

مطالعه عددی تأثیر تعداد انژکتور بر روی اختلاط و پایداری شعله در جریان مافوق صوت

محمد اخگری^۱، صادق تابع جماعت^۲

دانشجوی دوره کارشناسی ارشد پیشرانس - دانشکده هوافضا - دانشگاه امیر کبیر
moh_akhgari@cic.aut.ac.ir

چکیده

تحقیق حاضر، مطالعه عددی تأثیر انژکتورها بر روی اختلاط و پایداری شعله گاز هیدروژن در جریان هوای مافوق صوت می باشد. تعداد انژکتور در مدل‌های مورد مطالعه شامل یک انژکتور، دو انژکتور و سه انژکتور است. بدین منظور معادلات حاکم شامل معادلات بقاء جرمی، ناویر استوکس و مدل توربولانس در روش عددی درجه بالا بکار گرفته شده و با در نظر گرفتن شیمی نرخ محدود، حل شده‌اند. دما، میدان جریان و ضرایب مولی اجزاء در سه مدل تزریق مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به نتایج بدست آمده، می توان تغییرات شدیدی در شکل شعله برای سه مدل مورد بررسی در نتیجه تغییرات شدید در میدان جریان را مشاهده نمود.

واژه‌های کلیدی: اختلاط - پایداری شعله - مافوق صوت - انژکتور - مطالعه عددی.

۱- مقدمه

در حالت کلی، محفظه احتراق موتور اسکریم جت نیاز به روشی کارا جهت نگهداری شعله دارد. مدت زمان ماندگاری هوای عبوری از محفظه احتراق در این نوع پیشرانه بسیار پایین و در حدود هزارم ثانیه می باشد. در این مدت زمان بسیار کوتاه، سوخت و هوا باید ترکیب و تشکیل شعله دهند. جهت ایجاد بیشترین نیروی جلورندگی باید این شعله به صورت پایدار در محفظه احتراق باقی بماند [۱ و ۲].

چندین کار تجربی بسیار مهم و همچنین مطالعات تحلیلی و عددی بسیاری در دو دهه اخیر در زمینه احتراق مافوق صوت صورت گرفته است [۳]. بر اساس کارهای انجام شده، این گونه به نظر می رسد که در میان روشهای پایداری و کنترل احتراق مافوق صوت، استفاده از روش تزریق دارای برتری بوده و نقش بسیار مهمی در توسعه نگهداری و پایداری شعله دارد. تعدادی از روشهای نگهداری و پایداری شعله شامل تزریق موازی، تزریق عمودی، تزریق پلاسما، روش القایی موج شوک و ... در گذشته مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۴].

به ویژه، استفاده از انژکتور در پایین دست پله برای داشتن یک نگهدارنده شعله با راندمان بالا کاربرد دارد. در این روش اختلاط سوخت و هوا به شکل مناسبی در پشت پله انجام می گیرد و ناحیه نسبتاً ماندگاری از جریان در پشت پله تشکیل می شود که موجب حفظ شعله می گردد.

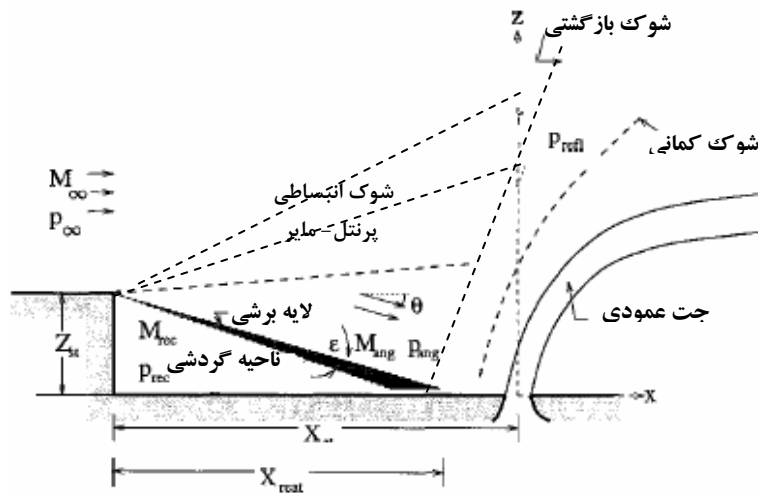
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد پیشرانس دانشکده هوافضا- دانشگاه صنعتی امیر کبیر

۲- دانشیار دانشکده هوافضا دانشگاه صنعتی امیر کبیر

در پایداری شعله مادون صوت، زمان بقاء و ماندگاری جریان به صورت مستقیم با طول ناحیه گردشی و بصورت معکوس با مقدار سرعت جریان متناسب است. بنابراین، زمان ماندگاری وابستگی شدیدی به شکل هندسی نواحی گردشی محفظه احتراق دارد.

از طرفی، تولید یک ناحیه گردشی جریان باعث افزایش اختلاط سوخت و هوا، افزایش سرعت واکنش احتراقی می گردد. در این مطالعه، انژکتورهای عمودی سوخت در پایین دست پله مورد استفاده قرار گرفته و تأثیر تعداد انژکتور بر روی احتراق در جریان مافوق صوت بررسی شده است. شبیه سازی عددی بر روی سه مدل تزریق شامل مدل یک انژکتوری، دو انژکتوری و سه انژکتوری انجام گرفته است.

در شکل ۱ طبیعت جریان را با عبور از روی پله به خوبی می توان دید. با توجه به وجود جریان مافوق صوت و باز شدن سطح بر روی پله، موج شوک انبساطی پرنتل مایر تشکیل می شود. وجود این موجها باعث افزایش سرعت در جریان می شود. جریان مافوق صوت پس از عبور از پله و شوک انبساطی دچار تغییر زاویه شده و به سمت سطح پایینی حرکت می کند. با توجه به شکل زیر جریان به دیواره پایینی برخورد و باعث ایجاد شوک بازگشتی می شود. سپس جریان مافوق صوت به صورت موازی سطح را می پیماید. وجود انژکتوری سبب ایجاد شوک کمائی^۱ می گردد.



