

ارایه مدل ریاضی بر پایه پیش بینی انتشار آلاینده های زیست محیطی در یک نیروگاه نمونه

رضا مرندي

نصرالله مجیدیان

استاد یار دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال

سید محمد حجتی خراسانی

کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود

تاریخ پذیرش: ۸۵/۶/۱۲

تاریخ دریافت: ۸۴/۱۲/۲۰

چکیده

محصولات ناشی از احتراق سوخته های هیدروکربنی شامل ترکیبات NO ، PM ، NO_x ، SO_x ، O_3 ، H_2O ، CO ، N_2 در میان آن ها ترکیبات SO_x ، NO_x ، PM ، CO ، CO_2 ، NO به عنوان آلاینده محیط زیست شناخته می شود. این آلاینده ها عامل اصلی آلودگی شهرهای صنعتی و بزرگ هستند. نیروگاه های حرارتی نیز به عنوان یکی از مصرف کنندگان عمده سوخت ناشی عمده در ایجاد این آلودگی دارند. در این مقاله با استفاده از ترمودینامیک احتراق و مدل های مختلف ارایه شده برای تولید آلاینده ها یک مدل برای پیش بینی تولید آلاینده ها در بویلر نیروگاه ها تهیه شده که غلظت آلاینده های CO_2 ، SO_x ، CO ، NO را پیش بینی می کند. با استفاده از این مدل از حجم زیاد محاسبات کاسته شده و برای هر نوع سوخت هیدروکربنی که در بویلرها مورد استفاده قرار می گیرد غلظت آلاینده ها نیز به دست می آید. در نهایت مقادیر پیش بینی شده با مقادیر عملی اندازه گیری شده در بویلر نیروگاه حرارتی تبریز مقایسه شده و تطابق خوبی بین مقادیر نظری و عملی برقرار است.

واژه های کلیدی: احتراق- مدل ریاضی- سینتیک شیمیایی- آلاینده- نیروگاه

مقدمه

آلودگی های مورد اشاره می باشد. این شرایط سبب می شود که مساله مدلسازی تولید آلاینده ها برای واحدهای صنعتی در شرف تاسیس اهمیت خاصی پیدا کند و تنها طرح هایی حالت اجرایی به خود بگیرد که مدل نوید نتایج مثبتی را بدهد. در مورد نیروگاه های حرارتی که ساخت آن ها هزینه های سنگینی دارد و عملاً آزمایش آن ها امکان پذیر نمی باشد، ارایه مدلی که بتواند آلاینده ها را به صورت دقیق پیش بینی کند بسیار حیاتی است. برای کالیبره کردن مدل های ارایه شده می توان نتایج حاصل از آن ها را با داده های نیروگاه های موجود (که مقادیر آلاینده های آن ها اندازه گیری شده است) مقایسه کرد.

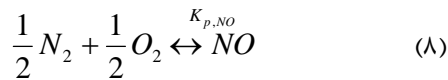
در این تحقیق یک مدل برای محاسبه مقادیر تعادلی CO ، CO_2 ، SO_x ، NO برای شرایط کارکرد بویلرها ارایه شده است که برای هر نوع سوختی با مشخص بودن دمای آدیاباتیک شعله آن در حالت استویکومتریك، نتایج حاصله

آلودگی هوا که در دهه های اخیر به عنوان یکی از بزرگترین معضلات جامعه بشری مطرح شده است، با پیشرفت روز افزون صنایع شدت بیشتری یافته و در صورت عدم کنترل میزان تولید آلاینده ها سلامت نسل های آتی به خطر می افتد. آلودگی هوا که براساس وجود ذرات و گازهای مضر در هوا تعریف می شود اثرات نامطلوبی از جمله سرطان های پوستی، گرفتگی مجاری تنفسی، نارسایی مغزی و کلیوی و پیری زودرس و صدمه دیدن جنین دارد و همچنین صدمات غیر قابل جبرانی به حیات حیوانات و گیاهان وارد می سازد. پدیده گازهای گلخانه ای خود یکی از عواملی است که حیات آیندگان را با خطر مواجه می کند. در حال حاضر مقررات اصولی بر پایه تولید آلاینده های محیط زیست در واحدهای صنعتی در حال تاسیس وضع شده است و پیمان کیوتو یکی از موثرترین راهکارهای جهان امروز برای مقابله با

را به دست می‌دهد.

