

اثر غنی سازی هوا با اکسیژن بر سوزش پلی اتیلن در رمجت ورتکسی

فاطمه دریجانی^۱، محمد حسن شولایی^۲، محمد حسن سعیدی^۳، علی اصغر مظفری^۴، اکبر غفوریان^۵

آزمایشگاه ترمودینامیک، دانشگاه صنعتی شریف

Fatemeh.darijani@gmail.com

چکیده

در این تحقیق جریان ورتکسی و غنی سازی هوا با اکسیژن جهت افزایش نرخ سوزش سوخت جامد در موتورهای رمجت مادون صوت به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. ورتکس با بالا بردن نرخ سوزش باعث بهبود بازده نیروی رانش می شود. بدین ترتیب امکان استفاده از موتورهای رمجت مادون صوت را در کاربردهای خاص مانند اضافه کردن آنها به اجسام رها شده از هواپیما جهت افزایش طول پرواز بوجود می آورد. در موتور آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده، از پلی اتیلن به عنوان سوخت جامد و هوای غنی شده با اکسیژن، به عنوان اکسیدکننده استفاده شده است. برای ایجاد ورتکس، اکسیدکننده از انتهای موتور به صورت مماسی وارد محفظه می شود. جریان ورتکسی به سمت سر موتور حرکت کرده و پس از طی طول محفظه و جارو کردن سطح پلی اتیلن، جهت ورتکس عکس شده و با شعاع کمتری نسبت به ورتکس بیرونی، به سمت خروجی نازل حرکت می کند و از آن خارج می شود. نرخ سوزش پلی اتیلن برای هوای غنی شده با اکسیژن بین ۲۷/۶ الی ۳۵/۱ درصد، در موتور ورتکسی اندازه گیری شده است. دبی جرمی اکسیدکننده ورودی نیز به عنوان یک متغیر موثر بر عملکرد در محدوده ۴/۱ تا ۱۰/۶ گرم بر ثانیه، تغییر داده شد و اثرات آن بر نرخ سوزش مورد مطالعه قرار گرفت. با افزایش ۷/۵ درصدی اکسیژن و ۲/۶ برابر کردن دبی جرمی اکسیدکننده، نرخ سوزش از ۰/۱ به ۰/۴۵ گرم بر ثانیه افزایش یافت. سرعت سوزش پلی اتیلن در بهترین شرایط در محدوده تست شده ۰/۱۶ میلی متر بر ثانیه است. از نتایج حاصل در طراحی این نوع موتورها می توان استفاده نمود.

واژه های کلیدی: رمجت - جریان ورتکسی - موتور ورتکسی - سوخت جامد - نرخ سوزش

۱- مقدمه

افزایش طول پرواز اجسام رها شده از هواپیما در سالهای اخیر در کشور اهمیت زیادی پیدا کرده است. هواپیما این اجسام را در سرعتهای مادون صوت رها می کند و به علت محدودیت سیستمهای هدایت و کنترل، باید با سرعت مادون صوت به پرواز خود ادامه دهند. جهت افزایش طول پرواز، می توان روی آنها موتور نصب نمود. وزن و ابعاد این موتورها باید در محدوده قابل قبول برای خود جسم و هواپیمای حامل باشد. به علت سرعت مادون صوت، زمان کارکرد این موتورها نسبتاً طولانی و در حد چند دقیقه باید باشد. موتورها سوخت جامد با سوختهای قابل دسترس بدلیل کوتاه بودن زمان سوزش و موتورها سوخت مایع بدلیل حجیم بودن سیستم ذخیره سوخت و سوخت رسانی قابل استفاده نیستند. در چنین مواقعی موتور رمجت سوخت جامد ورتکسی می تواند جایگزین مناسبی باشند. به علت سرعت مادون صوت، فشار داخل محفظه احتراق پایین خواهد بود در حدی که نازل خروجی به خفگی نخواهد رسید و این نکته چالش اصلی در ساخت این موتورها خواهد بود. استفاده از جریان ورتکسی و غنی سازی هوا با اکسیژن جهت افزایش نرخ سوزش در رفع این چالش می تواند کارگشا باشند. با ورتکسی کردن

^۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی هوا فضا

^۲ - کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی هوا فضا

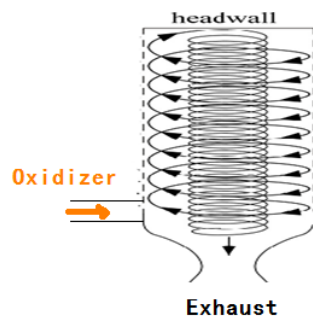
^۳ - استاد، دانشکده مهندسی مکانیک

^۴ - استاد، دانشکده مهندسی مکانیک

^۵ - استادیار، دانشکده مهندسی هوا فضا

جریان سرعت مماسی بالا روی سطح سوخت جامد در حال سوزش ایجاد می‌گردد و پدیده سوزش فرسایشی موجب افزایش نرخ و سرعت سوزش می‌شود.

در شکل ۱ چگونگی جریان در موتور ورتکسی نشان داده شده است. اکسیدکننده از انتهای محفظه احتراق و قبل از ورودی نازل بصورت مماسی وارد می‌شود. ورود اکسیدکننده بصورت مماسی باعث القاء گرادیان فشار شعاعی شده و همچنین نیروی جانب مرکز القایی باعث حرکت مارپیچی رو به جلوی اکسیدکننده بر روی سطح گرین سوخت می‌شود. روش ورود اکسیدکننده باعث ایجاد یک ورتکس خارجی به اندازه شعاع داخلی گرین سوخت شده که پس از طی طول محفظه به سر موتور رسیده و ورتکس داخلی تشکیل می‌شود. این ورتکس با شعاع کوچکتر و در جهت مخالف ورتکس خارجی به سمت نازل حرکت کرده و از آن خارج می‌شود [۱].



شکل ۱: چگونگی ورود اکسید کننده و تشکیل جریان ورتکسی داخل محفظه احتراق [۱].

وایاس^۶ و مجدلانی^۷ در سال ۱۳۸۲ حرکت دو جهته هم محور و گردابه‌ای یک سیال را در یک محفظه احتراق استوانه‌ای بررسی کردند و حل تحلیلی برای میدان سرعت و فشار جریان ارائه دادند. مدل تحلیلی ایشان با فرض دائمی، چرخشی، متقارن محوری، غیر قابل تراکم و غیر لزج بودن سیال پایه‌ریزی شده بود. با اضافه کردن فرض لزجی توسط وایاس مدل کنترل ورتکس اجباری نزدیک محور محفظه بهبود داده شد [۲ و ۳]. مجدلانی و وایاس در سال ۱۳۸۳ یک حل تقریبی برای ورتکس دوجته برای توصیف حرکت توده گاز در محفظه موشک هیبرید ورتکسی با فرض‌های شبه‌لزج، تراکم‌ناپذیری، متقارن، چرخشی و دائمی ارائه دادند [۴].

فروردین در سال ۱۳۸۴ محل وقوع احتراق را در یک محفظه احتراق ورتکسی با استفاده از تصویربرداری و شبیه سازی عددی، تعیین کرد [۵]. کارگر در سال ۱۳۸۵ میزان تشعشع حرارتی به دیواره‌ها و ضریب انتقال حرارت همرفتی در داخل دیواره‌های یک محفظه احتراق ورتکسی آزمایشگاهی را اندازه‌گیری کرد [۶]. امانپور قرایی در سال ۱۳۸۶ فرکانس‌های ناپایداری و تأثیر پارامترهای عملکردی بر میزان ناپایداری را اندازه‌گیری کرد. ایشان متوجه شد که موتور ورتکسی نسبتاً موتور پایداری می‌باشد [۷]. بشارت شفیعی در سال ۱۳۸۷ موتور هواتنفسی ورتکسی با سوخت گازی را ساخته و تست کرد. همچنین ورودی هوا با هندسه بهینه برای ایجاد کمترین افت فشار و تولید ورتکس در محفظه در سرعت‌های پروازی مادون صوت را طراحی کرد [۸].

