

مطالعه نحوه تولید CO و CO₂ در شعله متان-هیدروژن تحت شرایط MILD

امیر مردانی^{1*}، صادق تابع جماعت²

تهران - خیابان حافظ - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - دانشکده هوافضا

(* نویسنده مخاطب: Amir_Mardani@aut.ac.ir)

چکیده

احتراق تحت شرایط رقیق سازی زیاد و دمای پیش گرم بالا (MILD) دارای ویژگیهایی است که آنرا از سایر سیستمهای احتراقی متمایز می کند. کاهش چشمگیر اکسیژن در منطقه واکنش در مقایسه با احتراق عادی موجب می شود که مقیاس زمانی جریان و انجام واکنشها به یکدیگر نزدیک شود. جهت مطالعه این رژیم احتراقی شعله متقارن محوری مخلوط CH₄+H₂ که احتراق MILD را در شرایط کنترل شدهای ایجاد می نماید، مبنای مدلسازی قرار گرفته است. در مدلسازی صورت گرفته از معادلات RANS و مدل توربولانسی $k - \epsilon$ اصلاح شده به همراه مدل EDC جهت ایجاد رابطه مناسب بین سینتیک شیمیایی و آشفتگی جریان و همچنین از مکانیزم شیمیایی کاهش یافته DRM-22 استفاده شده است. همچنین علاوه بر ابزار دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، از یک کد صفربعدی تحلیل یک WSR نیز جهت تحلیل مسیر اکسایش متان استفاده شد. با تغییر غلظت اکسیژن هوای داغ ورودی و غلظت هیدروژن موجود در سوخت، نحوه اکسایش متان و تولید CO و CO₂ در رژیم MILD در شرایط یک WSR و همچنین جریان واکنشی مطالعه شد. مقایسه نتایج مدلسازی و تجربی حکایت از رضایتبخش بودن دقت نتایج عددی دارد.

واژه‌های کلیدی: احتراق MILD- متان - پیش گرم - رقیق سازی - آلاینده‌گی

1- مقدمه

تامین و تولید انرژی همواره یکی از دغدغه‌های اصلی بشر بوده است. یکی از مهمترین منابع تولید انرژی، سوختهای فسیلی می‌باشند. تجربه جوامع بشری در چند دهه اخیر مخصوصاً بحران نفتی دهه 1970، توجه انسان را بیش از پیش به محدودیت منابع انرژی فسیلی معطوف نمود. از طرفی مباحث و مشکلات زیست محیطی ناشی از تولید انرژی از منابع فسیلی نظیر انتشار NO_x، CO₂ و همچنین پدیده گرم شدن زمین و... اهمیت دستیابی به فرآیندهای بهینه‌تر در احتراق را، که یکی از اساسی تری روشهای تولید انرژی است، ضروری و لازم الاجرا نموده است. وینبرگ [1] در سال 1971، پایه و اساس احتراق با آنتالپی بالا را مطرح نمود. هدف این تئوری، ایجاد توانایی استحصال انرژی، از سوختهای با ارزش حرارتی پایین بود. بدین صورت که اگر مواد واکنش دهنده، قبل از واکنش گرم شوند، در نتیجه محدوده اشتعال پذیری آنها افزوده خواهد شد و لذا مخلوطهای رقیق و سوخت‌های دارای ارزش حرارتی کم، قابلیت سوختن پیدا خواهند کرد. ایشان اظهار داشتند که برای تامین انرژی اولیه جهت گرم کردن مواد اولیه، نیاز به سایر منابع انرژی نیست و این انرژی را می‌توان از گازهای حاصل از احتراق بصورت مستقیم و یا غیر مستقیم تامین نمود. بدین ترتیب از اتلاف انرژی گازهای حاصل از احتراق جلوگیری شده و با افزایش راندمان سیستم تولید انرژی، صرفه جویی سوخت را نیز، به دنبال خواهد داشت.

1- دکتر هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده هوافضا

2- دانشیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده هوافضا

FCCI2012-1011

در دهه هفتاد، استفاده از سیستمهای بازیاب حرارت فلزی (رکوپراتور) بصورت صنعتی در دنیا رواج یافت. به منظور بازیابی بیشتر انرژی، مبحث مشعلهای دارای مبدلهای سرامیکی در اوایل دهه هشتاد مورد توجه قرار گرفت. هرچند در دهه هفتاد و هشتاد تحقیقات موثری در زمینه سیستمهای بازیاب انجام شد ولی تحقیقات بیشتر در دهه نود در ژاپن و کمپانی NFK دنبال شد و مشعل صنعتی HiTAC¹ با مبدلهای سرامیکی ساخته و تست گردید. بصورت موازی با تلاشهای صورت گرفته در ژاپن، در برخی کشورهای دیگر نیز تحقیقاتی در این زمینه انجام شد و اولین مشعلهای بدون شعله در آلمان در سال 1991 تا 1992 طراحی و ساخته شدند.

تکنولوژی احتراق در هوای با درجه حرارت بالا (HiTAC) از مبانی ذکر شده یعنی پیش گرم زیاد هوای ورودی به محفظه و رقیق سازی گسترده استفاده می کند و در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته و تحقیقات متعددی که روی آن صورت پذیرفته است، که مزایا و ویژگیهای این رژیم احتراقی را بیشتر روشن نموده است.

محققان متعددی نظیر (گوپتا و همکارانش [5,4,3,2])، بولتز و همکارش [6]، ایتوو همکارش [7]، تسوجی و همکارانش [8] و مورتریگ و همکارانش [9]) بصورت جداگانه گزارش کرده اند که یکی از اصلی ترین ویژگیهای HiTAC، افزایش حجم شعله و یکنواختی میدان دمایی در محفظه احتراق می باشد. گوپتا [9,7] و گروه مورتریگ [10] گزارش کرده اند که با افزایش دمای پیش گرم و کاهش درصد اکسیژن، اندازه و حجم شعله افزایش می یابد و همچنین به علت یکنواختی بسیار بالای دما در محفظه احتراق، می توان عنوان راکتور همدما را به کوره HiTAC اطلاق نمود. گزارشهای تسوجی [8] و هاسگاوا و گروهش [11] نشان داده است که تحت شرایط HiTAC می توان تولید آلاینده ها را تا 50%، حجم محفظه احتراق را تا 25% و مصرف سوخت را تا 30% کاهش داد. همچنین گوپتا و همکارانش [3,4] نشان داده اند که تحت شرایط خاص، اکسیداسیون سوخت بدون شعله مرئی انجام می شود. از این جهت به این نوع احتراق، احتراق بدون شعله (FLOX) نیز گفته می شود. وونینگ [12] نیز گزارش نموده است که در رژیم احتراقی جدید، صدای شعله نیز کاهش می یابد.