دانیم که بویلر نیروگاه های حرارتی با مقداری هوای اضافی (نسبت سوخت به هوا بزرگتر از ۱ یا $AFR < 1$) کار می‌کند Wark و Warner (۳) پیشنهاد می‌کنند که معادله حذف شود. Heywood (۱۹۹۸) نیز این نکته را فقط برای حالتی که احتراق فقیر سوز داریم تایید می‌کند. اما برای حالت احتراق استوکیومتریك این فرض سبب ایجاد خطای بزرگی می‌شود (۴). زیرا تشکیل رادیکال آزاد OH وابسته به مقدار سوخت در دسترس است و با افزایش AFR که توام با کاهش درصد سوخت به هوای در دسترس است، می‌توان اثر OH را در نظر گرفت (۱).

با استفاده از معادله (۴) مقادیر لحظه ای NO و نیز زمان رسیدن به تعادل به دست می‌آید، اما مشاهده می‌شود که زمان تعادل برای دماهایی نظیر ۲۴۰۰ K که دمایی معمول برای احتراق بویلرها است در حدود چند دهم ثانیه است و لذا با توجه به زمان کافی برای احتراق در بویلر، می‌توان نتیجه گرفت که با غلظت های تعادلی NO سروکار داریم (۲). یعنی:



$$[NO]_e = K_{P,NO} [N_2]^{1/2} \cdot [O_2]^{1/2} \quad (9)$$

در هوای استاندارد جو غلظت های اکسیژن و نیتروژن برابر $21\% \text{ } O_2$ و $79\% \text{ } N_2$ است. اما در بویلرها که ضریب هوای اضافی A داریم، غلظت O_2 خروجی از دودکش (بعد از احتراق) برابر است با (۱):

$$[O_2] = 275 \frac{(A-1)V^o}{Vg} : Vg = V^o g + (A-1) \quad (10)$$

که V^o مقدار هوای نظری مورد نیاز برای احتراق کامل ۱kg از سوخت در $A=1$ و Vg نیز حجم گازهای دودکش خارج شده از احتراق کامل با $A=1$ است و در نهایت داریم [۱]:

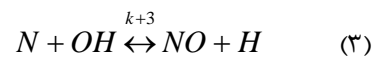
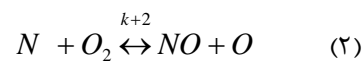
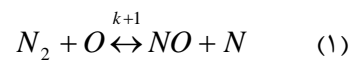
$$[O_2] = 275 \frac{(A-1)}{A+Ag} : Ag = \frac{V^o g}{V^o} - 1 \quad (11)$$

اما چون میزان نیتروژن مصرف شده در احتراق در مقایسه با مقدار اولیه بسیار ناچیز است، فرض می‌کنیم حجم آن تغییر نمی‌کند و لذا داریم [۱]:

معادلات تشکیل آلاینده ها

در هنگام سوختن يك سوخت هیدروکربنی معمول است که شعله را به سه ناحیه تقسیم می‌کنند که شامل ناحیه پیش شعله (Pre flame)، درخشان و پس شعله (Post flame) است. در ناحیه درخشان که دما نیز بالاترین مقدار خود را دارد، فعالیت شیمیایی فراوانی روی می‌دهد و در نهایت آلاینده های CO , CO_2 , NO , NO_2 تشکیل می‌شوند. باید تصریح کرد که NO تشکیل یافته NO حرارتی است که تنها بخشی از NO کل را که شامل NO سوختی و Prompt NO نیز می‌باشد شامل می‌شود.

در مورد تشکیل NO حرارتی مکانیزم های مختلفی همانند ایزات (۱)، زلدوویچ (۲)، هیوودولوی یو (۱) و زلدوویچ توسعه یافته (۱) وجود دارد که بهترین آن ها مکانیزم زلدوویچ توسعه یافته است که شامل واکنشهای زنجیره ای زیر می باشد (۲).