۲- محاسبه سرعت سوزش

⁶ -Vyas

⁷ -Majdalani

جهت محاسبه سرعت سوزش می توان از معادله پیوستگی برای یک جسم جامد در حال سوزش سطحی بصورت زیر استفاده نمود:

$$\frac{d}{dt} \iiint_V \rho_s dv + \iint_S V_B \cdot \vec{n} dA = 0 \quad (1)$$

با استفاده از قضیه دیورجانس، رابطه گرین و فرض همگنی فازهای جامد و گازی، یکنواختی سرعت سوزش سطح در تمام سطح در حال سوزش، معادله ۱ به معادله ۲ تبدیل می شود.

$$\frac{dM}{dt} = -v_b \rho_s A_b \quad (2)$$

که، M ، v_b ، V_B ، A_b و n و ρ بترتیب تغییرات جرم سوخت جامد، بزرگی و بردار سرعت سوزش سوخت جامد، مساحت سوختن، بردار عمود بر سطح و چگالی جسم جامد را نشان می دهند [۱۰]. با اندازه گیری جرم پلی اتیلن قبل و بعد از تست تغییرات جرم سوخت جامد بدست می آید و با تقسیم آن بر مدت زمان روشن بودن موتور، نرخ سوزش سوخت پلی اتیلن محاسبه می شود. برای بدست آوردن سرعت سوزش پلی اتیلن از فرضیات زیر استفاده می کنیم:

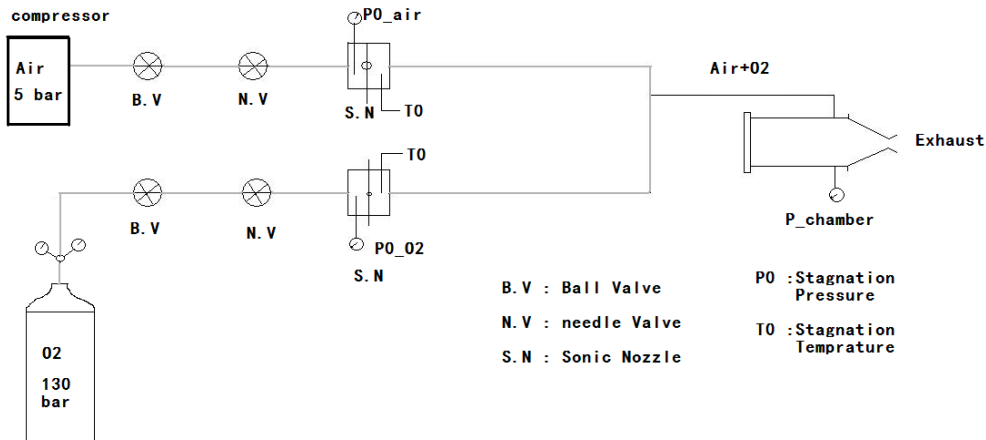
۱. مساحت در حال سوختن، مساحت جانبی استوانه با شعاع داخلی گرین سوخت باشد
۲. گرین سوخت شکل خود را در طول تست حفظ کند و اگر تغییر شکل در پسماند مشاهده شد مربوط به ثانیه های آخر تست است که از اثر آن صرف نظر شده است.

با جایگذاری نرخ سوزش، چگالی و مساحت در حال سوختن در معادله ۲ می توان سرعت سوزش و پلی اتیلن را بدست آورد. درصد اکسیژن عبارت است از نسبت مجموع دبی جرمی اکسیژن هوا و اکسیژن اضافه شده برای غنی سازی، به دبی جرمی اکسیدکننده.

