

## بررسی عددی تاثیرات اضافه نمودن هیدروژن و بخار آب بر انتشار آلاینده ها در احتراق پیش آمیخته متان - هوا

اسماعیل خسروجردی<sup>۱</sup>، حمید ممهدی هروی<sup>۲</sup>، سروش خسروجردی<sup>۳</sup>

دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد  
esmailkhosrojerdi@gmail.com

### چکیده

در این مقاله به مطالعه میزان تولید آلاینده های  $CO, CO_2, NO, NO_2$  در احتراق پیش آمیخته متان - هوا و متان - هوا - هیدروژن و متان - هوا - بخار آب پرداخته شده است. در این مقاله تاثیر عوامل مختلف از جمله نسبت هم ارزی، درصد های مختلف حضور هیدروژن و همچنین میزان رطوبت موجود در عمل احتراق مورد بررسی قرار گرفته است. جهت حل و شبیه سازی عددی موارد فوق از نرم افزار 2 CHEMKIN و مکانیزم 3 GRI MECH استفاده شده است. با توجه به نتایج این پژوهش مشخص می شود که با افزایش درصد هیدروژن موجود در ترکیب احتراق میزان تولید  $CO_2$  و  $NO_2$  کاهش می یابد. همچنین با افزایش میزان رطوبت موجود در سیستم احتراق میزان تولید  $CO, CO_2, NO$  و  $NO_2$  کاهش می یابند. با توجه به نتایج این مطالعه مشخص می گردد که تولید  $NO$  و  $CO$  در احتراق همراه با رطوبت با افزایش نسبت هم ارزی افزایش می یابد و حداکثر میزان تولید  $NO_2$  و  $CO_2$  در نسبت هم ارزی حدود ۰.۹ روی می دهد. طبق نمودارهای بدست آمده تولید آلاینده های  $CO_2, NO, NO_2$  با افزایش فشار در سیستم احتراق افزایش می یابند و میزان تولید  $CO$  با افزایش فشار کاهش می یابد. با توجه به نتایج این مقاله می توان رفتار و میزان تولید آلاینده های مختلف در عمل احتراق را در محیطها و سیستم های مختلف پیش بینی نمود.

واژه های کلیدی: احتراق متان - هوا - هیدروژن - بخار آب - انتشار آلاینده های  $CO, CO_2, NO_x$

### ۱- مقدمه

متان با فرمول مولکولی  $CH_4$  یک گاز کلخانه ایست و معمولاً به عنوان سوخت استفاده می گردد. متان ساده ترین آلکان است. ماده اصلی متان (گاز طبیعی) همراه با نفت یافت می گردد. از تجزیه مواد گیاهی در نواحی مردابی تشکیل می شود. این گاز اثر گلخانه ای زیادی نسبت به  $CO_2$  دارد. از این سوخت در اکثر صنایع از جمله حمل و نقل، پتروشیمی و نیروگاهها استفاده می گردد. اضافه نمودن هیدروژن باعث کاهش تولید آلاینده ها و همچنین بهبود راندمان حرارتی می گردد. همچنین باعث افزایش سرعت شعله و محدوده اشتعال پذیری بزرگتر و انرژی حداقل کمتر جهت اشتعال می گردد. اضافه نمودن هیدروژن می تواند در کاهش انتشار  $NO_x$  نیز موثر باشد. متأسفانه در بسیاری از مطالعات نقش آب (بخار آب) در احتراق نادیده گرفته می شود. آب می تواند از طرق بخار آب موجود در اتمسفر و یا برگشت مواد محترق شده EGR ویا تزریق آب به گاز جهت کاهش مقدار  $NO_x$  در عمل احتراق ایفای نقش نماید. تابحال در زمینه اضافه شدن بخار آب به گاز تحقیقات اندکی صورت پذیرفته است. در این مقاله به نقش اضافه شدن هیدروژن و بخار آب به صورت پیش آمیخته در انتشار آلاینده های  $CO, CO_2, NO_x$  پرداخته شده است. در حل مسایل از نرم افزار 2 CHEMKIN استفاده شده است و مکانیزم مورد استفاده 3 GRI MECH بوده است. [۱] مسایل مورد بررسی در این مقاله عبارتند از:

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

میزان انتشار  $NO_x, CO_2, CO$  در حالتی که هیدروژن و بخار آب در احتراق وجود نداشته و صرفاً هوا با متان می سوزد. در این

بررسی میزان انتشار آلاینده ها در نسبتهای هم ارزی مختلف بررسی شده است. [۲]

در بررسی دیگر میزان انتشار آلاینده ها در حضور درصدهای مختلف هیدروژن و با نسبتهای هم ارزی مختلف بررسی شده است. [۳]

در حالت دیگر انتشار آلاینده ها با حضور مقادیر مختلف بخار آب اندازه گیری گردیده است.

سپس به بررسی تاثیر فشارهای مختلف در زمان احتراق و با حضور درصدهای مختلف هیدروژن و بخار آب پرداخته شده است.

با توجه به نتایج بررسی های انجام شده می توان تاثیر اضافه شدن هیدروژن و بخار آب را در احتراق مطالعه نمود و با توجه به آن میزان

آلاینده گی در مناطق و محیطهای کاری مختلف جهت احتراق و با حضور مقادیر مختلف بخار آب و رطوبت را پیش بینی نمود.