با نوشتن نرخ شکل گیری NO و استفاده از این مطلب که نرخ شکل گیری رادیکال های آزاد مانند N تقریباً برابر صفر است ($R_N \approx 0$) در نهایت معادله زیر به دست می‌آید [۲]:

$$\frac{d[NO]}{dt} = \frac{M(1-Y^2)[NO]^e}{2(1+CY)} \quad (4)$$

$$Y = \frac{[NO]}{[NO]_e} \quad (5)$$

$$C = \frac{K_{-1}(K_{P,NO})[N_2]^{1/2}}{K_{+2}[O_2]^{1/2}} \quad (6)$$

$$M = \frac{4K_{+1} \times K_{P,O}[N_2]^{1/2}}{(R_u T)^{1/2} \cdot K_{P,NO}} \quad (7)$$

در معادله (۴) از اثر OH صرف نظر شده است، زیرا می

یک مول از گازهای حاصل از احتراق به عنوان حجم مورد مطالعه تعداد مول های تشکیل شده در شروع و حالت نهایی واکنش، پس از گذشت زمان کافی برای اجزای در نظر گرفته شده به شکل جدول ۱ می باشد، کمک گرفته شده است.

در مورد SO_2 نیز با توجه به میزان سولفور موجود در سوخت به راحتی می توان غلظت SO_2 خروجی را پیش بینی کرد و در صورت استفاده از امکانات جذب سولفور، برحسب راندمان دستگاه ها می توان معادله SO_2 خروجی را به صورت زیر نوشت (۱):

$$M_{SO_2} (g/s) = 2 \times 10^3 \times \frac{S^w}{100} \times Q \times (1 - \eta_{SO_2})(1 - \eta'_{SO_2}) \quad (21)$$

که در آن S^w درصد سولفور موجود در سوخت است. Q میزان سوخت مورد استفاده در نیروگاه برحسب kg/s و ضریب ۲ برابر وارد کردن اختلاف جریان مولکولی S و SO_2 به معادله وارد شده است.

η_{SO_2} بیان کننده بخشی از اکسیدهای سولفور است که به وسیله جذب کننده از گازهای خروجی از بویلر جذب می شود و η'_{SO_2} بخشی از اکسیدهای سولفور را که به وسیله کلکتورهای خاکستر جذب می شود، نشان می دهد.

فرمول دمای واقعی در بویلرها (Ta):

می دانیم که در بویلرها، هوای ورودی برای کنترل دمای بخار سوپرهیت و نیز کنترل میزان تولید آلاینده ها پیش گرم می شود و نیز مقداری از گازهای دودکش (به همان دلیل ذکر شده) به داخل بویلر برگشت داده می شوند. با توجه به این موارد، T_a برابر است با (۱):

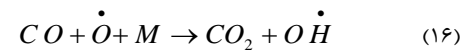
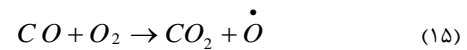
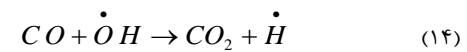
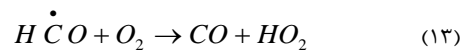
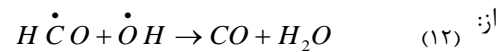
$$T_a = 273 + \frac{LHV(100 - q_1 - q_2 - q_3) + Q_a + rlg}{(1 - r)(1 + (A - 1)(Cp)g)} \quad (22)$$

که LHV ارزش حرارتی پایین سوخت و q_1 ، q_2 و q_3 هدر رفتن حرارت متناسب با به ترتیب احتراق ناقص شیمیایی، هیدروکربن های نسوخته و خاکستر می باشد.

$$[NO]_e = 2512.1 \sqrt{\frac{A-1}{A+Ag}} : \exp(-10000/T) \quad (11)$$

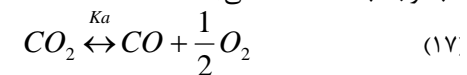
از این معادله برای پیش بینی غلظت NO تعادلی در بویلرها استفاده می شود. مقدار Ag برای مازوت ۰/۰۷۵ و برای گاز طبیعی ۰/۱۲۵ می باشد (۱). چنانچه روابط سینتیکی تولید NO_x را همانند NO بنویسیم، مشاهده می شود که زمان لازم برای رسیدن NO_x به حالت تعادلی طولانی بوده و لذا در لحظه پایان احتراق (همچنین در طول آن) میزان غلظت NO_x تولیدی شامل NO می باشد بنابر این می توان از غلظت NO_x حین احتراق صرف نظر کرد (۵-۳).

فرایندهایی که سبب شکل گیری CO می شوند عبارتند



که M کاتالیزور است.

