

## اندازه گیری اثر زاویه و الگوی پاشش سوخت بر تولید دوده در شعله سوخت مایع

کاظم بشیرنژاد<sup>۱</sup>، محمد مقیمان<sup>۲</sup>، محمود موسوی<sup>۳</sup>

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

[bashirnezhad@yahoo.com](mailto:bashirnezhad@yahoo.com)

### چکیده

در این مقاله اندازه گیری موضعی دوده شعله سوخت مایع به روش جمع آوری بر روی فیلتر در یک کوره آزمایشگاهی برای زوایا و الگوهای مختلف پاشش سوخت مطالعه شده است. اندازه گیریهای دوده برای زوایای پاشش سوخت ۳۰ و ۴۵ و ۶۰ درجه، الگوی پاشش مخروطی تو خالی و مخروطی تو پر و برای نسبتهای سوخت به هوای مختلف انجام شده است. اندازه گیری دمای شعله توسط ترموکوپل دیجیتالی نوع S انجام گرفته است. نتایج نشان می دهد با وجودیکه ماکزیمم غلظت دوده تولید شده در شعله با افزایش زاویه پاشش زیاد می شود، مقدار دوده خروجی از کوره به دلیل افزایش آمیختگی و بالا رفتن نرخ احتراق کاهش می یابد. همچنین نتایج نشان می دهد کاربرد الگوهای مختلف پاشش سوخت به صورت مخروطی تو خالی و مخروطی تو پر بر چگونگی توزیع و مقدار دوده موثر است. بطوریکه در الگوی پاشش مخروطی تو پر تمرکز بیشترین تولید دوده در روی محور مرکزی صورت می گیرد، در صورتیکه در الگوی پاشش مخروطی تو خالی تمرکز دوده خارج از محور مرکزی کوره اتفاق می افتد و ماکزیمم دوده تولید شده در الگوی مخروطی تو خالی بیشتر است. برای هر دو الگوی پاشش سوخت محل ماکزیمم مقدار غلظت دوده با افزایش زاویه پاشش به محل نازل سوخت نزدیکتر شده است.

**واژه های کلیدی:** دوده (Soot)، الگو (Pattern) و زاویه پاشش سوخت، احتراق سوخت مایع.

### ۱- مقدمه

یکی از محصولات حاصل از احتراق سوختهای مایع دوده (Soot) می باشد که از دو جهت مورد بررسی واقع شده است. از یک طرف یک ماده آلوده کننده محیط زیست بوده و پژوهشهای متعددی جهت اندازه گیری، مدل سازی و کنترل آن انجام شده است [۱-۵]، و از طرف دیگر وجود دوده باعث افزایش انتقال حرارت تشعشعی از شعله می شود که با توجه به اهمیت آن مطالعات گسترده ای جهت اندازه گیری میزان تشعشع دوده در شعله سوخت مایع انجام شده است [۶-۸]. در دوده در مناطقی از شعله با دمای بالا و سوخت غنی و معمولاً در شعله های پیش نیامیخته به وجود می آید [۹-۱۲]. در دستگاههایی از قبیل کوره های صنعتی، توربین گاز، موتورهای احتراق داخلی، سوخت و هوا به صورت جداگانه داخل دستگاه احتراقی شده و بدلیل عدم اختلاط کامل، مخلوط با سوخت غنی موضعی به وجود آمده که در دماهای بالا باعث تولید دوده می شود [۳]. اگرچه دوده یک ماده مضر برای محیط زیست به شمار می رود، ولی به دلیل افزایش انتقال حرارت تشعشعی در شعله های همراه با دوده در بسیاری از دستگاههای احتراقی از انتقال حرارت تشعشعی توسط دوده موجود در شعله استفاده

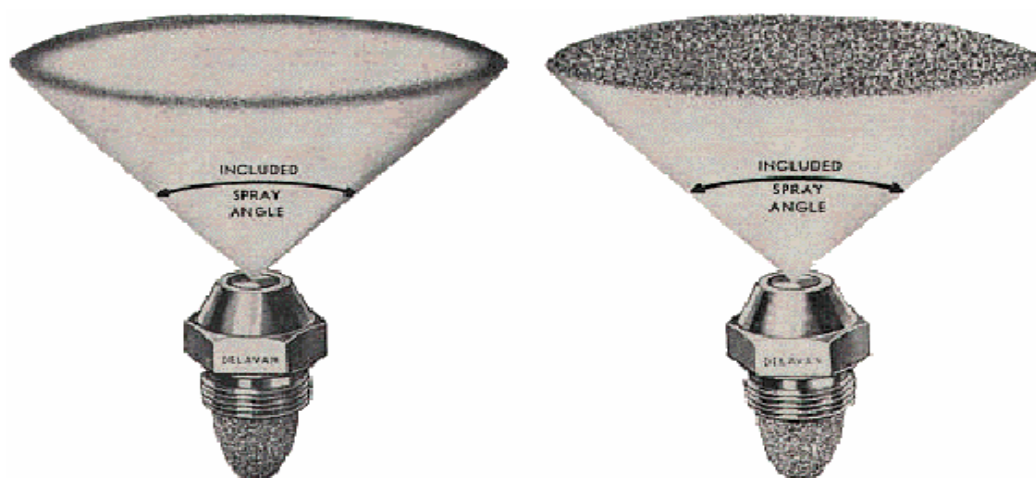
۱- مربی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