شکل ۱- شکل شماتیک جریان عبوری از روی پله

۲- معادلات حاکم و روش عددی

در تحقیق حاضر، از معادلات ناویر استوکس بی بعد در مختصات منحنی الخط کلی استفاده شده است. معادلات دو بعدی، غیر یکنواخت، ناویر استوکس تراکم پذیر برای یک گاز چندجزئی در حال واکنش شیمیایی به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial \tilde{U}}{\partial t} + \frac{\partial (\tilde{F} - \tilde{F}_v)}{\partial x} + \frac{\partial (\tilde{G} - \tilde{G}_v)}{\partial y} = \tilde{S} \quad (1)$$

که \tilde{U} بردار متغیرهای مستقل بوده، \tilde{F} و \tilde{G} بردار شارهای همرفتی هستند، \tilde{F}_v و \tilde{G}_v مؤلفه های لزج آنها بوده، \tilde{S} بردار ترم منبع می باشد.

هنگامی که احتراق مافوق صوت مطرح است، چندین اثر متقابل اساسی میان توربولانس، موج شوک و واکنشهای شیمیایی مطرح می باشد که تحقیقات بیشتری را نیازمند است. در مدل های pdf موجود، جهت اثر گذاری متقابل میان

1. Bow Shock

توربولانس و واکنش شیمیایی محاسبات بسیار بالایی نیاز است. بر این اساس معمولاً فرض بر واکنش شیمیایی سریع می باشد [۵]. هنگامی که تأثیرات شیمیایی نرخ محدود، شوکها و تغییرات انتشار به اندازه کافی باشد، مدل‌های pdf قابلیت اجرایی را در احتراق مافوق صوت ممکن است داشته باشد ولی هنوز یک مسئله دشوار می باشد [۶و۷]. هر چند، در نظر گرفتن تمام این تأثیرات قابل بررسی است ولی نیازمند مدل توربولانسی بسیار جامع و پیشرفته moment-closure می باشد، که خارج از این تحقیق بوده و در تحقیقات آینده مورد بررسی خواهد گرفت.

در شرایط رینولدز پایین استفاده از روش توربولانسی $q-\epsilon$ Coakley در معادلات ناویر استوکس مناسب بوده [۸] و رفتار جریان مافوق صوت قابل پیشبینی می باشد [۹].

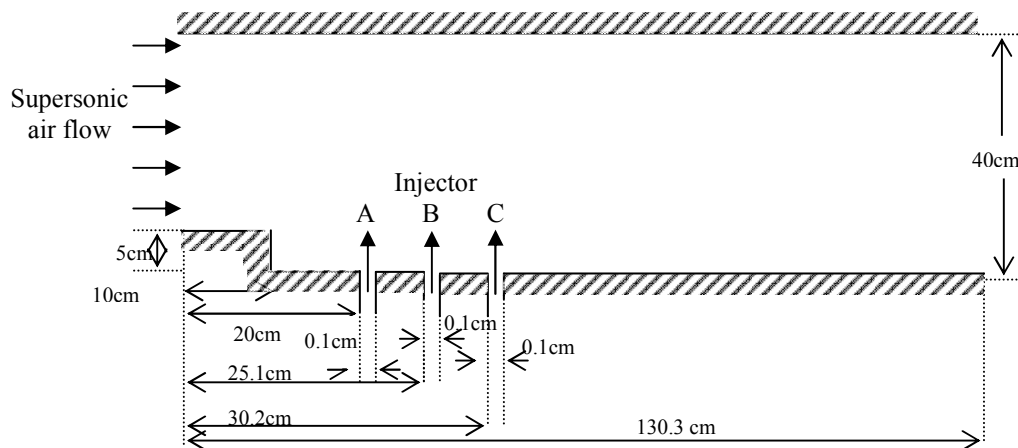
در این کار تحقیقاتی، مکانیزم واکنش شیمیایی به صورت کامل مورد استفاده قرار گرفته که توسط Stahl [۱۰] بدست آمده است. این مکانیزم شامل ۹ جزء ($H_2, O_2, H_2O, OH, H, O, HO_2, H_2O_2, N_2$) و ۳۷ واکنش شیمیایی می شود.

روش ضمنی بالادست- پایین دست (LU-SSOR) lower upper symmetric successive over relaxation، توسط Jameson و Yoon ارائه گردیده است [۱۱]. این روش دارای کارایی عددی نسبتاً بالایی به ویژه در مسایل چند بعدی می باشد. در مطالعه حاضر قسمتهای ناپایدار معادلات حاکم را با روش LU-SSOR حل می نمایم.

بر اساس الگوریتم TVD، انواع گوناگون روش TVD ایجاد شده است. این روشها به خوبی و بسیار زیاد برای گرفتن شوک و موجهای سطحی ناپیوسته قوی، استفاده می شوند. در این تحقیق، ترمهای جابجایی معادلات حاکم توسط روش مرتبه دوم ضمنی TVD MUSCL حل شده اند [۱۲].

