بهشتی تهران انجام گرفته است و نویسندگان مراتب قدردانی و تشکر خود را از همکاری و مساعدت آقای دکتر سیدمهدی میرساجدی سرپرست آزمایشگاه احتراق و پیشرانس دانشگاه شهید بهشتی اعلام می‌دارند.

References

- [1] Hunter CA. Experimental Investigation of Separated Nozzle Flows. *Journal of Propulsion and Power* 2004;20:527-32. doi: 10.2514/1.4612
- [2] Dumitrescu O, Gherman B, Tipa T. Development of a Laval nozzle for a cold gas propulsion system. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng* 2018;400:042016. doi: 10.1088/1757-899x/400/4/042016
- [3] RAO GVR. Exhaust Nozzle Contour for Optimum Thrust. *Journal of Jet Propulsion* 1958;28:377-82. doi: 10.2514/8.7324
- [4] Arora R, Vaidyanathan A. Experimental investigation of flow through planar double divergent

- nozzles. *Acta Astronautica* 2015;112:200–16. doi: [10.1016/j.actaastro.2015.03.020](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.03.020)
- [5] Bhide K, Siddappaji K, Abdallah S. Aspect Ratio Driven Relationship between Nozzle Internal Flow and Supersonic Jet Mixing. *Aerospace* 2021;8:78. doi: [10.3390/aerospace8030078](https://doi.org/10.3390/aerospace8030078)
- [6] George J, Nair PP, Soman S, Suryan A, Kim HD. Visualization of flow through planar double divergent nozzles by computational method. *J Vis* 2021;24:711–32. doi: [10.1007/s12650-020-00729-9](https://doi.org/10.1007/s12650-020-00729-9)
- [7] Ferlauto M, Ferrero A, Marsicovetere M, Marsilio R. Differential Throttling and Fluidic Thrust Vectoring in a Linear Aerospike. *IJTTP* 2021;6:8. doi: [10.3390/ijtp6020008](https://doi.org/10.3390/ijtp6020008)
- [8] Wu K, Dong Kim H. Numerical study on the shock vector control in a rectangular supersonic nozzle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* 2019;233:4943–65. doi: [10.1177/0954410019834133](https://doi.org/10.1177/0954410019834133)
- [9] Kozue K, Namba S, Endo T, Takiyama K, Tamura N. Spectroscopic Observation of He Arcjet Plasma Expanding Through a Converging and Diverging Slit Nozzle. *EJ* 2013;17:7–12. doi: [10.4186/ej.2013.17.5.7](https://doi.org/10.4186/ej.2013.17.5.7)
- [10] Krishnaraj A, Ganesan V. Investigation of Jet Mixing Characteristics Using Slotted Rectangular Tabs. *J Aerosp Technol Manag* 2021;13. doi: [10.1590/jatm.v13.1188](https://doi.org/10.1590/jatm.v13.1188)
- [11] Murugesan VK, Moorthi AKS, Ramachandran GSL. Aspect Ratio Effect on Mach 1.5 Rectangular Jet Mixing. *IEEE Access* 2021;9:73671–7. doi: [10.1109/access.2021.3080665](https://doi.org/10.1109/access.2021.3080665)
- [12] Bogadi S, Sridhar BTN. Decay of supersonic rectangular jet issuing from a nozzle with diagonal expansion ramps. *THERM SCI* 2019;23:3929–40. doi: [10.2298/tsci180614301b](https://doi.org/10.2298/tsci180614301b)
- [13] Reza MS, Agrawal BK, Tarnacha RS, Panchal D. Computational investigation of the effect of variable cowl length on the flowfield of conical aerospike nozzles. *AS* 2022;6:129–42. doi: [10.1007/s42401-022-00172-8](https://doi.org/10.1007/s42401-022-00172-8)
- [14] Hamedi-Estakhrsar MH, Mahdavy-Moghaddam H, Jahromi M. Investigation of effects of convergence and divergence half-angles on the performance of a nozzle for different operating conditions. *J Braz Soc Mech Sci Eng* 2018;40. doi: [10.1007/s40430-018-1271-9](https://doi.org/10.1007/s40430-018-1271-9)