۲- استاد دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار دانشگاه فردوسی مشهد

می شود [۴].

گازوئیل یکی از پر مصرفترین سوخت های مایع در بسیاری از دستگاه های احتراقی است، و در صورتیکه پارامترهای احتراق آن تحت کنترل نباشد دوده زیادی را تولید میکند. پارامتر های موثر بر احتراق گازوئیل در کوره های صنعتی شامل زاویه، الگو، عدد چرخش، سرعت، اندازه، دما و فشار سوخت و همچنین عدد چرخش، زاویه و الگوی پاشش هوا و... می باشند. کنترل سرعت، زاویه پاشش و الگوی پاشش سوخت توسط نازل مشعل میباشد. وظیفه نازل مشعل تقسیم کردن گازوئیل به هزاران قطره کوچک جهت افزایش سطح تماس بین سوخت و هوا است. در دمای بالا بخار سوخت از قطرات جدا و بعد از اختلاط با هوا محترق می شود. برای اختلاط بیشتر هوا و سوخت نازل های مختلفی طراحی شده اند که سوخت را به صورت مخروطی و در زوایا و الگو های پاشش مختلف به داخل محفظه احتراق وارد می کنند. در شکل (۱) دو نازل با الگوی پاشش سوخت به صورت مخروط توخالی و مخروط توپر نشان داده شده است. در این پژوهش اندازه گیری دوده در شعله گازوئیل تحت شرایط مختلف از جمله نسبت سوخت به هوا، زاویه و الگوی پاشش سوخت مورد بررسی قرار گرفته است.



الف) پاشش سوخت با الگوی مخروط توپر (ب) پاشش سوخت با الگوی مخروط توخالی  
شکل ۱: شماتیک پاشش سوخت در کوره برای دو نوع الگوی پاشش سوخت

## ۲- سیستم تولید و اندازه گیری دوده

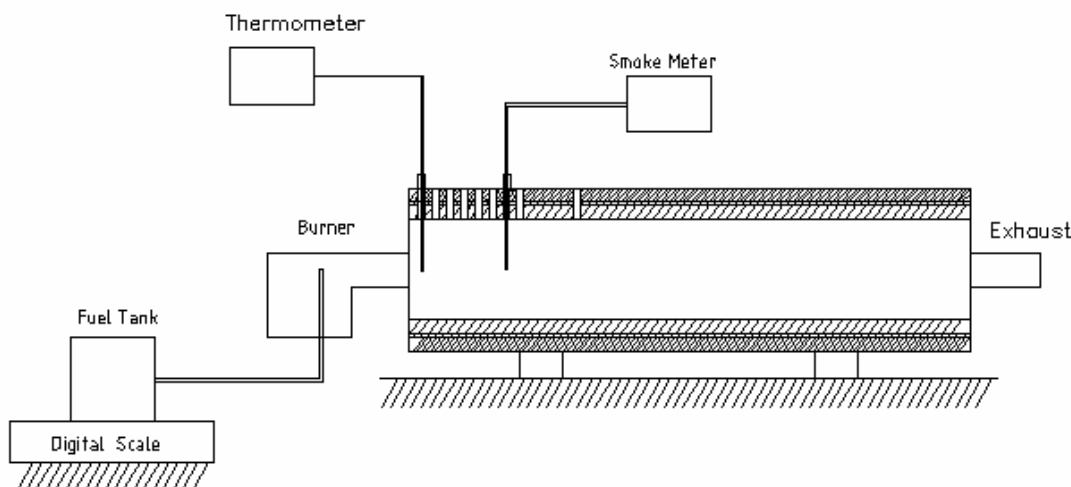
کوره آزمایشگاهی استفاده شده در این پژوهش شامل یک استوانه افقی با طول ۲ متر و قطر ۰٫۳۶ متر است، که شامل محللهائی مناسب برای نمونه برداری و اندازه گیری دما از گازهای احتراق می باشد، بطوریکه اندازه گیری دوده در جهت طولی و شعاعی امکان پذیر است، شماتیک سیستم آزمایشگاهی در شکل (۲) نشان داده شده است [۹]. جهت جلوگیری از انتقال حرارت و کنترل دمای بدنه کوره اطراف آن با پشم سنگ ۱۲۶۰ (معروف به پتوی هندی که تحمل دما تا  $1260^{\circ}C$  را دارد) با ضخامت ۵۰ mm پوشانیده شده است. اندازه گیری دوده توسط دستگاه AVL415 که با روش انعکاسی دوده را اندازه گیری می کند انجام شده است [۱۰]. گازهای احتراق توسط دستگاه دودسنج از طریق لوله مکش قرار گرفته در داخل شعله، مکیده شده و از روی فیلتر مخصوص عبور می نمایند. دوده های موجود در گازهای احتراق بر روی فیلتر جمع شده و سطح فیلتر تیره می شود، میزان تیره گی سطح فیلتر که با روش انعکاسی اندازه گیری می شود نشان دهنده مقدار دوده موجود در گاز است. از طرفی با اندازه گیری حجم گاز عبوری از روی فیلتر میزان دوده بر حسب  $gr/m^3$  بدست می آید، که مقدار کسر حجمی دوده از تقسیم عدد فوق بر جرم حجمی دوده  $kg/m^3$  ۱۸۰۰ بدست می آید. جهت اندازه گیری غلظتهای مختلف دوده مقدار حجم گاز عبوری از روی فیلتر قابل تنظیم بوده بطوریکه برای غلظتهای مختلف دوده حجم گاز عبوری از روی فیلتر از