۳- مدل فیزیکی

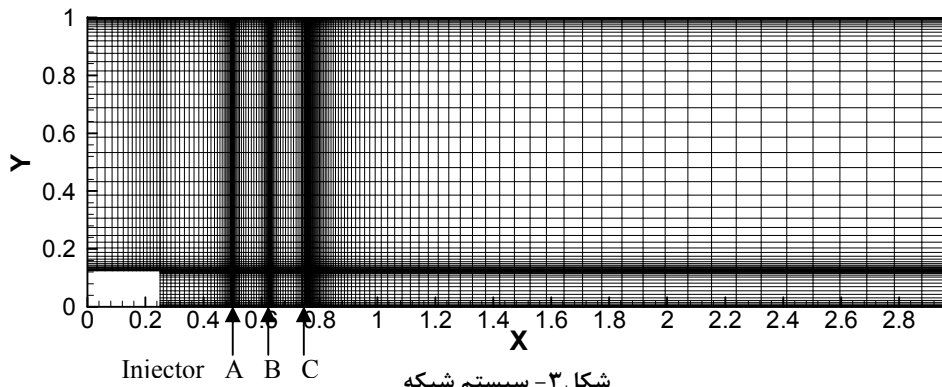
شکل ۲ شمایی از ساختار و مدل فیزیکی به کار رفته در این تحقیق را نشان می دهد. مدل به صورت کانالی دو بعدی بوده که سه انژکتور (A, B, C) در پایین دست پله جایگذاری شده است. جدول ۱ شرایط ورودی هوا و سوخت را نشان می دهد.



شکل ۲- مدل فیزیکی

جدول ۱- شرایط ورودی

هوا	هیدروژن	شرایط ورودی
۱/۵	۱	ماخ ورودی (M)
۰/۵ atm	۱ atm	فشار استاتیک (P)
۵۰۰ k	۲۹۸ k	دمای استاتیک (T)



شکل ۳- سیستم شبکه

بر اساس سیستم شبکه ای شکل ۳ سه نوع شبکه مختلف برای حالت‌های مختلف انژکتور استفاده شده است. تعداد نقاط شبکه بر حسب تعداد انژکتور به ترتیب ۱۰۶۱۱، ۱۳۴۴۶ و ۱۶۲۸۱ می باشد. به این ترتیب تمرکز نقاط شبکه باید در ناحیه وجود موج بیشتر از نواحی دیگر بوده و نقاط کافی در قسمت جت، پله و نواحی لایه های برشی بکار گرفته شده است. شبکه مورد استفاده برای سه حالت انژکتور دارای دقت 1.31×10^{-1} و 1.66×10^{-1} و 2.01×10^{-1} نقطه است. با افزایش تعداد نقاط تغییراتی در نتایج نداشته که وابسته نبودن نتایج به شبکه را نشان می دهد. جهت اطمینان از همگرایی نتایج، تغییرات و نوسانات پارامترهای اصلی مانند سرعت، فشار، دما و ضرایب مولی اجزاء به دقت در حین عملیات مورد بررسی قرار گرفته اند.

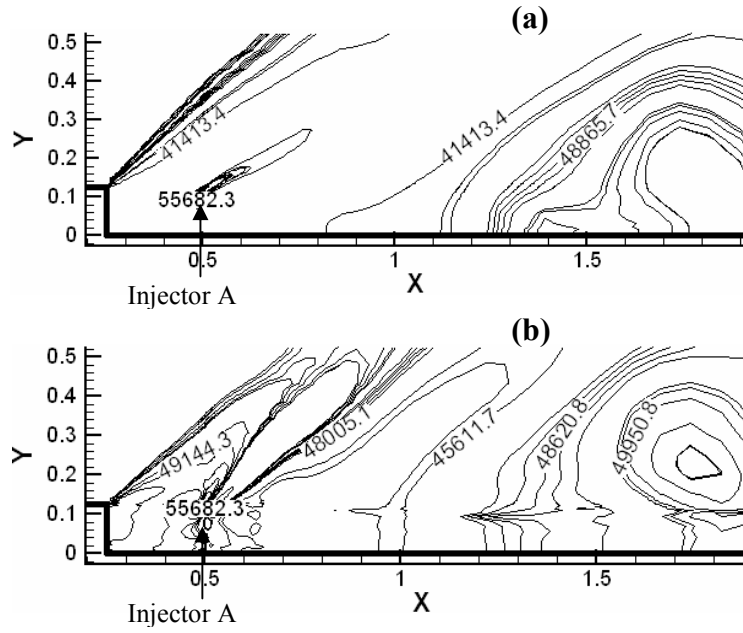
۴- نتایج

در این تحقیق محاسبات برای سه مدل تزریق شامل: مدل a: تزریق از طریق انژکتور A، مدل b: تزریق از انژکتورهای A و B، مدل c: تزریق از سه انژکتورهای A، B و C انجام گرفته است. تمام نتایج در این قسمت، در حقیقت مقایسه نتایج برای این سه مدل می باشد. صحت برنامه نوشته شده به صورت جزئی در مقالات گذشته مورد بررسی قرار گرفته است [۱۳]. توزیع فشار در این مدلها در حالت بدون احتراق تقریباً یکسان می باشد، به عنوان مثال یک نمونه از توزیع فشار را برای حالت یک انژکتوری در شکل ۴(a) داریم. در حالت وجود احتراق، توزیع فشار به صورت قابل توجهی به هم ریخته و باعث ایجاد مکش جریانهای سطحی به داخل جریان میانی می شود. شکل ۴(b) توزیع فشار را برای حالت احتراقی مدل یک انژکتوری به خوبی نشان می دهد. تغییرات شدید فشار در نزدیکی دیواره و مکانهای دما بالا در این شکل به روشنی دیده می شود.