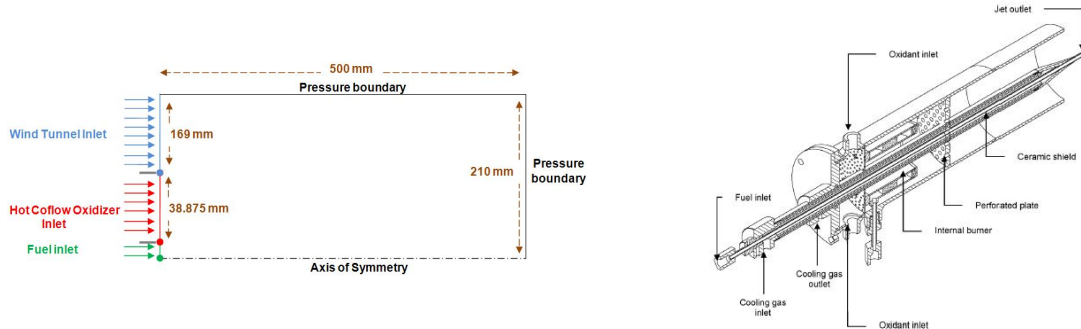
اما در این جا باید به این مطلب اشاره نمود که دقیقاً پیش گرم کردن و رقیق سازی به چه محدوده ای اطلاق می گردد. آنچه از آن به عنوان پدیده ای نو در احتراق یاد می شود، در عمل به معنای پیش گرم کردن تا دمای بالاتر از 900 درجه سانتی گراد و رقیق سازی جهت رسیدن به غلظت اکسیژن در حدود زیر 5% می باشد، و از آن به عنوان احتراق در درجه حرارت بالا یاد می شود. اما تعریف دقیق علمی آن عبارت است از "پیش گرم کردن مخلوط قابل اشتعال و یا هوای احتراق تا دمای بالاتر از حد خود اشتعالی و رقیق سازی اکسیژن تا حدودی که اختلاف دمای بیشینه شعله و دمای مخلوط اولیه (بعد از پیش گرم) کمتر از دمای خوداشتعالی به درجه کلون باشد" [13]. احتراقهایی تحت عنوان HiTAC, MILD, HiCOT و یا بدون شعله (FLOX or Flameless) فارغ از این مسئله که مکانیزم احتراقی آنها پیش مخلوط و یا دیفیوژن باشد، جزء مصادیق اصلی تعریف یاد شده می باشند. البته در برخی از تعاریف [8] به کمتر بودن افزایش دمای مخلوط محترق شده تا حد کمتر از دمای خوداشتعالی بصورت صریح اشاره نشده است ولی در عمل نتایج آنها متضمن این ویژگی می باشد.

آلاینده های تولید شده توسط فرآیند احتراق عمدتاً شامل CO₂ که موجب به وجود آمدن اثرات گلخانه ای و گرم شدن زمین می شود، دوده، هیدروکربنهای نسوخته (UHC) و NO_x که موجب تغییرات آب و هوایی در ارتفاعات، بارانهای اسیدی، دود فتوشیمیایی و تخریب لایه ازن می شوند، می باشند. یکی از ویژگیهای اصلی رژیم احتراقی HiTAC کاهش این آلاینده ها می باشد. مرور تحقیقات انجام شده نشان میدهند که نحوه تولید آلاینده ها در رژیم احتراقی MILD نیازمند مطالعه و بررسی بیشتری می باشد لذا در تحقیق جاری، که در ادامه تحقیقات نویسندگان در زمینه احتراق MILD می باشد [16, 15, 14]، نحوه تولید CO₂ و CO در رژیم احتراقی MILD و در شرایط غلظت اکسیژن مختلف برای سوخت متان و ترکیب متان- هیدروژن توسط مدلسازی صفر بعدی یک well-stirred reactor (WSR) و همچنین مدل جریان واکنشی مطالعه شده است.

¹ High Temperature Air Combustion

2- مدل سازی

جهت مطالعه رژیم احتراق مایلد مشعل متقارن محوری (JHC) گروه دالی [۱۷] مدنظر قرار گرفت. مشعل مذکور، که در شکل 1 نشان داده شده است، در یک تونل باد با سرعت هوای 3/2 متر بر ثانیه به گونه‌ای که محور مشعل موازی جریان تونل باشد، قرار گرفته است. جت سوخت شامل مخلوط متان و هیدروژن با رینولدز 10000 از نازل خارج می‌گردد در حالیکه هوای اطراف احاطه کننده آن دارای دمای 1300 کلوین و نسبت جرمی اکسیژن 3 و یا 9 درصد می‌باشد. اطلاعات مدل در مرجع ذکر شده قابل دسترس می‌باشد.



شکل 2- مدل هندسی بکار رفته در محاسبات CFD (شکل مقیاس نشده است)

شکل 1- مشعل مدل سازی شده، [17].

در مطالعه عددی صورت گرفته از محاسبات دینامیک سیالات محاسباتی و همچنین یک کد صفر بعدی تحلیل یک well-stirred reactor (WSR) استفاده شده است. در بخش دینامیک سیالات محاسباتی معادلات متوسط گیری شده متقارن محوری نوپراستوکس، بقای اجزاء شیمیایی و معادلات تصحیح شده $k - \epsilon$ توسط الگوریتم سیمپل پاتانکار در یک شبکه هم مکان با 39000 سلول حل می‌شوند، (شکل 2). در مدل تصحیح شده $k - \epsilon$ با توجه به نتایج کریستو [۱۸]، ضریب c_{e1} آن در معادله استهلاک انرژی توربولانس از 1/44 به 1/6 تغییر یافته است. شکل 2 مدل بکار رفته در مدل سازی عددی را نشان داده است.

با توجه به ویژگیهای احتراق مایلد نظیر پایین بودن نرخ واکنش و هم ارزی مقیاس زمانی احتراق و آشفستگی [۱۹]، از مدل احتراقی (EDC) Eddy Dissipation Concept جهت ایجاد ارتباط بین آشفستگی و شدت واکنشهای شیمیایی، استفاده شده است. مدل احتراقی EDC، توسعه یافته مدل ED و با امکان در نظر گرفتن مکانیزم شیمیایی کامل در جریان آشفته می‌باشد [۲۰]. این مدل میدان حل را بصورت نواحی با ابعاد $\zeta = c_{\zeta} \left(\frac{v\epsilon}{k^2} \right)^{3/4}$ که در واقع هر ناحیه بصورت یک محفظه با فشار ثابت می‌باشد و مواد در داخل این ناحیه در طی مدت زمان $\tau = c_{\tau} \left(\frac{v}{\epsilon} \right)^{1/2}$ و تحت فرآیند نرخ محدود و مطابق قانون آرنیوس واکنش می‌دهند، در نظر می‌گیرد. در این روابط v ویسکوزیته سینماتیکی، ϵ نرخ استهلاک انرژی توربولانس، k انرژی توربولانس، c_{ζ} ضریب نسبت حجمی برابر با 2/1377، c_{τ} ثابت زمانی برابر با 0/4082 می‌باشند.

نتایج تحقیق کریستو [18] حاکی از آن است که تشعشع حرارتی در مشعل JHC، اثر قابل توجهی در نتایج مدل سازی ندارد، لذا با توجه به هزینه سنگین محاسبات انتقال حرارت تشعشعی از آن در تحقیق جاری صرف نظر شده است.

مکانیزم شیمیایی اصلی بکار رفته در تحقیق جاری مکانیزم کاهش یافته DRM22 [۲۱] می‌باشد. مکانیزم DRM22 مکانیزمهای کاهش یافته GRI.Mech 1.2 با به ترتیب 22 گونه شیمیایی و 104 واکنش رفت و برگشت می‌باشند. سایر گزارشهای منتشر شده نویسندگان نیز عملکرد مناسب مکانیزم DRM22 در مدل سازی مشعل JHC را نشان داده اند، [16.15.14].

FCCI2012-1011

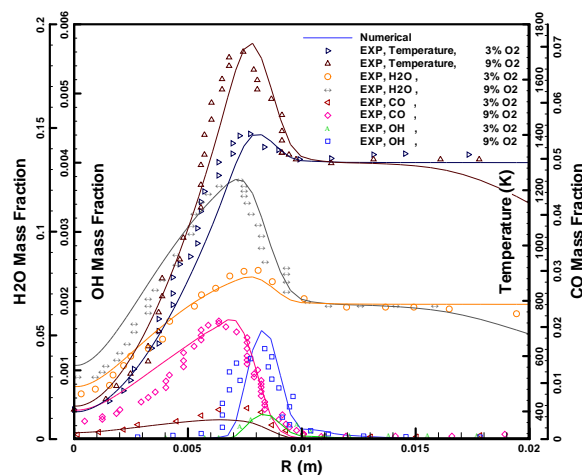
در تحلیل صفربعدی مربوط به WSR نیز به وسیله نرم افزار کمکین [۲۲] به حل معادلات بقای جرم در یک محفظه احتراق مطابق روابط نرخ آرنیوس در طی زمان اقامت 0/1 ثانیه و دمای ثابت 1345 کلوین پرداخته شده است. تستهای عددی انجام شده در تحقیق جاری در جدول 1 ارائه شده است.