۰/۱ تا ۳ لیتر تغییر می کند. لوله نمونه گیری دوده از جنس سرامیک به قطر داخلی ۵mm می باشد که بعد از هر آزمایش جهت جلوگیری از خطا داخل لوله تمیز شده است. برای جلوگیری از چگالیده شدن بخار آب موجود در گازهای احتراق دمای گاز در حین عبور از داخل لوله نمونه گیری تحت کنترل بوده است.

اندازه گیری دما در داخل کوره توسط ترموکوپل نوع S که قابلیت اندازه گیری دما تا  $1600^{\circ}C$  با دقت  $0.1^{\circ}C$  را دارد انجام می شود و اندازه گیری سرعت جریان هوای ورودی که با الگوی استوانه ای و بدون چرخش داخل کوره می شود، توسط یک سرعت سنج از نوع سیم داغ و با دقت  $0.1m/s$  که در محل ورودی هوا قرار گرفته انجام می شود. برای اندازه گیری شدت جریان سوخت از یک ترازوی دیجیتال با دقت ۱ gr استفاده شده است، و جهت اطمینان از نتایج سیستم اندازه گیری کلیه تجهیزات اندازه گیری کالیبره شده و صحت و دقت آنها کنترل شده است.

کوره آزمایشگاهی به گونه ای طراحی شده که به راحتی بتوان نازل پاشش سوخت را تعویض نمود. نازلهای مورد بررسی دارای زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه و با الگوی پاشش مخروطی توخالی می باشند. با توجه به اینکه زبری سطح قطعات داخل نازل بر روی اتمیزه کردن ذرات سوخت موثر است. از نازلهایی که مدارک کالیبراسیون و تأیید عملکرد آنها در دسترس بوده استفاده شده است.

کلیه اندازه گیریها بعد از رسیدن دمای کوره به حالت پایدار انجام شده و به لحاظ اینکه تغییر دمای سوخت باعث تغییر غلظت و لزجت سوخت شده و این عوامل تاثیر مهمی بر اندازه قطرات سوخت دارند، در حین آزمایش دمای هوا و سوخت ورودی تحت کنترل بوده و ثابت نگه داشته شده است.