در اینجا نیز با توجه به این که از اثر OH صرف نظر می کنیم به حالتی می رسیم که فرض می کنیم CO بر اثر احتراق به وجود آمده و تنها تبدیل آن به CO_2 مدنظر است و لذا با توجه به معادله تعادلی (۲):



$$K_a = 26108 \exp(-33600/T)$$

معادله تعادل را مانند روش تشکیل NO نوشته و در نهایت داریم (سوخت مورد نظر C_xH_y می باشد) (۵):

$$C = \frac{x}{4.76A(x + \frac{y}{4}) + \frac{y}{4}} \cdot \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (18)$$

$$\beta = 49.8 \sqrt{\frac{A + Ag}{A - 1}} \exp(-33600/T) \quad (19)$$

$$[CO]_e = \frac{10^6 \times C}{1 + 0.5C} (ppm); \quad (20)$$

$$[CO_2] = \frac{P - C}{1 + 0.5C} \times 10^6 (ppm)$$

در نوشتن رابطه (۱۸) از این امر که با در نظر گرفتن

جدول ۱- تعداد مول های اجزای محصولات احتراق در لحظه شروع و پایان تشکیل آلاینده ها

زمان	N ₂	O ₂	NO	NO ₂	CO ₂	CO	H ₂ O	n _t
0	m	n	0	0	p	0	۱-m-n-p	۱
∞	m-a/۲	n-a/۲ + b/۲ + c/۲	a-b	b	p-c	c	۱-m-n-p	۱-b/۲ + c/۲

۳ نیز معلوم است که گرم کردن هوای ورودی سبب افزایش CO و کاهش CO_p می شود، زیرا از ثابت واکنش تعادلی معلوم است که در دماهای بالا تبدیل CO_p به CO به مقدار زیاد انجام می شود، اما با کاهش دما این میزان به شدت کاهش می یابد. (با کاهش دما از ۲۴۰۰ k به ۱۴۳۰ k مقدار Ka به ۳/۱۰۰۰۰ مقدار اولیه خود می رسد). [۵].

باید توجه کرد که در این حالت میزان اکسیژن در دسترس (A) ثابت در نظر گرفته می شود.

حال به بررسی اثر برگشت دادن گازهای خروجی می پردازیم. در نمودار ۴ مشاهده می شود که به ازای افزایش درصد برگشت گازهای خروجی، دمای آدیاباتیک شعله و نیز دمای متوسط شعله کاهش می یابد. در نمودار ۵ نشان داده شده است که به ازای افزایش درصد گازهای خروجی مقدار NO به علت کاهش دمای متوسط شعله و نیز به این علت که مقداری از NO تولید شده در احتراق قبلی، مجدداً وارد محفظه شده، به رادیکال های آزاد شکسته می شود و در احتراق شرکت می کند، کاهش می یابد.

در نمودار ۶ تغییرات NO برحسب A رسم شده است. در این نمودار مشاهده می شود که با افزایش A ابتدا مقداری افزایش NO داریم و سپس NO کاهش می یابد. دلیل این امر ترکیب دو اثر مجزا از هم است. اثر اول کاهش دمای آدیاباتیک شعله با افزایش A می باشد که در نمودار ۴ نشان داده شده و اثر دومی افزایش میزان O_p و N_p در دسترس برای انجام واکنش است. اثر اولی سبب کاهش NO (کاهش انرژی لازم برای شکستن رادیکال های آزاد و کاهش ترکیب آن ها و تشکیل NO) و اثر دومی سبب افزایش NO (افزایش رادیکال های آزاد در دسترس برای انجام واکنش) می شود. چنانچه از قضیه جمع آثار استفاده کنیم مشاهده می شود که برای مازوت در فاصله ۱/۱ < A < ۱ درصد کاهش NO با کاهش دما (با فرض N_p و O_p ثابت) برابر ۲۳/۶٪ و درصد افزایش NO با افزایش O_p و N_p (دمای ثابت) برابر ۱۱۵/۸۶٪ است و ترکیب این دو اثر فوق برابر ۹۲/۳٪ خواهد شد. (۵).

