



بررسی پارامترهای هندسی مشعل‌های مخلوط سر نازل از دیدگاه اگزرژی با استفاده از تکنیک تاگوچی

حمیده شیخانی¹، محسن قاضی‌خانی²، حسین عجم^{2*}

1- دانشجوی دکتری تخصصی، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، پردیس بین‌الملل، مشهد

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

*مشهد، صندوق پستی 91775-1111، h.ajam@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 07 بهمن 1393

پذیرش: 18 بهمن 1393

ارائه در سایت: 06 اسفند 1393

کلید واژگان:

نرخ بازگشت‌ناپذیری

مشعل‌های مخلوط سرنازل

نازل شاخه‌ای

روش تاگوچی

چکیده

شاخه‌ای کردن نازل‌ها، زاویه پاشش سوخت با مسیر محوری هوا و قطر نازل می‌توانند در اختلاط و عملکرد احتراقی مشعل‌های مخلوط سرنازل موثر باشند. در این تحقیق، ترکیب شبیه‌سازی عددی و روش تاگوچی به عنوان یک ابزار تحقیقاتی موثر برای بررسی تاثیر ترکیبی این پارامترها بر نرخ بازگشت‌ناپذیری احتراق مشعل‌های مخلوط سرنازل مورد استفاده قرار گرفته است. در ابتدا فرایند احتراق در یک مشعل مخلوط سرنازل با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی گردید. مجموعه معادلات حاکم شامل پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی به همراه واکنش‌های شیمیایی احتراق توسط نرم افزار فلوئنت حل شده است. جهت شبیه‌سازی جریان معشوش از مدل K-ε استاندارد و تقابل واکنش‌های شیمیایی و آشفستگی از مدل EDC استفاده شده است. سپس مدل توسعه یافته مذکور در شرایط آزمایشی بررسی و اعتبارسنجی گردید. در مرحله بعد، با کمک نرم‌افزار مینی‌تب، تحلیل تاگوچی جهت بررسی اثر هر یک از پارامترها، اهمیت آن‌ها در نرخ بازگشت‌ناپذیری و تعیین مقادیر بهینه آن‌ها صورت پذیرفت. در تحلیل تاگوچی، از یک آرایه متعامد $L_9(3^3)$ با هدف کمیته‌سازی نرخ بازگشت‌ناپذیری استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که زاویه پاشش سوخت، تعداد شاخه‌ها و قطر نازل به ترتیب بیشترین اثر را در نرخ بازگشت‌ناپذیری دارند. همچنین طراحی سرمشعل با ویژگی‌های چهار شاخه، زاویه پاشش سوخت 45 درجه با جریان محوری هوا و قطر نازل چهار میلی‌متر برای حفظه احتراقی مورد نظر از دیدگاه نرخ بازگشت‌ناپذیری بهینه می‌باشد. نرخ بازگشت‌ناپذیری متناظر با این حالت بهینه 45/88 درصد است.

Investigating the geometrical parameters of nozzle-mix burners from the combustion exergy points of view using Taguchi method

Hamideh Sheikhani, Mohsen Ghazikhani, Hosein Ajam*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

* P.O.B. 91775-1111, Mashhad, Iran, h.ajam@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 27 January 2015
Accepted 07 February 2015
Available Online 25 February 2015

Keywords:
Irreversibility
nozzle-mix burner
branched nozzle
Taguchi method

ABSTRACT

Nozzles branching, fuel injection angle and nozzle diameter can affect the mixing process and combustion performance of nozzle-mix burners. In the current work, CFD approach and Taguchi method are employed to investigate the effects of these parameters on the irreversibility of combustion process. Combustion in nozzle-mix burner is first simulated by use of CFD method. The governing equations, including continuity, momentum, energy and chemical reactions are solved numerically by use of FLUENT. Standard k-ε and EDC models are used for modeling turbulence and interaction between chemical reactions and turbulence, respectively. Then, the developed model is experimentally investigated and numerical method is validated. Using the Taguchi method, the effects of each parameter, their priority and optimum values are determined by use of Minitab. A $L_9(3^3)$ orthogonal Taguchi array is used with the analysis aim of minimizing irreversibility. Results show that injection angle, number of branches and nozzle diameter have the most influence on the combustion irreversibility, respectively. The optimum configuration of the nozzle-mix burner is determined to have a 45° injection angle, 4 branches and 4mm nozzle diameter. The corresponding irreversibility to this optimum case is 45.88%.

1- مقدمه

داغ احتراق نمی‌کند. برای مثال اگر احتراق یک سوخت با هوا را در فشار اتمسفر یک در نظر بگیریم، دمای نهایی محصول برای یک احتراق کامل بستگی به هوای تامین شده دارد. افزایش هوای اضافی، حتی با عایق در نظر گرفتن دیواره‌ها، منجر به کاهش دمای گازهای محصولات احتراق می‌گردد. بنابراین، با توجه به قانون دوم ترمودینامیک پتانسیل تولید کار محصولات

در یک حفظه احتراق، انرژی شیمیایی سوخت به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود. بر این اساس، تعریف متداول بازدهی حفظه احتراق نشان می‌دهد چه بخشی از انرژی ذخیره شده در سوخت، به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود. این تعریف متداول، هیچ توجهی به کیفیت انرژی حرارتی ناشی از محصولات

Please cite this article using:

H. Sheikhani, M. Ghazikhani, H. Ajam, Investigating the geometrical parameters of nozzle-mix burners from the combustion exergy points of view using Taguchi method, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 4, pp. 221-228, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

فیض و اصفهانی در مطالعه‌ای عددی به تحلیل عوامل تولید آنتروپی احتراق متان و هوا در یک ریز محفظه پرداختند [7]. آن‌ها نشان دادند ناحیه ورودی و ناحیه واکنش دارای بیشترین تولید آنتروپی بوده و تولید آنتروپی حرارتی در مقایسه با سایر عوامل تولید آنتروپی چشم‌گیر می‌باشد.

پیش‌بین و همکارانش به روش آزمایشگاهی به بررسی شعله‌های پیش آمیخته که از طریق پیچش کم پایدار می‌شوند، پرداختند [8]. آن‌ها نشان دادند رژیم شعله برخاسته در این نوع مشعل‌ها بازگشت‌ناپذیری کمتری نسبت به رژیم شعله چسبیده دارد.