جدول 1- لیست آزمایشهای عددی انجام شده (نسبتها جرمی است)

No.	Fuel composition	Hot oxidizer Composition	CFD	WSR	Chemical Mechanism
1	20% H ₂ +80% CH ₄	9% O ₂ +6.5% H ₂ O+5.5% CO ₂ +79% N ₂	*		DRM-22
2	20% H ₂ +80% CH ₄	3% O ₂ +6.5% H ₂ O+5.5% CO ₂ +85% N ₂	*		DRM-22
3	20% H ₂ +80% CH ₄	9% O ₂ +6.5% H ₂ O+5.5% CO ₂ +79% N ₂		*	DRM-22
4	20% H ₂ +80% CH ₄	3% O ₂ +6.5% H ₂ O+5.5% CO ₂ +85% N ₂		*	DRM-22
5	100% CH ₄	23% O ₂ +77% N ₂		*	DRM-22
6	100% CH ₄	9% O ₂ +91% N ₂		*	DRM-22
7	100% CH ₄	3% O ₂ +97% N ₂		*	DRM-22
8	20% H ₂ +80% CH ₄	23% O ₂ +77% N ₂		*	DRM-22
9	20% H ₂ +80% CH ₄	9% O ₂ +91% N ₂		*	DRM-22
10	20% H ₂ +80% CH ₄	3% O ₂ +97% N ₂		*	DRM-22

3- نتایج

جهت بررسی نحوه تولید آلاینده هایی نظیر CO و CO₂ توجه به مسیر انجام واکنشها می تواند راهگشا باشد. لذا جهت درک بهتر آنچه که در رژیم احتراقی MILD اتفاق می افتد در گام اول به استخراج مسیر واکنشهای متان پرداخته می شود. در تحقیقات متعدد نشان داده شده است که مکانیزم شیمیایی DRM-22 مکانیزم کاهش یافته مناسبی است که دقت نتایج حاصل از کاربرد آن با مکانیزم کامل GRI2.11 برابری می نماید، [14, 15, 16, 23]. لذا با توجه به کمتر بودن تعداد واکنشهای آن و هزینه محاسباتی کمتر آن در مقایسه با مکانیزم GRI2.11، این مکانیزم مبنای تحلیل در این بخش قرار گرفته است. همچنین جهت اطمینان از صحت مدل سازی صورت گرفته، در شکل 3 توزیع شعاعی دما و گونه های CO، OH و H₂O برای دو اکسیدکننده دارای غلظت 3 و 9 درصد اکسیژن در فاصله 30 میلی متری دهانه نازل مشعل JHC برای نتایج عددی کار حاضر و اندازه گیریهای تجربی گروه دالی [17] مقایسه شده اند. همانطور که مشاهده می شود انطباق نتایج عددی و تجربی قابل قبول می باشند.



شکل 3- مقایسه نتایج تجربی و عددی برای مشعل JHC در فاصله 30 میلیمتری دهانه نازل

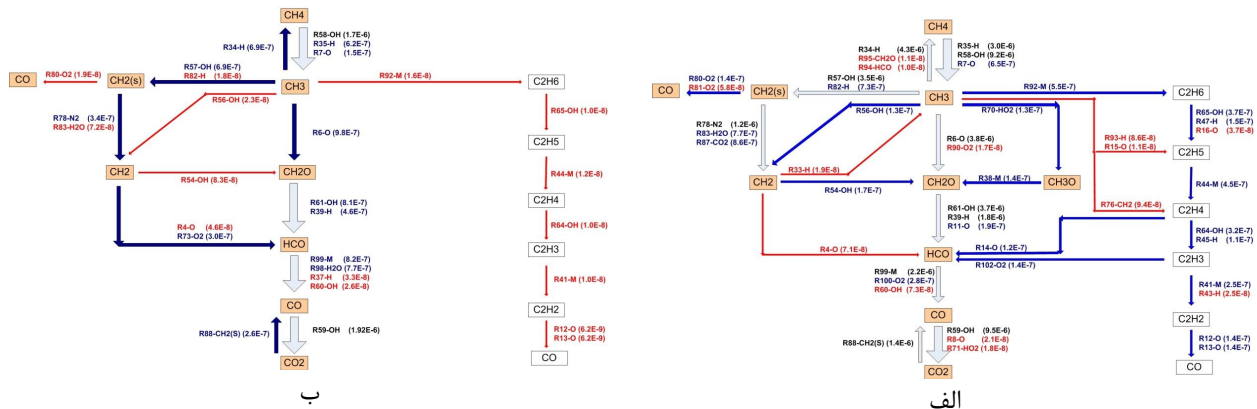
3-1- مکانیزم اکسایش در شرایط MILD

FCCI2012-1011

مسیر واکنشهای متان در مکانیزم DRM-22 در شرایط دمایی ثابت 1345 کلوین و زمان اقامت 0/1 ثانیه و شرایط اتمسفریک، 21 درصد حجمی اکسیژن (معادل با 23 درصد جرمی) و فشار یک اتمسفر، در شکل 4-الف ارائه شده است. شرایط مورد استفاده در استخراج این دیگرام با توجه به شرایط احتراق MILD انتخاب شده است. همچنین شماره واکنشها مطابق جدول 2 می باشد.

جدول 2- مکانیزم شیمیایی DRM-22 [21]