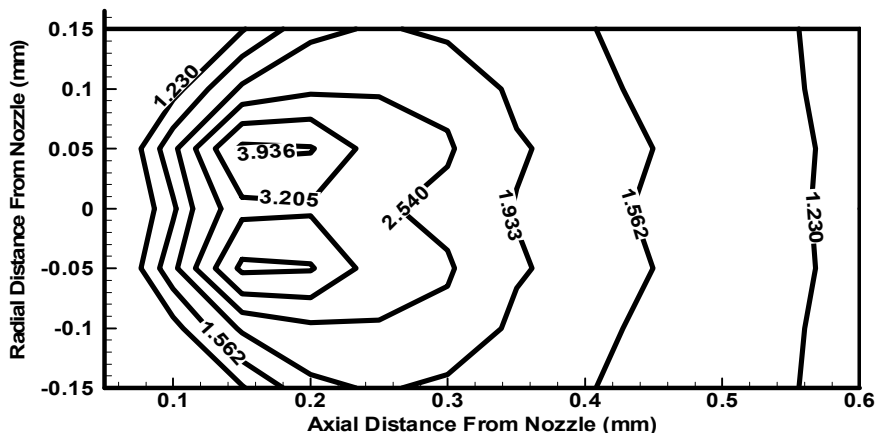


شکل ۲: شماتیک کوره و سیستم اندازه گیری نتایج

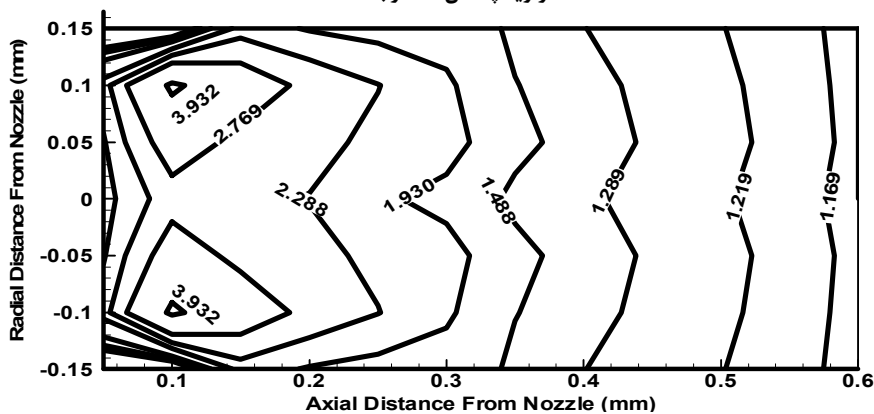
### ۳- نتایج

شکل (۳) اثر زاویه پاشش سوخت بر توزیع دوده در داخل کوره با الگوی پاشش سوخت به صورت مخروطی توخالی و نسبت سوخت به هوای تئوری را نشان می دهد. نتایج نشان می دهند ماکزیمم غلظت دوده تولید شده با افزایش زاویه پاشش سوخت زیاد شده و محل وقوع آن به سمت نازل پاشش سوخت نزدیکتر شده است. مقدار دوده تولید شده متاثر از دو عامل مهم یکی تمرکز سوخت و دیگری دمای موضعی شعله می باشد [۱]. با افزایش زاویه پاشش، قطر ذرات سوخت خروجی از نازل کوچکتر می شود، که باعث افزایش سطح تماس بین سوخت و هوا شده و اختلاط بین سوخت و هوا را افزایش می دهد. بنابر این با افزایش زاویه پاشش احتراق کاملتری انجام گرفته و ماکزیمم دمای شعله نیز زیاد شده است، ماکزیمم غلظت دوده که متاثر از ماکزیمم دما نیز هست، با افزایش زاویه پاشش زیاد شده است. همچنین نتایج نشان می دهند که محل وقوع

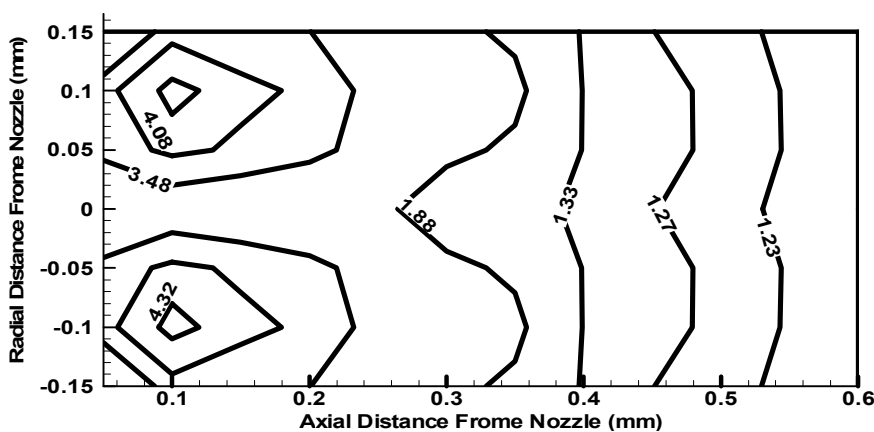
ماکزیمم غلظت دوده نسبت به محور مرکزی با افزایش زاویه پاشش از آن دور شده است. که با توجه به زاویه و الگوی پاشش سوخت در این مکانها غلظت سوخت و گونه های اولیه تولید شده از آن از جمله استیلین بیشتر است. نتایج نشان می دهند از نقطه ماکزیمم غلظت دوده به بعد به دلیل اختلاط گازهای احتراق و اکسیداسیون دوده غلظت دوده کاهش یافته است.