در خصوص بررسی اثرات ترکیبی پارامترهای متفاوت در عملکرد سیستم‌های احتراقی و بهینه‌سازی آن‌ها نیز تحقیقاتی با استفاده از تکنیک تاگوچی انجام شده است. سن‌لین و همکارانش جهت بررسی اثرات عوامل نرخ بازگردانی گازهای حاصل از احتراق، میزان سوخت پایلوت و زمان تزریق که به شدت بر میزان آلاینده‌گی موتورهای دیزل اثرگذار بودند از روش تاگوچی استفاده کردند [9]. ژان و همکارانش نیز آزمایشات مربوط به بررسی اثر پارامترهای ترکیب بیودیزل و دیزل و بازگردانی گازهای حاصل از احتراق سرد شده بر میزان آلاینده‌گی موتورهای دیزل را با استفاده از تکنیک تاگوچی طراحی نمودند [10]. ناتاراج و همکارانش تاثیر تغییرات در پارامترهای عملیاتی - طراحی مانند قطر نازل‌ها، برآمدگی نازل و فاصله پیستون و سرسیلندر در حالت بسته بر آلاینده‌گی موتورهای دیزل را با استفاده از تکنیک تاگوچی بررسی نمودند و شرایط بهینه را تعیین کردند [11].

تحقیقات گذشته در ارتباط با تحلیل اگزورژی، اغلب بر روی مشعل‌های نفوذی و پیش‌آمیخته انجام شده است. حال آن‌که تا کنون پژوهشی در زمینه تحلیل اگزورژی مشعل‌های مخلوط سرنازل صورت نگرفته است. در این نوع مشعل‌ها، احتراق در نازل‌ها سریع و به‌طور کامل رخ می‌دهد و حرارت یکنواخت، پایدار و کنترل شده‌ای آزاد می‌شود. می‌توان گفت سرنازل مخلوط‌ها با تولید شعله‌ای مشابه پیش مخلوط‌ها (آبی و با آلاینده‌گی پایین) می‌توانند در صنعت مورد استفاده قرار گرفته و جایگزین مشعل‌های نفوذی در کوره‌های کوتاه شوند. از مزایای دیگر این مشعل‌ها تولید بسیار کم آلاینده NOx می‌باشد [12]. در این مشعل‌ها با افزایش اختلاط، عملکرد شعله‌های نفوذی به پیش آمیخته نزدیک شده و احتراق دقیقاً در خروجی نازل‌ها و همزمان با اختلاط سوخت و هوا رخ می‌دهد. بطوری‌که نه مشابه سیستم‌های پیش آمیخته قبل از احتراق فرصت اختلاط در نظر گرفته می‌شود و نه مشابه سیستم‌های نفوذی از در نظر گرفتن مکانیزمی برای اختلاط سوخت و هوا صرف‌نظر می‌گردد [13]. در این تحقیق به بررسی عوامل تاثیرگذار بر اختلاط در مشعل‌های مخلوط سرنازل از دیدگاه اگزورژی می‌پردازیم.

2- مشخصات مشعل و بستر آزمایشگاهی

2-1- طراحی مشعل

در شکل 1 طرح مشعل مخلوط سرنازل و مسیر ورود هوا در محفظه احتراق نشان داده شده است. شاخه‌های این سرمشعل قابلیت پاشش سوخت در مخلوط هوا بصورت شعاعی و با زوایای متفاوت را دارند. این شاخه‌ها با ایجاد اختلاط در سر مشعل نفوذی (خروجی سوخت) می‌توانند شرایط مشعل مخلوط سرنازل را فراهم سازند؛ بطوری‌که احتراق دقیقاً در خروجی نازل‌ها و محل اختلاط سوخت و هوا رخ می‌دهد.

2-2- بستر آزمایشگاهی

مطالعات تجربی روی یک کوره آزمایشگاهی به طول 1850 میلی‌متر و قطر

کاهش می‌یابد. لذا استفاده صرف از مفهوم انرژی کسب شده از محفظه احتراق به تنهایی نمی‌تواند نشان دهنده بازدهی آن باشد.

چندین تحقیق نشان داده است که فرایند متداول احتراق شامل بازگشت‌ناپذیری ترمودینامیکی ذاتی است، که به‌طور چشم‌گیری محدود به تبدیل انرژی سوخت به کار می‌شود. برای سیستم‌های احتراق اتمسفر یک، یک سوم اگزورژی سوخت بدلیل بازگشت‌ناپذیری ترمودینامیکی غیرقابل دسترسی است [1]. نیشیدا و همکارانش بیان نمودند که افت اگزورژی در شعله‌های پیش آمیخته و نفوذی، ناشی از چهار فرآیند برگشت‌ناپذیر، شامل اتلاف لزجت، تبادل حرارت داخلی، نفوذ جرم و واکنش شیمیایی است [2]. آن‌ها نشان دادند که مهمترین فرآیند در تولید آنتروپی و بازگشت‌ناپذیری برای احتراق پیش آمیخته، واکنش شیمیایی و در احتراق نفوذی، تبادل حرارت داخلی بوده و سهم واکنش شیمیایی نسبتاً پایین است. آن‌ها نشان دادند که با افزایش دمای سوخت ورودی در احتراق پیش آمیخته، تولید آنتروپی کاهش و با کاهش نسبت هم ارزی تولید آنتروپی افزایش می‌یابد.

غالب این بازگشت‌ناپذیری به تبادل حرارت داخلی در محفظه احتراق از محصولات به واکنش‌گرها مربوط می‌شود. این تبادل حرارت داخلی در احتراق پیش آمیخته، مخلوط سرنازل و نفوذی اجتناب‌ناپذیر است.

بررسی تاثیر تبادل حرارت داخلی در شرایط عملیاتی اغلب مشکل است؛ زیرا به‌طور مستقیم در اتلاف انرژی از منطقه احتراق به محیط نتیجه نمی‌دهد. در حالی‌که تبادل حرارت داخلی، باعث کاهش اگزورژی گاز محصولات احتراق و در نتیجه پتانسیل کاری می‌شود. بنابراین تا مرحله تولید کار، مقدار کار واقعی مشخص نمی‌شود؛ که این مرحله یک مرحله جدا از احتراق می‌باشد.

تحقیقات دونبار و لیور بر روی احتراق هیدروژن و متان نشان می‌دهد که فرایند کلی احتراق را می‌توان به سه زیر فرایند اصلی تقسیم کرد [3]:

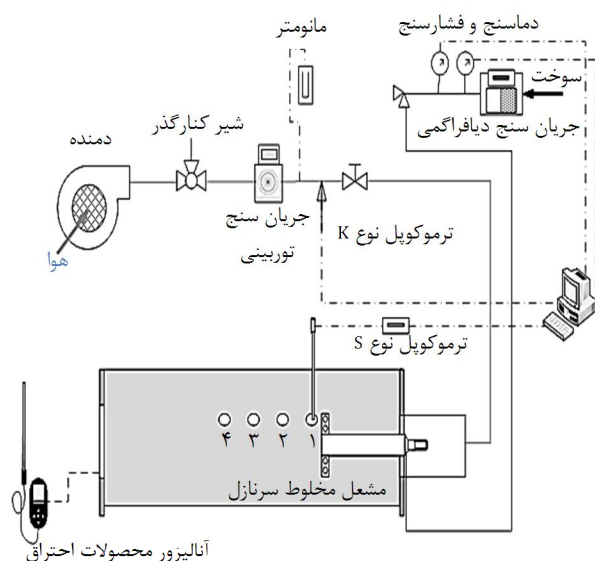
1- فرایند نفوذی ترکیب (که مولکول‌های سوخت و اکسیژن به سمت یکدیگر جریان می‌یابند) و واکنش شیمیایی (اکسیداسیون سوخت) انجام می‌شود.

