فصلنامه تحقیقات مکانیک کاربردی
جلد ۳، شماره ۳، ص‌ص ۳ الی ۱۰، زمستان ۱۳۹۰
تاریخ دریافت: ۹۰/۰۵/۱۵ تاریخ پذیرش: ۹۰/۰۹/۲۲

بررسی تاثیر تزریق بخار آب بر سرعت شعله و تشکیل آلاینده‌ها در محفظه احتراق

افشین فهیمی‌راد– کارشناس ارشد مکانیک تبدیل انرژی، مدرس گروه مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری
محمد محمودی آریا کارشناس ارشد مکانیک تبدیل انرژی

E-mail: Afshin_Fahimi_rad@yahoo.com

چکیده: رقیق‌سازی به عنوان یکی از روش‌های کاهش حداکثر دمای محفظه احتراق است که سبب کاهش تشکیل NO_x حرارتی می‌شود. در سال‌های اخیر پیشرفت‌های زیادی برای کاهش NO_x در سیستم‌های احتراقی صورت گرفته است. تشکیل NO_x حرارتی با افزایش غلظت اکسیژن و همینطور دمای احتراق افزایش می‌یابد، لذا روش‌های کنترل تشکیل NO_x همگی براساس کنترل دما و یا محدود کردن غلظت اکسیژن استوار است. در این تحقیق، اثر رقیق‌سازی بر روی حداکثر دمای شعله و تشکیل آلاینده‌های NO_x و CO با استفاده از کد Premix نرم افزار CHEMKIN II به وسیله رقیق‌ساز H_2O در نسبت‌های رقیق‌سازی مختلف (β) و در محدوده ای از نسبت هم ارزی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین نتایج حاصل از رقیق سازی با H_2O، با نتایج شبیه سازی رقیق سازهای N_2 و CO_2 مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت رقیق‌سازی، حداکثر دمای شعله و همچنین آلاینده‌های NO_x و CO کاهش می‌یابند.

واژه های کلیدی: رقیق‌سازی، محفظه احتراق ، NO_x، CO، شبیه سازی.

Study of influence H_2O injection the flame speed and emission formation in combustion chamber

A. Fahimi.Rad, Dept. of Mech. Eng., Islamic Azad University of Sari
M. Mahmoodi Arya, Dept. of Mech. Eng., Islamic Azad University of Sari

Abstract: Numerical study on the effect of dilution on NO_x and CO emissivity in premixed flames is conducted by using PREMIX code of CHEMKIN II program. Dilution is considered as a way to reduce the maximum of flame temperature and concentration of thermal NO_x. There is an upward trend to reduce NO_x over the past years. H_2O is used as a dilatants over a wide range of equivalence ratio and dilution ratio (β). The results show that the maximum of flame temperature and the concentration of NO_x and CO are decreases with increase of dilution ratio.

Keywords: Dilution, Combustion chamber, NO_x, CO, Simulation.

