

اثر نسبت هم‌ارزی و زاویه واگرایی بر تشکیل آلاینده NO_x در مسیرهای همگرا-واگرا

مریم امیری*
محمد مقیمان

دانشجوی دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی

چکیده

در این مقاله، جریان آشفته احتراقی در مجرای همگرا-واگرا و همچنین مدل‌سازی آلاینده NO_x به روش عددی تفاضل محدود مورد مطالعه قرار گرفته و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همچنین در این مقاله اثر نسبت هم‌ارزی و زاویه واگرایی بر تشکیل آلاینده NO_x در مجرای همگرا-واگرا مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده اثر مهم زاویه واگرایی حدی را بر ضریب بازیافت فشار نشان می‌دهد. به دلیل وابستگی شدید آلاینده NO_x به دمای بیشینه، با افزایش دما، میزان آلاینده NO_x نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت هم‌ارزی، دمای بیشینه افزایش و به دنبال آن میزان آلاینده NO_x نیز افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: احتراق، مجرای همگرا-واگرا، زاویه واگرایی، نسبت هم‌ارزی، NO_x .

Effects of Equivalence Ratio and Diverging Angle on Formation of NO_x in Converging and Diverging Ducts

M. Amiri

Ph. D. Student, Ferdowsi University of Mashhad, Deptment of Mechanical Engineering

M. Moghiman

Professor, Ferdowsi University of Mashhad, Deptment of Mechanical Engineering

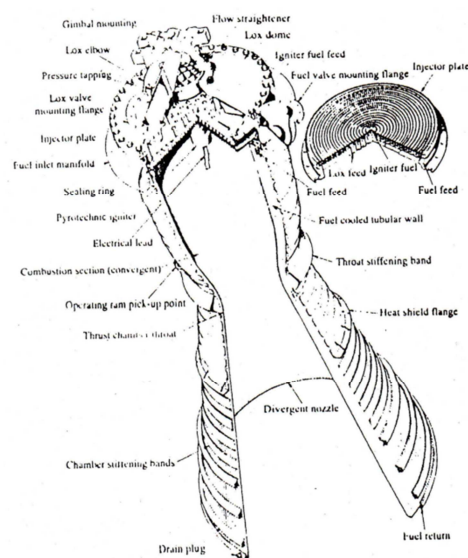
Abstract

The present paper develops a numerical procedure (finite difference) for the calculation of turbulent combustive flows and simulation of production of NO_x pollutants in converging and diverging ducts. Also this paper reports the results of a numerical investigation of the effects of the equivalence ratio and diverging angle on NO_x emissions. Our results indicate the important influence of the limiting diverging angle of diffuser on the coefficient of pressure recovery. Moreover, due to its intense dependence on the maximum temperature in the domain, the NO_x pollutant amount attained also maximum level. By increasing the equivalence ratio, maximum temperature and also NO_x pollutant increase.

Keywords: Combustion, Converging and Diverging Duct, Diverging Angle, Equivalence Ratio, NO_x .

۱- مقدمه

از دیر باز تا کنون بشر برای تامین انرژی مورد نیاز خود و تبدیل آن به صورت‌های دیگر فعالیت‌های زیادی انجام داده است. در همین راستا به جمع‌آوری دانش در این زمینه و تحقیقات درباره تولید انرژی پرداخته است. تکامل تحقیقات باعث پیدایش روش‌های نوینی در این زمینه شده، که یکی از مهمترین آنها تولید توربین‌های گازی می‌باشد که قابلیت تبدیل انرژی سوخت به دیگر انرژی‌های مفید از قبیل انرژی مکانیکی، انرژی الکتریکی و یا نیروهای پیش‌برندگی، که از انرژی جنبشی جت به دست می‌آید، و غیره ... را دارا است. اساس کار همه انواع توربین‌های گازی یکسان است. در این موتورها سوخت به درون هوای فشرده پاشیده می‌شود و در فشار بالا می‌سوزد. گازهای سوخته شده که دارای دما و فشار بالایی است منبع انرژی را فراهم می‌سازد. در توربین‌های گازی زمینی همه این گاز برای چرخاندن پره‌های توربین به کار می‌رود و در موتورهای جت و توربین‌های گاز هوایی این گازها به صورت نیروی پیش‌برنده مورد استفاده قرار می‌گیرد. تکنولوژی ساخت و طراحی توربین‌های گاز کاری بسیار پیچیده و طاقت فرسا می‌باشد. شرکت‌های مختلفی در این زمینه فعالیت دارند که دو شرکت جنرال الکتریک و رولزپیس معتبر ترین آنهاست. شکل ۱ نمونه‌ای از کاربردهای توربین گاز در سیستم‌های هوایی است که توسط شرکت رولز پویس طراحی و ساخته شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۱- کاربرد توربین گاز در سیستم‌های هوایی