2- تبادل انرژی حرارتی داخلی، که مولکول‌های محصولات، انرژی جنبشی خود را با مولکول‌های مجاور تسهیم می‌کنند.

3- فرایند اختلاط که به موجب آن مخلوط یکنواختی تشکیل می‌گردد. تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که تخریب اگزورژی ناشی از اکسیداسیون با افزایش پیشروی واکنش کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع وقوع اکسیداسیون سوخت در شرایط نزدیک به تعادل و در دمای بالاتر است.

لیور و همکارانش به تحلیل اگزورژی احتراق قطره‌ای نفت و فرآیند احتراق ذغال‌سنگ پرداختند [4]. نتایج آن‌ها حاکی از این بود که 30 درصد اگزورژی سوخت در اثر فرایند احتراق تخریب می‌گردد آن‌ها نشان دادند که در احتراق سوخت‌های غیرگازی، افزایش دمای هوای ورودی در گستره 573 تا 973 درجه کلوین، منجر به کاهش بازدهی اگزورژی می‌گردد که تا اندازه‌ای بدلیل افزایش اتلاف‌های حرارتی می‌باشد.

داتا به صورت تحلیلی تولید آنتروپی در شعله‌های آرام دیفیوژن متقارن را بررسی نمود [5]. وی نشان داد، با افزایش دمای هوای ورودی، میزان تولید آنتروپی کاهش می‌یابد؛ در حالی‌که کاهش در نسبت سوخت به هوا میزان تولید آنتروپی را افزایش می‌دهد. در تحقیقی دیگر، داتا اثر گرانش در تولید آنتروپی در شعله با سوخت متان را مطالعه کرد [6]. او نشان داد که حداکثر میزان تولید آنتروپی به علت تبادل حرارت داخلی در شعله‌های پخشی است.



شکل ۲ شمای بستر آزمون و تجهیزات اندازه‌گیری

۳- معادلات حاکم

برای تحلیل عملکرد مشعل و محفظه احتراق نیاز به حل همزمان معادلات بقای سه‌بعدی کلی برای جرم، انرژی و اندازه حرکت می‌باشد. لازم به ذکر است که واکنش‌های حاصل از احتراق باید در معادلات بقا و انرژی لحاظ گردند. بنابراین برای معادله پیوستگی کلی رابطه (۱) را داریم [۱۴]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

معادله بقای جرم گونه‌ها به صورت رابطه (۲) است [۱۴]:

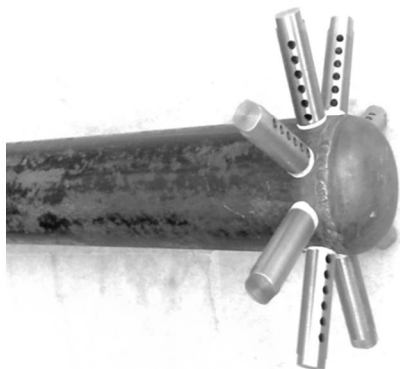
$$\frac{\partial (\rho m_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u m_i) = \nabla \cdot ((\Gamma_i + \Gamma_{i,t}) \nabla m_i) R_i \quad (2)$$

در رابطه (۲)، m_i دلالت بر کسر جرمی گونه شیمیایی i دارد که در حضور میدان سرعت u قرار می‌گیرد و Γ_i ضریب پخش می‌باشد. کمیت R_i طرف راست نشان دهنده نرخ تولید یا مصرف گونه شیمیایی i به ازای واحد حجم است. $\Gamma_{i,t}$ ضریب نفوذ به دلیل وجود اغتشاش در جریان را نشان می‌دهد.

پایستگی اندازه حرکت به صورت رابطه (۳) می‌باشد [۱۴]:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla P + \nabla \cdot ((\mu + \mu_t)(\nabla u + \nabla u^T)) \quad (3)$$

که در این رابطه، μ لزجت، μ_t لزجت اغتشاشی و P نمایانگر فشار می‌باشد. مدل دو معادله‌ای اغتشاش $k-\epsilon$ استاندارد برای پیش‌بینی لزجت اغتشاش μ_t استفاده شده است.



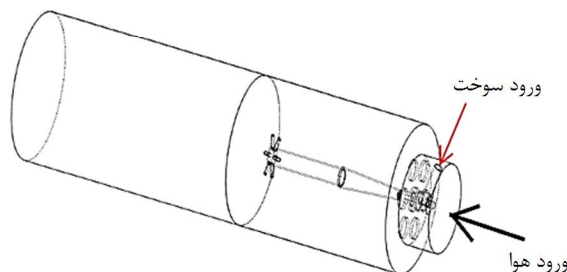
شکل ۳ نمونه سرمشعل مورد استفاده

۵۰۰ میلی‌متر انجام شده است. بدنه کوره از فولاد ASTM A36 با مقاومت در برابر دماهای بالا (بیشتر از ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) ساخته شده است. مشعل مورد استفاده گازسوز و با ظرفیت حرارتی بیشینه ۳۰۰۰۰ کیلوکالری بر ساعت می‌باشد.

در شکل ۲ شمای بستر آزمون و تجهیزات اندازه‌گیری آن نشان داده شده است.

جهت اندازه‌گیری دبی گاز و هوای مصرفی به‌ترتیب از یک جریان‌سنج دیافراگمی با دقت ۲٪ و یک جریان‌سنج توربینی با دقت ۱٪ در گستره دبی مصرفی استفاده شده است. برای اندازه‌گیری دمای هوا و سوخت از ترموکوپل نوع K با دقت ۰/۷٪ استفاده شده است. برای اندازه‌گیری دما در راستای شعاعی و محوری سوراخ‌هایی با فواصل ۱۰ سانتی‌متر از سر مشعل در نظر گرفته شده و از ترموکوپل نوع S با دقت ۰/۵٪ استفاده شده است. این ترموکوپل‌ها از نوع ترموکوپل‌های فلزات نجیب (پلاتینی) می‌باشند که از پلاتین و رودیوم ساخته می‌شوند. بیشینه دمای کارکرد آن‌ها ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد است و به جهت تحمل دماهای بالا و عدم واکنش شیمیایی با مواد حاصل از احتراق در شعله در اندازه‌گیری دما در فرایندهای احتراقی استفاده می‌شود. جهت آنالیز محصولات احتراق و اندازه‌گیری میزان گازهای اکسیژن، دی‌اکسیدکربن، مونوکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن و هیدروکربن‌های نسوخته و درصد هوای اضافی از آنالیزور تستو مدل ۳۵۰ با مشخصات دقت جدول ۱ استفاده شده است.

