



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

حمیده شیخانی^۱، محسن قاضی‌خانی^۲، حسین عجم^{۲*}

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

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

*مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۷۵-۱۱۱۱

چکیده

شاخه‌ای کردن نازل‌ها، زاویه پاشش سوخت با سبیر محوری هوا و قطر نازل می‌توانند در اختلاط و عملکرد احتراقی مشعل‌های مخلوط سرنازل موثر باشند. در این تحقیق، ترکیب شیمیاسازی عددی و روش تاگوچی به عنوان یک ابزار تحقیقاتی موثر برای بررسی تاثیر تکیی این پارامترها بر نزدیکی احتراق مشعل‌های مخلوط سرنازل مورد استفاده قرار گرفته است. در ابتدا فراپند 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 فلووشت حل شده است. جهت شبیه‌سازی جریان مغذی از مدل L-4 استاندارد و تقابل واکنش‌های شیمیایی و آشفتگی از مدل EDC استفاده شده است. سپس مدل توسعه یافته مذکور در شرایط آزمایشی بررسی و اعتبارسنجی گردید. در مرحله بعد با کمک نرم افزار مینی‌تی، تحلیل تاگوچی یعنی آن‌ها در نزدیکی احتراق مشعل‌ها، اهمیت آن‌ها در نزدیکی احتراق مشعل‌ها و تعیین مقادیر بهینه آن‌ها صورت پذیرفت. در تحلیل تاگوچی، از یک آرایه تعتماد (L9) با عدف کمینه‌سازی نزدیکی احتراق مشعل‌ها بهینه شد. نتایج این تحقیق نشان داد که زاویه پاشش سوخت، تعداد شاخه‌ها و قطر نازل به ترتیب بیشترین اثر را در نزدیکی احتراق مشعل‌ها دارند. همچنین طراحی سرمشعل با ویژگی‌های چهار شاخه، زاویه پاشش سوخت ۴۵ درجه با جریان محوری هوا و قطر نازل چهار میلی‌متر برای محافظه احتراق مورد نظر از دیدگاه نزدیکی احتراق مشعل‌ها بهینه می‌باشد. نزدیکی احتراق مشعل‌ها بهینه ۴۵/۸۸ درصد است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۷ بهمن ۱۳۹۳

پذیرش: ۱۸ بهمن ۱۳۹۳

ارائه در سایت: ۰۶ اسفند ۱۳۹۳

کلید واژگان:

نزدیکی احتراق

مشعل‌های مخلوط سرنازل

نازل شاخه‌ای

روش تاگوچی

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 L9(3³) 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 irreversibly to this optimum case is 45.88%.

DAG 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 تأمین شده دارد. افزایش هوای اضافی، حتی با عایق در نظر گرفتن دیوارهای، منجر به کاهش دمای گازهای محصولات احتراق می‌گردد. بنابراین، با توجه به قانون دوم ترمودینامیک پتانسیل تولید کار محصولات

- مقدمه - در یک محافظه احتراق، انرژی شیمیایی سوخت به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود. بر این اساس، تعریف متداول بازدهی محافظه 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 آنتروبی احتراق متان و هوا در یک ریز محفظه پرداختند [7]. آن‌ها نشان دادند ناحیه ورودی و ناحیه واکنش دارای بیشترین تولید آنتروبی بوده و تولید آنتروبی حرارتی در مقایسه با سایر عوامل تولید آنتروبی 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 تاگوجی 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 آلایندگی موتورهای دیزل اثرگذار بودند از روش تاگوجی استفاده کردند [9]. زان و همکارانش نیز آزمایشات مربوط به بررسی اثر پارامترهای ترکیب بیودیزل و دیزل و بازگردانی گازهای حاصل از احتراق سرد شده بر میزان آلایندگی موتورهای دیزل را با استفاده از تکنیک تاگوجی 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 آلایندگی موتورهای دیزل را با استفاده از تکنیک تاگوجی بررسی نمودند و شرایط بهینه را تعیین کردند [11].