بازی کند. آیرودینامیک دیفیوزر نیز نقش مهمی در کنترل توزیع جریان جرم، پایداری سیستم محفظه احتراق و کاهش افت فشار توربین گاز، ایفا می‌کند [۲]. هوای ورودی به موتور هواپیما از طریق کانالی به شکل دیفیوزر با عدد ماخ ۰/۴ یا کمتر تامین می‌شود و در شرایط پروازی منجر به افزایش فشار می‌شود [۳]. در این موتورها، افت فشار کم و یکنواختی جریان برای جلوگیری از ارتعاشات اهمیت زیادی دارند. در جریان لایه مرزی در داخل یک دیفیوزر با دیواره‌های صاف، زاویه واگرایی دارای اهمیت قابل توجه است. اگر این زاویه بسیار کوچک باشد، طول دیفیوزر زیاد و تلفات اصطکاک نیز افزایش می‌یابد و بزرگ شدن بیش از حد از این زاویه منجر به جدایی لایه مرزی و تولید چرخش و در نتیجه از دست دادن قدرت موتور می‌شود. با این حال زاویه واگرایی، با توجه به ویژگی‌های جریان انتخاب و نیم زاویه‌آن نباید بزرگتر از ۱۰ باشد [۴-۵]. جریان با زاویه واگرایی مناسب شبیه به جریان لایه مرزی است و معادلات آن را می‌توان با استفاده از روش گام به گام حل کرد. این روش دارای مزایای قابل توجهی نسبت به دیگر روش‌های محاسبه از نظر سرعت محاسبات و حجم حافظه مورد نیاز دارد [۵-۶]. در شبیه‌سازی عددی، جریان در داخل دیفیوزر، انطباق شبکه به میدان حل و افزایش تراکم آن در مجاورت دیوار جامد در دقت و صحت نتایج خروجی نقش بسیار مهمی را بازی کند [۷]. یکی از روش‌هایی که برای انطباق شبکه محاسباتی به میدان حل به کار گرفته می‌شود، استفاده از دستگاه مختصات فون میز است که در آن خطوط جریان به عنوان یکی از مختصات مستقل انتخاب می‌شوند [۸].

احتراق قدیمی‌ترین فن‌آوری بشر است. در حال حاضر حدود نود درصد انرژی جهان، مانند حمل و نقل، گرمایش و بوسیله احتراق تامین می‌شود. با وجود پژوهش‌های روزافزون برای دستیابی به انرژی‌های جایگزین، شکی نیست که در آینده نیز احتراق همچنان مهم خواهد ماند. با افزایش دائمی احتراق سوخت‌های هیدروکربنی، بخش مهمی از محصولات احتراق به عنوان یک منبع مضر برای محیط زیست شناخته می‌شوند. گروه مهمی از سوخت‌ها که در تولید انرژی استفاده وسیع دارند، سوخت‌های مایع می‌باشند. احتراق این سوخت‌ها با گرم شدن و تبخیر سوخت و جریان اختلاط آن با هوا و سپس مشتعل شدن آن همراه بوده و اغلب با تشکیل NO_x همراه می‌باشد. NO_x از آلاینده‌های مضر حاصل از احتراق است. در گذشته برای مطالعه احتراق در توربین‌های گازی از نتایج تجربی استفاده می‌شده است. اما با توجه به زمان‌بری و هزینه بالای آزمایشات از طرف دیگر، طراحان همواره مایل به استفاده وسیعتر از روش‌های عددی و محاسباتی بوده‌اند. با استفاده از

ضرورت کاهش سرعت و جلوگیری از افت فشار در بسیاری از جریان‌های داخلی منجر به استفاده از انواع مختلف دیفیوزر شده است [۱]. در توربین گاز، که در واقع یک موتور حرارتی است، دیفیوزر نقش مهمی در تبدیل انرژی جنبشی به فشار

۲- معادلات حاکم و انتخاب دستگاه مختصات

معادلات پایستاری ممنوم، انرژی و گونه‌ها شیمیایی در سیستم مختصات $X \sim \psi$ به صورت زیر می‌باشند، که ψ تابع جریان است. انتخاب ψ به عنوان یکی از پارامترها باعث می‌شود که خود به خود معادله پایستاری جرم ارضا شود و عملاً نیازی به حل این معادله نیست. این یکی از مزایای انتخاب ψ و X می‌باشد که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه و از نظر زمانی بسیار مفید است [۸].

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \psi} \left(r^2 \rho U \mu_{eff} \frac{\partial U}{\partial \psi} \right) + \frac{1}{\rho U} \left(F_x - \frac{\partial P}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\frac{\partial}{\partial \psi} \left(r^2 \rho U \Gamma_{h,eff} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial \psi} \right) \right) \\ + \frac{\partial}{\partial \psi} \left[\left(\mu_{eff} \right. \right. \\ \left. \left. - \Gamma_{h,eff} \right) r^2 \rho U \frac{\partial (U^2/2)}{\partial \psi} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial m_j}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \psi} \left(r^2 \rho U \Gamma_{j,eff} \frac{\partial m_j}{\partial \psi} \right) + \frac{R_j}{\rho U} \quad (3)$$

معادلات بالا را می‌توان به شکل کلی زیر نوشت:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} + (a + b\omega) \frac{\partial \phi}{\partial \omega} = \frac{\partial}{\partial \omega} \left(c \frac{\partial \phi}{\partial \omega} \right) + d \quad (4)$$

که ضرایب a, b, c, d عبارتند از:

$$a = \frac{r_I \dot{m}_I''}{(\psi_E - \psi_I)} \quad (5)$$

$$b = \frac{(r_E \dot{m}_E'' - r_I \dot{m}_I'')}{(\psi_E - \psi_I)} \quad (6)$$

$$c = \frac{r^2 \rho U \Gamma_{eff}}{(\psi_E - \psi_I)^2} \quad (7)$$

$$d = \frac{1}{\rho U} S_0 \quad (8)$$

ضرایب a و b دارای بعد L^{-1} است و S_0 نیز آهنگ تولید ویژگی ϕ می‌باشد. به جای به کار بردن تابع جریان به عنوان یکی از مختصات، از کمیت بدون بعد تابع جریان استفاده می‌شود. این کمیت به صورت $\omega = \frac{\psi - \psi_E}{\psi_E - \psi_I}$ نشان داده می‌شود [۲۲]. اثرات آشفته‌گی نیز با طول اختلاط پرانتل مدل شده است. انرژی حاصل از احتراق با استفاده از یک واکنش کلی، برگشت ناپذیر و یک مرحله‌ای بین بخار سوخت و کسپژن تایین شده است. آهنگ‌های واکنشی که در جمله چشمه معادله بقاء گونه‌های شیمیایی نشان داده شده بوسیله عبارت فرضیه شکست