۱- مقدمه

احتراق سوخت‌های فسیلی منجر به آلودگی قابل ملاحظه و یکی از عوامل اصلی گرم شدن زمین می‌باشد، که علت این امر انتشار آلاینده‌هایی از قبیل NO_x می‌باشد. هنگامیکه سوخت‌های فسیلی از قبیل گاز طبیعی یا روغن و ترکیبات مشتق شده از آنها در هوا می سوزد، محصولات اکسیداسیون شامل CO_2، CO، H_2O تشکیل می شود. بعلاوه مولکول نیتروژن موجود در هوا با بعضی از مولکول‌های اکسیژن موجود در آن واکنش داده و اکسید نیتروژن (NO_x) شکل می‌گیرد. NO_x تولید شده از مولکول نیتروژن و اکسیژن موجود در هوا، NO_x حرارتی و NO_x تولید شده از مولکول نیتروژن موجود در سوخت، NO_x سوخت نامیده می شود. گاز طبیعی بعنوان سوختی که احتراق آن انتشار آلاینده کمتری را در پی دارد، از تمیزترین سوختها محسوب می شود که علت این امر ساختار شیمیایی ساده و عدم مشکل تبخیر سوخت می باشد. اعمال رقیق‌سازی به عنوان یک خط‌مشی جهت دستیابی به انتشار NO_x کمتر در بسیاری از مقالات مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. این اصل بر گسترش حدود اشتعال‌پذیری به سمت شرایط کم سوخت استوار است که کاهش قابل توجه اکسیدهای نیتروژن را به همراه دارد[1-5]. احتراق پیش آمیخته کم سوخت گاز طبیعی بسیار مورد توجه قرار گرفته است، زیرا باعث پایین آمدن دمای شعله و در نتیجه کاهش انتشار NO_x می شود. هرچند در نزدیکی حدود اشتعال پذیری کم سوخت، پایداری شعله کم شده و پدیده خاموشی ممکن است اتفاق بیفتد، بعلاوه شعله های کم سوخت ممکن است منجر به مشکلاتی از قبیل خاموشی و راندمان احتراق پایین شود، که یک راه حل عملی برای غلبه بر این مشکلات، افزودن سوخت های واکنش پذیرتر از قبیل هیدروژن می باشد[6-8]. هوای اضافی موجود باعث رقیق شدن احتراق شده ودمای شعله را پایین نگه می دارد و این امر باعث کاهش انتشار NO_x حرارتی می شود. علاوه بر رقیق ساز N_2 از H_2، CO_2، CO، H_2O، Ar، He و حتی NO می توان استفاده کرد. آزمایشات نشان می دهد که رقیق سازی کاهش چشمگیرNO_x را بهمراه دارد[2,4,6,8,9]. در مورد رقیق سازی با N_2 یا هوای اضافی، دمای آدیاباتیک شعله کاهش یافته و در هر دو مورد NO_x کمتری تشکیل می شود[10]. در مورد رقیق سازی با هوا، حضور اکسیژن در ابتدای احتراق تشکیل NO_x حرارتی را از طریق دو مکانیزم افزایش سینتیک احتراق و افزایش نرخ تشکیل NO زیاد می کند. که دلیل مشاهده NO_x کمتر در هنگامی است که از N_2 (در مقایسه با هوا) بعنوان رقیق ساز استفاده شده است[11]. تحقیقات نشان می‌دهد که رقیق‌سازی با CO_2 و H_2O کاهش دمای شعله و در نتیجه کاهش انتشار NO_x حرارتی را در پی دارد. نهایتا در همه تحقیقات مشاهده شد، هنگامی که نرخ رقیق‌سازی افزایش می‌یابد، سرعت شعله آرام کاهش می‌یابد. رقیق‌سازی با نیتروژن نیز منجر به کاهش سرعت شعله و نهایتا کاهش انتشار NO_x حرارتی می‌شود[12]. در این تحقیق هدف مطالعه عددی تاثیر تزریق بخار آب بر حداکثر دمای شعله و تشکیل NOx و مقایسه با دیگر رقیق ساز های رایج می باشد. رقیق سازی با بخار آب، به دلیل ظرفیت حرارتی بالای مولکول آب سبب افزایش ظرفیت حرارتی مخلوط و جذب حرارت ناشی از احتراق شده و بدین وسیله نرخ واکنش ها اندکی کاهش می یابد که عاملی موثر در راستای کنترل NOx حرارتی است. همچنین به دلیل گرم بودن بخار آب تزریقی، راندمان احتراق بر خلاف اکثر روش های رایج رقیق سازی کاهش نمی یابد. نسبت رقیق سازی با β نشان داده می شود و از رابطه زیر بدست می آید.

$$\beta = \frac{n_{H2O}}{n_{Fuel}} \qquad (۱)$$

۲- شبیه سازی عددی

در مطالعه پیش رو به منظور بررسی تاثیر رقیق سازی بر NOx تولیدی شعله متان_هوا از کد Premix در نرم افزار CHEMKIN II استفاده شده است. در شبیه سازی ها از مکانیزم زنجیره ای GRI_MECH3.0 [13] بهره گرفته شده است. مشخصات شبکه مش بندی در این شبیه سازی GRAD = 0.08 و CURV = 0.8 و معیارهای خطای نسبی و مطلق به ترتیب RTOL = 1E-4 و ATOL = 1E-9 می باشد. با توجه به معادله کلی واکنش با نسبت های مختلف رقیق ساز H_2O به بررسی تاثیر آن بر دمای شعله،سرعت شعله و تشکیل آلاینده های NO و CO پرداخته شده است. نسبت های مختلف رقیق سازی در ورودی کد Premix اعمال می شود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تاثیر رقیق کننده H_2O بر سرعت شعله