انرژی حرارتی موجود در هوای ورودی و are نسبت گازهای برگشتی و Ig انرژی گرمایی موجود در گازهای برگشتی و (Cp)g ظرفیت گرمایی گاز ورودی است و در نهایت با ساده سازی معادلات داریم(۱):

$$T_a = 273 + \frac{t_a^0 + A(Ca)ha + r[(Cg)rt_r + (A-1).(Ca)rt_r]}{(1+r)(1+(A-1)Ca/a)} \quad (۲۳)$$

که دمای آدیاباتیک شعله برحسب C برای سوخت مورد نظر با A=۱ و t_{ha}=0 (بدون پیش گرم هوا) و r=0 می باشد (دمای معادل احتراق استوکیومتری). tr دمای گازهای برگشتی برحسب (Ca)_{ha}, (Ca)_p, (Ca)_a ، °C به ترتیب نسبت گرماهای مخصوص هوای گرم، هوای برگشتی و هوا در دمای t_a⁰ به گرمای مخصوص گازها در دمای t_a⁰ می باشد. مقادیر مربوط به C برای سوخت های مختلف در جدول ۲ ذکر شده است(۱).

جدول ۲- مقادیر مربوط به C های مازوت و گاز طبیعی [۱]

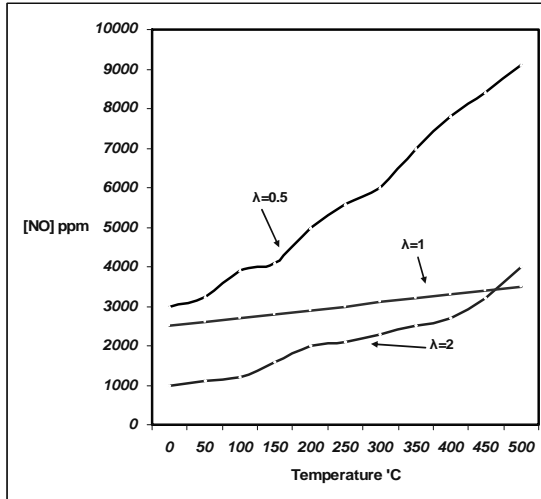
نوع سوخت	(Ca)a	(Cg)r	(Ca)r=(Ca)ha	Ag
مازوت	۰/۸۵	۰/۸۹	۰/۷۸	۰/۰۷۵
گاز طبیعی	۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۷۲	۰/۱۲۵

بحث و تفسیر نتایج

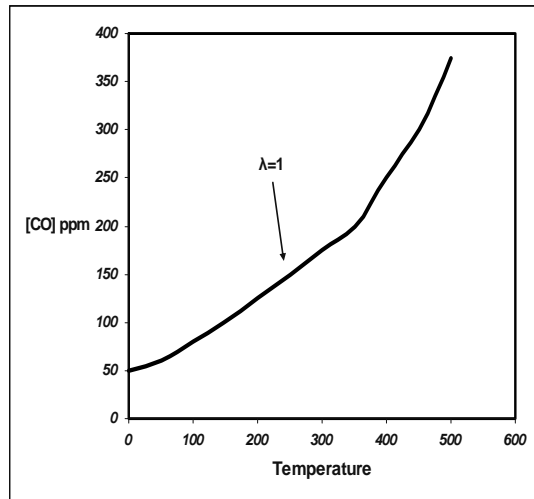
با استفاده از معادلات به دست آمده، نمودارهای مربوط به غلظت NO، CO_p و CO_p برحسب ضریب هوای اضافی در ابتدا (برای مازوت) (C_pH_p) و (سپس برای گاز طبیعی) CH_۴ که در آینده به عنوان سوخت جایگزین مورد استفاده قرار می گیرد، رسم شده است.

همچنین اثر مربوط به پیش گرم کردن هوای ورودی و برگشت دادن گازهای خروجی به میزان r به داخل بویلر نیز بررسی شده است.

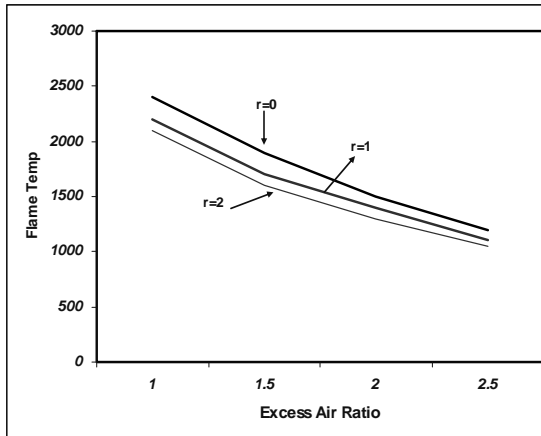
در نمودار ۱ مشاهده می شود که گرم کردن هوای ورودی به ازای یک r ثابت سبب افزایش میزان NO می شود که این خود به دلیل افزایش دمای احتراق می باشد که باعث می شود تعداد بیشتری از رادیکال های آزاد تولید شده و لذا ترکیب آن ها سبب افزایش NO می شود. در نمودار ۲ و