این روش‌ها براحتی می‌توان پارامترهای گوناگون طراحی از قبیل هندسه، دبی، نوع سوخت و نسبت هم‌ارزی..... را تغییر داد. ملتون و همکاران، اثر نسبت هم‌ارزی را بر شعله‌های دیفیوژن اتان آزمایش نمودند [۹]. بارلو و کارتر، اثر دما و کسر جرمی بر آلایندة NO_x در شعله‌های هیدروژن به طریق آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. مونیر و همکاران، آلایندة NO_x را در شعله‌های آشفته پروپان را به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند [۱۱]. پوپ و همکاران، کنترل آلایندة NO_x را در شعله‌های پیش آمیخته متان با اعمال نوسانات مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. بسیاری از محققان نیز بر توسعه مکانیسم‌های NO_x برای پیش بینی دقیق تر و بررسی خروجی‌های NO_x متمرکز شده اند که شامل مکانیسم‌های لی-ویلیامز [۱۳]، مکانیسم وارناتز-کلاس [۱۴]، مکانیسم لیدز [۱۵]... می‌باشند. رورتویت و همکاران، اثر رقیق کننده ها مثل CO_2 ، NO_2 و He بر تشکیل NO_x در شعله‌های هیدروژن مورد بررسی قرار دادن و به این نتیجه رسیدند که شعله‌هایی که با CO_2 و He رقیق شده اند، نسبت به NO_x ، NO_2 کمتری تولید می‌کنند [۱۶]. چودوری و همکاران، اثر استفاده از سوخت‌های ترکیبی هیدروژن-هیدروکربن در شعله‌های جت آشفته مورد بررسی قرار دادند [۱۷]. سوبرمونی و همکاران، اثر پیش آمیخته کردن سوخت هلیوم با کسر جرمی‌های مختلف و همچنین اثر نسبت هم‌ارزی بر تشکیل NO_x بررسی نموده‌اند [۱۸]. هاشمی و همکاران اثر آشفته‌گی هوای ورودی بر آلایندة NO_x و توزیع دما در شعله پخشی متان - هوا در یک هندسه با یک انبساط ناگهانی را بررسی کردند و نشان دادند که افزایش شدت آشفته‌گی جریان ورودی به طور قابل ملاحظه آلایندة NO_x را کاهش می‌دهد [۱۹]. مارکوس و همکاران به صورت آزمایشگاهی به بررسی عدد چرخش و نسبت هم‌ارزی بر تشکیل آلایندة ناکس در یک کوره پرداختند و نشان دادند که افزایش عدد چرخش و کاهش نسبت هم‌ارزی به ترتیب منجر به کاهش ۳۱٪ و ۳۳٪ NO_x می‌شود [۲۰]. بولات و همکاران تشکیل آلایندة‌ها در محفظه احتراق توربین گاز صنعتی را با استفاده از مدل توربولانسی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) را بررسی کردند و آهنگ تشکیل NO_x را به صورت NO فوری و حرارتی تعیین کردند [۲۱]. هدف از این مقاله توسعه یک روش عددی برای اندازه گیری جریان سهموی داخل و خارج مجاری همگرا- واگرا در وضعیت احتراقی و همچنین شبیه‌سازی عددی آلایندة NO_x است. اثر پارامترهای مهم از قبیل زاویه واگرایی و نسبت هم‌ارزی بر آلایندة NO_x نیز مطالعه شده است.

$$R_{f1} = 1.8 * 10^8 * EXP\left(\frac{-38370}{T}\right) \quad (14)$$

$$R_{f2} = 1.8 * 10^4 * T * EXP\left(\frac{-4680}{T}\right) \quad (15)$$

$$R_{r1} = 3.8 * 10^7 * EXP\left(\frac{-425}{T}\right) \quad (16)$$

$$R_{r2} = 3.8 * 10^3 * T * EXP\left(\frac{-20820}{T}\right) \quad (17)$$

آهنگ تشکیل NO توسط رابطه زیر بیان شده است [۲۶]:

$$\frac{d[NO]}{dt} = \frac{2[O]\{R_{f1}R_{f2}[O_2][N_2] - R_{r1}R_{r2}[NO]^2\}}{R_{f2}[O_2] + R_{r1}[NO]} \quad (18)$$

در حالت پایدار $\frac{d[NO]}{dt}$ برابر صفر می‌باشد. معادله فوق شدت ایجاد NO را بیان می‌کند که در روابط تفاضل محدود استفاده می‌شود.

غلظت اتم نیتروژن توسط رابطه زیر بیان شده است:

$$[N] = [O] \frac{R_{f1}[N_2] + R_{r2}[NO]}{R_{r1}[NO] + R_{f2}[O_2]} \quad (19)$$

غلظت اتم اکسیژن طبق نظر [۳۰] عبارتند از:

$$[O] = 36.64 * T^{1/2} * [O_2]^{1/2} * EXP\left(\frac{-27123}{T}\right) \quad (20)$$

به منظور پیش بینی مقدار NO در مقاله حاضر، مدل زلدوویچ انتخاب شده است. از نکات مثبت مکانیزم زلدوویچ این است که برای یافتن غلظت NO احتیاج است که فقط یک معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی اضافی حل شود و هر چند که باید چند رابطه جبری جنبی را برای حل آن در نظر گرفت. بنابراین با توجه به این که این مدل به حجم نسبتاً کمی از حافظه کامپیوتر احتیاج دارد، لذا مدل فوق مقرون به صرفه بوده و همین امر عامل مهمی در انتخاب این ساز و کار برای مدل سازی NO تولید شده می‌باشد.