شکل (۱) روند کلی تغییر سرعت شعله را در نسبت هم ارزی های مختلف و درمحدوده ای از نسبت های رقیق سازی نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که با افزایش نسبت هم ارزی تا نزدیک به حالت استوکیومتریک نمودار روند صعودی داشته و سپس با حرکت به سمت نواحی پر سوخت سرعت شعله کاهش می یابد. علت این امر این است که سرعت شعله با دما رابطه مستقیم دارد. همچنین با افزایش نرخ رقیق سازی مشاهده می شود که با کاهش در دمای شعله، سرعت شعله نیز کاهش یافته است.دمای واکنش، سرعت فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون را تحت تاثیر قرار می‌دهد. دمای واکنش به نقطه‌ی جوش الکل بکار گرفته شده وابسته است. فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون در محدوده‌ی دمایی متغیر، از دمای اتاق تا نقطه جوش الکل انجام پذیر است[۹و۱۰].در این تحقیق به علت استفاده از متانول با نقطه‌ی جوش ۶۴/۷ ^0C دمای واکنش، بین ^0C ۶۳- ۶۰ حفظ شده است.

۳-۲- تاثیر رقیق کننده H_2O بر NO_x انتشار یافته

نتایج شبیه سازی نشان می دهد که با افزایش نسبت رقیق سازی برای رقیق کننده های مختلف حداکثر دمای شعله کاهش یافته و در نتیجه NO_x انتشار یافته کاهش می یابد. تزریق بخار آب به محفظ احتراق نیز باعث کاهش حداکثر دمای شعله شده و منجر به کاهش میزان انتشار NO_x می شود که علت این امر ظرفیت حرارتی بالای H_2O می باشد. شکل2 تاثیر رقیق ساز H_2O بر حداکثر دمای شعله در نسبت های مختلف هم ارزی و رقیق سازی را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش کسر مولی رقیق ساز H_2O ، حداکثر دمای شعله و بالتبع انتشار آلاینده NO_x کاهش می یابد که علت این امر بالا بودن ظرفیت حرارتی H_2O و توانایی آن در جذب گرمای محفظه احتراق و پایین آوردن بیشینه دمای شعله است.

۳-۳- تاثیر رقیق‌کننده های مختلف بر میزان CO انتشار یافته

نتایج شبیه سازی نشان می دهد که با افزایش نسبت رقیق سازی برای رقیق کننده های مختلف با کاهش حداکثر دمای شعله میزان CO انتشار یافته نیز کاهش می یابد. همانگونه که مشاهده می شود در یک نسبت هم ارزی مشخص و با افزایش نسبت رقیق سازی، CO انتشار یافته از محفظه احتراق مانند NO_x تولید شده روندی کاهشی داشته که به علت پایین آمدن بیشینه دمای شعله است که نرخ تجزیه CO_2 را کاهش می دهد. همچنین در حالت پرسوخت، افزایش نرخ رقیق سازی، منجر به بهبود احتراق می شود.

البته در نسبت های هم ارزی پایین تر، CO انتشار یافته از محفظه احتراق کمتر است که به علت پایین تر بودن حداکثر دمای شعله و همچنین کم سوخت بودن احتراق است چون در

احتراق پرسوخت مقداری از کربن موجود در هیدروکربن به علت کمبود هوا بطور ناقص می سوزد و این خود دلیلی برای انتشار بیشتر آلاینده CO می باشد.

در جدول (۱) تاثیر رقیق سازهای مختلف بر حداکثر دمای شعله، سرعت شعله و تشکیل آلاینده های NO و CO در حالت استوکیومتری آورده شده است. β نشان دهنده کسر مولی رقیق کننده یعنی نسبت تعداد مول های رقیق کننده به تعداد مول های هیدروکربن در معادله واکنش می باشد. البته در حالتی که نسبت رقیق سازی برای CO_2 از $\beta = 0.7$ تجاوز کند منجر به خاموشی شعله می شود.