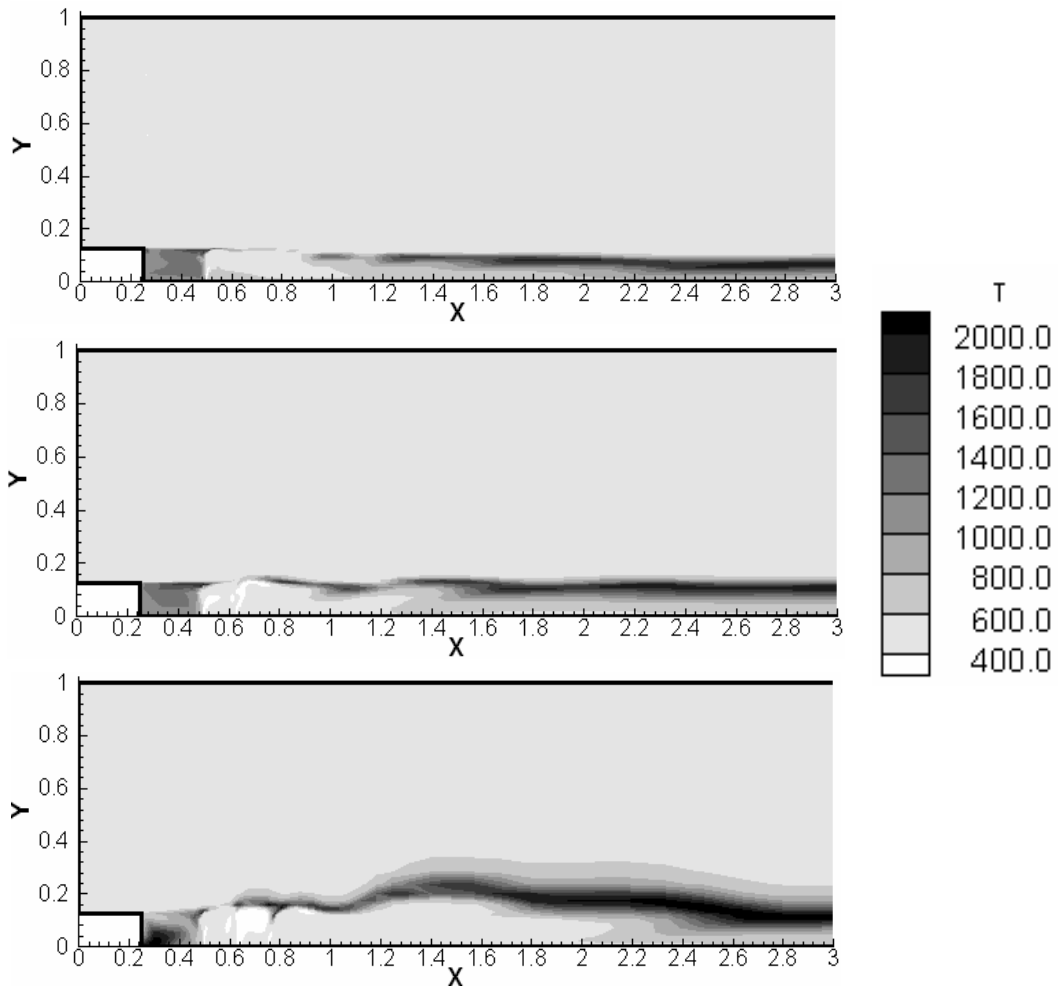
توزیع دما و نسبت مولی H_2O به ترتیب در شکل ۵ و ۶ برای سه مدل مختلف انژکتور نشان داده شده است. برای مدل a می توان مشاهده کرد که تزریق از یک انژکتور یک ناحیه احتراقی اولیه در نزدیکی پله و یک ناحیه احتراقی قوی در پایین دست انژکتور ایجاد می نماید. در این مدل نواحی احتراقی در پایین دست جریان محدود به ناحیه اختلاط سوخت و هوا در نزدیکی دیواره پایینی می باشد. برای مدل b، احتراق در ناحیه پایین دست انژکتور وسعت یافته بنابراین باعث نفوذ نواحی احتراقی به داخل جریان اصلی می شود. در این مورد احتراق اولیه ای در قسمت بعد از پله نداریم.

برای مدل c، یک ناحیه بسیار بزرگ احتراقی در قسمت پایین دست جریان داریم که به خوبی در میان جریان اصلی گسترش یافته است.