۴- تولید شبکه و حل معادلات دیفرانسیلی

تولید شبکه در میدان محاسباتی در مختصات $x - w$ انجام شده است. با توجه به سه‌موی بودن ماهیت معادله ۲۱ و غالب بودن جریان و یک راهه بودن مختصه x ، می‌توان فرض کرد که جریان فقط از بالا دست اثر می‌پذیرد. از این رو در گسسته سازی معادلات از روش قدم به قدم استفاده می‌شود [۳۱]. بنابراین هر نقطه از پنج نقطه مجاور خود اثر می‌پذیرد که دو نقطه در همان مقطع و سه نقطه در مقطع بالا دست می‌باشد.

$$D_i \phi_{i,D} = A_i \phi_{i+1,D} + B_i \phi_{i-1,D} + E_i \phi_{i,U} + F_i \phi_{i+1,U} + G_i \phi_{i-1,U} + H_i \quad (21)$$

A_i و B_i و ضرایبی هستند که با انتگرال گیری از معادلات روی سلول محاسباتی به دست می‌آیند. با توجه به این که در معادله

گردابه‌ها [۲۳] یا آهنگ آرنیوس [۲۴] تعیین می‌گردد. این نوع مدل‌ها برای گستره وسیعی از کاربردها شامل سیستم‌های واکنشی آرام و آشفته و نیز احتراق از پیش مخلوط و یا نفوذ شعله مناسب می‌باشد. آهنگ مصرف سوخت توسط دو روش ذکر شده محاسبه شده و کمترین مقدار انتخاب می‌شود.

$$R_{fu} = -C \rho m_{fu} \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \quad (9)$$

$$R_{fu} = -p P^2 m_{fu} m_{ox} \exp\left\{-\frac{E}{RT}\right\} \quad (10)$$

۳- ساز و کارهای تشکیل NO_x

آلودگی‌های ناشی از اکسیدهای نیتروژن، اثرات زیان باری بر سلامت انسان و محیط زیست برجای می‌گذارند و همچنین نقش مهمی در تشکیل باران‌های اسیدی، مه، دود فتوشیمیایی و سوراخ شدن لایه ازن دارند. به مجموعه تمام اکسیدهای نیتروژن NO_x گفته می‌شود که طی فرایندهای احتراقی با واکنش شیمیایی نیتروژن هوای احتراق و یا نیتروژن موجود در سوخت تشکیل می‌شود. گونه‌های آلایندگی تشکیل شده به طور اهم وابسته به دما و نسبت سوخت به هوا در ناحیه احتراق هستند. تقریباً ۹۰ تا ۹۵ درصد NO_x تشکیل شده در پروسه احتراق، NO و مابقی NO₂ است. البته با توجه به نوع شعله و سایر عوامل وابسته سهم هر یک از این گونه‌ها در یک فرایند احتراقی می‌تواند تغییر کند. به طور عمده سه ساز و کار برای تولید NO_x احتراق مطرح می‌باشد: ساز و کار گرمایی، ساز و کار فوری و ساز و کار NO سوختی [۲۵-۲۶].

ساز و کار گرمایی مهمترین ساز و کاری است که تاکنون شناخته شده است. این ساز و کار برای اولین بار توسط زلدوویچ در سال ۱۹۴۶ مطرح شد. دما و غلظت بالای اکسیژن از عوامل مهم در این ساز و کار هستند و تقریباً در اکثر فرایندهای احتراقی مطرح می‌باشد. این ساز و کار توسط دو واکنش اساسی زیر، با عنوان ساز و کار زلدوویچ بیان می‌گردد [۲۳]:



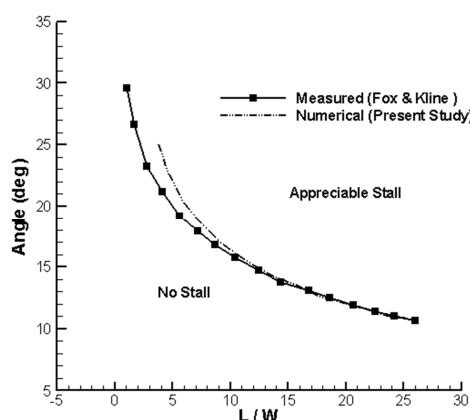
تشکیل اکسید نیتروژن از طریق مولکول نیتروژن N₂ نیازمند شکسته شدن پیوند قوی بین اتم‌های نیتروژن است و همین امر موجب وابستگی شدید این ساز و کار به درجه حرارت می‌گردد. به علاوه واکنش دیگری توسط لاووی و همکاران به صورت زیر ارائه شده است [۲۷]:



در این مکانیزم R_{f1} و R_{f2} شدت واکنش‌ها (آهنگ واکنش) به سمت جلو می‌باشند و R_{r1} و R_{r2} شدت واکنش‌ها در جهت عکس می‌باشند [۲۸-۲۹].

۶- نتایج

در این بخش اثر نسبت طول به قطر مقطع ورودی بر زاویه حدی واگرایی دیفیوزر با دیواره تخت بررسی می‌شود. زاویه واگرایی حدی عبارتست از: بزرگترین زاویه واگرایی که قبل از آن هیچگونه جدایی و جریان برگشتی در سیال بوجود نیاید. در شکل ۴ نتایج محاسبات عددی با نتایج آزمایشگاهی فاکس و کلاین [۳۲] مقایسه شده است، نمای کلی منحنی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش نسبت طول به قطر ورودی در دیفیوزر، پدیده جدایش و جریان برگشتی در زوایای واگرایی کمتری رخ می‌دهد، از طرفی همچنین مشاهده می‌شود که در نسبت‌های بالاتر طول به قطر ورودی، منحنی‌ها انطباق بهتری بر یکدیگر دارند. خاصیت و کاربردی که منحنی فوق می‌تواند داشته باشد، استفاده از آن در طراحی دیفیوزر با دیواره تخت می‌باشد. بدین ترتیب که بسیار کوچک بودن زاویه واگرایی موجب طول شدن طول دیفیوزر و افزایش تلفات اصطکاکی و بیش از حد بزرگ شدن زاویه مذکور باعث جدایش لایه مرزی می‌شود. منحنی شکل ۴ در واقع مرز بین ناحیه‌ای که در آن جدایش وجود دارد (ناحیه بالای منحنی) و ناحیه‌ای که در آن هرگز این پدیده بوجود نخواهد آمد (ناحیه زیر منحنی) می‌باشد. این منحنی در اصطلاح نقشه پایداری دیفیوزر خوانده می‌شود [۳۲]. در طراحی‌ها همواره سعی بر آن است که ابعاد هندسی و زاویه واگرایی دیفیوزر طوری انتخاب شود که دارای بیشترین زاویه واگرایی و کمترین نسبت طول به قطر ورودی باشد. این حالت وضعیت بهینه‌ای بین ابعاد هندسی و تلفات انرژی خواهد بود.