همانگونه که در شکل (۳) مشاهده می شود با افزایش نسبت رقیق سازی، NO_x انتشار یافته از کوره بطور چشمگیری کاهش می یابد که علت آن کاهش حداکثر دمای شعله می باشد.

٤- نتیجه گیری

با شبیه سازی احتراق متان- هوا با رقیق سازهای مختلف مشخص گردید که در نسبت های مختلف رقیق سازی با افزایش نسبت رقیق سازی، حداکثر دمای شعله و در نتیجه آلاینده NO_x روند کاهشی را طی کرده است. در مورد رقیق سازی با CO_2 و H_2O بعلت ظرفیت حرارتی بالا تاثیر بیشتری بر کاهش حداکثر دمای شعله و در نتیجه آلاینده NO_x دارد. رقیق ساز N_2 بعلت برقراری پیوند سه گانه وانرژی اکتیواسیون بالا نیز تاثیر مشابهی بر روند کاهشی آلاینده NO_x دارد.

همچنین نتایج شبیه سازی نشان می دهد که رقیق سازی باعث کاهش آلاینده CO نیز می گردد و علت آن پایین آمدن حداکثر دمای شعله و در نتیجه کاهش نرخ تجزیه CO_2 می باشد. این کاهش در نسبت های هم ارزی بالاتر محسوس تر و ملموس تر است. رقیق ساز بخار آب بر خلاف CO_2، به علت گرم بودن بخار تزریقی، کاهش کمتری در دمای شعله ایجاد می نماید و همچنین کاهش راندمان احتراق را در پی ندارد.

.

٥- مراجع

[1] Bell, S.R., Gupta, M., Combust. Sci. Technol. 123, pp. 23-48, 2003.

[2] Schefer, R.W., Wicksall, D.M.,Agarwal, A.K., Proc. Combust. Inst. 29, pp. 843-851, 2002.

[3] Ren, J.Y., Qin,W., Egolfopoulos, F.N.,Tsotsis,T.T., Combust. Flame 124, pp. 717-720, 2001.

[4] Rortveit, G.J., Zepter,K., Skreiberg,M., Fossum,J.E., Combust. Inst. 29, pp. 1123-1129, 2002.

[5] Ghoniem, A.F., Annaswamy,A., Park,S., Sobhani,Z.C., Proc. Combust. Inst. 30, pp.1765-1773, 2005.

[6] Yamaoka,I., Tsuji,H., Anomalous behavior of methane-air and methane-hydrogen-air flames diluted wih nitrogen in a stagnation flow, Publ by Combustion Inst, Pittsburgh,PA,USA, Sydney,Engl, pp.145-152, 1992.

[7] Wierzba,I., Ale,B.B., Rich flammability limits of fuel mixtures involving hydrogen at elevated tempratures, International Journal of Hydrogen Energy 25, pp. 75-80, 2000.

[8] Jackson, G.S., Sai,R.,Plaia,J.M.,Boggs, C.M.,Kiger,K.T., Influence of H2 on response of lean premixed CH4 flames to high strained flows, Combustion and Flame 132, pp. 503-511, 2003.

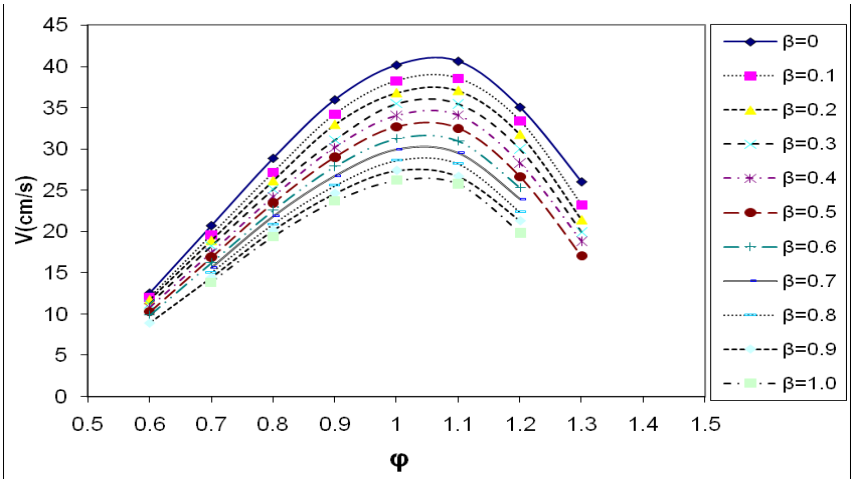
[9] Konnov, A.A., Dyakov, I.V., "Nitrous oxide conversion in laminar premixed flames of CH4+O2+Ar" , Proceedings of the Combustion Institute 32, pp. 319-326, 2009.