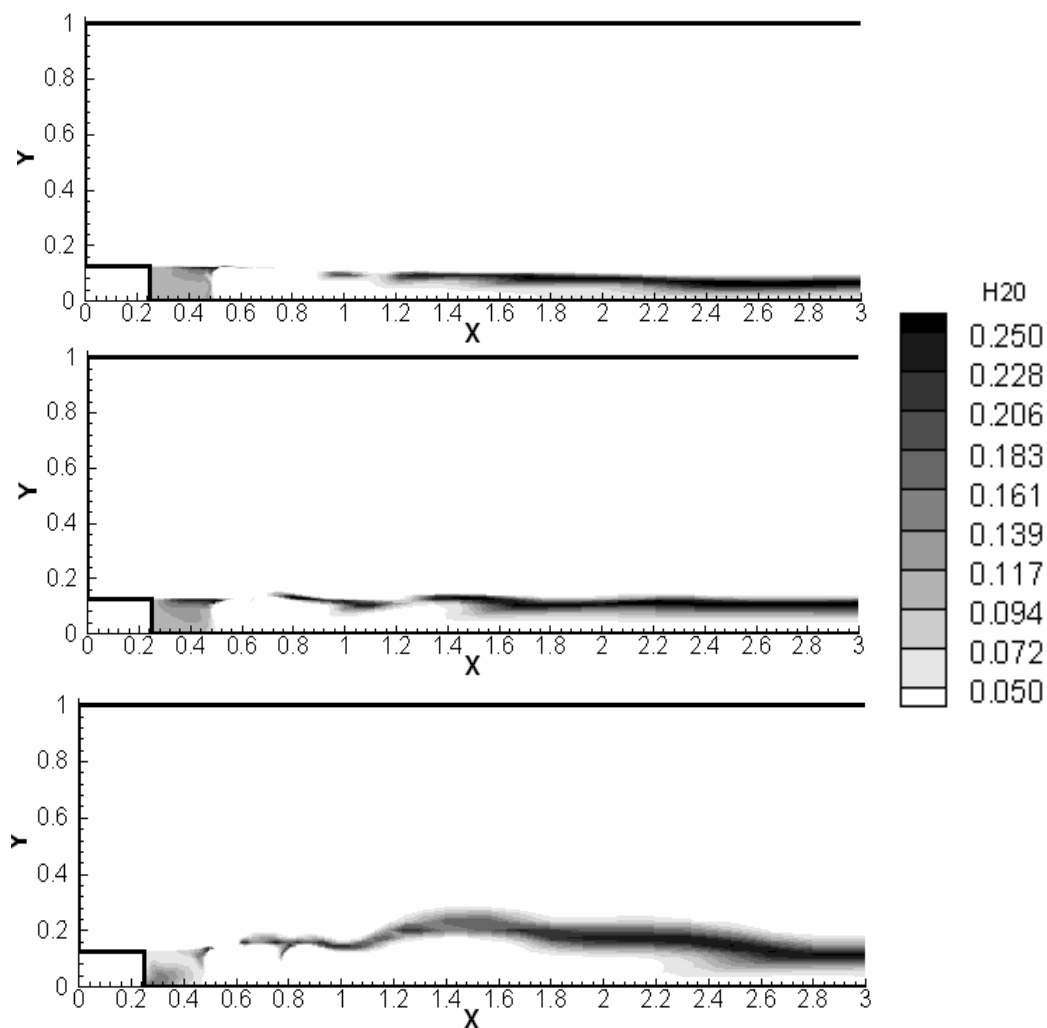
در شکل ۷ رفتار شعله ها در شکل ۵ و ۶ به خوبی قابل تحلیل می باشد. برای مدل a، دو ناحیه گردشی قبل و بعد از انژکتور وجود دارد. در این دو ناحیه گردشی اختلاط خوبی را میان هیدروژن و هوا داریم که باعث ایجاد دو ناحیه احتراقی (در شکل ۶) می شود.



شکل ۴- توزیع فشار برای مدل یک انژکتور (a) بدون واکنش شیمیایی، (b) با واکنش شیمیایی