شکل ۴- مقایسه نتایج محاسبات عددی و آزمایشگاهی برای زوایای واگرایی حدی

فاکس و کلاین [۳۲] ضریب بازیافت فشار در یک دیفیوزر با دیواره تخت را به صورت ایده‌آل با رابطه $C_{PR} = 1 - (U_2/U_1)^2$ تعریف کرده‌اند، که U_2 و U_1 به ترتیب سرعت‌های متوسط در مقاطع ورودی و خروجی را نشان می‌دهند. در این بخش نتایج عددی به دست آمده و نتایج شرایط

۲۱ مقادیر بالادست معلوم می‌باشد، می‌توان کلیه جملات مربوطه را با معرفی پارامتر C_i به صورت زیر مستتر کرد.

$$C_i = E_i \phi_{i,U} + F_i \phi_{i+1,U} + G_i \phi_{i-1,U} + H_i \quad (22)$$

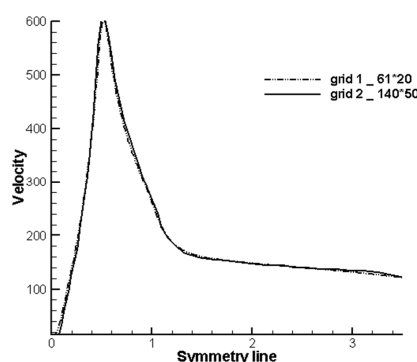
بنابراین معادله ۲۱ بر اساس مقادیر مجهول به شکل نهایی زیر نوشته می‌شود [۲۹]:

$$D_i \phi_{i,D} - A_i \phi_{i+1,D} - B_i \phi_{i-1,D} = C_i \quad (23)$$

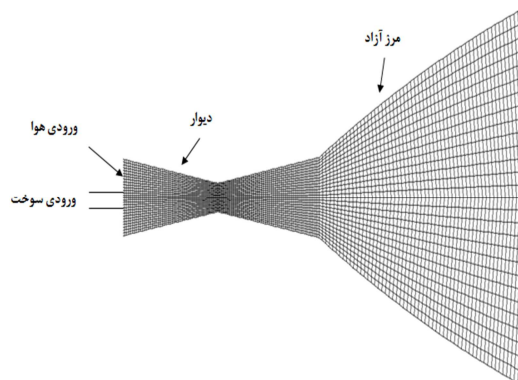
با بسط معادله ۲۳ و حل دستگاه معادلات با استفاده از الگوریتم ماتریس سه قطری (TDMA) می‌توان مقادیر ϕ_2 و ϕ_3 و ... ϕ_{N-1} را به دست آورد.

۵- میدان حل و بررسی استقلال شبکه

شکل ۲ توزیع سرعت در روی خط تقارن مجرا برای دو نمونه مختلف شبکه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که جواب‌های هر دو شبکه بر یکدیگر منطبق می‌باشد و لذا درشت ترین شبکه (شبکه اول) دقت کافی در حل میدان عددی را دارد. تمام نتایج ارائه شده مربوط به حل بر روی این شبکه می‌باشد. در شکل ۳ شبکه موردنظر به همراه حوزه محاسباتی و شرایط مرزی مسئله ارائه شده است.

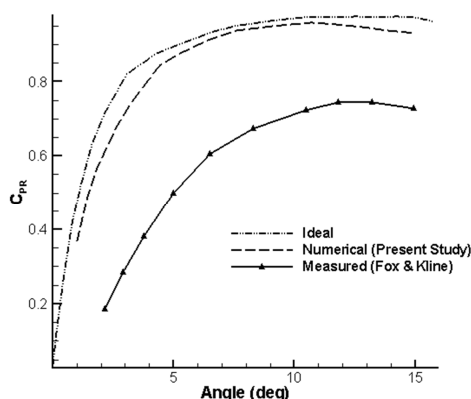


شکل ۲- بررسی عدم وابستگی نتایج به ابعاد شبکه



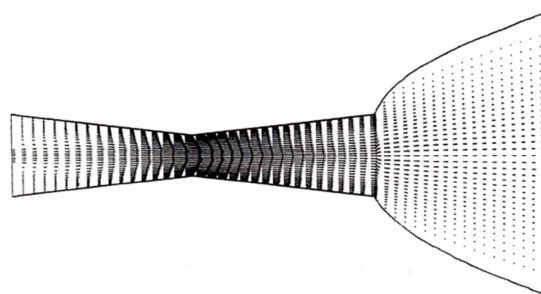
شکل ۳- شبکه بندی و حوزه محاسباتی

ایده‌ال برای نسبت طول به قطر ۱۰ با نتایج آزمایشگاهی فاکس و کلاین مقایسه شده است. از نمای کلی سه منحنی پیداست که با افزایش زاویه واگرایی مقدار ضریب بازیافت فشار افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که نتایج حالت ایده‌ال و نتایج عددی بسیار نزدیک به هم بوده و مقادیر آن‌ها کمی بیشتر از مقادیر نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. اختلاف نتایج آزمایشگاهی با دو روش دیگر می‌تواند به علت اثرات زبری جداره دیفیوزر آزمایشگاهی که می‌تواند موجب اتلاف انرژی در سیال شود و یا به علت وجود خطای اندازه‌گیری باشد.