۳- تجهیزات آزمایشگاهی

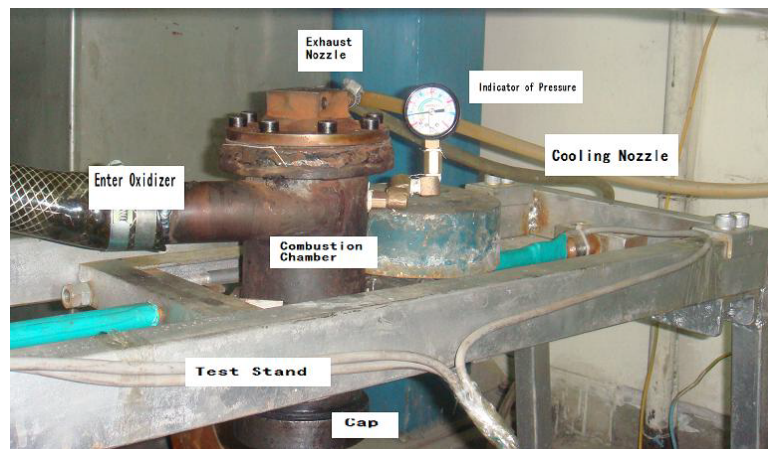
به علت کمبود منابع اطلاعاتی مناسب راجع به نرخ سوزش سوخت جامد در فشارهای کاری پایین، نسبت به طراحی و ساخت یک محفظه احتراق آزمایشگاهی جهت شبیه سازی جریان ورتکسی و اندازه گیری نرخ سوزش پلی اتیلن اقدام گردید. درصد غنی سازی هوا با اکسیژن و دبی جریان ورودی به محفظه احتراق به عنوان دو عامل مهم در تعیین نرخ سوزش بررسی گردید.

به منظور انجام آزمایشهای تجربی، از یک مجموعه آزمایشگاهی شامل کمپرسور هوا، مخزن اکسیژن خالص، شیرهای کنترل و سایر وسایل اندازه گیری دبی جرمی، فشار و دما استفاده شده است. مطابق شکل ۲، محفظه احتراق به قطر ۹۰ میلی متر و طول ۲۰۰ میلی متر است. نازل بوسیله فلنج به محفظه متصل شده. در این مجموعه آزمایشها، از نازلی با گلوگاه به قطر ۱۸ میلی متر و خروجی ۲۵ میلی متر با زاویه واگرایی ۴ درجه و گرین سوخت پلی اتیلن به طول ۱۰۰ میلی متر و شعاع ۴۱ میلی متر استفاده شده است.



شکل ۲ شماتیک دستگاه آزمایش.

دبی هوا و اکسیژن بوسیله شیر تویی و شیر سوزنی تنظیم، پس از عبور از شیبوره صوتی با هم مخلوط شده و بطور مماسی از لوله‌ای به قطر ۳۷ میلی‌متر وارد محفظه احتراق می‌شوند. نازل این موتور توسط آب خنک‌کاری شده و یک فشارسنج برای نشان دادن فشار محفظه احتراق به بدنه موتور نصب شده است. شماتیک موتور رم‌جت ورتکسی سوخت جامد، نگهدارنده و مجموعه‌های مورد نیاز در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ شماتیک رم‌جت ورتکسی سوخت جامد.

در پایان با استفاده از فعال ساز، موتور روشن شده و آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های مربوطه مطابق جدول ۱ انجام می‌پذیرند. این آزمایش‌ها در چهار سری انجام شده که در هر سری، دبی جرمی کل اکسیدکننده ثابت نگهداشته شده و در چهار مرحله مقدار درصد اکسیژن بین ۲۷/۶ الی ۳۵/۱ درصد تغییر کرده است. همچنین در هر کدام از مجموعه آزمایش‌ها دبی جرمی کل اکسیدکننده بین ۴/۱ الی ۱۰/۶ گرم بر ثانیه می‌باشند.