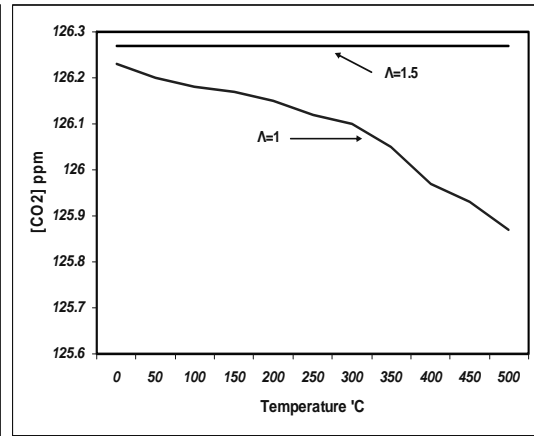
نمودار ۱- تغییرات غلظت NO در برابر دمای هوای پیش گرم شده ورودی برای $A=1, 1.5, 2$



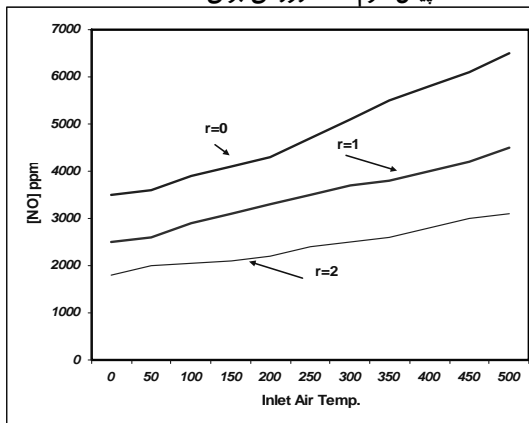
نمودار ۲- تغییرات غلظت CO در برابر دمای هوای پیش گرم شده ورودی برای $A=1, 1.5, 2$



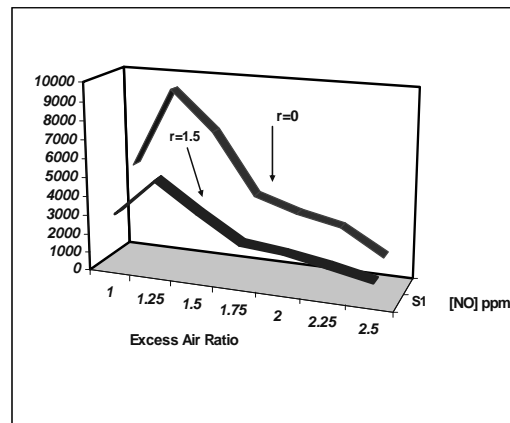
نمودار ۳- تغییرات غلظت CO_۲ در برابر دمای هوای پیش گرم شده ورودی برای $A=1, 1.5, 2$



نمودار ۴- تغییرات دمای شعله بر حسب ضریب هوای اضافی برای مقادیر مختلف گازهای برگشتی



نمودار ۵- تغییرات غلظت NO بر حسب دمای هوای ورودی به ازای مقادیر مختلف گازهای برگشتی



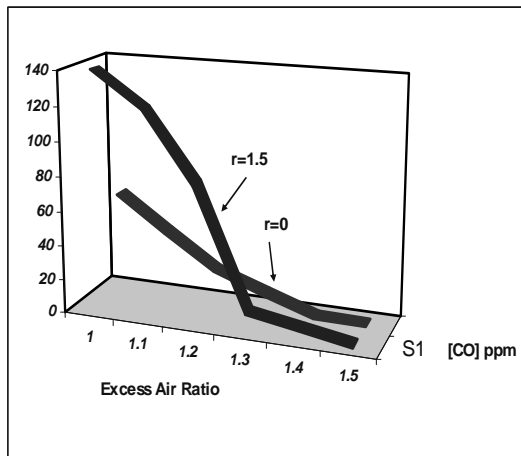
نمودار ۶- تغییرات غلظت NO بر حسب A

نشان می دهد که با افزایش A میزان CO به شدت کاهش می یابد. در مورد CO_۲ نیز در نزدیکی نقطه استوکیومتری که چون احتراق به سمت کامل شدن پیش می رود، بالاترین میزان CO_۲ را داریم و با دور شدن از این حالت احتراق ناقص شده و از میزان CO_۲ کاسته می شود (نمودار ۸).