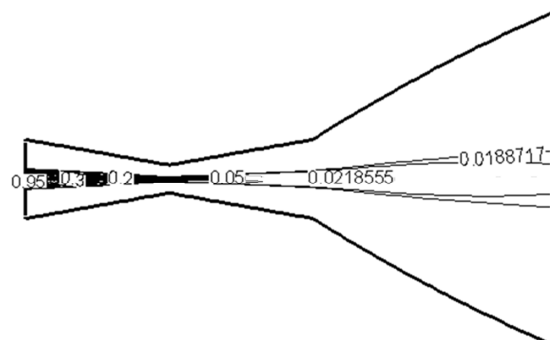
شکل ۵- مقایسه نتایج محاسبات عددی و آزمایشگاهی C_{PR} در زوایای واگرایی مختلف

در راکت‌ها و سیستم‌های پرتاب، نیروی پیشرانش بوسیله محفظه جلوبری که شامل بخش محفظه احتراق و دیفیوزر می‌باشد انجام می‌شود. شکل ۶ توزیع بردارهای سرعت در داخل و خارج مجرای همگرا-واگرا با طول واحد را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که بردارهای سرعت در محل اتصال محفظه احتراق (مجرای همگرا) با دیفیوزر دارای بیشترین مقدار می‌باشد. تقارن مطلوبی برای توزیع سرعت در داخل محفظه احتراق جلوبری و خارج از آن دیده می‌شود که می‌تواند به پایداری سیستم پرتابی کمک کند.

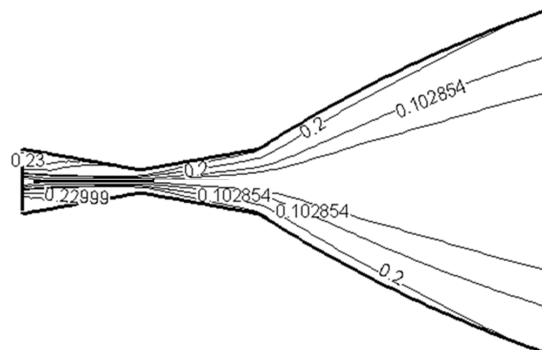


شکل ۶- توزیع بردارهای سرعت داخل و خارج مجرای همگرا-واگرا

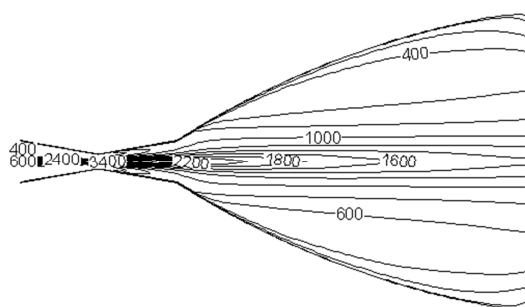
شکل‌های ۷ و ۸ کانتورهای کسر جرمی سوخت و اکسیژن در نسبت هم‌ارزی ۱ را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که اولاً مقدار کمی سوخت در نواحی خارج مجرا وجود دارد و ثانیاً در نواحی از داخل مجرا اکسیژن کافی وجود ندارد. شکل ۹ خطوط همدمای را برای جریان احتراقی در مجرای همگرا-واگرا نشانی‌دهد. بیشترین دما در اطراف محور تقارن یعنی در محلی که دو جریان سوخت و هوای ورودی با هم مخلوط می‌شود، به دست آمده است. مشاهده می‌شود که احتراق در مجرا به صورت بهتری انجام می‌شود و مقدار کمتری از سوخت به صورت سوخته نشده از مجرا خارج می‌شود.



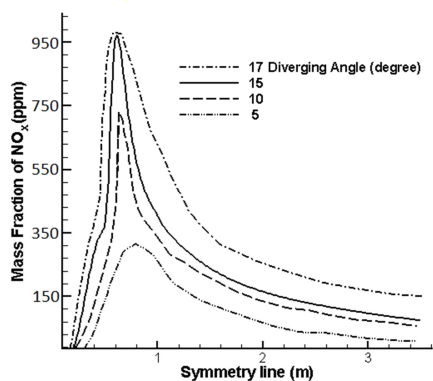
شکل ۷- کانتورهای سوخت در داخل و خارج مجرای همگرا-واگرا در نسبت هم‌ارزی ۱



شکل ۸- کانتورهای اکسیژن در داخل و خارج مجرای همگرا-واگرا در نسبت هم‌ارزی ۱

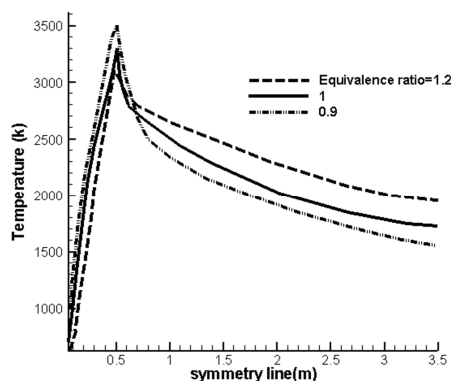


شکل ۹- خطوط همدمای در داخل و خارج مجرای همگرا-واگرا

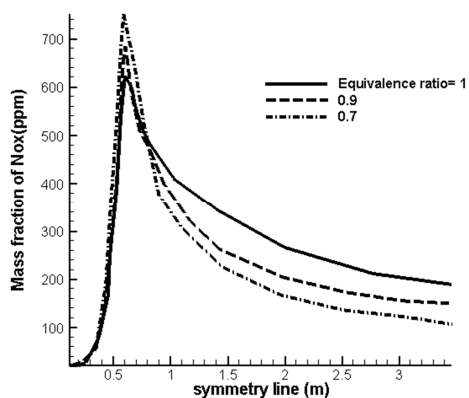


شکل ۱۲- اثر تغییر زاویه واگرایی بر کسر جرمی NO_x راستای جریان در داخل و خارج مجرای همگرا- واگرا