الف) زاویه پاشش ۳۰ درجه



ب) زاویه پاشش ۴۵ درجه

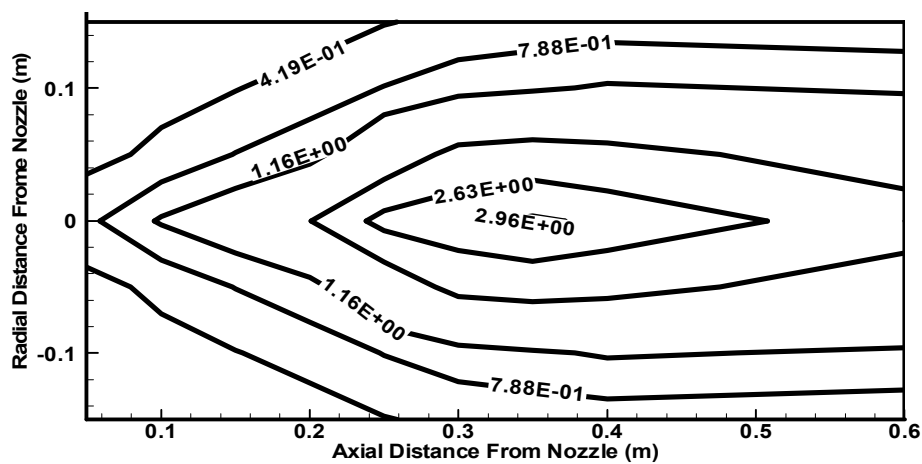


ج) زاویه پاشش ۶۰ درجه

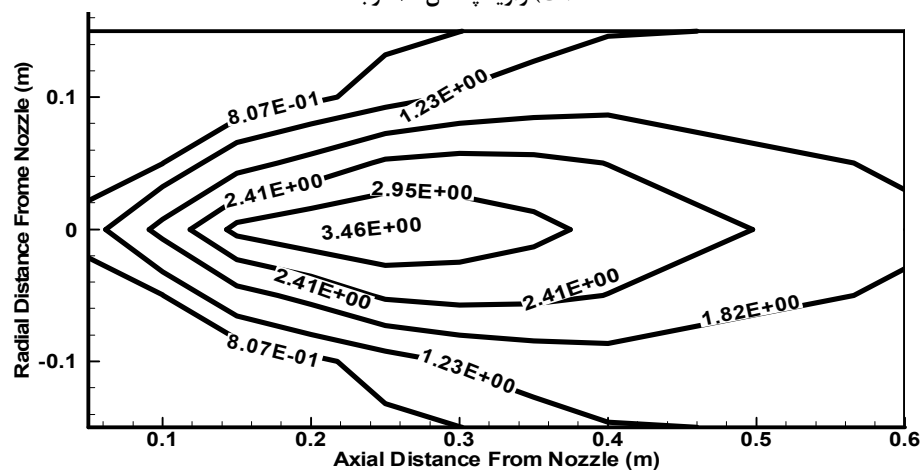
شکل ۳: اثر زاویه پاشش بر توزیع کسر حجمی دوده برای پاشش سوخت با الگوی مخروط توخالی (کسر حجمی دوده در  $1e6$  ضرب شده است)

شکل (۴) اثر زاویه پاشش سوخت بر توزیع دوده داخل کوره برای پاشش سوخت با الگوی مخروط توپر و نسبت سوخت به هوای

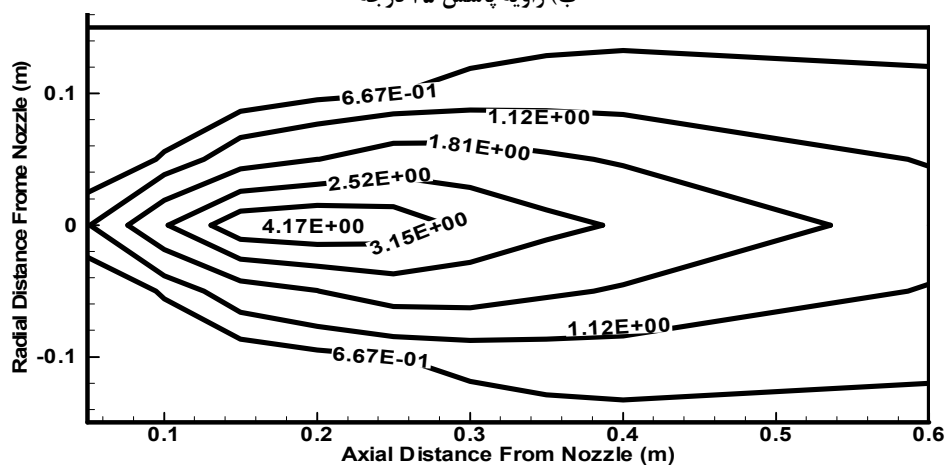
تئوری را نشان می دهد.