تحقیقات گذشته در ارتباط با تحلیل اگزرسی، اغلب بر روی مشعل‌های نفوذی و پیش‌آمیخته انجام شده است. حال آن‌که تا کنون پژوهشی در زمینه تحلیل اگزرسی مشعل‌های مخلوط سرنازل صورت نگرفته است. در این نوع مشعل‌ها، احتراق در نازل‌ها سریع و به طور کامل رخ می‌دهد و حرارت یکنواخت، پایدار و کنترل شده‌ای آزاد می‌شود. می‌توان گفت سرنازل مخلوط‌ها با تولید شعله‌ای مشابه پیش مخلوط‌ها (آبی و باآلایندگی پایین) می‌توانند در صنعت مورد استفاده قرار گرفته و جایگزین مشعل‌های نفوذی در کوره‌های کوتاه شوند. از مزایای دیگر این مشعل‌ها تولید بسیار کم آلایندگی NO_x می‌باشد [12]. در این مشعل‌ها با افزایش اختلاط، عملکرد شعله‌های نفوذی به پیش‌آمیخته 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 صرف نظر می‌گردد [13]. در این تحقیق به بررسی عوامل تاثیرگذار بر اختلاط در مشعل‌های مخلوط سرنازل از دیدگاه اگزرسی 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 (خروچی 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

کاهاش 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 مداول احتراق شامل بازگشت‌ناپذیری ترمودینامیکی ذاتی است، که به طور چشم‌گیری محدود به تبدیل انرژی سوخت به کار می‌شود. برای سیستم‌های احتراق اتمسفر یک، یک سوم اگزرسی سوخت بدليل بازگشت ناپذیری ترمودینامیکی غیرقابل دسترسی است [1]. نیشیدا و همکارانش بیان نمودند که افت اگزرسی در شعله‌های پیش آمیخته و نفوذی، ناشی از چهار فرایند برگشت‌ناپذیر، شامل اتلاف لزجت، تبادل حرارت داخلی، نفوذ جرم و واکنش شیمیایی است [2]. آن‌ها نشان دادند که مهمترین فرایند در تولید آنتروبی 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 هم از رساندن آنتروبی در احتراق پیش آمیخته، تولید آنتروبی کاهش و با کاهش نسبت هم ارزی تولید آنتروبی افزایش می‌یابد.

غالب این بازگشت ناپذیری 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 اجتناب ناپذیر است. بررسی تاثیر تبادل حرارت داخلی در شرایط عملیاتی اغلب مشکل است؛ زیرا به طور مستقیم در اتلاف انرژی از منطقه احتراق به محیط نتیجه نمی‌دهد. در حالی‌که تبادل حرارت داخلی، باعث کاهش اگزرسی 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]:

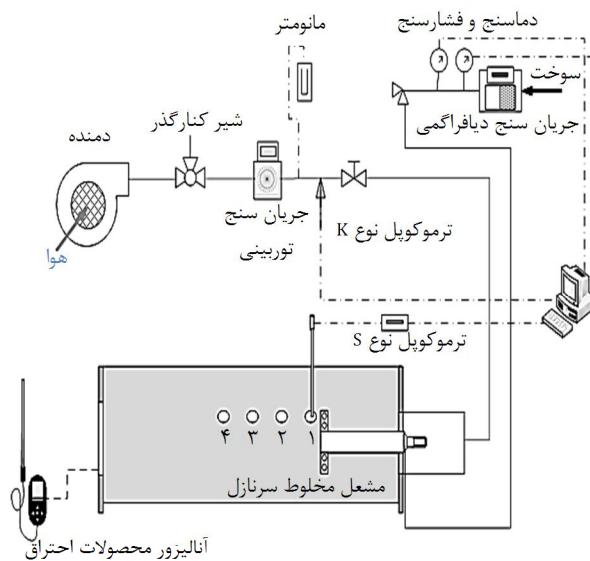
1- فرایند نفوذی ترکیب (که مولکول‌های سوخت و اکسیژن به سمت یکدیگر جریان می‌یابند) و واکنش شیمیایی (اکسیداسیون سوخت) انجام می‌شود.