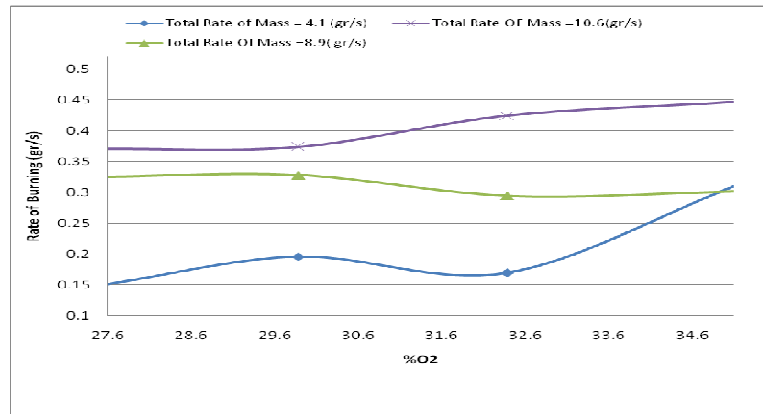
جدول ۱ برنامه تست‌های ۱ الی ۱۶.

شماره تست	دبی جرمی کل اکسیدکننده (گرم بر ثانیه)	درصد اکسیژن دبی جرمی کل اکسید کننده	دبی جرمی هوا (گرم بر ثانیه)	دبی جرمی اکسیژن اضافه (گرم بر ثانیه)
۱	۴/۱	۲۷/۶	۳/۸	۰/۳
۲	۴/۱	۲۹/۹	۳/۷	۰/۴
۳	۴/۱	۳۲/۴	۳/۶	۰/۵
۴	۴/۱	۳۵/۱	۳/۵	۰/۶
شماره تست	دبی جرمی کل اکسیدکننده (گرم بر ثانیه)	درصد اکسیژن دبی جرمی کل اکسید کننده	دبی جرمی هوا (گرم بر ثانیه)	دبی جرمی اکسیژن اضافه (گرم بر ثانیه)
۵	۶/۵	۲۷/۶	۶/۰	۰/۵
۶	۶/۵	۲۹/۹	۵/۹	۰/۶
۷	۶/۵	۳۲/۴	۵/۷	۰/۸
۸	۶/۵	۳۵/۱	۵/۵	۱/۰
شماره تست	دبی جرمی کل اکسیدکننده (گرم بر ثانیه)	درصد اکسیژن دبی جرمی کل اکسید کننده	دبی جرمی هوا (گرم بر ثانیه)	دبی جرمی اکسیژن اضافه (گرم بر ثانیه)
۹	۸/۹	۲۷/۶	۸/۲	۰/۷
۱۰	۸/۹	۲۹/۹	۸/۰	۰/۹
۱۱	۸/۹	۳۲/۴	۷/۸	۱/۱
۱۲	۸/۹	۳۵/۱	۷/۶	۱/۳
شماره تست	دبی جرمی کل اکسیدکننده (گرم بر ثانیه)	درصد اکسیژن دبی جرمی کل اکسید کننده	دبی جرمی هوا (گرم بر ثانیه)	دبی جرمی اکسیژن اضافه (گرم بر ثانیه)
۱۳	۱۰/۶	۲۷/۶	۹/۸	۰/۸
۱۴	۱۰/۶	۲۹/۹	۹/۵	۱/۱
۱۵	۱۰/۶	۳۲/۴	۹/۳	۱/۳
۱۶	۱۰/۶	۳۵/۱	۹/۰	۱/۶