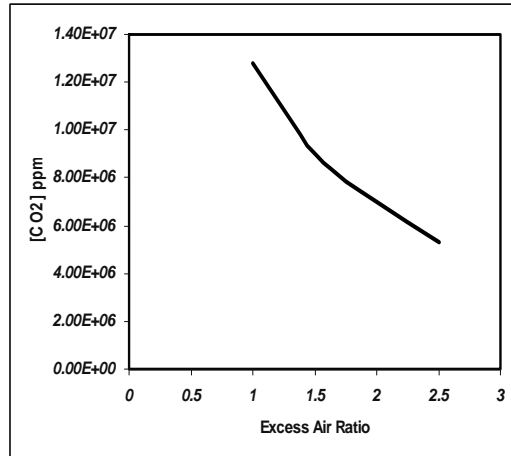
در این فاصله اثر N_۲ و O_۲ در دسترس نقش غالب را دارد، اما برای فاصله های بعدی مثلاً $1/3 < A < 1/5$ اثر کاهش دما نقش غالب را دارد و لذا میزان NO در این فاصله کاهش می یابد. همچنین با افزایش r به علل گفته شده غلظت NO کاهش می یابد (۵). نمودار CO در برابر A (نمودار ۷)

۳ نتایج ارایه شده است. همچنین مقدار SO_2 نیز محاسبه شده و با مقدار واقعی مقایسه شده است.

نتایج حاصل از اجرای مدل با مقادیر CO و NO در خروجی دودکش نیروگاه حرارتی تبریز با شرایط کارکرد $r=1/15$ و $t_f = 300^\circ C$ و $t_a = 300^\circ C$ مقایسه شده و تطابق بسیار خوبی بین مقادیر تجربی و نتایج مدل به دست آمده است که در جدول



نمودار ۷- تغییرات غلظت CO بر حسب A



نمودار ۸- تغییرات غلظت CO_2 بر حسب A

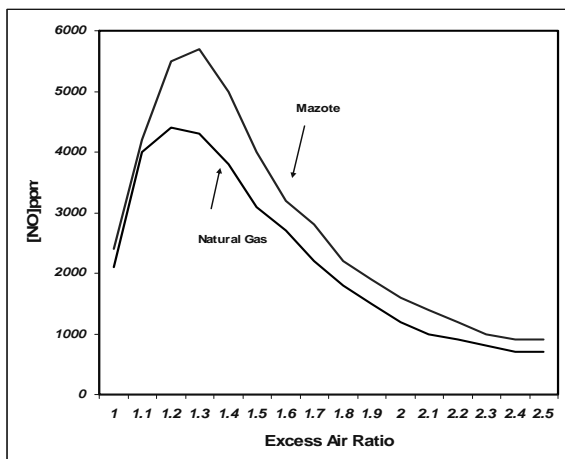
جدول (۳)- مقایسه نتایج مدل با مقادیر تجربی

$SO_2(kg/h)$	$CO(ppm)$	$NO(kg/h)$	نتایج
۳۳۱۸	۸	۲۴۷/۷	مقدار پیش بینی شده توسط مدل
۳۴۲۰	ناچیز	۲۶۲/۳۵	مقدار اندازه گیری شده
۳	ناچیز	۵/۸۲	درصد خطا

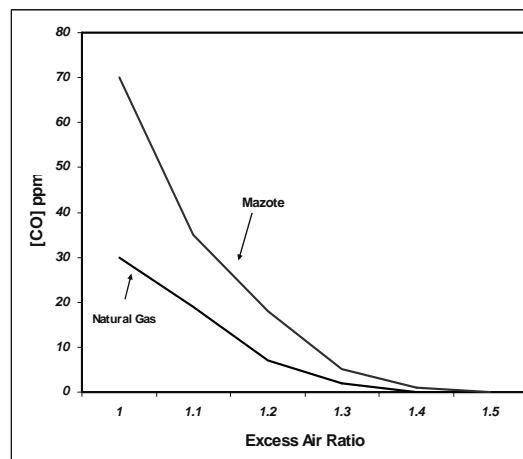
متان (CH_4) که سرمنشا تمامی فواید آن است. پیش بینی می شود که در این مورد نیز مدل جواب های نسبتا دقیقی به ما بدهد. به هر حال کاهش مقدار آلاینده ها نوید بخش این مطلب است که بتوان با گاز سوز کردن نیروگاه ها علاوه بر سود اقتصادی ناشی از ارزان بودن گاز طبیعی، میزان آلاینده ها را تا سطح رسیدن به استانداردهای جهانی کاهش داد.