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 اگزرسی 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 اگزرسی احتراق قطراهای نفت و فرایند احتراق ذغال‌سنگ پرداختند [4]. نتایج آن‌ها حاکی از این بود که 30 درصد اگزرسی 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 اگزرسی می‌گردد که تا اندازه‌ای بدلیل افزایش اتلاف‌های حرارتی می‌باشد.

دانای به صورت تحلیلی تولید آنتروبی در شعله‌های آرام دیفیوزن متقاضی را بررسی نمود [5]. وی نشان داد، با افزایش دمای هوای ورودی، میزان تولید آنتروبی کاهش می‌یابد؛ در حالی‌که کاهش در نسبت سوخت به هوا میزان تولید آنتروبی را افزایش می‌دهد. در تحقیقی دیگر، دانای اثر گرانش در توپولید آنتروبی در شعله با سوخت متان را مطالعه کرد [6] او نشان داد که حداقل میزان تولید آنتروبی 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 گردد. 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]:

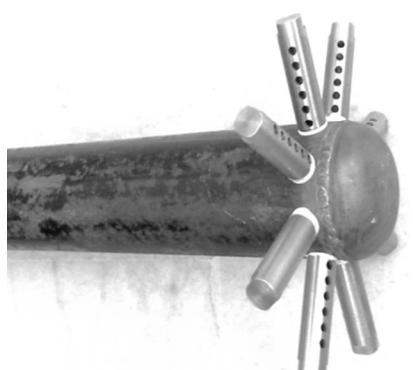
$$\frac{\partial(\rho m_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u m_i) = \nabla \cdot ((\Gamma_i + \Gamma_{i,t}) \nabla m_i) R_i \quad (2)$$

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 در 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 افتباشی و P نمایانگر فشار می‌باشد. مدل دو معادله‌ای افتباش $k-e$ استاندارد برای پیش‌بینی لزجت افتباش μ_t استفاده شده است.



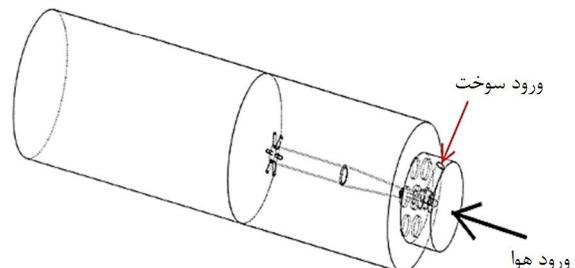
شکل ۳ نمونه سرمشعل مورد استفاده

۵۰ 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 ۳۰۰۰ 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 به ترتیب از یک جریان‌سنجدیافراگمی با دقیقه ۲٪ و یک جریان‌سنجد توربینی با دقیقه ۱٪ در گستره دبی مصرفی استفاده شده است. برای اندازه‌گیری دمای هوا و سوخت از ترموموکوپل نوع K با دقیقه ۰٪ 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 ترموموکوپل نوع S با دقیقه ۵٪ استفاده شده است. این ترموموکوپل‌ها از نوع ترموموکوپل‌های فلزات نجیب (پلاستینی) می‌باشند که از پلاتین و روديوم 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 سرناز و مسیر ورود هوا در محفظه احتراق

جدول ۱ دقیقه اندازه‌گیری آنالیزور محصولات احتراق - تستو ۳۵۰

نمونه	واحد	دقیقه
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
مونوکسیدنیبیتروژن	جز در یک میلیون	۱
ناتکس	جز در یک میلیون	۱

$$\vec{q}_r = -\frac{1}{3\kappa} \nabla G \quad (8)$$

6، تابش کلی (شامل مستقیم و پخشی) است. عبارت $\nabla \cdot q_r$ که در رابطه (9) تعریف شده است، می‌تواند به طور مستقیم در معادله انرژی برای محاسبه منبع گرما ناشی از تابش وارد گردد.