در شکلهای ۱۳ و ۱۴ اثر تغییر نسبت هم‌ارزی بر دما و میزان آلایندۀ NO_x نشان داده شده است. واضح است با افزایش نسبت هم‌ارزی، به دلیل کامل شدن احتراق، در خروجی دما افزایش می‌یابد همچنین بدلیل وابستگی شدید آلایندۀ NO_x به دما، همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌گردد آلایندۀ NO_x نیز با افزایش دما افزایش می‌یابد. لازم بذکر است سوخت مصرفی کروسین ($\text{C}_{12}\text{H}_{23}$) می‌باشد و تغییر نسبت هم‌ارزی با تغییر دبی هوا انجام می‌شود. در نسبت هم‌ارزی ۱، مقدار دبی سوخت ۹ کیلوگرم بر ثانیه است.

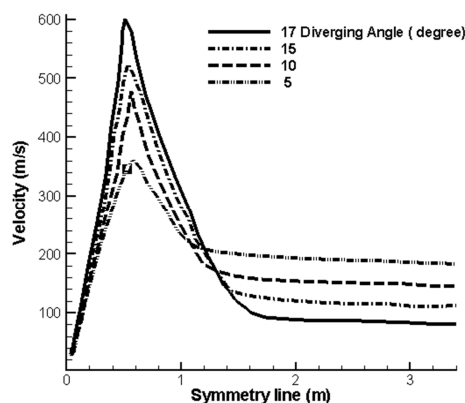


شکل ۱۳- اثر تغییر نسبت هم‌ارزی بر دما در داخل و خارج مجرای همگرا- واگرا



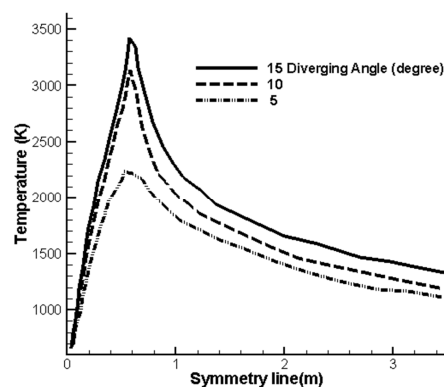
شکل ۱۴- اثر تغییر نسبت هم‌ارزی بر کسر جرمی NO_x در داخل و خارج مجرای همگرا- واگرا

در شکل ۱۰ اثر تغییر زاویه واگرایی بر توزیع سرعت در مسیرهای همگرا- واگرانشان داده شده است. با افزایش زاویه واگرایی دیفیوزر، به دلیل تقارن هندسی موجود بخش دیفیوزر و نازل، سرعت در راستای جریان در بخش نازل افزایش و در بخش دیفیوزر کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰- اثر تغییر زاویه واگرایی بر سرعت در راستای جریان در داخل و خارج مجرای همگرا- واگرا

در شکل ۱۱ تغییرات دما در داخل و خارج مجرای همگرا- واگرا در اثر افزایش زاویه واگرایی نشان داده شده است. واضح است که با افزایش زاویه فوق آهنگ احتراق افزایش می‌یابد و در نتیجه دما نیز افزایش می‌یابد. به دلیل وابستگی شدید NO_x به دمای بیشینه، در قسمت‌هایی که دما بیشینه می‌باشد، مقدار آلایندۀ NO_x نیز بیشینه می‌باشد. در انتهای مجرا با کاهش دما میزان آلایندۀ NO_x نیز کاهش می‌یابد (شکل ۱۲).



شکل ۱۱- اثر تغییر زاویه واگرایی بر دما در راستای جریان در داخل و خارج مجرای همگرا- واگرا

۶- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر جریان سهموی تراکم‌ناپذیر احتراقی با روش گام به گام مکانی در داخل و خارج مجراهای همگرا-واگرا و همچنین شبیه‌سازی آلاینده‌های NO_x به روش تفاضل محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. مقایسه نتایج عددی به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی بیانگر انطباقی نزدیک بین آنها می‌باشد. تشخیص نوع دستگاه مختصات و سهموی بودن ماهیت جریان و استفاده از روش گام به گام مکانی، باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در زمان محاسبات شده است. همچنین نتایج بیانگر آن است که مدل ساده طول اختلاط توانسته است رفتار جریان را با تقریب خوبی توصیف نماید. به دلیل وابستگی شدید آلاینده NO_x به دمای بیشینه، با افزایش دما، میزان آلاینده NO_x نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت هم‌آزری، دمای بیشینه افزایش و به دنبال آن میزان آلاینده NO_x نیز افزایش می‌یابد.