[10] Huang,Z., Zhang, Y., Zeng,K., Liu,B., Wang,Q., Jiang,D., Combust. Flame 146, pp. 302-311,2006.

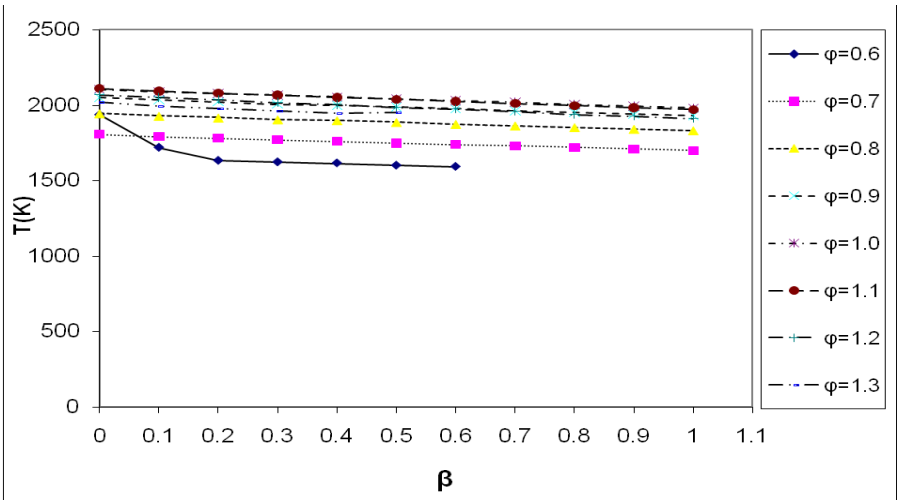
[11] Ruddy,E.N., Caroll, L.A., Select the best VOC control strategy, Chemical Engineering Progress 89(7), pp. 28-35,1993.

[12] Kobayashi, H., Hagiwara,H., Kaneko, H., Ogami,Y., Proc. Combust. Inst. 31, pp. 1451-1458, 2007.

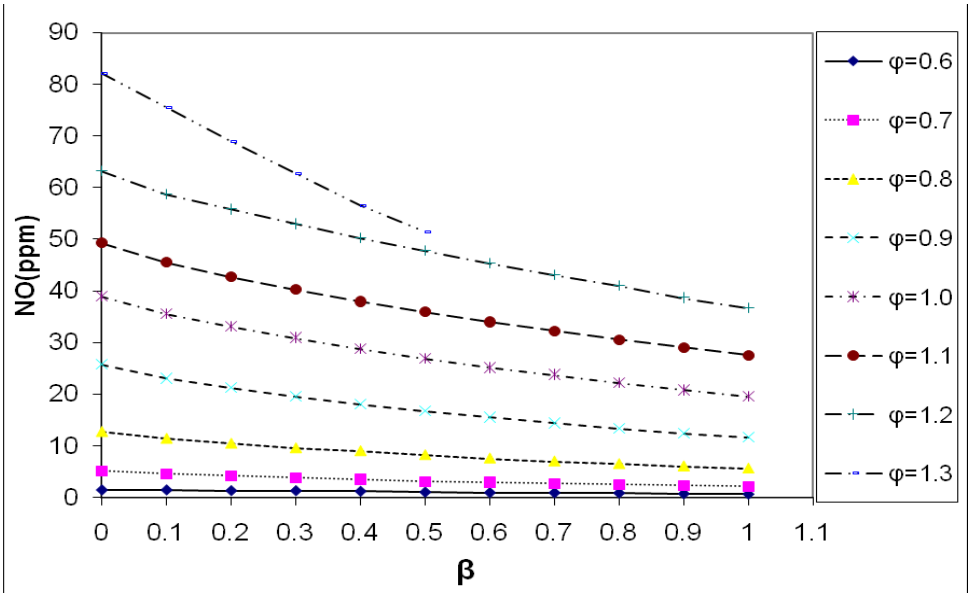
[13] http://www.me.berkeley.edu/gri-mech.