$$-\nabla \cdot q_r = \kappa G - 4\kappa\sigma T^4 \quad (9)$$

3-3- محاسبه اگزرژی

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

$$\int \frac{dA_{CV}}{dt} = \int_j^N Q_j (1 - T_0/T_j) \cdot ds - (W_{CV} - P_0 \cdot dv_{CV}/dt) + \sum_i^N (i_t \psi_i)_{in} - \sum_i^N (i_t \psi_i)_{out} - I_{CV} \quad (10)$$

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 دیوارهای محفظه احتراق است. T_f دمای مرزی و Q نرخ انتقال حرارت است که از نتایج مدل بدست می‌آیند. مراتهای حجم کنترل در این تحقیق، دیوارهای محفظه احتراق می‌باشند، بنابراین بازگشت ناپذیری فرایند احتراق قابل محاسبه است. جملات سوم و چهارم این رابطه مربوط به اگزرژی مولی جریان‌های ورودی و خروجی است. با توجه به این که کار محوری (شافت) و تغییرات حجم کنترل در این تحقیق صفر است، از عبارت دوم در سمت راست صرف نظر می‌شود. I_{CV} نرخ بازگشت ناپذیری داخل حجم کنترل ناشی از انتقال جرم و حرارت، واکنش شیمیایی و اصطکاک می‌باشد. اگزرژی جریان جرم شامل، اگزرژی جنبشی، اگزرژی پتانسیل، اگزرژی ترمومکانیکی و اگزرژی شیمیایی است. با توجه به این که تغییرات سرعت و ارتفاع در این تحقیق ناچیز است، از اگزرژی مربوطه صرف نظر و اگزرژی ترمومکانیکی و شیمیایی در جریان‌های ورودی و خروجی محاسبه شده است. اگزرژی ترمومکانیکی (ψ_i^{tm}) و اگزرژی شیمیایی (ψ_i^{ch}) گونه شیمیایی i_{th} از روابط (11) و (12) بدست می‌آید [18].

$$\psi_i^{tm} = (h - h_0)_i - T_0(s - s_0)_i \quad (11)$$

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

که ε_i^0 اگزرژی شیمیایی استاندارد گونه i_{th} در مخلوط ورودی یا خروجی بوده و \tilde{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 تاگوجی

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 تاگوجی 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

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

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

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 اتفاف گردابهای توسعه یافته (EDC) برای احتراق مغشوش

مدل EDC از مدل‌های واکنش با سرعت محدود و توسعه یافته مدل اتفاف گردابهای 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 محيط به صورت محلی آدیباتیک، 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 به سیال احاطه کننده منتقل می‌شوند. اندازه شبکه ریز شده را با ϵ و زمان متوسط اقامت سیال در آن را با τ نشان می‌دهیم، که از معادلات (5) و (6) بدست می‌آید [15]:

$$\xi = C_\xi \left(\frac{\nu \epsilon}{\kappa^2} \right)^{1/4} \quad (5)$$

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

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

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

$$\check{\omega}_i = \frac{\bar{\rho} \xi^2 \lambda}{\tau (1 - \xi^3)} (Y_i^* - \tilde{Y}_i) \quad (7)$$

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 یاکوب و همکارانش، $\lambda = 1$ بهترین مقدار می‌باشد [16].

با عنایت به این که مدل EDC قابلیت پیش‌بینی غلظت گونه‌های زیادی را در فرایند احتراق غیر پیش‌آمیخته دارد و در این تحقیق نیز جهت محاسبه اگزرژی واکنش شیمیایی، غلظت گونه‌های منوکسید کربن، دی‌اکسید کربن، بخار آب، هیدروژن، نیتروژن، اکسیژن، متان، هیدروکسید و ناکس در محصولات احتراق غیر پیش‌آمیخته 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

این که 98/231 درصد از گاز طبیعی مورد استفاده در این تحقیق (عنوان سوخت) از متان تشکیل شده، در مدل‌سازی عددی متان خالص به عنوان سوخت فرض شده است. لیکن جهت محاسبات اگزرزی ارزش حرارتی واقعی سوخت ($m^3/kcal$) (8080/153) در نظر گرفته شده است [8]. هوا مصرفی حاوی گونه‌های نیتروژن، اکسیژن، بخار آب، دی‌اکسیدکربن با غلظت مولی به ترتیب 0/02055، 0/0188 و 0/0003 مترمکعب بر ثانیه و فشار نسبی 293 میلی‌متر ستون آب و دمای 280/061 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 می‌گردد. دیواره‌های محفظه احتراق با هوا محيط اطراف به دمای 280 درجه کلوین (دما آزمایشگاه) از طریق جابجایی و تابشی تبادل حرارت دارند.