نمادها

A,B,C,D	ضرایب
E	انرژی فعالساز
$\tilde{h}_m$	کسر جرمی
$\dot{m}_I$	آهنگ جریان جرم از مرز I
$\dot{m}_E$	آهنگ جریان جرم از مرز E
P	فشار
p	ثابت
r	جهت شعاعی
R_r, R_f	آهنگ واکنش در جهت مستقیم و عکس
S	عبارت چشمه
T	دما
U	سرعت
x	جهت محوری

نمادهای یونانی

Γ	ضریب پخش
ψ	تابع جریان
μ	لزجت دینامیکی
$\emptyset$	متغیر عمومی
ρ	چگالی

زیرنویس

U	بالادست جریان
D	پایین دست جریان

مراجع

- [1] Azad R. S., "Turbulent flow in conical diffuser" Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 13, pp. 318-337, 1996.
- [2] Lefebvre A. H., "Gas Turbine Combustion", McGraw-Hill, New York, 1983.
- [3] Hill P. G., Peterson C. R., "Mechanic and Thermodynamic of Propulsion", Addison-Wesley Company, Massachusetts, 1965.
- [4] Ganesan V., Suzuki K., Narayana P. A., Chithamaram V. K., "Investigations of mean and turbulent flow characteristics of a two dimensional plane diffuser", Experiment in Fluid, vol.10, pp. 205-212. 1991.
- [5] Olsson A., Stemme G., Stemme E., "Numerical and experimental studies of flat-walled diffuser element for valve-less micro pumps", Sensors and Actuators, vol.84, pp.165-175. 2000.
- [6] Gan G., Riffat, S. B., "Measurement and computational fluid dynamics prediction of pressure-loss coefficient", Applied Energy, Vol. 54, pp.181-195, 1996.
- [7] Sky W., "A numerical study of dump diffuser flow", Computer Method in Applied Mechanic and Engineering, vol. 53, pp. 47-65, 1985.
- [8] Feletchers C. A. J., "Computation Techniques for Fluid Dynamics", 1988.
- [9] Melton T. R., Inal F., Senkan S. M., "Effect of Equivalence Ratio on the Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Soot in Premixed Ethane Flames", Combustion and Flame, pp. 671-678, 2000.
- [10] Barlow R. S., Carter C. D., "Relationships among nitric oxide, temperature and mixture fraction in hydrogen jet flames", Combust and Flame, vol.104, pp.288-299, 1996.
- [11] Meunier Ph., Costa M., Carvalho M. G., "On NO_x emissions from turbulent propane diffusion flames", Combustion and Flame, vol.112, pp. 221-230, 1998.
- [12] Poppe C., Sivasegaram S., Whitelaw J. H., "Control of NO_x emissions in confined flames by oscillations", Combust and Flame, vol.113, pp.13-26, 1998.
- [13] Li S. C., Williams F. A., " NO_x formation in two-stagemethane-air flames", Combust and Flame, vol.118, pp.399-414, 1999.
- [14] Warnats J., Klaus P., "CEC reaction mechanism for methane/air combustion", <http://www.ca.sandia.gov/tdf/3rdworkshop/chemmech/JW-C2NO98.mec.html>.
- [15] Leeds NO_x Mechanism, <http://www.chem.leeds.ac.uk/combustion/nox.html>.
- [16] Rortveit G. J., Hustad J. E., Li S. C., Williams F. A., "Effects of diluents on NO_x formation in hydrogen counter flow flames", Combust and Flame, Vol.130, pp.48-61, 2002.
- [17] Choudhuri A. R., Gollahali S. R., "Characteristics of hydrogen-hydrocarbon

- [32] Fox R. W., Kline S. J., "Flow regime data and design method for curved subsonic diffusers", ASME Journal of Basic Engineering, vol. 84, pp.303-312, 1962.
- composite fuel turbulent jet flames", Int. J. Hydrogen Energy, vol. 28, pp. 445-454, 2003.
- [18] Subramani A., Ambedkar B., Sarat Chandra B., "Numerical simulation of diluent effect on NO_x emission in a turbulent premixed methane flames", International Journal on Applied Bioengineering, vol. 2, pp.1-9, 2008.
- [19] Hashemi S. A., Fattahi A., Sheikhzade G. A., Hajialigoli N., Nikfar M., "Numerical investigation of NO_x reduction in a sudden expansion combustor with inclined turbulent air jet", Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 26, pp.3723-3731, 2012.
- [20] Marcos R. M., Fabio L. F., Everton F. Z., Waldir A. B., "Influence of swirl number and fuel equivalence ratio on NO emission in an experimental LPG-fired chamber", Applied Thermal Engineering, vol. 30, pp. 928-934, 2010.
- [21] Bulat G., Jones W. P., Marquis A. J., "NO and CO formation in an industrial gas-turbine combustion chamber using LES with the Eulerian sub-grid PDF method", Combustion and Flame, vol. 161, pp.1804-1825, 2014.
- [22] Launder B. E., Shima N., "Second-moment closure for the wall sub layer, development and application", AIAA, vol. 27, pp. 1319-1325, 1989.
- [23] Magnussen B. F., "Modeling of pollutant formation in gas turbine combustors based on the eddy dissipation concept", 18th International Congress on Combustion Engines, International Council on Combustion Engines, Tianjin, China. 1989.
- [24] Glassman I., "Combustion", Academic Press, 1996.
- [25] Beltram A., Porshnev P., Merchan M. W., Savelyev A., Fridman A., Kennedy L. A., Petrova O., Zhdnok S., Amouri F., Charon O., "Soot and NO formation in methane-oxygen enriched diffusion flames", Combustion and Flame, vol.124, pp. 295-310, 2001.
- [26] ANSYS FLUENT 14.5, User's Guide, 2014.
- [27] Lavoie G. A., Heywood J. B., Keck J. C., "Experimental and theoretical investigation of nitric oxide formation in internal combustion engines", Combustion Science Technology, pp. 313-326, 1970.
- [28] Soete G. G. D., "Fundamental chemistry of NO_x and N₂O formation and destruction", Lecture 6, Third Flame Research Course, IFRF, the Netherlands. 1990.
- [29] Hanson R. K., Salimian S. "Survey of rate constants in H/N/O system", Combustion Chemistry. 1984.
- [30] Warnatz J., Mass U., Dibble R. W., "Combustion, physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation", 4th Edition, Springer. 2006.
- [31] Spalding D. B., "GENMIX- a general computer program for two-dimensional parabolic phenomena", Pergamon, New York. 1977.