۳- تحلیل نتایج

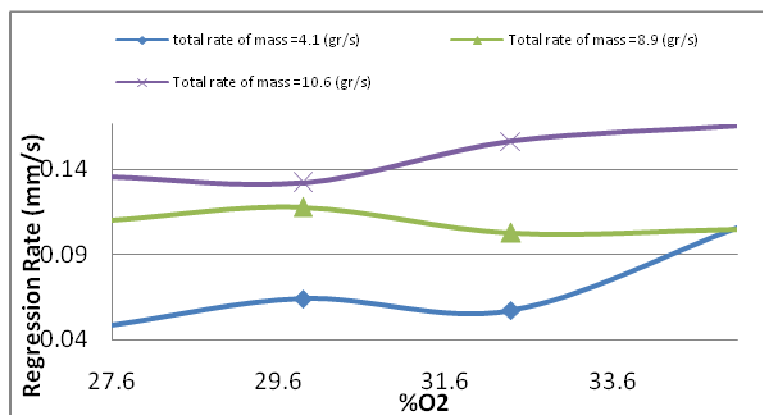
نرخ سوزش پلی‌اتیلن بر حسب درصد اکسیژن در شکل ۴ نشان داده شده است. مقدار غنی‌سازی از ۲۷/۶ الی ۳۵/۱ درصد افزایش یافته است. از داده‌های تست‌ها می‌توان نتیجه گرفت که در دبی کم اکسیدکننده درصد غنی‌سازی با اکسیژن به صورت قابل توجهی نرخ سوزش پلی‌اتیلن را افزایش می‌دهد. طبق نتایج بدست آمده غنی‌سازی با اکسیژن تأثیر قابل توجهی بر نرخ سوزش ندارد. این مشاهده می‌تواند بدین معنی باشد که در شرایط ایجاد شده در محفظه احتراق با احتساب فشار و دمای احتراق مقدار ملکول‌های پلیمری پلی‌اتیلن که می‌توانند شکسته و برای احتراق مهیا شوند محدود است. اگر در دبی

جرمی اکسیدکننده به اندازه کافی برای احتراق آنها اکسیژن وجود داشته باشد دیگر غنی سازی با اکسیژن بی اثر می شود. در نتیجه در دبی جرمی ۴/۱ گرم در ثانیه اکسیژن کافی برای احتراق ملکول های مهیا شده پلی اتیلن وجود ندارد ولی در دبی جرمی های بالاتر موجود است.



شکل ۴ نرخ سوزش پلی اتیلن بر حسب درصد اکسیژن.

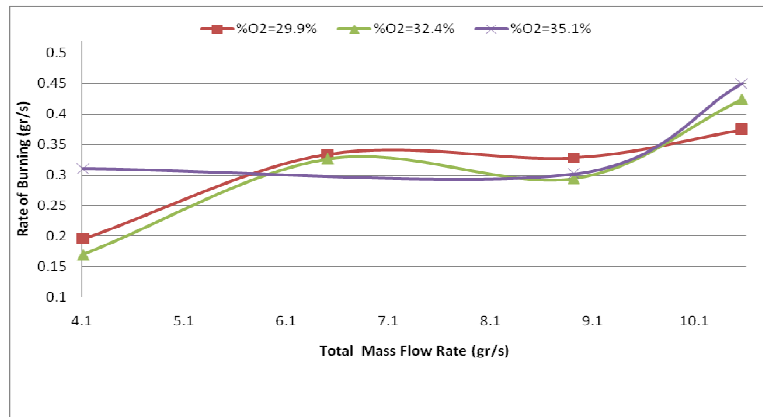
سرعت سوزش پلی اتیلن بر حسب درصد اکسیژن در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که بیان شد با افزایش سرعت مماسی بوسیله جریان ورتکسی، روی سطح درحال سوزش و با استفاده از رابطه ۲ و اطلاعات شکل ۴، سرعت سوزش محاسبه و ارائه شده است. با تغییر ۷/۵ درصدی غنی سازی اکسیژن در دبی جرمی کل اکسیدکننده ۴/۱ گرم بر ثانیه سرعت سوزش پلی اتیلن افزایش می یابد.



شکل ۵ سرعت سوزش پلی اتیلن بر حسب درصد اکسیژن.