الف) زاویه پاشش ۳۰ درجه



ب) زاویه پاشش ۴۵ درجه



ج) زاویه پاشش ۶۰ درجه

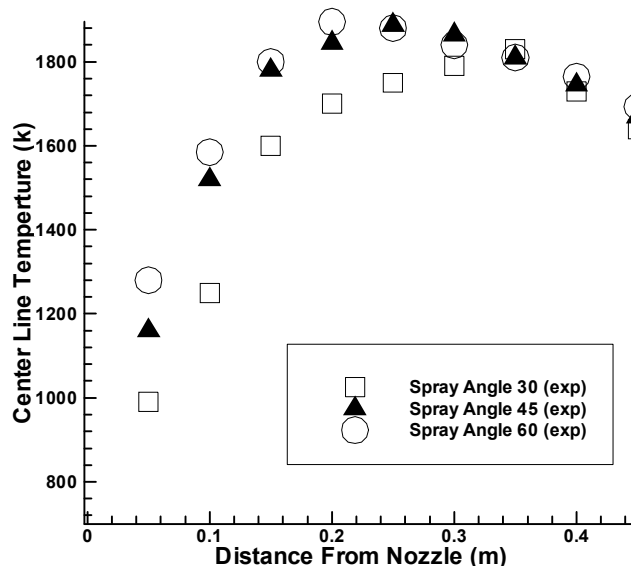
شکل ۴: اثر زاویه پاشش بر توزیع کسر حجمی دوده برای پاشش سوخت با الگوی مخروط توپر (کسر حجمی دوده در 1e6 ضرب شده است)

در این الگوی پاشش تمرکز سوخت در محور مرکزی کوره است. همانطور که انتظار می رود ماکزیمم مقدار دوده برای هر

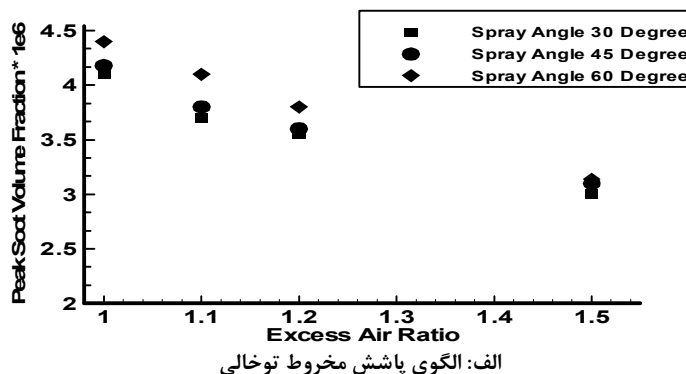
سه زاویه پاشش سوخت در محور مرکزی کوره اتفاق افتاده است. در زاویه پاشش ۶۰ درجه به دلیل کمتر بودن اندازه ذرات سوخت اختلاط بین سوخت و هوا بیشتر شده که خود منجر به وقوع ماکزیمم مقدار دوده در این زاویه نسبت به سایر زوایا است. در زاویه پاشش سوخت ۳۰ درجه اندازه ذرات سوخت بزرگتر بوده و دیرتر تبخیر و محترق می شوند، به همین دلیل نسبت به زوایای بالاتر محل تشکیل ماکزیمم غلظت دوده از محل پاشش سوخت دورتر شده است.

شکل (۵) پروفیل دما در مرکز کوره برای زوایای مختلف پاشش سوخت و الگوی پاشش مخروط توپر را می دهد. نتایج نشان می دهند که با افزایش زاویه پاشش سوخت، به دلیل اختلاط بهتر سوخت و هوا ماکزیمم دمای شعله افزایش و محل آن به محل پاشش سوخت نزدیکتر شده است. که با توزیع دوده در کوره تطابق دارد [۱۱]. به دلیل احتراق نسبتاً کامل سوخت برای هر سه زاویه و اختلاط محصولات احتراق در انتهای کوره، اختلاف دمای بین آنها کاهش پیدا نموده است.