Reaction No.	Reaction	Reaction No.	Reaction	Reaction No.	Reaction
1	O+H+M<=>OH+M	36	H+HCO(+M)<=>CH2O(+M)	71	HO2+CO<=>OH+CO2
2	O+H2<=>H+OH	37	H+HCO<=>H2+CO	72	HO2+CH2O<=>HCO+H2O2
3	O+HO2<=>OH+O2	38	H+CH2O(+M)<=>CH3O(+M)	73	CH2+O2<=>OH+HCO
4	O+CH2<=>H+HCO	39	H+CH2O<=>HCO+H2	74	CH2+H2<=>H+CH3
5	O+CH2(S)<=>H+HCO	40	H+CH3O<=>OH+CH3	75	2CH2<=>H2+C2H2
6	O+CH3<=>H+CH2O	41	H+C2H2(+M)<=>C2H3(+M)	76	CH2+CH3<=>H+C2H4
7	O+CH4<=>OH+CH3	42	H+C2H3(+M)<=>C2H4(+M)	77	CH2+CH4<=>2CH3
8	O+CO+M<=>CO2+M	43	H+C2H3<=>H2+C2H2	78	CH2(S)+N2<=>CH2+N2
9	O+HCO<=>OH+CO	44	H+C2H4(+M)<=>C2H5(+M)	79	CH2(S)+AR<=>CH2+AR
10	O+HCO<=>H+CO2	45	H+C2H4<=>C2H3+H2	80	CH2(S)+O2<=>H+OH+CO
11	O+CH2O<=>OH+HCO	46	H+C2H5(+M)<=>C2H6(+M)	81	CH2(S)+O2<=>CO+H2O
12	O+C2H2<=>CH2(S)+CO	47	H+C2H6<=>C2H5+H2	82	CH2(S)+H2<=>CH3+H
13	O+C2H2<=>CO+CH2	48	H2+CO(+M)<=>CH2O(+M)	83	CH2(S)+H2O<=>CH2+H2O
14	O+C2H4<=>CH3+HCO	49	OH+H2<=>H+H2O	84	CH2(S)+CH3<=>H+C2H4
15	O+C2H5<=>CH3+CH2O	50	2OH(+M)<=>H2O2(+M)	85	CH2(S)+CH4<=>2CH3
16	O+C2H6<=>OH+C2H5	51	2OH<=>O+H2O	86	CH2(S)+CO<=>CH2+CO
17	O2+CO<=>O+CO2	52	OH+HO2<=>O2+H2O	87	CH2(S)+CO2<=>CH2+CO2
18	O2+CH2O<=>HO2+HCO	53	OH+H2O2<=>HO2+H2O	88	CH2(S)+CO2<=>CO+CH2O
19	H+O2+M<=>HO2+M	54	OH+CH2<=>H+CH2O	89	CH3+O2<=>O+CH3O
20	H+2O2<=>HO2+O2	55	OH+CH2(S)<=>H+CH2O	90	CH3+O2<=>OH+CH2O
21	H+O2+H2O<=>HO2+H2O	56	OH+CH3<=>CH2+H2O	91	CH3+H2O2<=>HO2+CH4
22	H+O2+N2<=>HO2+N2	57	OH+CH3<=>CH2(S)+H2O	92	2CH3(+M)<=>C2H6(+M)
23	H+O2+AR<=>HO2+AR	58	OH+CH4<=>CH3+H2O	93	2CH3<=>H+C2H5
24	H+O2<=>O+OH	59	OH+CO<=>H+CO2	94	CH3+HCO<=>CH4+CO
25	2H+M<=>H2+M	60	OH+HCO<=>H2O+CO	95	CH3+CH2O<=>HCO+CH4
26	2H+H2<=>2H2	61	OH+CH2O<=>HCO+H2O	96	CH3+C2H4<=>C2H3+CH4
27	2H+H2O<=>H2+H2O	62	OH+C2H2<=>CH3+CO	97	CH3+C2H6<=>C2H5+CH4
28	2H+CO2<=>H2+CO2	63	OH+C2H3<=>H2O+C2H2	98	HCO+H2O<=>H+CO+H2O
29	H+OH+M<=>H2O+M	64	OH+C2H4<=>C2H3+H2O	99	HCO+M<=>H+CO+M
30	H+HO2<=>O2+H2	65	OH+C2H6<=>C2H5+H2O	100	HCO+O2<=>HO2+CO
31	H+HO2<=>2OH	66	2HO2<=>O2+H2O2	101	CH3O+O2<=>HO2+CH2O
32	H+H2O2<=>HO2+H2	67	2HO2<=>O2+H2O2	102	C2H3+O2<=>HCO+CH2O
33	H+CH2(+M)<=>CH3(+M)	68	HO2+CH2<=>OH+CH2O	103	C2H4(+M)<=>H2+C2H2(+M)
34	H+CH3(+M)<=>CH4(+M)	69	HO2+CH3<=>O2+CH4	104	C2H5+O2<=>HO2+C2H4
35	H+CH4<=>CH3+H2	70	HO2+CH3<=>OH+CH3O		



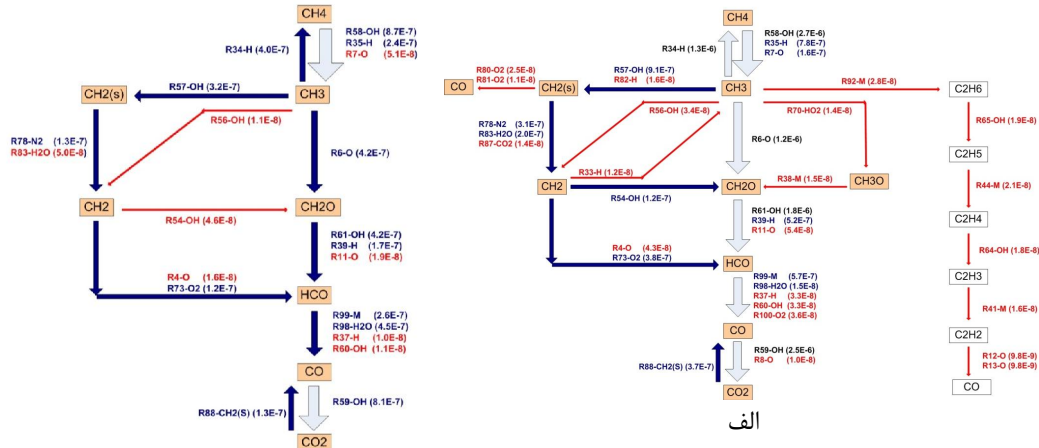
شکل 4- مسیر واکنشهای اکسایش مخلوط استوکیومتری متان با اکسیدکننده شامل الف) $23\% \text{O}_2 + 77\% \text{N}_2$ ب) $9\% \text{O}_2 + 91\% \text{N}_2$ (درصد جرمی)، در یک WSR در شرایط دمایی 1345 کلوین و فشار اتمسفریک و زمان اقامت 0/1 ثانیه. شماره واکنشها مطابق واکنشهای مکانیزم DRM-22 می باشند. گونه های درج شده در کنار شماره واکنش ها، نشان دهنده گونه واکنش دهنده و اعداد داخل پرانتز نرخ واکنش مربوطه بر مبنای $\text{gmole/cm}^3 \cdot \text{s}$ می باشند.

مشابه بودن شرایط رژیم احتراقی MILD با WSR در بخشهای قبل مورد اشاره قرار گرفت که همین امر استفاده از مدل احتراقی EDC را توجیه پذیرتر می نمود. همچنین در مشعل دالی شرایط فشار اتمسفریک و دمای پیش گرم 1300 کلوین حاکم می باشد. جهت استخراج مسیر واکنش متان در مکانیزم DRM-22 از نرم افزار Chemkin 4.11 [22] برای محاسبه شدت واکنشها در شرایط WSR استفاده شده است. روش این فرآیند بدین صورت بوده است که شدت کلی واکنشها از نرم افزار استخراج و سپس واکنشها بر مبنای شدت آنها از بزرگ به کوچک مرتب شده اند. با در نظر گرفتن واکنشهایی که شدت آنها از یک حدی (در دیاگرام شکل 4 از حد $1.0E-9 \text{ mole.cm}^{-3}\text{-s}$ استفاده شده است.) بزرگترند، مسیر انجام واکنشهای شامل اتم کربن ترسیم شده اند. در ترسیم مسیرهایی که رنگ ها و ضخامت پیکانها بیانگر بزرگی مسیر باشد. علاوه بر این مقدار شدت هر واکنش و گونه واکنش دهنده نیز نشان داده شده اند. واکنشهای با شدت مشابه بصورت هم رنگ نمایش داده شده اند. به عنوان مثال در مسیر تبدیل CH_3 به CH_3O پیکان آبی رنگ که روی آن عبارت R70-HO2 ($1.3E-7$) نوشته شده، بدین معناست که رادیکال متیل (CH_3) با رادیکال HO_2 مطابق واکنش شماره 70 در مکانیزم DRM-22 واکنش داده و به CH_3O تبدیل می گردد که شدت کلی این واکنش $1.3E-7 \text{ gmole/cm}^3\text{-s}$ می باشد. همچنین رنگ آبی پیکان در این دیاگرام نشان می دهد که مقیاس مسیر ذکر شده در این دیاگرام در محدوده $1.0E-7 \text{ gmole/cm}^3\text{-s}$ می باشد. نکته قابل توجه این نمودار وجود مسیر شامل هیدروکربنهای سنگین دو کربنی می باشد. زنجیره احتراق اتان (C_2H_6) رادیکال متیل را به CO تبدیل می نماید در حالیکه مسیر تبدیل CH^3 به CH_2O سپس به HCO و CO و نهایتاً CO_2 اصلی ترین مسیر احتراق متان می باشد.