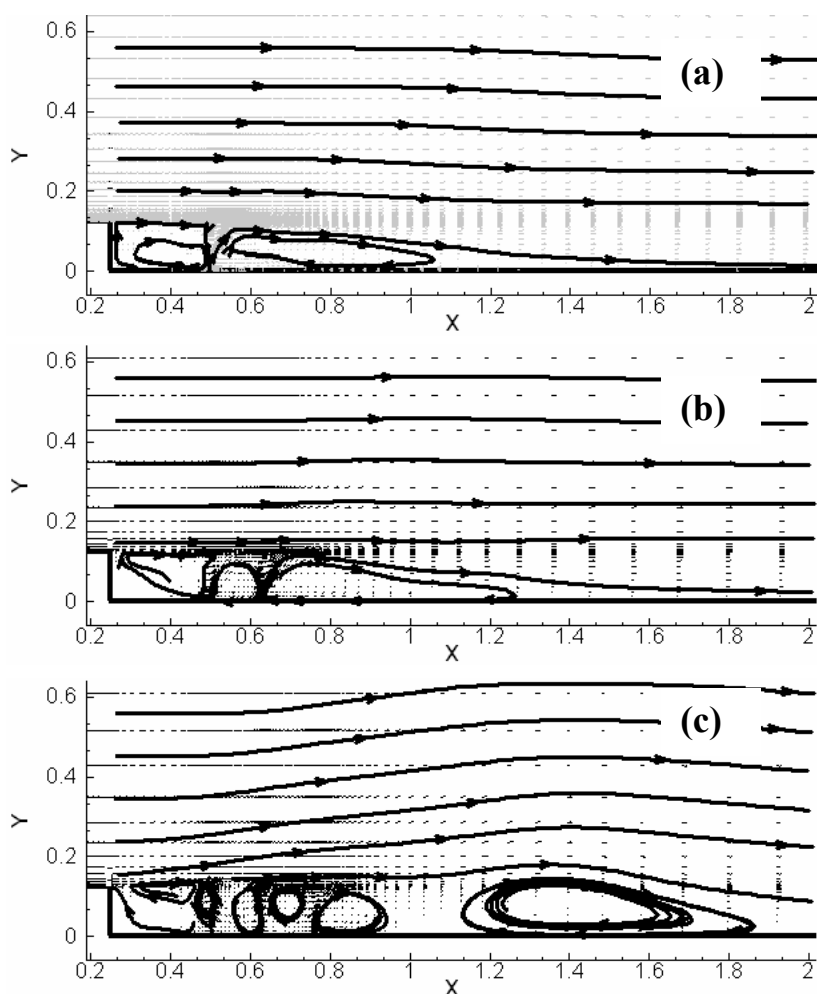


شکل ۵- توزیع دما برای (a) یک انژکتور، (b) دو انژکتور و (c) سه انژکتور



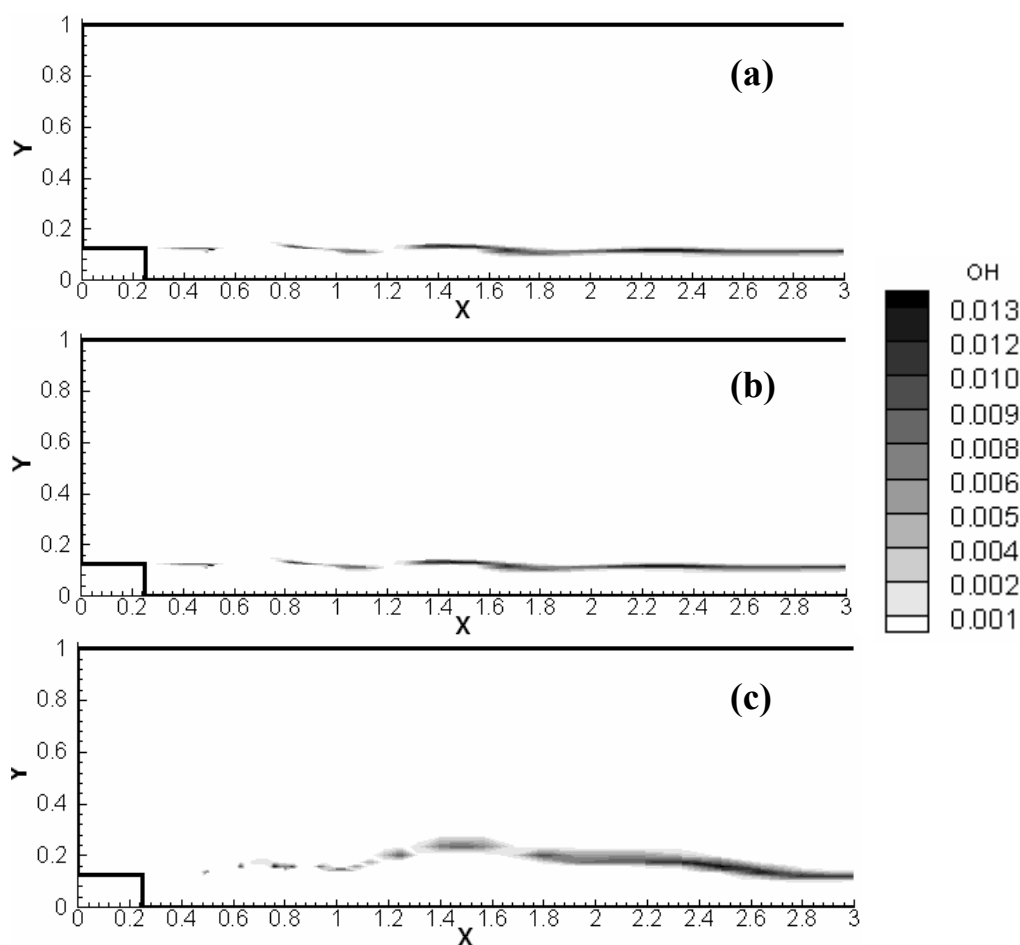
شکل ۶- توزیع نسبت مولی H_2O برای (a) یک انژکتور، (b) دو انژکتور و (c) سه انژکتور

برای مدل b، سه ناحیه گردشی وجود دارد. یکی از این نواحی قبل از انژکتورها بوده و یکی میان دو انژکتور و سومین ناحیه که دارای ناحیه گردشی بزرگی است در پایین دست انژکتورها قرار دارد. از شکل ۶ می توان این موضوع را برداشت نمود که اختلاط میان هوا و سوخت در ناحیه های گردشی دو و سه رخ می دهد. در ناحیه اول به دلیل وجود مخلوط غنی سوخت احتراق به صورت خیلی ضعیف می باشد.



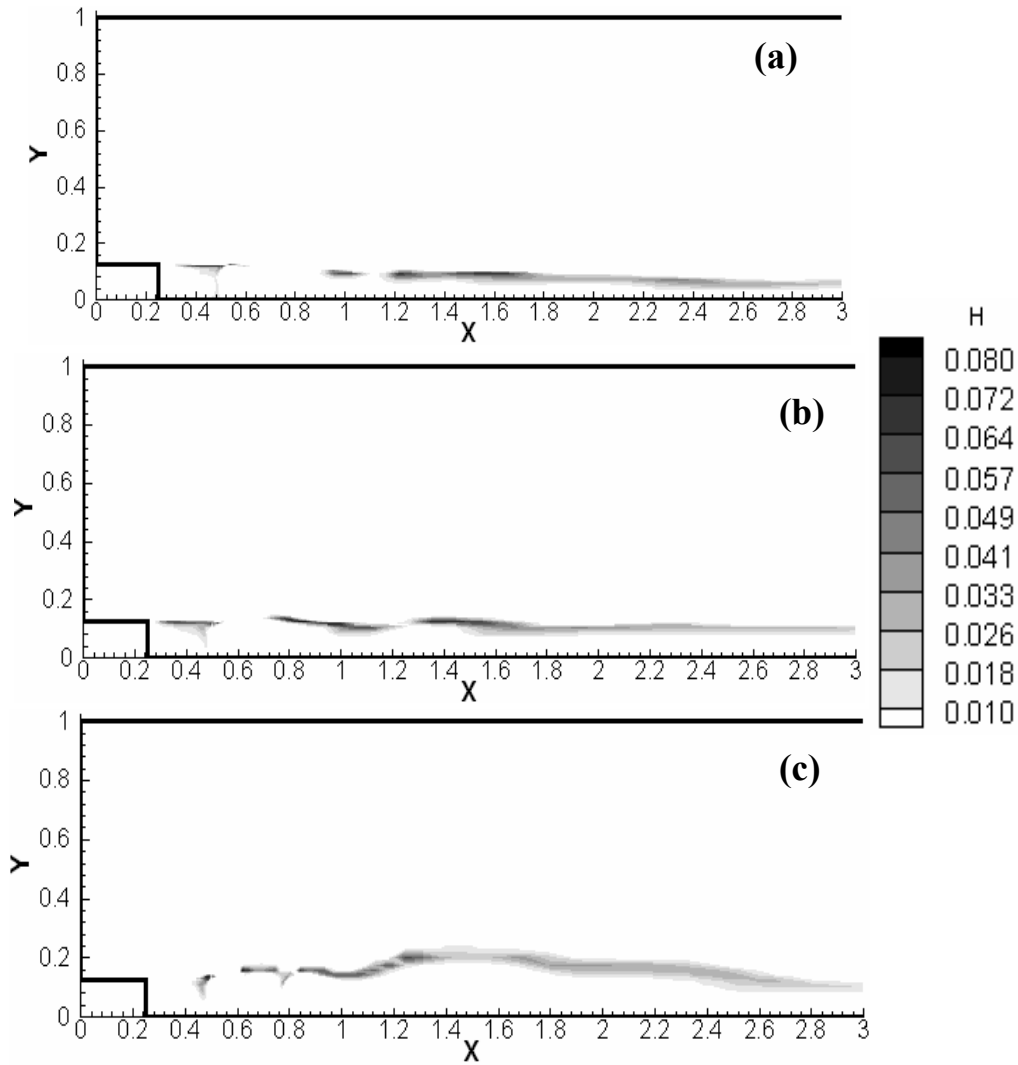
شکل ۷- میدان جریان برای (a) یک انژکتور، (b) دو انژکتور و (c) سه انژکتور