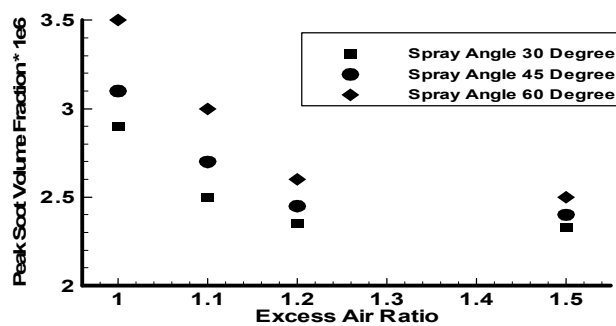
تاثیر مقدار هوای اضافی بر ماکزیمم مقدار دوده تولید شده در زوایای الگوهای مختلف پاشش در شکل (۶) نشان داده شده است. با افزایش مقدار هوای اضافی همانطور که انتظار می رود، ماکزیمم مقدار دوده کاهش پیدا نموده است. همچنین با افزایش زاویه پاشش سوخت هوای اضافی کمتری برای مینیمم کردن دوده تولید شده مورد نیاز است. که به دلیل کاهش قطر ذرات سوخت در زوایای پاشش بالاتر و تبخیر سریع سوخت می باشد.



شکل ۵: تاثیر زاویه پاشش بر دمای مرکز کوره برای پاشش سوخت با الگوی مخروط توپر

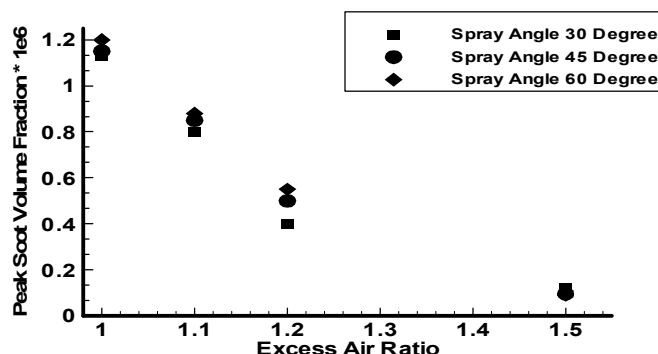


الف: الگوی پاشش مخروط توخالی

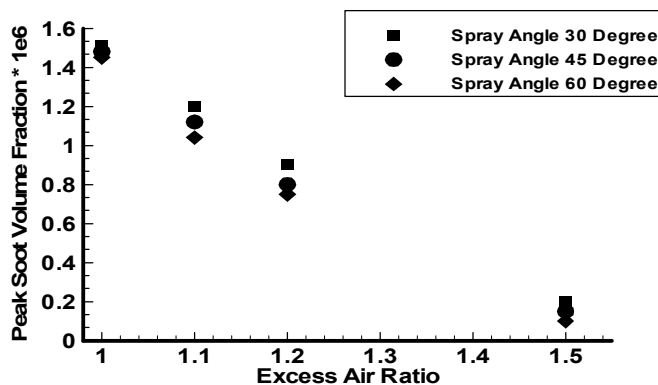


ب: الگوی پاشش مخروط توپر  
شکل ۶: تاثیر ضریب هوای اضافی بر ماکزیمم مقدار دوده

شکل (۷) تاثیر زاویه و الگوی پاشش بر مقدار دوده خروجی از کوره را نشان می دهد. با افزایش مقدار هوای اضافی مقدار دوده خروجی کاهش یافته است. علت کاهش دوده به دو دلیل مرتبط می باشد، اول اینکه با افزایش مقدار هوای اضافی، جرم هوای ورودی اضافه شده و باعث کاهش دمای ماکزیمم شعله می شود، دوم اینکه اکسیژن اضافه موجود در گازهای احتراق احتمال اکسیداسیون دوده را بیشتر می کند [۱۲].



الف: الگوی پاشش مخروط توخالی



ب: الگوی پاشش مخروط توپر  
شکل ۷: تاثیر هوای اضافی بر دوده اندازه گیری شده در خروجی کوره

از آنجائی که برای کاهش آلاینده ها و احتراق کامل معمولا از مقداری هوای اضافی استفاده می شود که باعث کاهش دمای

گاز به دلیل افزایش جرم هوای ورودی و در نتیجه کاهش راندمان دستگاه احتراقی می شود. هوای اضافی مورد نیاز برای احتراق کامل با افزایش زاویه پاشش سوخت کاهش می یابد. لذا با افزایش زاویه پاشش راندمان احتراق افزایش می یابد.