حال با توجه به اینکه رژیم احتراقی مورد مطالعه در این تحقیق دارای غلظتهای اکسیژن کمی می باشد، دیاگرام مسیر احتراق متان در شرایط 9 درصد جرمی اکسیژن (معادل 7/9 حجمی اکسیژن) در شکل 4-ب ارائه شده است. در استخراج این دیاگرام سایر شرایط مورد استفاده مشابه دیاگرام شکل 4-الف می باشد. در مقایسه با حالت اتمسفریک مشاهده می شود که نرخ کلی واکنشها کاهش می یابند، اما همچنان مسیر واکنشهای ناشی از اتان، هر چند با شدت کمتر، اما فعال می باشند. همچنین مسیرهای ارتباطی واکنشهای اتان با مسیر اصلی $\text{CH}_3 \rightarrow \text{CH}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO}$ و واکنشهای شامل رادیکال CH_3O تضعیف و از بین می روند. از سویی دیگر مسیر تبدیل CH_2 به CH_2O تضعیف و مسیر تبدیل CH_2 به HCO تقویت می گردد. نکته دیگر اینکه هر چند مسیرهای منتهی به تولید CO تضعیف شده اند اما مسیر اصلی تولید CO_2 که واکنش R59 می باشد، بطور نسبی کمتر تضعیف شده است. در ادامه مجدداً غلظت اکسیژن را به 3 درصد جرمی کاهش دادیم. در این شرایط کاهش شدت واکنشها کاهش چشمگیری داشت و هیچ واکنشی دارای نرخ بالاتر $1.0E-9 \text{ gmole/cm}^3\text{-s}$ نشد. لذا از رسم مسیر واکنشی آن صرف نظر نمودیم. این مطلب می تواند دلیلی بر لزوم افزودن هیدروژن به سوخت در شرایط 3 درصد اکسیژن باشد. به منظور رسیدن به شرایط مورد آزمایش در تحقیق جاری در گام بعدی در حالت 9 درصد جرمی اکسیژن، شرایط سوخت را تغییر داده و به اندازه 20 درصد جرمی هیدروژن (H_2) به سوخت اضافه نموده و مسیرهای واکنشی در شکل 5-الف نشان داده شده اند.

مشاهده می شود که نسبت به شکل 4-ب، افزودن هیدروژن موجب افزایش شدت واکنشها شده است. تفاوتی که در شرایط جدید حاصل شده است، تقویت چشمگیر مسیرهای منتهی به رادیکال CH_2O یعنی مسیرهای $\text{CH}_2 \rightarrow \text{CH}_2\text{O}$ و $\text{CH}_3 \rightarrow \text{CH}_3\text{O} \rightarrow \text{CH}_2\text{O}$ می باشد که بیانگر تقویت اشتعال پذیری و وقوع جرقه در شرایط جدید می باشد. حال در ادامه غلظت اکسیژن را در شرایطی که هیدروژن به متان افزوده شده است، به 3 درصد جرمی کاهش می دهیم. مسیر انجام واکنشها در شرایط 3 درصد اکسیژن در شکل 5-ب نشان داده شده است.

FCCI2012-1011



ب

شکل 5- مسیر واکنشهای اکسایش مخلوط استوکیومتریک $CH_4 + 20\% H_2 + 80\%$ با اکسیدکننده الف) $O_2 + 5.5\% CO_2 + 6.5\% H_2O$ و $9\% N_2 + 79\%$ ب) در یک WSR در شرایط دمایی 1345 کلین و فشار اتمسفریک و زمان اقامت 0/1 ثانیه. شماره واکنشها مطابق واکنشهای مکانیزم DRM-22 در پیوست 2 می باشند. گونه های درج شده در کنار شماره واکنش ها، نشان دهنده گونه واکنش دهنده و اعداد داخل پرانتز نرخ واکنش مربوطه بر مبنای $gmole/cm^3.s$ می باشند.

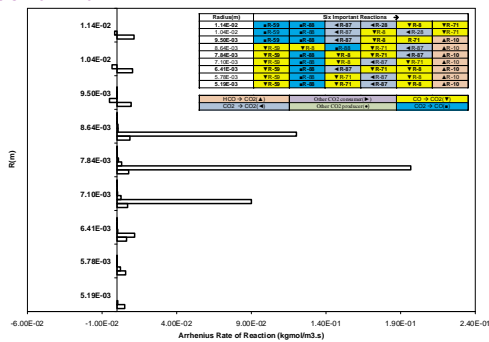
مشاهده می شود که اولاً بر خلاف حالت 3 درصد O_2 و $100\% CH_4$ این بار به لطف وجود هیدروژن شدت واکنشها قابل توجه می باشند. در این شرایط نرخ کلی واکنشها نسبت به حالت 9 درصد اکسیژن کمتر است و واکنشهای زنجیره اتان و رادیکال CH_3O ناچیز بوده و حذف می شوند. مسیر $CH_2 \rightarrow CH_2O$ تضعیف شده و مقیاس شدت اغلب واکنشها هم مقیاس و در حدود $1.7E-7 gmole/m^3.s$ خواهند شد. این مطلب بدان معناست که در شرایط جدید مسیرهای باقی مانده موثر دارای اهمیت نزدیک به هم می باشند. همچنین با توجه به تضعیف مسیرهای منتهی به تولید CO و کاهش شدت واکنش R59، که تولید کننده CO_2 می باشد، احتمالاً می بایست با کاهش اکسیژن تولید این گونه ها نیز کاهش یابند.

3-2- مطالعه مدل جریان واکنشی

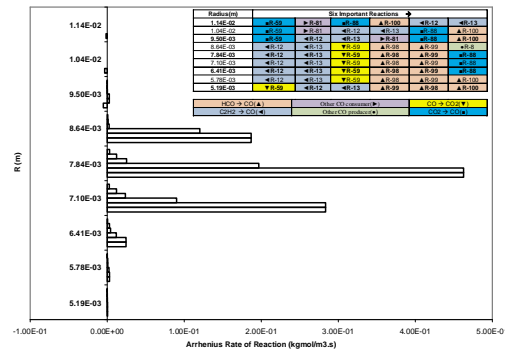
حال در ادامه به مطالعه نحوه رفتار واکنشها در فاصله 30 میلی متری از دهانه نازل مشعل JHC و در موقعیت های مکانی مختلف پرداخته شده است. و بر این مبنا سعی شده است که رفتارهای مشاهده شده در نحوه تغییرات توزیع گونه های نظیر CO و CO_2 در اثر تغییر غلظت اکسیژن ورودی توضیح داده شود. به عنوان مثال نتایج عددی و تجربی در شکل 3 نشان می دهد که غلظت CO و CO_2 با افزایش درصد اکسیژن افزایش می یابد. نتایج بدست آمده در مدلسازی عددی و مقایسه آنها با نتایج تجربی نشان داد که مدلسازی جاری در پیش بینی گونه های اصلی فرآیند احتراق نظیر H_2O ، CO، OH و عملکرد رضایتبخشی داشته است. لذا در ادامه به واکنشهای شامل این گونه ها توجه شده است.

در مکانیزم DRM-22 واکنشهای شامل گونه CO عبارتند از: R8, R10, R9, R12, R13, R17, R37, R48, R59, R60, R62, R8, R10, R17, R28, R59, R71, R71, R81, R86, R88, R94, R98, R99, R100, R87, R88. اگر در هر فاصله شعاعی از محور در فاصله 30 میلیمتری از دهانه نازل، واکنشهای حاکم بر تولید و مصرف CO و CO_2 بر مبنای قدرمطلق مقدار نرخ آزنوس واکنشها و از بزرگ به کوچک دسته بندی نماییم به جداول وشکل 6-الف و ب برای شرایط 9 درصد O_2 خواهیم رسید.