5- 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 این که استفاده از شبکه‌بندی ریزتر بدون تاثیر 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- اعتبارسنجی مدل

به منظور اعتبارسنجی روند حل عددی، نمایه شعاعی دمای به دست 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 را به شده در نمودار شکل 6 داده‌های مربوط به پروفهای شماره 1، 2، 3 و 4 است که همگی بالاتر از شعله بوده‌اند.

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 انتطباق 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

مدل	عنوان
بر پایه فشار	حل گر
ضمی	روش فرمول بندی
سیمیل	الگوریتم حل همزمان سرعت و فشار
K-4 استاندارد	مدل اغتشاشی
بدون پیش‌آمیختگی	مدل احتراق
EDC	قابل شمی و اغتشاش
P-1	مدل تابش
WSGGM	محاسبه ضریب جذب محیط واسط در مدل تابشی
حرارتی و سریع	مدل سازی ناکس

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 (EDC) و محاسبات مربوط به تحلیل اگزرزی، با استفاده از تکنیک تاگوجی و نرم افزار مینی‌تب، طراحی آزمایشات برای بررسی اختلاط و عملکرد احتراقی سرمشعل جهت مدل‌سازی عددی انجام شده است. تابع هدف در این تحقیق نرخ بازگشت‌نایپذیری می‌باشد، بنابراین معادله (13) عنوان تابع زبان انتخاب می‌گردد. بعبارت دیگر مقدار کوچک بهترین است. فاکتورهای کنترلی همان پارامترهای موثر بر اختلاط می‌باشند، که در جدول 2 سطوح آن مشخص گردیده است. برای تحلیل تاگوجی، از یک آرایه متعامد (L9) که دارای 9 آزمایش مطابق جدول 3 می‌باشد، استفاده شده است. ملاحظه می‌شود، به کارگیری روش تاگوجی باعث کاهش 18 مدل‌سازی بسیار زمان بر نسبت به حالت آزمایش کامل می‌شود.

5- مدل‌سازی عددی

در این پژوهش از نرم‌افزار سالیدورکس به عنوان پیش‌پردازنه 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 10×10^{-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.