شکل ۳ نمونه آزمایشی سرمشعل مورد استفاده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، با چرخش شاخه‌های این سرمشعل می‌توان زوایای پاشش سوخت در مسیر هوا را تغییر داد. در این آزمایش تعداد شاخه‌ها، قطر نازل‌ها و زاویه پاشش سوخت به ترتیب ۸ شاخه، ۴ میلی‌متر و صفر درجه می‌باشد.



شکل ۱ طرح مشعل مخلوط سرنازل و مسیر ورود هوا در محفظه احتراق

جدول ۱ دقت اندازه‌گیری آنالیزور محصولات احتراق - تستو ۳۵۰

نمونه	واحد	دقت
اکسیژن	درصد حجمی	۰/۰۱
دی‌اکسیدکربن	درصد حجمی	۰/۰۱
هیدروژن	جز در یک میلیون	۱
هیدروکربن‌های نسوخته	جز در یک میلیون	۱
مونوکسیدکربن	جز در یک میلیون	۱
دی‌اکسیدنیتروژن	جز در یک میلیون	۰/۱
مونوکسیدنیتروژن	جز در یک میلیون	۱
ناکس	جز در یک میلیون	۱

برای یک جریان پایا و با سرعت کم که اتلاف ناشی از لزجت در آن ناچیز باشد، معادله انرژی می‌تواند به صورت رابطه (4) نوشته شود [14]:

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u h - \nabla \cdot (k \nabla T) = S_h \quad (4)$$

در رابطه (4)، h نمایانگر آنتالپی، k نمایانگر ضریب هدایت حرارت، k_t ضریب هدایت حرارتی ناشی از اغتشاش، T نشان دهنده دما و S_h نمایانگر نرخ حجمی تولید حرارت می‌باشد.

3-1- مدل اتلاف گرذابه‌ای توسعه یافته (EDC) برای احتراق مغشوش

مدل EDC از مدل‌های واکنش با سرعت محدود و توسعه یافته مدل اتلاف گرذابه‌ای مگنسن-هرتاگر می‌باشد؛ بطوری که می‌تواند نرخ واکنش را برای تعداد واکنش‌های زیاد محاسبه نماید. در این مدل فرض می‌شود که واکنش شیمیایی در یک منطقه نازک و کوچک‌تر از اندازه شبکه محاسباتی رخ می‌دهد. در مدل EDC، شبکه محاسباتی به طور مفهومی به دو منطقه محاسباتی تقسیم شده است، یک منطقه شبکه محاسباتی به اندازه کافی برای مدل‌سازی واکنش‌ها کوچک شده و منطقه دیگر برای سیال احاطه کننده در نظر گرفته شده است [15]. فرض شده است که تمام واکنش‌های شیمیایی به طور یکنواخت در شبکه‌های محاسباتی منطقه اول رخ می‌دهند. این محیط به صورت محلی آدیاباتیک، فشار ثابت و مشابه راکتورهای اختلاط کامل رفتار کرده و تنها جرم و انرژی را به سیال احاطه کننده، جایی که تنها اختلاط مغشوش رخ می‌دهد، (بدون واکنش شیمیایی) منتقل می‌کند. در نتیجه، واکنش‌گرها از سیال احاطه کننده به شبکه ریز شده و محصولات واکنش از شبکه ریز شده به سیال احاطه کننده منتقل می‌شوند. اندازه شبکه ریز شده را با ξ و زمان متوسط اقامت سیال در آن را با τ نشان می‌دهیم، که از معادلات (5) و (6) بدست می‌آیند [15]:

$$\xi = C_\xi \frac{v_E}{K^2}^{1/4} \quad (5)$$

$$\tau = C_\tau \left(\frac{v}{\varepsilon} \right)^{1/2} \quad (6)$$

که $C_\tau = 0/408$ و $C_\xi = 2/13777$ است.

عبارت چشمه شیمیایی در معادله انتقال از معادله (7) بدست می‌آید [15]:

$$\tilde{\omega}_i = \frac{\bar{\rho} \xi^2 \lambda}{\tau - \xi^3} Y_i^* - \tilde{Y}_i \quad (7)$$

در معادله (7)، Y_i^* و $\tilde{Y}_i$ به ترتیب کسر جرمی گونه i در منطقه واکنش (شبکه ریز شده) و کسر جرمی متوسط گونه i است. λ بخشی از شبکه ریز شده است که در آن واکنش رخ می‌دهد. براساس آنالیز حساسیت انجام شده توسط یاکوت و همکارانش، λ بهترین مقدار می‌باشد [16].

با عنایت به این که مدل EDC قابلیت پیش‌بینی غلظت گونه‌های زیادی را در فرایند احتراق غیر پیش آمیخته دارد و در این تحقیق نیز جهت محاسبه آگرزری واکنش شیمیایی، غلظت گونه‌های منوکسیدکربن، دی‌اکسیدکربن، بخار آب، هیدروژن، نیتروژن، اکسیژن، متان، هیدروکسید و ناکس در محصولات احتراق غیر پیش آمیخته مورد نیاز می‌باشد، از مدل EDC استفاده شده است.

3-2- مدل تابش

مدل P-1 برای ارزیابی انتقال حرارت تابشی در داخل محفظه احتراق با مقاطع دایره‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرمول‌های مورد استفاده در این مدل جهت محاسبه شار حرارتی تابشی در روابط (8) و (9) ارائه شده است

[17]:

$$\vec{q}_r = -\frac{1}{\kappa} \nabla G \quad (8)$$

G ، تابش کلی (شامل مستقیم و پخشی) است. عبارت $-\nabla \cdot \vec{q}_r$ که در رابطه (9) تعریف شده است، می‌تواند به طور مستقیم در معادله انرژی برای محاسبه منبع گرما ناشی از تابش وارد گردد.

$$-\nabla \cdot \vec{q}_r = \kappa G - \kappa \sigma T^4 \quad (9)$$

3-3- محاسبه آگرزری

نرخ قابلیت کاردهی نسبت به زمان در سیستم از رابطه (10) قابل محاسبه است [18]:

$$\int \frac{dA_{cv}}{dt} \int_j \dot{Q}_j (-T_0/T_j) \cdot ds - W_{cv} - P_0 \cdot dv_{cv}/dt - \sum_i \dot{n}_i \psi_i \text{ in} - \sum_i \dot{n}_i \psi_i \text{ out} - I_{cv} \quad (10)$$