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج اندازه گیری برای سه زاویه و دو الگوی پاشش سوخت ارائه شدند. نتایج نشان می دهند که توزیع دوده در داخل شعله سوخت مایع متاثر از هر دو پارامتر زاویه و الگوی پاشش سوخت می باشد. در زاویه پاشش ۳۰ درجه و الگوی مخروط توپر ماکزیمم غلظت سوخت کمترین و در زاویه پاشش ۶۰ درجه و الگوی مخروط توخالی بیشترین مقدار را داشته است. مقدار دوده خروجی از کوره در زاویه پاشش ۶۰ درجه و الگوی پاشش مخروط تو خالی کمترین و برای الگوی پاشش مخروط توپر و زاویه پاشش ۳۰ درجه بیشترین مقدار را دارد. نکته حائز اهمیت این است که با وجودیکه با افزایش زاویه ماکزیمم غلظت دوده در شعله زیاد شده است اما غلظت دوده در خروجی کوره با افزایش زاویه پاشش کاهش یافته است، که علت آن در قسمت نتایج توضیح داده شده است.

مقدار هوای اضافی جهت احتراق کاملتر سوخت و کاهش دوده خروجی با افزایش زاویه پاشش به دلیل اختلاط بیشتر سوخت و هوا کاهش می یابد. دمای سوخت و هوای ورودی و دمای جداره کوره از عوامل موثر بر فرایند احتراق و تولید دوده هستند که می توانند در پژوهشهای بعدی مورد مطالعه قرار گیرند.

#### تشکر و قدردانی

در اینجا بر خود لازم می بینیم که از حمایتهای بیدریق جنای آقایان دکتر مدرس رضوی و دکتر قاضی خانی مسئولین محترم آزمایشگاه پژوهشی گروه مکانیک که در تهیه نتایج آزمایشگاهی این پروژه ما را حمایت کردند، تشکر و قدردانی نماییم.

#### مراجع

- 1- T. Mendiara, M.P. Domene, A. Millera, R. Bilbao and M.U. Alzueta, An experimental study of the soot formed in the pyrolysis of acetylene, Analytical and Applied Pyrolysis, Vol 74, pp. 486-493, 2005.
- 2- M.S. Rasmussen, P. Glarborg, M. Østberg, J.T. Johannessen, H. Livbjerg, A.D. Jensen, Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons and soot in fuel-rich oxidation of methane in a laminar flow reactor, Combustion and Flame, Vol. 136, pp. 91- 128, 2004.
- 3- J.H. Bae and C.T. Avedisian, Experimental study of the combustion dynamics of jet fuel droplets with additives in the absence of convection, Combustion and Flame, Vol. 137, pp. 148-162, 2004.
- 4- F. Inala, G. Tayfurb, R. Meltonc, M. Senkanc, Experimental and artificial neural network modeling study on soot formation in premixed hydrocarbon flames, Fuel, Vol. 82, pp. 1477-1490, 2003.
- 5- A. Saarioa, A. Rebolab, P.J. Coelhob, M. Costab, A. Oksanena, Heavy fuel oil combustion in a cylindrical laboratory furnace: measurements and modeling Fuel, Vol 84, pp. 359-369, 2005.
- 6- J.B. Moss, C.D. Stewart, Spectrally resolved measurements of radiative heat transfer in a gas turbine combustor, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 28, pp. 575-583, 2004.
- 7- Wen, Z., Yun, S., Thomson, M. J., Lightstone, M. F. Modeling soot formation in turbulent kerosene/air jet diffusion flames, Combustion and Flame, Vol. 135, pp. 323-340, 2003.
- 8- T. Kevin, J. Fieding, D. Mitchell, B. LONG, Experimental and computational study of temperature, species, and soot in buoyant and non-buoyant coflow laminar diffusion flames, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 28, pp. 1973-1979, 2000.
- 9- F. C. Lockwood, J. E. Van Niekerk, Parametric study of a carbon black oil furnace. Combustion and Flame, Vol. 103, pp. 76-90, 1995.
- 10- AVL 2001 Smoke Measurement AVL LIST GMBH, Graz.
- 11- B. Hu, B. Yang, U. O. Koylu, Soot measurements at the axis of an ethylene/air nonpremixed turbulent jet flame, Combustion and Flame, Vol. 134, pp. 93-106, 2003.
- 12- B.R. Stanmore, J.F. Brilhac, P. Gilot, Review article the oxidation of soot: a review of experiments, mechanisms and models, Carbon, Vol. 39, pp. 2247-2268, 2001.