ارایه نتایج برای گاز طبیعی

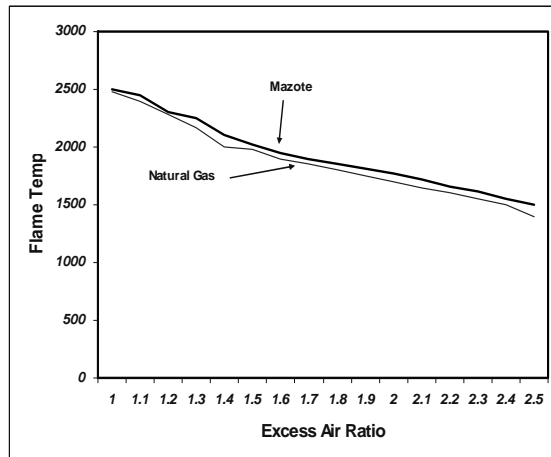
در نمودارهای ۹ تا ۱۱ نتایج غلظت آلاینده ها برای گاز طبیعی CH_4 و مازوت رسم شده است. همچنین نمودار تغییرات دمای شعله با A (نمودار ۱۲) نیز رسم شده است. مقادیر غلظت ها که برای گاز طبیعی رسم شده اند، نشان می دهند که مقدار آلاینده ها در همه حالات نسبت به مازوت کاهش می یابد. دلیل اصلی این امر کاهش دمای آدیاباتیک شعله گاز طبیعی است و نیز فرمول ساده شیمیایی



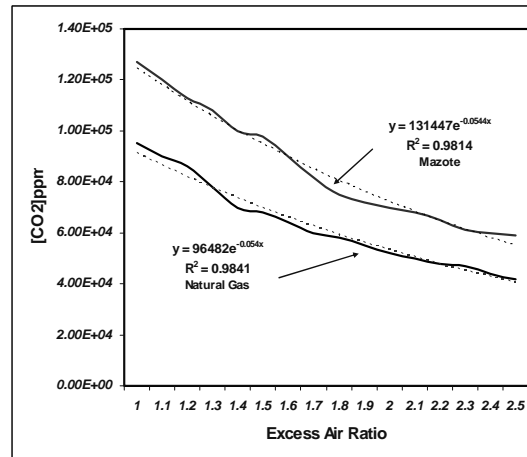
نمودار ۹- تغییرات غلظت NO بر حسب A برای مازوت و گاز نمودار



نمودار ۱۰- تغییرات غلظت CO بر حسب A برای مازوت و گاز



نمودار ۱۱- تغییرات غلظت CO₂ بر حسب A برای مازوت و گاز



نمودار ۱۲- تغییرات دمای شعله بر حسب ضریب هوای اضافی برای مازوت و گاز طبیعی

نتیجه گیری کلی

در این تحقیق سعی شده است که مدلی برای پیش بینی آلایندگی های حاصل از احتراق نفت کوره و گاز طبیعی در یک بویلر نیروگاهی بر پایه میزان اکسید نیتروژن ایجاد تولید شد که ارایه شود. مقایسه نتایج حاصل از این مدل با نتایج اندازه گیری شده در بویلر نیروگاه تبریز برای سوخت نفت کوره صحت و دقت قابل قبول این مدل را تایید می کند.

منابع

- Janes M. Ber, «Low NO_x Burners for Boilers, Furnaces and Gas Turbines», combustion science and technology.
- Berettam N. Mancinic, «The influence of the Temperature Fluctuations Variance ang No Prediction for a Gas Flame», combustion science and technology.
- «the study on Evaluation of Environmental Impact of Tabriz Thermal Power Plants» Tokyo ELECTRICS, power environmental, 1999.

- L.A. Richter, (1984), «Thermal Power Plants and Environmental Controls» Mir Publisher,.
- Robert Jennings Heinson, Robert Lynn kabel, (1999) «Sources and Control of Air Pollution», Prentice Hall,.