FCCI2012-1011



ب



الف

شکل 6- الف) شش واکنش دارای بزرگترین نرخ در میان واکنشهای شامل گونه CO که در هر موقعیت شعاعی از بزرگ به کوچک مرتب شده اند در فاصله 30 میلیمتری و برای حالت 9 درصد اکسیژن ب) شش واکنش دارای بزرگترین نرخ در میان واکنشهای شامل گونه CO₂ که در هر موقعیت شعاعی از بزرگ به کوچک مرتب شده اند در فاصله 30 میلیمتری و برای حالت 9 درصد اکسیژن

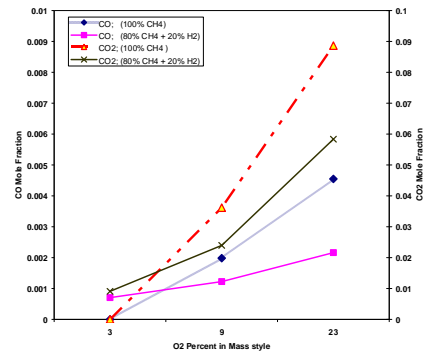
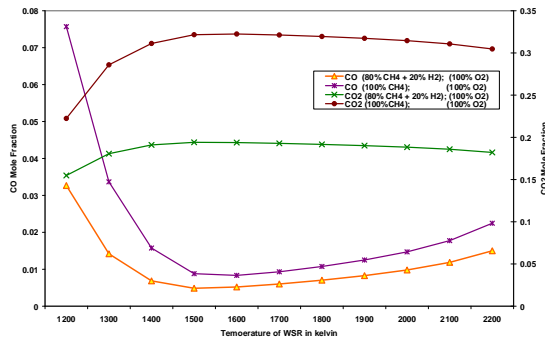
مشاهده می شود که در محدوده شعاعی که حداکثر دما رخ داده و منطقه واکنش می باشد (R=7.1-8.64 mm) مهمترین واکنشهای حاکم بر تولید و مصرف CO₂ به ترتیب عبارتند از: R59, R88, R8 و مهمترین واکنشهای حاکم بر تولید و مصرف CO به ترتیب عبارتند از: R59, R13, R12, R99, R98. درک مفهوم مرتب سازی واکنشها، با توجه به مسیر انجام واکنش متان، که قبلاً استخراج شد، بهتر قابل درک می باشند.

با توجه به پروفیل دما در فاصله 30 میلیمتری، مسیرهای حاکم بر احتراق متان را مطابق شکل 5 می توان در نظر گرفت. در جدول شکل 6 واکنشها با الهام از دسته بندی واکنشها در مسیر احتراق متان، با استفاده از رنگها دسته بندی شده اند. توجه به این دیگرام و واکنشهای حاکم بر CO بیانگر این مطلب است که واکنشهای تبدیل C₂H₂ به CO (R12, R13) که در سمت راست دیگرام مسیر احتراق متان قابل مشاهده است از واکنشهای تبدیل HCO به CO (R98, R99) و CH₂(S) به CO (R88) فعال تر به نظر می رسند. این مطلب بدین معناست که در این شرایط احتراقی و در محل مورد مطالعه تبدیل متان به اتان و واکنشهای حاکم بر احتراق اتان مهم می باشند. چنین پیش بینی را می توان با توجه همزمان به نرخ آرنیوس واکنشهای مهم حاکم بر CO و CO₂ بهتر درک نمود. مشاهده می شود که واکنش R59، در شکل 6-ب، که مهمترین واکنش در انتهای زنجیره احتراق متان و تبدیل CO به CO₂ می باشد، نرخ آرنیوس به مراتب کمتری نسبت به واکنشهای (R12, R13)، در شکل 6-الف، را دارا می باشد. توجه به واکنشهای مهم حاکم بر CO₂ نیز نشان می دهند که همانطور که دیگرام شکل 5 پیش بینی می نماید، واکنش R59 و R88 مهمترین واکنش در زنجیره تولید و مصرف CO₂ می باشد که البته R59 مهمتر است.

با تغییر درصد O₂ از 9 درصد به 3 درصد، نتایج تجربی و عددی نشان می دهند که غلظت CO و CO₂ کاهش می یابند. در نگاه اولیه کاهش غلظت CO₂ به عنوان محصول اصلی احتراق متان با توجه به کاهش اکسیژن در دسترس منطقی به نظر می رسد اما کاهش غلظت CO، با توجه به کاهش اکسیژن در دسترس، غنی شدن منطقه واکنش از سوخت و افزایش احتمال اکسیداسیون ناقص سوخت، کمی عجیب به نظر می رسد. این مطلبی است که توسط کریستو [18] نیز مورد اشاره قرار گرفته است. ایشان این پدیده را حتی در رژیم جریان آرام نیز گزارش نموده و آنرا به تغییر مسیر اکسایش CO به CO₂ مرتبط و مستلزم بررسی بیشتر نموده اند. به منظور بررسی این مطلب ابتدا به مطالعه نحوه رفتار این گونه ها در یک WSR پرداخته و سپس به مدل جریان واکنشی می پردازیم.

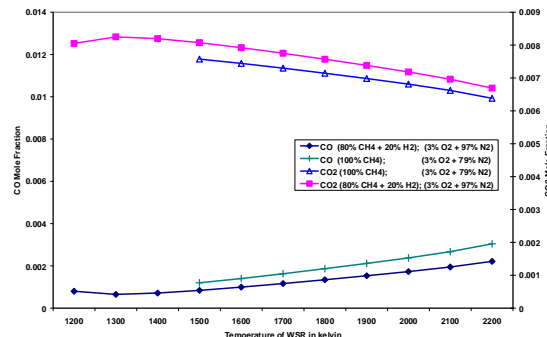
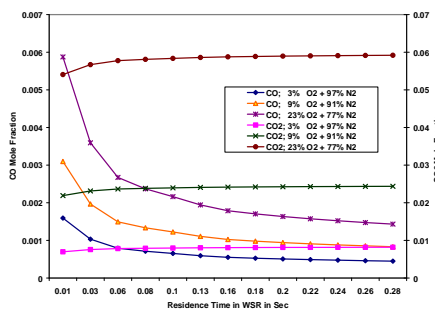
در شکل 7 تغییرات غلظت CO و CO₂ با افزایش غلظت اکسیژن در مخلوط O₂+N₂ در یک WSR با دمای 1345 کلوین و زمان اقامت 0/1 ثانیه برای دو ترکیب متفاوت سوخت در شرایط استوکیومتریک نشان داده شده است.

FCCI2012-1011



شکل 7- اثر غلظت O₂ اکسیدکننده روی تولید CO و CO₂ در یک WSR با دمای 1345 درجه کلون و زمان اقامت 0/1 ثانیه برای دو سوخت 80% CH₄ + 20% H₂ و 100% CH₄ با زمان اقامت 0/1 ثانیه برای دو سوخت 80% CH₄ + 20% H₂ و 100% CH₄ و 20% H₂ در شرایط استوکیومتریکی برای اکسیدکننده با ترکیب 100 درصد O₂+N₂ در شرایط استوکیومتریکی

مشاهده می شود که افزایش غلظت اکسیژن منجر به افزایش غلظت CO و CO₂ در هر دو ترکیب سوخت شده است هر چند که در درصدهای بالاتر اکسیژن احتراق با شدت بالاتری را متصور می شود. با توجه به اینکه دمای محفظه و زمان اقامت نیز در فرآیند واکنشهای شیمیایی موثر می باشد، اثر این پارامترها نیز در شکلهای 9.8 و 10 مطالعه شده اند.