برای مدل c، سه انژکتور سیستم گردش کاملاً پیچیده ای را تولید می کنند. نواحی گردشی شامل ۶ ناحیه می شود که این نواحی در قبل، میان و بعد از انژکتورها مانند مدل b قرار دارند. در ابتدا میان پله و انژکتور اول به دلیل وجود ناحیه غنی سوخت احتراق بسیار ضعیفی را داریم. از طرفی در پایین دست انژکتورها ناحیه ای با احتراق شدید را مشاهده می کنیم.

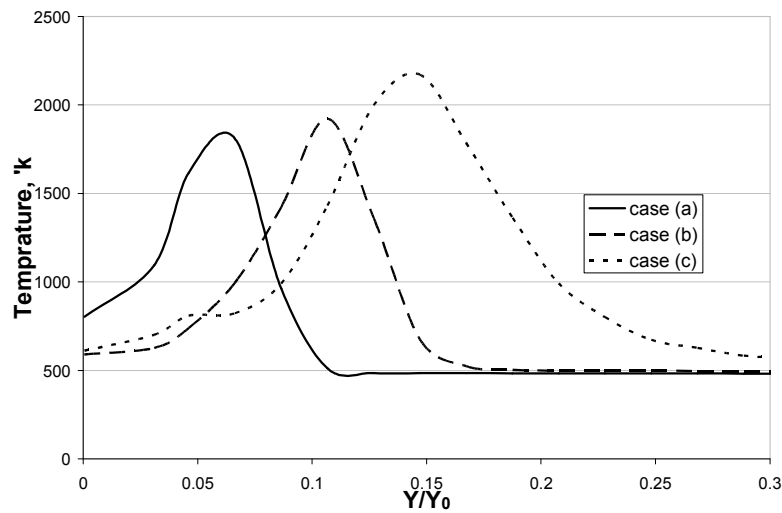


شکل ۸- توزیع نسبت مولی OH برای (a) یک انژکتور، (b) دو انژکتور و (c) سه انژکتور

شکل ۸ و ۹ به خوبی نواحی تشکیل شعله را با استفاده از توزیع نسبت مولی OH و H نشان می دهد. با توجه به اشکال بالا و میدان جریان به نظر می رسد که شکل شعله به شدت متأثر از سیستم گردش جریان و نواحی گردشی می باشد. هنگامی که تعداد نواحی گردشی افزایش می یابد شعله در ناحیه پایین دست جریان وسعت یافته و در نتیجه سبب پایداری نواحی احتراقی می گردد. از طرفی از توزیع OH و H می توان تأثیر بسیار مهم نواحی گردشی میان انژکتورها را بر روی پایداری شعله به خوبی مشاهده نمود.