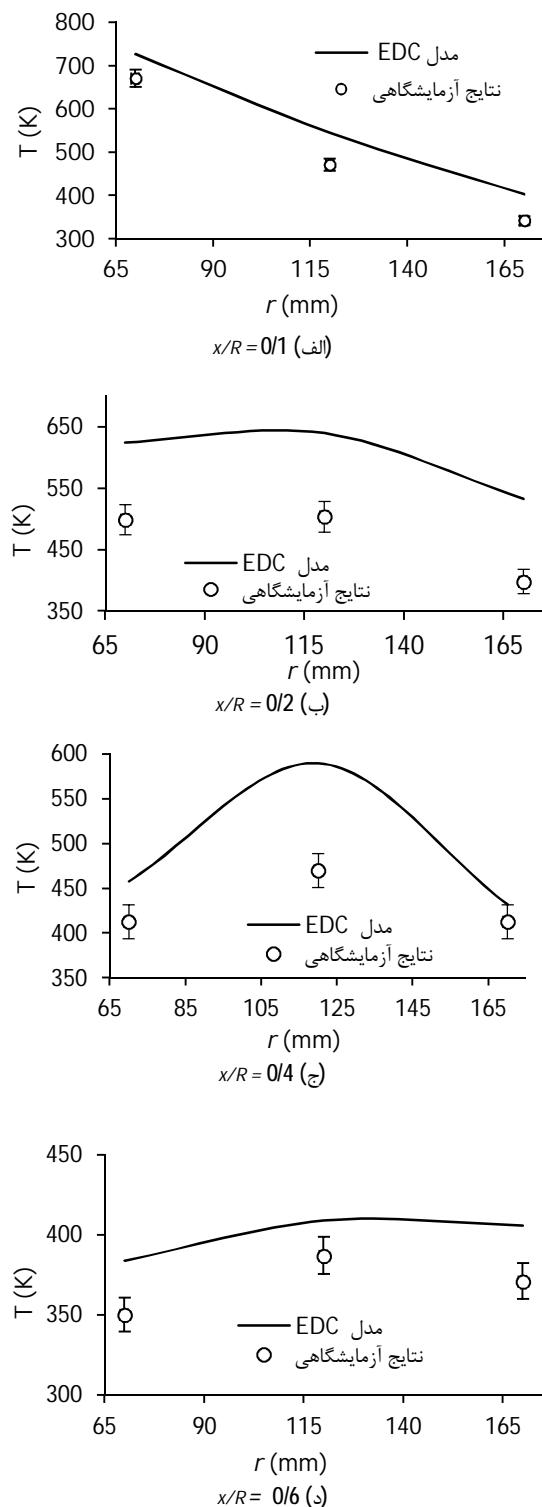
سوخت مصرفی با نرخ جریان حجمی 0/0011 مترمکعب بر ثانیه و فشار نسبی 176 میلی‌متر ستون آب و دمای 282 درجه کلوین وارد محفظه احتراق می‌شود. قطر هیدرولیکی ورودی 0/0254 متر می‌باشد. با توجه به

جدول 2 دامنه تغییرات پارامترهای طراحی سرمشعل

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

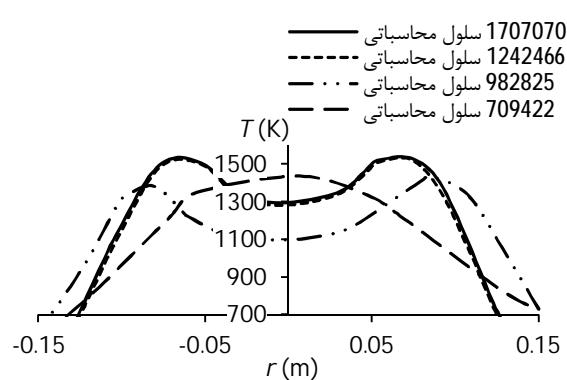
جدول 3 آرایه متعامد (L9) تاگوجی

مدل	قطر نازل (mm)	تعداد شاخه‌ها	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

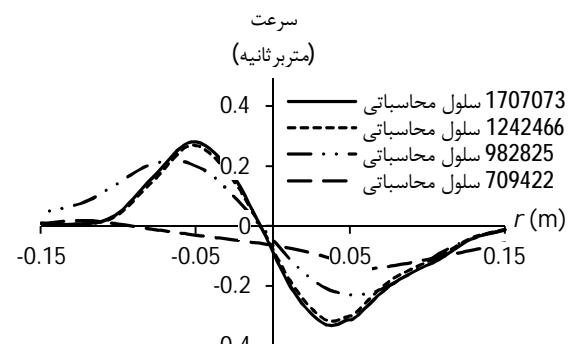


شکل 6 نمایه شعاعی دما نمونه آزمایشگاهی مشعل مخلوط سرنازل و مدل EDC

با توجه به جدول 3، نتایج جدول 5 و در نظر گرفتن این موضوع که قطر نازل در گستره انتخابی نسبت به پارامترهای 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



شکل 4 نمایه شعاعی دما برای شبکه‌های محاسباتی مختلف



شکل 5 نمایه سرعت شعاعی برای شبکه‌های محاسباتی مختلف

6- نتایج

6-1-محاسبات اگزرزی 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 بازگشت‌ناپذیری 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 اگزرزی شیمیایی، تعداد محدودی از گونه‌ها که دارای غلظت و اگزرزی شیمیایی قابل توجه می‌باشند، انتخاب شوند. بنابراین، گونه‌های منوکسید کربن، دی‌اکسید کربن، بخار آب، هیدروژن، نیتروژن، اکسیژن، متان، هیدروکسید و ناکس در محاسبه اگزرزی 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 بازگشت‌ناپذیری انجام گرفت. مقدار متوسط نسبت سیگنال به نویز برای فاکتورهای مختلف در جدول 6 و شکل 7 نشان داده شده است.