در این رابطه، عبارت سمت چپ، با توجه به شرایط پایا در سیستم مورد مطالعه، برابر صفر می‌باشد. جمله اول عبارت سمت راست معادله فوق، قابلیت کاردهی ناشی از انتقال حرارت از دیواره‌های محفظه احتراق است. T_j دمای مرزی و $\dot{Q}_j$ نرخ انتقال حرارت است که از نتایج مدل بدست می‌آیند. مرزهای حجم کنترل در این تحقیق، دیواره‌های محفظه احتراق می‌باشد، بنابراین بازگشت‌ناپذیری فرایند احتراق قابل محاسبه است. جملات سوم و چهارم این رابطه مربوط به آگرزری مولی جریان‌های ورودی و خروجی است. با توجه به این که کار محوری (شفت) و تغییرات حجم کنترل در این تحقیق صفر است، از عبارت دوم در سمت راست صرف نظر می‌شود. I_{cv} نرخ بازگشت‌ناپذیری داخل حجم کنترل ناشی از انتقال جرم و حرارت، واکنش شیمیایی و اصطکاک می‌باشد. آگرزری جریان جرم شامل، آگرزری جنبشی، آگرزری پتانسیل، آگرزری ترمومکانیکی و آگرزری شیمیایی است. با توجه به این که تغییرات سرعت و ارتفاع در این تحقیق ناچیز است، از آگرزری مربوطه صرف نظر و آگرزری ترمومکانیکی و شیمیایی در جریان‌های ورودی و خروجی محاسبه شده است. آگرزری ترمومکانیکی (ψ_i^{tm}) و آگرزری شیمیایی (ψ_i^{ch}) گونه شیمیایی i th از روابط (11) و (12) بدست می‌آیند [18].

$$\psi_i^{tm} = h - h_{0,i} - T_0 s - s_{0,i} \quad (11)$$

$$\psi_i^{ch} = \varepsilon_i^0 \bar{R} T_0 Y_i \quad (12)$$

که ε_i^0 آگرزری شیمیایی استاندارد گونه i th در مخلوط ورودی یا خروجی بوده و $\bar{R}$ ثابت جهانی گازها و Y_i نسبت مولی گونه i th می‌باشد. T_0 دمای حالت مرده می‌باشد که برابر 298/15 درجه کلوین است [8].

4- طراحی آزمایشات با استفاده از روش تاگوچی

عوامل تاثیرگذار در اختلاط، تعداد شاخه، قطر نازل و زاویه پاشش سوخت می‌باشند؛ زیرا تعداد شاخه‌ها بر سرعت پاشش سوخت و پاشش یکنواخت سوخت در مسیر هوا بصورت شعاعی، قطر نازل‌ها بر سرعت پاشش سوخت و ایجاد مکش هوا به داخل ترکیب سوخت و زاویه پاشش بر ایجاد اغتشاش و پیچش در جریان اثرگذار می‌باشند. تاثیر تغییرات هر کدام از این عوامل و همچنین اثر ترکیبی آنها بر عملکرد احتراقی مخلوط سرنازل از طریق مدل‌سازی عددی قابل پیش‌بینی است. تکنیک تاگوچی روش مناسبی برای پیش‌بینی اثرات پارامترهای طراحی بر عملکرد سیستم‌ها می‌باشد. این روش ترکیبی از تکنیک‌های آماری و ریاضی است که در مطالعات تجربی استفاده می‌شود و می‌تواند با کمترین تعداد آزمایشات، شرایط بهینه را تعیین کند. در

این‌که 98/231 درصد از گاز طبیعی مورد استفاده در این تحقیق (بعنوان سوخت) از متان تشکیل شده، در مدل‌سازی عددی متان خالص به عنوان سوخت فرض شده است. لیکن جهت محاسبات آگزری ارزش حرارتی واقعی سوخت $(8080/153 \text{ kcal/m}^3)$ در نظر گرفته شده است [8]. هوای مصرفی حاوی گونه‌های نیتروژن، اکسیژن، بخار آب، دی‌اکسیدکربن با غلظت مولی به ترتیب 0/7662، 0/2055، 0/0188 و 0/0003. با نرخ جریان حجمی 0/061 مترمکعب بر ثانیه و فشار نسبی 293 میلی‌متر ستون آب و دمای 280 درجه کلوین وارد محفظه احتراق می‌شود. قطر هیدرولیکی ورودی هوا 0/3 متر است. محصولات احتراق در انتهای کوره به طول 950 میلی‌متر به اتمسفر تخلیه می‌گردند. دیواره‌های محفظه احتراق با هوای محیط اطراف به دمای 280 درجه کلوین (دمای آزمایشگاه) از طریق جابجایی و تابشی تبادل حرارت دارند.

5-1- بررسی استقلال نتایج از تعداد شبکه محاسباتی

جهت بررسی عدم وابستگی نتایج حل به شبکه محاسباتی، چهار شبکه مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. تأثیر تعداد سلول‌های محاسباتی بر نمایه شعاعی دما و سرعت، طبق شکل‌های 4 و 5 بررسی گردید. همان‌طور که مشاهده می‌گردد شبکه با تعداد سلول محاسباتی کمتر از 982825 نتوانسته در پیش‌بینی توزیع دمایی و شکل شعله موفق عمل نماید و لذا با افزایش تعداد شبکه تغییرات منحنی دما مشهود بوده است. با توجه به این‌که استفاده از شبکه‌بندی ریزتر بدون تأثیر بر دقت محاسبات، سبب تأخیر زیادی در همگرایی و افزایش زمان اجرای برنامه می‌گردد، شبکه محاسباتی با 1242466 سلول محاسباتی مورد استفاده قرار گرفت. شبکه در نزدیکی دیواره‌ها و در قسمت خروجی سوخت از سرمشعل به فضای داخلی کوره (در نازل‌ها)، به علت وجود گرادیان‌های شدید سرعت، ریزتر شده است.

5-2- اعتبارسنجی مدل

به منظور اعتبارسنجی روند حل عددی، نمایه شعاعی دمای به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و در شکل 6 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 2 نشان داده شده است کلیه اندازه‌گیری‌های ارائه شده در نمودار شکل 6 داده‌های مربوط به پروب‌های شماره 1، 2، 3 و 4 است که همگی بالاتر از شعله بوده اند.

همان‌طور که در شکل 6 نشان داده شده است روند نمایه‌های شعاعی دمای داخل محفظه احتراق پیش‌بینی شده توسط مدل با روند داده‌های آزمایشی از انطباق مناسبی برخوردارند. بنابراین مدل‌سازی عددی انجام شده روند تغییرات دمایی را در طول و شعاع محفظه احتراق به طور مطلوبی پیش‌بینی می‌کند.