ب

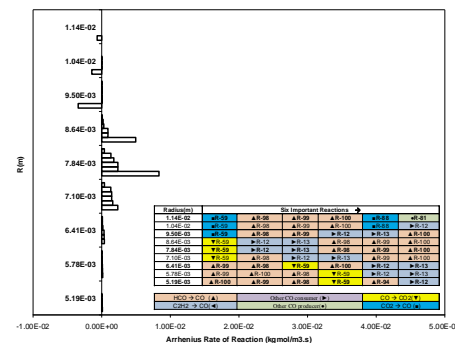
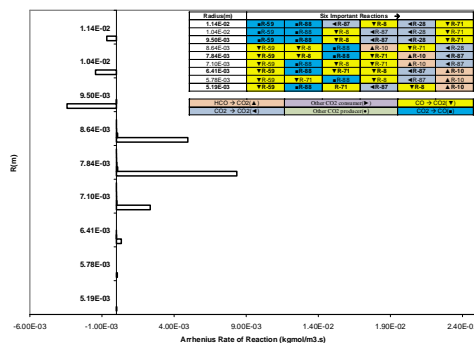
شکل 9- اثر دمای محفظه احتراق روی تولید CO و CO₂ در یک WSR با زمان اقامت 0/1 ثانیه برای دو سوخت 80% CH₄ + 20% H₂ و 100% CH₄ در شرایط استوکیومتریکی برای اکسیدکننده شامل 3 درصد جرمی O₂ و 97 درصد جرمی N₂ در شرایط استوکیومتریکی برای سه حالت اکسیدکننده حاوی 3، 9 و 23 درصد جرمی O₂

در شکل 8 اثر دمای محفظه احتراق بر تولید CO و CO₂ برای دو ترکیب سوخت در شرایط استوکیومتریکی و اکسیدکننده شامل 100 درصد O₂ نشان داده شده اند. مشاهده می شود اثر دما محفظه احتراق بر تولید این گونه ها در دمای کمتر از حدود 1500 کلون با محدوده بالاتر از دمای مذکور متفاوت است. یعنی در دماهای کمتر از 1500 کلون افزایش دمای محفظه منجر به کاهش غلظت CO و افزایش CO₂ شده است ولی اثر دمای محفظه بر تولید این گونه ها در دمای بالاتر از 1500 کلون برعکس خواهد شد. آنچه که منجر به این رفتار می گردد احتمالا واکنشهای تجزیه ای CO₂ در دماهای بالاتر از 1500 کلون می باشد. اگر مجددا همین نمودار را در غلظت بسیار کم اکسیژن 3 درصد جرمی استخراج کنیم به شکل 9 خواهیم رسید. مشاهده می شود که در غلظت های بسیار کم اکسیژن اثر دمای محفظه بر تولید گونه های CO و CO₂ تقریباً یکسان بوده و همواره با افزایش دما تولید آنها افزایش می یابد. اگر بخواهیم افزایش غلظت CO با افزایش O₂ را که در این تحقیق و تحقیق کریستو و دالی [18,17] مشاهده شده است، با توجه به اطلاعات تحلیل WSR توضیح دهیم می توان به این جمع بندی

FCCI2012-1011

دست یافت که افزایش درصد اکسیژن مترادف با بالا رفتن دمای WSR می‌باشد. از آنجاییکه مشاهده شد تغییرات تولید CO و CO₂ با تغییرات دمای محفظه برای مخلوطهای با غلظت متفاوت اکسیژن در محدوده دمایی کمتر از 1500 کلوین با محدوده دمایی بالاتر از آن متفاوت می‌باشد. لذا در محدوده دمایی که احتراق MILD تحقیق جاری اتفاق می‌افتد، افزایش تولید CO با افزایش غلظت O₂ قابل درک می‌گردد. از سویی دیگر اثر زمان اقامت در تولید CO و CO₂ در WSR با دمای 1345 کلوین برای ترکیب سوخت حاوی 80 درصد جرمی متان و 20 درصد جرمی هیدروژن در سه شرایط 23 و 9 و 3 درصد جرمی اکسیژن در شکل 10 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تغییرات CO با زمان اقامت به مراتب بیشتر از CO₂ می‌باشد و با افزایش زمان اقامت غلظت CO کاهش و غلظت CO₂ افزایش می‌یابد. همچنین در غلظت های بالاتر اکسیژن این حساسیت بیشتر می‌باشد. این مطلب بدان معناست که دینامیک جریان نظیر سرعت و اغتشاشات میدان جریان، با توجه به اثری که در زمان اقامت دارند، در شرایط اکسیژن بالاتر اثر به مراتب بالاتری نسبت به حالت های فوق رقیق، نظیر شرایط 3 درصد اکسیژن، دارند. به عبارت دیگر بخشی از افزایش غلظت CO با افزایش اکسیژن هوای ورودی در شعله دالی، در حالیکه سایر پارامترهای میدان ثابت هستند، را می‌توان به عدم تامین زمان اقامت کافی در WSR های محلی (با توجه به فرض مشابه بودن شرایط WSR و احتراق MILD) نسبت داد.

از دیدگاه مدل جریان واکنشی بررسی افزایش غلظت CO با افزایش درصد اکسیژن، با رجوع به واکنشهای مهم حاکم بر CO و CO₂ در حالت 3% O₂ (شکل 11) و مقایسه شکل 5-الف و ب پیگیری خواهد شد.



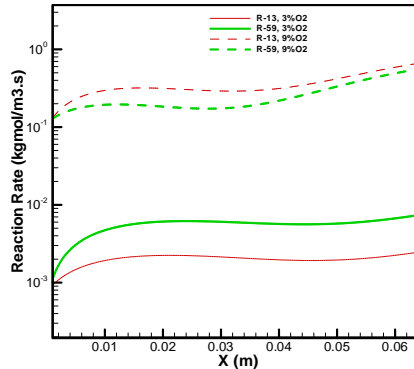
ب

الف

شکل 11- الف: توزیع شعاعی واکنشهای مهم شامل گونه CO در فاصله 30 میلیمتری و برای حالت 3 درصد اکسیژن ب: توزیع شعاعی واکنشهای مهم شامل گونه CO₂ در فاصله 30 میلیمتری و برای حالت 3 درصد اکسیژن مشاهده می‌شود که در حالت 3 درصد اکسیژن، واکنش R59 که تولید کننده CO₂ و مصرف کننده عمده CO می‌باشد از واکنشهای زنجیره اتان (R12, R13) که تولید کننده CO می‌باشند، نرخ بالاتری داشته و مهمتر می‌باشد. از سویی دیگر شکل 6 و نمودار مسیر انجام واکنش در حالت 9 درصد اکسیژن، شکل 5-الف، نشان می‌دهد که واکنشهای R12 و R13 دارای شدت بالاتری نسبت به واکنش R59 می‌باشند. یعنی به عبارت بهتر آنچه که موجب عکس العمل پروفیل‌های توزیع CO و CO₂ نسبت به اثر تغییر درصد اکسیژن ورودی می‌گردد، نسبت واکنشهای R59 و R12-13 می‌باشد و افزایش شدت واکنشهای مربوط به هیدروکربنهای دوکربنی موجب افزایش تولید CO در شرایط 9% اکسیژن نسبت به حالت 3% شده است. اگر در راستای خطی که از میان ناحیه واکنشی (در امتداد جت)، مقایسه شدت دو واکنش R59 و R13 را در دو حالت 3 و 9 درصد اکسیژن انجام دهیم به شکل 12 خواهیم رسید. این شکل نشان می‌دهد که در تمام ناحیه ای که به عنوان ناحیه MILD در نظر گرفته شده است، نسبت شدت واکنشهای R59 و R13 با تغییر درصد اکسیژن تغییر خواهد کرد و رفتار یگانه ای از خود نشان می‌دهند. نکته دیگری که از توجه به دیگر نمودار شکل 6 و شکل 11 نتیجه می‌شود این مطلب است که با کاهش درصد O₂ واکنش R88، به عنوان تولید کننده CO، محدود شده و همچنین شاید این مطلب را بتوان به کاهش تولید CH₂(S) (از CH₃) که نقش اساسی در تبدیل مجدد CO₂ به CO طی واکنش R88 دارد، مربوط نمود. همچنین کاهش رادیکال O، با کاهش

FCCI2012-1011

غلظت O_2 ورودی، که نقشی اساسی در واکنشهای R12 و R13 دارد، منجر به کاهش نرخ این واکنشها می گردد. توجه به توزیع رادیکال O، OH و H در دو حالت 3 و 9 درصد O_2 حاکی از کاهش این رادیکالها با کاهش اکسیژن می باشد.