براساس دو ردیف آخر جدول 6، می‌توان گفت زاویه پاشش، تعداد شاخه‌ها و قطر نازل به ترتیب بیشترین تأثیر را بر نرخ بازگشت‌ناپذیری 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.

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 سوت در مسیر هوا بر نرخ بازگشت‌نایپذیری 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 بازگشت‌نایپذیری 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 بازگشت‌نایپذیری 45/88 درصد برای محفظه احتراق موردنظر می‌باشد.

-4 در زاویه پاشش ثابت 90 درجه که جهت پاشش سوت و هوا موازی و در یک راستا است، افزایش نقاط تزریق از طریق افزایش تعداد شاخه‌ها، منجر به کاهش نرخ بازگشت‌نایپذیری می‌گردد.

-5 ایجاد زاویه در پاشش سوت، تا حدی که منجر به تداخل شعله‌ها و برخورد آن‌ها با شاخه‌های مقابله نگردد، منجر به کاهش نرخ بازگشت‌نایپذیری 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- تقدير و تشكر

نويسندهان مرتب سپاس‌گزاری و قدردانی خود را جهت راهنمایی‌ها و مشاوره مهندس ایوب عادلی، مدیرعامل محترم شرکت شعله صنعت ابزار می‌دارند.

9- مراجع

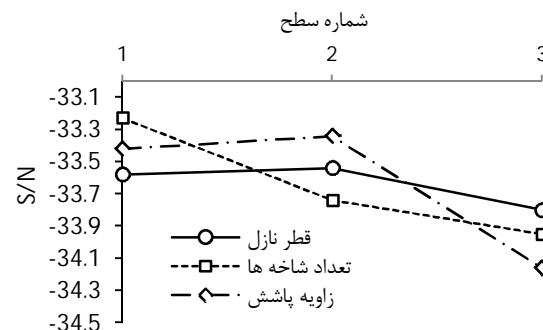
- [1] S. K. Som, A. Datta, Thermodynamic irreversibilities and exergy balance in combustion processes, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 34, No. 3, pp. 351-376, 6//, 2008.
- [2] K. Nishida, T. Takagi, S. Kinoshita, Analysis of entropy generation and exergy loss during combustion, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, No. 1, pp. 869-874, //, 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. ۱۹۹۴، ۱۵/۲
- [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//, 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. 42-۰۰۰ //, ۴۴-۹
- [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 .

جدول 5 نرخ بازگشت‌نایپذیری برای مدل‌های انتخاب شده

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

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	0/82	0/52	0/26
بیشینه و کمینه			
درجه اهمیت	1	2	3



شكل 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 بازگشت‌نایپذیری 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 بازگشت نایپذیری در این زاویه رخ دهد و مقادیر آن نسبت به دو زاویه دیگر کمتر باشد. همچنین با توجه به این که نرخ بازگشت‌نایپذیری در مشعل‌های پیش‌آمیخته حدود 32 درصد [2] و در مشعل‌های نفوذی حدود 52 درصد می‌باشد [20] مشاهده می‌گردد که مشعل مخلوط سرنازل نیز از لحاظ بازگشت نایپذیری در بین این دو مقدار قرار گرفته و عملاً با ایجاد یک شعله پخشی و گستره احتراق نفوذی را بهبود داده است.

7- جمع‌بندی

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

- [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] JH. Farahmand, Z. Yousefi, Utilization of Taguchi Technique in Engineering Problems and Multiobjective Optimization, in *10th International Industrial Engineering Conference*, Tehran, Iran, 2014 .
- [20] 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: Yariation 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