جدول 4 مدل‌های به کار رفته در حل عددی

عنوان	مدل
حل گر	بر پایه فشار
روش فرمول بندی	ضمنی
الگوریتم حل همزمان سرعت و فشار	سیمپل
مدل اغتشاشی	K-ε استاندارد
مدل احتراق	بدون پیش‌آمیختگی
تقابل شیمی و اغتشاش	EDC
مدل تابش	P-1
محاسبه ضریب جذب محیط واسط در مدل تابشی	WSGGM
مدل سازی ناکس	حرارتی و سریع

این روش تغییرات با عاملی به نام نسبت سیگنال به نویز (S/N) معرفی می‌شود، که نشان دهنده حساسیت مشخصه مورد بررسی به فاکتورهای خارجی اثرگذار می‌باشد. شرایط آزمایشی که دارای بیشترین مقدار S/N باشد، به عنوان شرایط بهینه شناخته می‌شود [19].

با توجه به حجم بالای محاسبات مدل‌سازی عددی فرایند احتراق (روش EDC) و محاسبات مربوط به تحلیل آگزری، با استفاده از تکنیک تاگوچی و نرم افزار مینی‌تپ، طراحی آزمایشات برای بررسی اختلاط و عملکرد احتراقی سرمشعل جهت مدل‌سازی عددی انجام شده است. تابع هدف در این تحقیق نرخ بازگشت‌ناپذیری می‌باشد، بنابراین معادله (13) بعنوان تابع زیان انتخاب می‌گردد. به عبارت دیگر مقدار کوچک بهترین است. فاکتورهای کنترلی همان پارامترهای موثر بر اختلاط می‌باشند، که در جدول 2 سطوح آن مشخص گردیده است. برای تحلیل تاگوچی، از یک آرایه متعامد $L9(3^3)$ که دارای 9 آزمایش مطابق جدول 3 می‌باشد، استفاده شده است. ملاحظه می‌شود، به کارگیری روش تاگوچی باعث کاهش 18 مدل‌سازی بسیار زمان‌بر نسبت به حالت آزمایش کامل می‌شود.

5- مدل‌سازی عددی

در این پژوهش از نرم‌افزار سالدورکس به عنوان پیش‌پردازنده جهت ایجاد هندسه سه‌بعدی و از نرم‌افزار گمبیت جهت شبکه‌بندی میدان محاسباتی استفاده شده است. شبکه‌بندی هندسه محفظه احتراق از نوع هرمی است. در تنظیم شبکه محاسباتی به مناطق دارای گرادیان‌های شدید و از طرفی عدم وابستگی نتایج به تعداد گره‌های محاسباتی توجه شده است. برای مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار فلوئنت 6.3.26 استفاده شده است. مدل‌های بکاررفته در حل عددی توسط نرم‌افزار، در جدول 4 ارائه شده است. معیار همگرایی برای تمامی حل‌ها 1×10^{-6} در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌ها بر روی یک سیستم پردازش موازی با 8 هسته و 16 گیگابایت حافظه موقت تحت ویندوز اجرا شده است.

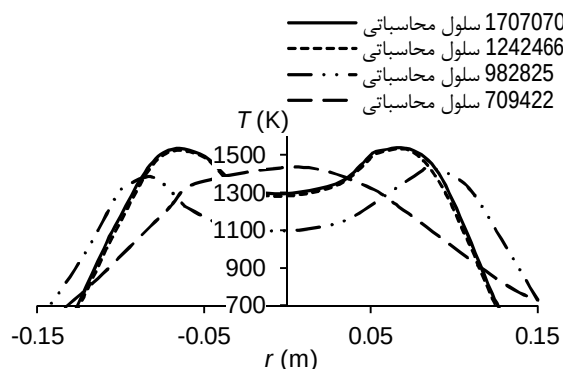
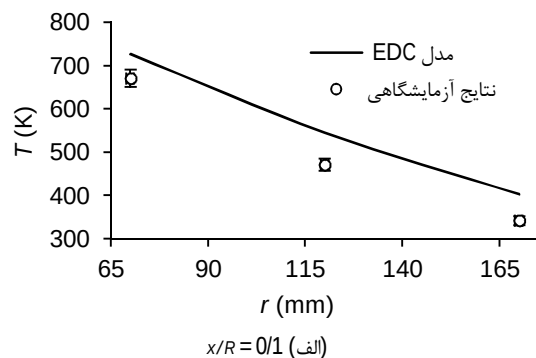
سوخت مصرفی با نرخ جریان حجمی 0/0011 مترمکعب بر ثانیه و فشار نسبی 176 میلی‌متر ستون آب و دمای 282 درجه کلوین وارد محفظه احتراق می‌شود. قطر هیدرولیکی ورودی 0/0254 متر می‌باشد. با توجه به

جدول 2 دامنه تغییرات پارامترهای طراحی سرمشعل

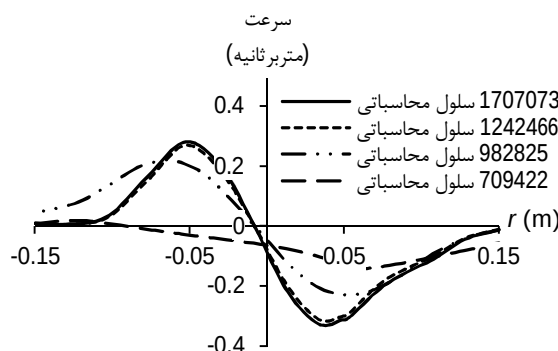
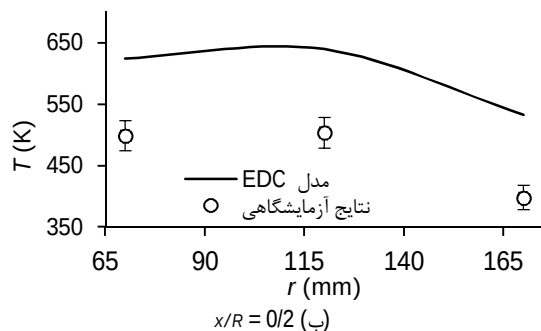
فاکتورهای کنترلی	سطح 1	سطح 2	سطح 3
تعداد شاخه ها	4	6	8
قطر نازل (mm)	2	4	6
زاویه پاشش	0 درجه	45 درجه	90 درجه

جدول 3 آرایه‌ی متعامد $L9(3^3)$ تاگوچی

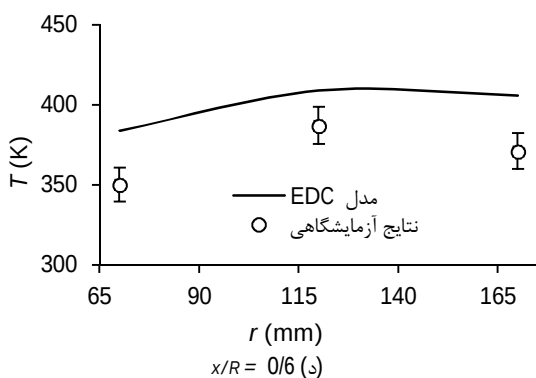
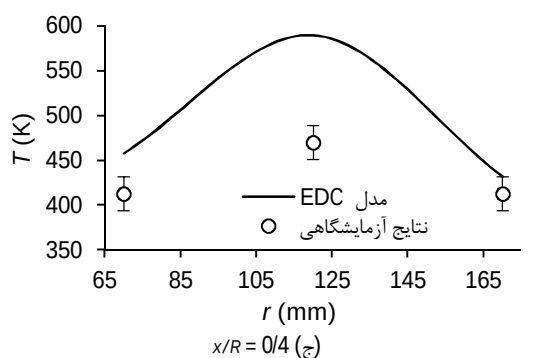
مدل	قطر نازل (mm)	تعداد شاخه ها	زاویه پاشش سوخت
1	2	4	0
2	2	6	45
3	2	8	90
4	4	4	45
5	4	6	90
6	4	8	90
7	6	4	90
8	6	6	0
9	6	8	45