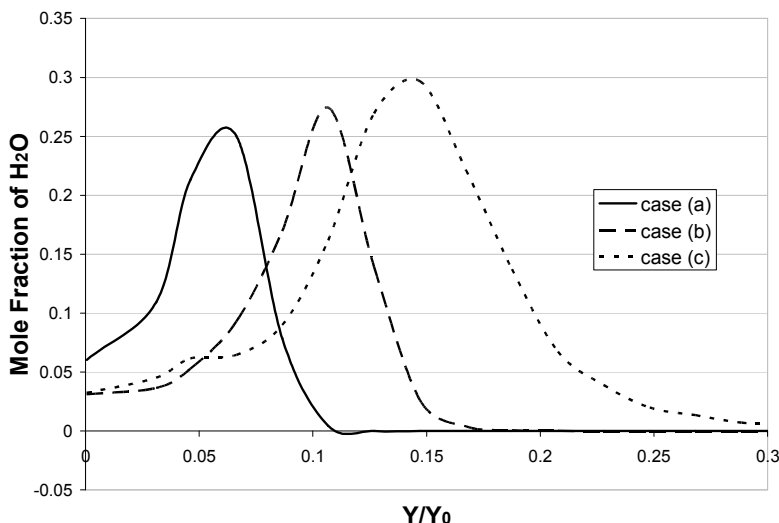


شکل ۹- توزیع H برای (a) یک انژکتور، (b) دو انژکتور و (c) سه انژکتور

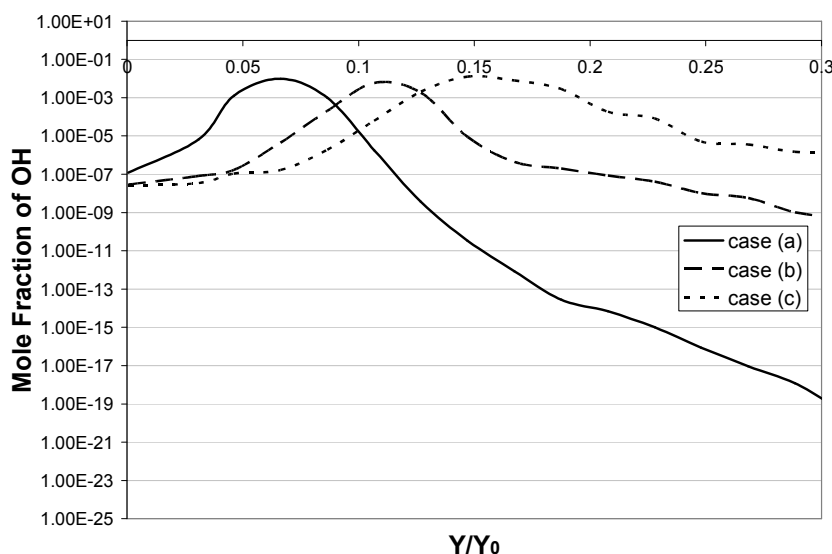


شکل ۱۰- مقایسه توزیع دما در فاصله $X=100$ cm

پروفایل عرضی تغییرات دما و نسبت مولی H_2O و OH در فاصله $X=2.5(100cm)$ برای سه مدل مورد مطالعه در شکل ۱۰ تا ۱۲ داده شده است. بر اساس این نمودارها می توان نفوذ و انبساط شعله را در داخل جریان اصلی به خوبی مشاهده کرد. شکل ۱۰ به طور واضح نشان دهنده نواحی احتراقی گسترش یافته در مدل b و c در مقایسه با مدل a می باشد.



شکل ۱۱- مقایسه توزیع ضرایب مولی H_2O در فاصله $X=100\text{ cm}$



شکل ۱۲- مقایسه توزیع ضرایب مولی OH در فاصله $X=100\text{ cm}$

۵- نتیجه گیری

نتایج این مطالعه نشان می دهد که برای سه مدل تزریق شامل: یک انژکتور، دو انژکتور و سه انژکتور، ساختار شعله تغییر می کند. برای یک انژکتور دو ناحیه احتراقی قبل و بعد از انژکتور وجود دارد. در این مدل، حداکثر ارتفاع شعله تا حدود نصف ارتفاع شعله می باشد. البته با افزایش انژکتور مانند مدل دو انژکتوری و سه انژکتوری، احتراقی قوی و عریض در ناحیه پایین دست انژکتور خواهیم داشت. به عبارت دیگر، انژکتور ها باعث ایجاد نواحی گردشی پیچیده ای می شوند که این نواحی گردشی عامل اصلی و معتبری برای ایجاد ساختار شعله می باشد. در مدل دو انژکتوری، حداکثر ارتفاع شعله تا حدود ارتفاع پله

بوده و برای مدل سه انژکتوری ارتفاع شعله از ارتفاع پله بیشتر شده و به داخل جریان اصلی کشیده می شود. دمای شعله با افزایش تعداد انژکتور افزایش می یابد.

مراجع

1. Bogdanoff, D.W., "Advanced Injection and Mixing Techniques for Scramjet Combustors," Journal of Propulsion and Power, Vol. 10, No. 2, 1994, pp. 183-190.
2. Bushnell, D.M., "Hypervelocity Scramjet Mixing Enhancement," Journal of Propulsion and Power, Vol. 11, No. 5, 1995, pp. 1088-1090.
3. Billig, F.S. "Research on Supersonic Combustion," Journal of Propulsion and Power, Vol.9, 1993, pp. 499.
4. Kimura, I., Aoki, H., and Kato, M., "The Use of a Plasam Jet for Flame Stabilization and Promotion of Combustion in Supersonic Air Flows", Combustion and Flame, Vol. 42, 1981, pp. 297.
5. Pope, S.B., "Computations of Turbulent Combustion: Progress and Challenge," 23th Symposium on Combustion, Combustion Inst., Pittsburgh, PA, 1990, pp. 591-612.
6. Bray, K.N.C. et al., "High Speed Turbulent Combustion," Turbulent Reactive Flows, Academic Press, New York, 1994.
7. Baurle, R.A. et al., "Assumed Joint Probability Density Function Approach for Supersonic Turbulent Combustion," Journal of Propulsion and Power, Vol. 10, 1994, pp. 473-484.
8. Coakley, T.J., Huang, P.G., "Turbulence Modeling for High Speed Flow," 1992, AIAA Paper 92-0436.
9. Gerlinger, P., Algermissen, J., Bruggemann, D., "Numerical Simulation of Mixing for Turbulent Slot Injection," AIAA Journal, Vol. 34, Jan. 1996, pp. 73-78.
10. Stahl, G., Warnatz, J., "Numerical Investigation of Time-Dependent Properties and Extinction of Strained Methane and Propane Air Flamelets," Combustion and Flame, Vol.85, 1991, pp.285-299.
11. Shuen, J.S., Yoon, S., "Numerical Study of Chemically Reacting a Lower-Upper Symmetric Successive Overrelation Scheme," AIAA Journal, Vol. 27, No. 12, 1989, pp. 1752-1760.
12. Ju, Y., "Lower-Upper Scheme for Chemically Reacting Flow with Finite Rate Chemistry," AIAA Journal, Vol. 34, No. 8, 1996, pp. 1418-1425.
13. Tabejamaat, S., Niioka, T., "Numerical Study of Preburned Hydrogen by a High-Order Numerical Scheme for Turbulent Reactive Flows," Proceeding of the Combustion Institute, Combustion Inst., Pittsburgh, PA, Vol.28, 2000, pp.83-89.