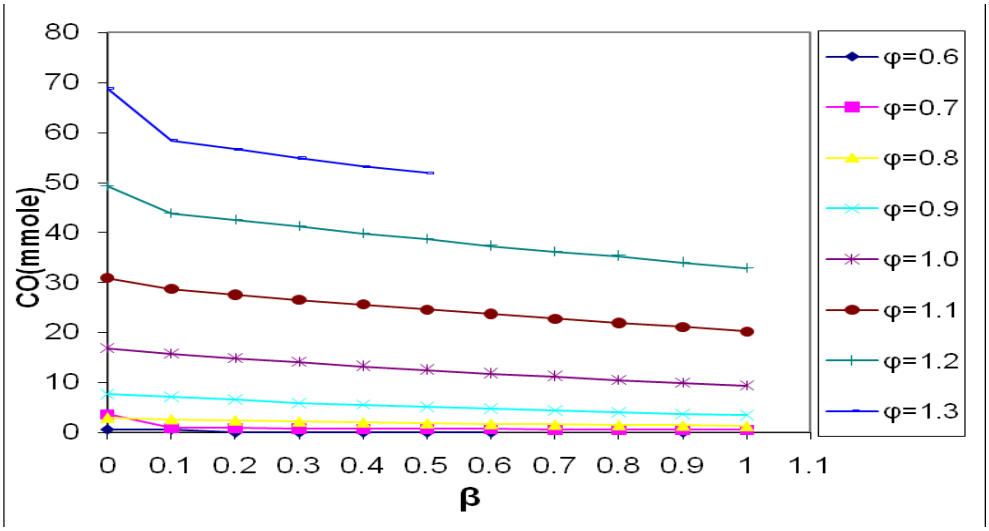
شکل (۱): تاثیر رقیق ساز H_2O بر سرعت شعله در نسبت های مختلف هم ارزی و رقیق سازی



شکل (۲): تاثیر رقیق ساز H_2O بر حداکثر دمای شعله در نسبت های مختلف هم ارزی و رقیق سازی



شکل (۳): رقیق ساز H_2O بر تشکیل آلاینده NO_x در نسبت های مختلف هم ارزی و رقیق سازی



شکل (٤): تاثیر رقیق ساز H_2O بر تشکیل آلاینده CO در نسبت های مختلف هم ارزی و رقیق سازی

جدول(۱): تاثیر رقیق سازهای مختلف بر حداکثر دمای شعله، سرعت شعله و تشکیل آلاینده های **NO** و **CO** در $\varphi = 1.0$

رقیق ساز / β	CO_2				H_2O				N_2			
	T (K)	V (cm/s)	NO (ppm)	CO (mmole)	T (K)	V (cm/s)	NO (ppm)	CO (mmole)	T (K)	V (cm/s)	NO (ppm)	CO (mmole)
0	2104	40.16	38.9	16.85	2014	40.16	38.9	16.85	2104	40.16	38.9	16.85
0.1	2085	36.75	34.97	16.87	2088	38.24	35.53	15.77	2090	38.73	37.06	16.26
0.2	2054	33.14	30.1	16.88	2077	36.79	33.11	14.88	2079	37.7	35.66	15.84
0.3	2021	32.7	26.26	16.87	2066	35.5	30.91	14.16	2069	36.78	34.58	15.46
0.4	1967	25.3	20.78	16.78	2054	34.04	28.8	13.29	2059	35.83	33.44	15.02
0.5	1907	20.72	16.08	16.35	2042	32.69	26.85	12.58	2049	35.03	32.37	14.66
0.6	1818	15.12	11.28	15.13	2030	31.25	25.15	11.82	2038	34.03	31.32	14.26
0.7	1766	9.086	5.779	12.82	2019	29.92	23.76	11.29	2029	33.24	30.4	13.94
0.8	خاموشی شعله				2003	28.6	22.19	10.52	2019	32.42	29.5	13.55
0.9					1994	27.37	20.82	9.918	2008	31.32	28.34	13.07
1.0					1981	27.16	19.6	9.411	1999	30.57	27.74	12.81