نرخ سوزش پلی اتیلن بر حسب دبی جرمی اکسیدکننده در شکل ۶ نشان داده شده است. در این نمودار مقدار غنی سازی در چهار مرحله از مقدار ۲۷/۶ تا ۳۵/۱ درصد تغییر داده شده است. دبی جرمی اکسیدکننده از ۴/۱ الی ۱۰/۶ گرم بر ثانیه افزایش یافته است. از داده های تست ها می توان نتیجه گرفت که با افزایش دبی جرمی اکسیدکننده نرخ سوزش پلی اتیلن

افزایش می‌یابد. افزایش دبی جرمی اکسیدکننده باعث احتراق کاملتری شده که دلالت بر دمای احتراق بالاتر دارد. بنابراین نرخ سوزش پلی‌اتیلن افزایش می‌یابد.



شکل ۶ نرخ سوزش پلی‌اتیلن بر حسب دبی جرمی اکسیدکننده.

۵- نتیجه‌گیری

در جسم پرنده مورد نظر به علت سرعت مادون صوت و پایین بودن فشار سکون محفظه احتراق، نرخ سوزش کم است. در این راستا استفاده از خاصیت جریان ورتکسی به همراه غنی‌سازی هوای ورودی با اکسیژن خالص، باعث افزایش نرخ سوزش و سرعت سوزش سوخت جامد می‌شود. ورود اکسیدکننده بصورت مماسی باعث القاء گرادیان فشار شعاعی شده و باعث حرکت ماریپیج شده و باعث جدایش ملکول‌های سطح پلی‌اتیلن خواهد شد. به منظور اندازه‌گیری نرخ سوزش و سرعت سوزش پلی‌اتیلن مجموعه‌ای طراحی و ساخته شد. نرخ سوزش در چهار دبی جرمی اکسیدکننده برای چهار درصد اکسیژن اندازه‌گیری شد. با افزایش درصد اکسیژن برای دبی جرمی ۴/۱ گرم بر ثانیه نرخ سوزش افزایش می‌یابد اما برای دبی‌های جرمی اکسیدکننده بالاتر اثر محسوسی ندارد و همچنین افزایش دبی جرمی اکسیدکننده باعث افزایش نرخ سوزش می‌شود.

مرجع

- 1- Majdalani, J. and Halpenny, E. K., "The Bidirectional Vortex with Sidewall Injection", 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 21 - 23 July 2008, Hartford, CT , AIAA 2008-5018, 2008 .
- 2- Vyas, A. B., Majdalani, J., Chiaverini, M. J., "The Bidirectional Vortex, Part 1: An Exact Inviscid Solution", AIAA Paper 2003-5052, 2003.
- 3- Vyas, A. B., Majdalani, J., Chiaverini, M.J, "The Bidirectional Vortex, Part 2: Viscous Core Corrections", AIAA Paper, 2003-5053, 2003
- 4- Majdalani, J., Vyas, A. B., " Rotational Axisymmetric Mean Flow for the Vortex Injection Hybrid Rocket Engine", 4th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit , 11-14 July 2004, Fort Lauderdale, Florida, 2004

- ۵- فروردین، احسان، مدلسازی انتقال حرارت برای موتور گردابه‌ای با استفاده از ساختار شعله، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۳۸۴.
 - ۶- کارگر، مهدی، بررسی تجربی نرخ حرارت آزاد شده انتقال حرارت تشعشعی در موتور گردابه‌ای، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۳۸۵.
 - ۷- امانپور قرایی، حسن، تحلیل پاسخ احتراق موتور ورتکسی سوخت مایع، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۳۸۶.
 - ۸- بشارت شفیعی، سمیه، مدلسازی تئوری و تجربی طرح ورتکس برای کاربرد رمجت مادون صوت، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی هوافضا، ۱۳۸۷.
- 9- Kuo, K. K., *Principles of Combustion*, JOHN WILEY & SONS, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, 1986.