شکل 4 نمایه شعاعی دما برای شبکه‌های محاسباتی متفاوت



شکل 5 نمایه سرعت شعاعی برای شبکه‌های محاسباتی متفاوت



شکل 6 نمایه شعاعی دما نمونه آزمایشگاهی مشعل مخلوط سر نازل و مدل EDC

با توجه به جدول 3، نتایج جدول 5 و در نظر گرفتن این موضوع که قطر نازل در گستره انتخابی نسبت به پارامترهای تعداد شاخه‌ها و زاویه پاشش از درجه تاثیرگذاری کمتری برخوردار است (نتایج جدول 6)، مشاهده می‌شود در زاویه پاشش ثابت 90 درجه که جهت پاشش سوخت و هوا موازی و در یک راستا است، افزایش نقاط تزریق از طریق افزایش تعداد شاخه‌ها، منجر به کاهش نرخ بازگشت ناپذیری می‌گردد زیرا در این حالت تداخل شعله‌ها وجود نداشته و افزایش تعداد شاخه‌ها منجر به توزیع مناسب‌تر شعله

6- نتایج

6-1- محاسبات اگزرژی با استفاده از نتایج مدل‌سازی عددی

با استفاده از مدل‌سازی عددی، میزان غلظت گونه‌های موجود در محصولات احتراق، شار حرارتی دیواره محفظه احتراق، دمای شعله، دمای دودکش محاسبه می‌شود. بنابراین، می‌توان با استفاده از معادلات ارائه شده در بخش 3-3، نرخ بازگشت ناپذیری را محاسبه نمود. به علت تنوع زیاد گونه‌ها در محصولات احتراق، به واسطه استفاده از تکنیک GRI 2.1، لازم است جهت ساده‌سازی در انجام محاسبات مربوط به اگزرژی شیمیایی، تعداد محدودی از گونه‌ها که دارای غلظت و اگزرژی شیمیایی قابل توجه می‌باشند، انتخاب شوند. بنابراین، گونه‌های منوکسید کربن، دی‌اکسید کربن، بخار آب، هیدروژن، نیتروژن، اکسیژن، متان، هیدروکسید و ناکس در محاسبه اگزرژی شیمیایی جریان خروجی محصولات احتراق در نظر گرفته شده‌اند. میزان بازگشت ناپذیری برای مدل‌های انتخاب شده توسط تکنیک تاگوچی در جدول 5 ارائه شده است.

تحلیل تاگوچی بر روی نتایج عددی به دست آمده، با هدف کمینه‌سازی نرخ بازگشت ناپذیری انجام گرفت. مقدار متوسط نسبت سیگنال به نویز برای فاکتورهای مختلف در جدول 6 و شکل 7 نشان داده شده است.

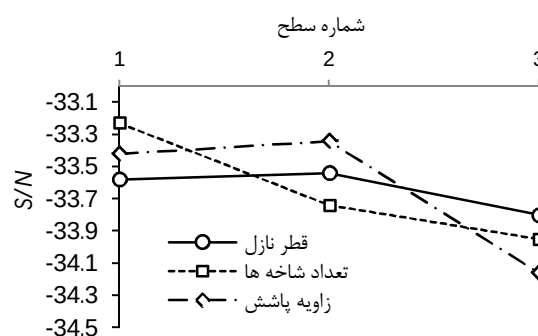
بر اساس دو ردیف آخر جدول 6، می‌توان گفت زاویه پاشش، تعداد شاخه‌ها و قطر نازل به ترتیب بیشترین تاثیر را بر نرخ بازگشت ناپذیری دارند. همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار نسبت سیگنال به نویز برای فاکتورهای قطر نازل، تعداد شاخه‌ها و زاویه پاشش، به ترتیب در سطح 4 میلی‌متر، 4 شاخه و 45 درجه رخ می‌دهد. بنابراین، این طراحی بهینه‌ترین حالت با حداقل نرخ بازگشت ناپذیری در محفظه احتراق مورد نظر می‌باشد که با نتایج محاسبه شده در جدول 5 نیز کاملاً انطباق دارد.

جدول 5 نرخ بازگشت‌ناپذیری برای مدل‌های انتخاب شده

مدل	درصد بازگشت‌ناپذیری
1	46
2	46/12
3	55/09
4	45/88
5	49/3
6	47/42
7	49/03
8	50/56
9	47/35

جدول 6 مقدار متوسط نسبت سیگنال به نویز (S/N)

سطح	زاویه	تعداد شاخه‌ها	قطر نازل
1	-33/62	-33/43	-33/78
2	-33/34	-33/74	-33/54
3	-34/16	-33/95	-33/80
اختلاف مقدار بیشینه و کمینه	0/82	0/52	0/26
درجه اهمیت	1	2	3



شکل 7 منحنی‌های مقدار متوسط سیگنال به نویز برای فاکتورهای مختلف

در واحد سطح می‌گردد. در زاویه 0 درجه، افزایش تعداد شاخه‌ها، منجر به نزدیک شدن فاصله بین شاخه‌ها و ایجاد تداخل شعله و برخورد شعله‌ها با شاخه مقابل آن گردیده و از طریق افزایش اغتشاشات و تداخلات منجر به افزایش نرخ بازگشت‌ناپذیری گردیده است. اما در زاویه 45 درجه مشاهده می‌شود که مزیت ایجاد پیچش در شعله با هدف افزایش سطح کلی شعله همراه با رفع پدیده تداخل شعله‌ها (مشابه حالت 0 درجه) منجر به آن گردیده است که برای تعداد ثابت شاخه‌ها، حداقل بازگشت‌ناپذیری در این زاویه رخ دهد و مقادیر آن نسبت به دو زاویه دیگر کمتر باشد. همچنین با توجه به این که نرخ بازگشت‌ناپذیری در مشعل‌های پیش آمیخته حدود 32 درصد [2] و در مشعل‌های نفوذی حدود 52 درصد می‌باشد [20] مشاهده می‌گردد که مشعل مخلوط سرنازل نیز از لحاظ بازگشت‌ناپذیری در بین این دو مقدار قرار گرفته و عملاً با ایجاد یک شعله پخشی و گسترده احتراق نفوذی را بهبود داده است.