شکل 12- مقایسه نرخ واکنشهای R13 و R59 در راستای خط عبوری از محل حداکثر نسبت جرمی در ناحیه واکنش Mild برای دو حالت 3 و 9 درصد O_2

9- نتیجه گیری

در تحقیق جاری به بررسی و مطالعه رژیم احتراقی MILD به وسیله مدلسازی عددی پرداخته و نحوه اکسایش سوخت متان-هیدروژن به مونواکسیدکربن و دی اکسیدکربن مطالعه شده است. در این مطالعه شعله جت متقارن محوری مخلوط متان-هوا احاطه شده توسط هوای داغ دارای 3 تا 9 درصد جرمی اکسیژن بصورت دوبعدی-متقارن محوری و همچنین بصورت صفربعدی مدلسازی گردیده است. این مشعل توسط گروه دالی مورد آزمایش قرار گرفته و اطلاعات دقیقی از آن منتشر شده است. مسیرهای اکسایش متان و مخلوط متان و هیدروژن در یک WSR با دمای 1345 کلوین و همچنین در جریان واکنشی مدل شده توسط دینامیک سیالات محاسباتی در شرایط مختلف غلظت اکسیژن هوا و هیدروژن سوخت استخراج شد. مشاهده شد که در شرایط MILD مسیرهای شامل تبدیل متیل به اتان فعال شده و به عبارت دیگر بخشی از متان بصورت اتان اکسید می گردد. کاهش غلظت اکسیژن هوای ورودی همواره منجر به کاهش تولید CO و CO_2 نمی گردد. دلیل روند مشاهده شده تغییر رفتار واکنشهای تجزیه ای CO_2 در دمای کمتر از 1500 کلوین نسبت به دمای بالاتر از آن و همچنین تغییر نسبت شدت واکنشهای تولید کننده CO و بخصوص واکنش (R12 & 13: $O+C_2H_2 \rightleftharpoons CH_2(S)+CO$) در زنجیره احتراق اتان و واکنش (R59: $OH+CO \rightleftharpoons H+CO_2$) به عنوان مصرف کننده CO می باشد. تحلیل WSR نشان داد در دماهای کمتر از 1500 کلوین افزایش دمای محفظه منجر به کاهش غلظت CO و افزایش CO_2 شده است ولی اثر دمای محفظه بر تولید این گونه ها در دمای بالاتر از 1500 کلوین برعکس خواهد شد. نتایج CFD نیز نشان میدهد که با افزایش غلظت اکسیژن شدت واکنش R13, R12 از واکنش R59 بیشتر خواهد شد. تحلیل WSR بیانگر این مطلب است که دینامیک جریان نظیر سرعت و اغتشاشات میدان جریان، با توجه به اثری که در زمان اقامت دارند، در شرایط اکسیژن بالاتر اثر به مراتب بالاتری نسبت به حالتها بسیار رقیق، نظیر شرایط 3 درصد اکسیژن، در تولید و مصرف CO و CO_2 دارند.

مراجع

- [1] Weinberg, F.J.; Combustion Temperatures: The Future?; Nature; 233(1971); pp.239-241
- [2] Gupta, A. K.; Li, Z.; Effect of Fuel Property on the Structure of Highly Preheated Air Flames; Proceedings of Intl. Joint Power Generation Conference(1997); Denver; ASME EC- 5; PP. 247-258.
- [3] Gupta, A.K.; Flame characteristics and challenges with high temperature air combustion; Proc. of Intl. Joint Power Generation Conference (JPGC)(2002); Phoenix; AZ.



- [4] Gupta, A.K.; Flame length and ignition delay during the combustion of acetylene in high temperature air; Proceedings of the 5th high temperature air combustion and gasification conference (2002); Yokohama; Japan.
- [5] Gupta, A. K.; Thermal characteristics of gaseous fuel flames using high temperature air; ASME J. Engr. Gas Turbine Power (2004);126(1); pp. 9–19.
- [6] Boltz, S.; Gupta, A. K.; Effect of air preheat temperature and oxygen concentration on flame structure and emissions; Proc. Intl. Joint Power Joint Generation Conference (IJPJC98); Baltimore Aug- 1998, ASME FACT-22; pp. 193–205.
- [7] Ito, Y.; Gupta, A. K.; Yoshikawa, K.; Shimo, N.; Combustion characteristics of low calorific value gas with high temperature and low-oxygen concentration air; Proceedings of the 5th High Temperature Air Combustion and Gasification Conference (2002), Yokohama, Japan.
- [8] Tsuji, H.; Gupta, A. K.; Hasegawa, T.; Katsuki, K.; Katsuki, M.; Morita, M.; High Temperature Air Combustion: From Energy Conservation to Pollution Reduction; CRC Press; the United States of America; 2003.
- [9] Mortberg, M.; Blasiak, W.; Gupta, A. K.; Experimental investigation of flow phenomena of a single fuel jet in cross-flow during highly preheated air combustion conditions; Journal of engineering for Gas Turbines and Power 129(2) (2007); pp.556-567.
- [10] Mortberg, M.; Blasiak, W.; Gupta, A.K.; Flameless combustion of methane fuel jet injected into transverse high temperature air flow; Proc. 6th Intl. Conference on High Temperature Air Combustion and Steam Gasification (HTACG)(2005), Essen, Germany, October 17–19.
- [11] Hasegawa, T.; Mochida, S.; Gupta, A.K.; Development of advanced industrial furnace using highly preheated air combustion; J. Propul. Power 18(2)(2002); pp.233–239.
- [12] Wunning, J. G.; Flameless Combustion in Thermal Process Technology; 2th International Seminar on High Temperature Air Combustion; Sweden; 2000
- [13] Cavaliere, A.; Joannon, M. D.; MILD Combustion, Prog. Energy Combust. Sci.30(2004), pp.329-366
- [14] Mardani, A., Tabejamaat, S., Baig Mohammadi, M. , Numerical Study of the Effect of Turbulence on Rate of Reactions in the MILD Combustion Regime, Combustion Theory and Modelling, DOI:10.1080/13647830.2011.561368.
- [15] Mardani, A., Tabejamaat, S., Effect of hydrogen on hydrogene-methane turbulent non-premixed flame under MILD condition, International Journal of Hydrogen Energy 35 (2010) 11324-11331.
- [16] Mardani, A., Tabejamaat, S., Ghamari, M., Numerical Study of Influence of Molecular Diffusion in the MILD Combustion Regime, Combustion Theory and Modelling 14 (2010) 747–774.
- [17] Dally B. B.; Karpetis, A. N.; Barlow, R. S.; Structure of turbulent non-premixed jet flames in a diluted hot co-flow; Proc. Combust. Inst. 29 (2002); pp. 1147–1154.
- [18] Christo, F. C.; Dally, B. B.; Modeling Turbulent Reacting Jets Issuing into a Hot and Diluted Coflow, Combustion and Flame142 (2005); pp. 117-129
- [19] Plessing, T., , Peters, N., J. G. Wunning, J. G., Laser Optical Investigation of Highly Preheated Combustion with Strong Exhaust Gas Recirculation”, 27Symp. on Comb./The Comb. Institute(1998), pp.3197-3204.
- [20] Fluent Inc. Docs, January 28, 2003, page:13-10
- [21] Kazakov A., Frenklach M., Reduced reaction sets based on GRIMech1.2., Available at <http://www.me.berkeley.edu/drm/>.
- [22] Reaction Design Theory Manual, CHEMKIN Software, Release 4.1, 2006
- [23] Parente A., Galletti C., Tognotti L., (2008) effect of the combustion model and kinetic mechanism on the MILD combustion in an industrial burner fed with hydrogen enriched fuels, int. j. of hydrogen ene.33, pp.7553 – 7564.