7- جمع‌بندی

در تحقیق حاضر، ابتدا یک نمونه مشعل مخلوط سرنازل در محیط

آزمایشگاهی، با محفظه احتراق مشخص، مورد بررسی قرار گرفت. سپس، شبیه‌سازی CFD به همراه تکنیک تاگوچی جهت بررسی تاثیر ترکیبی سه پارامتر قطر نازل، شاخه‌ای ساختن شعله و زاویه پاشش سوخت در مسیر هوا بر نرخ بازگشت‌ناپذیری احتراق به کار گرفته شد. نتایج این تحقیق عبارتند از:

- 1- روند نتایج مدل EDC با داده‌های آزمایشگاهی مخلوط سرنازل ساخته شده انطباق مناسبی دارد و می‌تواند عملکرد احتراق این مشعل‌ها را به طور مطلوبی پیش‌بینی نماید.
- 2- با توجه به مقادیر متوسط نسبت سیگنال به نویز، پارامترهای موثر در نرخ بازگشت‌ناپذیری به ترتیب اهمیت عبارتند از زاویه پاشش، تعداد شاخه‌ها و قطر نازل.
- 3- مدل سرنازل با 4 شاخه، قطر نازل 4 میلی‌متر و زاویه پاشش 45 درجه، مدل بهینه با نرخ بازگشت‌ناپذیری 45/88 درصد برای محفظه احتراق مورد نظر می‌باشد.
- 4- در زاویه پاشش ثابت 90 درجه که جهت پاشش سوخت و هوا موازی و در یک راستا است، افزایش نقاط تزریق از طریق افزایش تعداد شاخه‌ها، منجر به کاهش نرخ بازگشت‌ناپذیری می‌گردد.
- 5- ایجاد زاویه در پاشش سوخت، تا حدی که منجر به تداخل شعله‌ها و برخورد آن‌ها با شاخه‌های مقابل نگردد، منجر به کاهش نرخ بازگشت‌ناپذیری می‌شود.
- 6- روش ترکیب شبیه‌سازی عددی و تکنیک تاگوچی می‌تواند در کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی و اتلاف زمان شبیه‌سازی فرآیندهای احتراقی مورد استفاده قرار گیرد.

8- تقدیر و تشکر

نویسندگان مراتب سپاس‌گزاری و قدردانی خود را جهت راهنمایی‌ها و مشاوره مهندس ایوب عادل، مدیرعامل محترم شرکت شعله صنعت ابراز می‌دارند.

9- مراجع

- [1] S. K. Som, A. Datta, Thermodynamic irreversibilities and exergy balance in combustion processes, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 34, No. 3, pp. 351-376, 6/1, 2008.
- [2] K. Nishida, T. Takagi, S. Kinoshita, Analysis of entropy generation and exergy loss during combustion, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, No. 1, pp. 869-874, 1/1, 2002.
- [3] W. R. Dunbar, N. Lior, Sources of Combustion Irreversibility, *Combustion Science and Technology*, Vol. 103, No. 1-6, pp. 41-61, 1994/1.
- [4] N. Lior, W. Sarmiento-Darkin, H. S. Al-Sharqawi, The exergy fields in transport processes: Their calculation and use, *Energy*, Vol. 31, No. 5, pp. 553-578, 4/1, 2006.
- [5] A. Datta, Entropy Generation in a Confined Laminar Diffusion Flame, *Combustion Science and Technology*, Vol. 159, No. 1, pp. 39-56, 2000/10/01, 2000.
- [6] A. Datta, Effects of gravity on structure and entropy generation of confined laminar diffusion flames, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 44, No. 5, pp. 42. 2005, 440-9.
- [7] M. E. Feyz, J. A. Esfahani, Exergetic performance of a cylindrical methane-air microcombustor under various inlet conditions, *International Journal of Exergy*, Vol. 15, No. 3, pp. 257-275, 01/01/, 2014.
- [8] S. I. Pishbin, S. M. R. M. Razavi, M. Ghazikhani, Investigation of the effects of performance parameters on the flame behavior and temperature distribution and exergy analysis of low swirl premixed burners, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 27-38, 2014.
- [9] S. Xiao, W. Sun, J. Du, G. Li, Application of CFD, Taguchi Method, and ANOVA Technique to Optimize Combustion and Emissions in a Light Duty Diesel Engine, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2014, pp. 9, 2014.
- [10] Z.-Y. Wu, H.-W. Wu, C.-H. Hung, Applying Taguchi method to combustion characteristics and optimal factors determination in diesel/biodiesel engines with port-injecting LPG, Fuel, Vol. 117, Part A, No. 0, pp. 8-14, 1/30/, 2014.

- [16] V. Yakhot, S. Orszag, Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory, *Journal of Scientific Computing*, Vol. 1, No. 1, pp. 3-51, 1986/03/01, 1986. English
- [17] E. Ghasemi, S. Soleimani, C. X. Lin, RANS simulation of methane-air burner using local extinction approach within eddy dissipation concept by OpenFOAM, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, No. 0, pp. 96-102, 5/ /, 2014 .
- [18] T. J. Kotas, *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*: Butterworth-Heinemann, 1985 .
- [19] J.H. Farahmand, Z. Yousefi, Utilization of Taguchi Technique in Engineering Problems and Multiobjective Optimization, in *10th International Industrial Engineering Conference*, Tehran, Iran, 2014 .
- [20] J.M. H. Uzzaman, R. Saidur, N. A. Rahim, Energy, exergy and economic analysis of an annealing furnace., *International Journal of the Physical Sciences*, Vol. 6, pp. 1257-1266, 2011 .
- [11] M. Natarjan, V. P. Aunachalam, N. Dhandapani, Optimizing diesel engine parameters for low emissions using Taguchi method: Variation risk analysis approach-Part1, *Indian Journal of Engineering & Material Sciences*, Vol. 12, pp. 169-181, 2005 .
- [12] N. A. M. Co, R. J. Reed, *North American Combustion Handbook: A Basic Reference on the Art and Science of Industrial Heating with Gaseous and Liquid Fuels*: North American Mfg. Company, 1978 .
- [13] I. Glassman, *Combustion*: Elsevier Science, 1997 .
- [14] V. V. Ranade, *Computational Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering*: Elsevier Science, 2001 .
- [15] A. De, E. Oldenhof, P. Sathiah, D. Roekaerts, Numerical Simulation of Delft-Jet-in-Hot-Coflow (DJHC) Flames Using the Eddy Dissipation Concept Model for Turbulence-Chemistry Interaction, Flow, *Turbulence and Combustion*, Vol. 87, No. 4, pp. 537-567, 2011/ 12/01, 2011. English