## ۲- روش حل

در شبیه سازی و حل این پروژه از نرم افزارهای مختلفی استفاده گردید که مهمترین آنها عبارتند از :

EES, EXCEL, CHEMKIN 2

موارد مورد مطالعه در این مقاله و روش های مورد استفاده جهت حل آنها عبارتند از :

الف- در اولین بررسی انجام شده میزان آلاینده های  $CO, CO_2, NO, NO_2$  در احتراق متان-هوا بدون حضور هیچگونه ماده دیگری در

ترکیب بررسی گردید. این مطالعه جهت مقایسه در حالتی که عناصر دیگر نیز در احتراق شرکت دارند کاربرد دارد.

در این قسمت احتراق با نسبتهای هم ارزی مختلف مطالعه شده اند. ابتدا فرمول های شیمیایی مربوط به حالتی مختلف احتراق بررسی

گردید. ابتدا حالتی که سوختن بدون حضور هیدروژن و بخار آب صورت می پذیرد بررسی گردید و جهت یافتن نسبتهای هم ارزی مختلف

اقدام شد..

سپس جهت ورود اطلاعات به نرم افزار در فشار 1 bar و دمای 300 K، کسرهای مولی هرکدام از مولکولها بررسی و محاسبه شد

در این مقاله نسبتهای هم ارزی ۰.۸ الی ۱.۲ بررسی گردید.

ب- در بررسی دیگر تاثیر وجود هیدروژن با درصدهای مختلف شبیه سازی گردید. [۴] نسبتها و درصدهای مختلف وجود هیدروژن با

فرمول ذیل بررسی گردید :

$$=H2/(CH4+H2)$$

با توجه به نسبتهای هم ارزی مختلف و قراردادن ضرایب a و b در فرمول ، کسرهای مولی هر یک از مولکولها محاسبه گردید و به عنوان

ورودی نرم افزار معرفی و سپس حل گردید.

ورودی های برای کلیه درصدهای هیدروژن با نسبتهای هم ارزی ۰.۸ الی ۱.۲ محاسبه و شبیه سازی گردید.

پ - در بررسی دیگر میزان انتشار آلاینده ها در نسبتهای هم ارزی خاص ۰.۸ و ۱ به طور مجزا حل گردید. در این بررسی احتراق متان با

نسبتهای هم ارزی مشخص و درصدهای مختلف حضور هیدروژن مطالعه گردید. [۵]

ت- در این مقاله سپس به بررسی تاثیر وجود بخار آب در دما های ۳۰۰ و ۳۳۰ درجه کلین پرداخته شده است.

قابلیت هوا در جذب رطوبت در دمای ۳۰۰ درجه کلین بین صفر الی ۲۱.۸ g/kg و در دمای ۳۳۰ بین صفر الی ۱۱۲.۱ g/kg می باشد.

جهت بررسی این موضوع از فرمول ذیل استفاده گردید:

$$SH=mH2O/(mair+mH2O)$$

سپس کسرهای مولی برای مولکولهای متان و اکسیژن و نیتروژن و آب در دماهای ۳۰۰ و ۳۳۰ درجه کلین به نرم افزار معرفی و حل

گردید. [۶]

ث- در حالت دیگر میزان انتشار آلاینده ها در نسبتهای هم ارزی مختلف برای میزان رطوبتهای ۸.۶ و ۱۵.۲ g/kg بررسی گردیده

است. [۷]

ج- در مطالعه بعدی تاثیر فشارهای مختلف احتراق بر روی میزان انتشار آلاینده های مختلف در احتراق متان-هوا و متان -هوا-هیدروژن

و همچنین متان-هوا -بخار آب بررسی و شبیه سازی گردید. [۸]

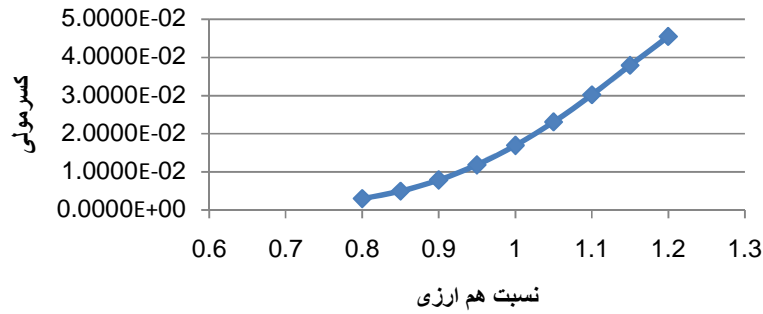
## ۳- نتایج

پس از دستیابی به نتایج بررسی های مختلف و استخراج آنها از نرم افزار مقادیر بدست آمده وارد نرم افزار EXCEL گردید و

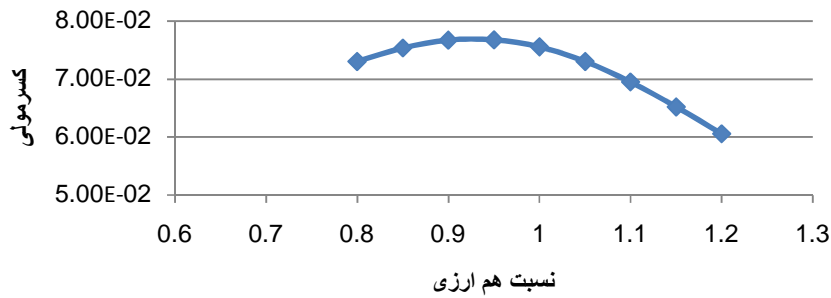
نمودارهای مربوطه ترسیم گردید و با توجه به نتایج بدست آمده می تواند بحث و بررسی صحیحی انجام پذیرد.

الف- در این نمودار میزان تولید آلاینده ها در احتراق متان -هوا بدون وجود مولکولهای دیگر بررسی شده است و نمودارهای آن به

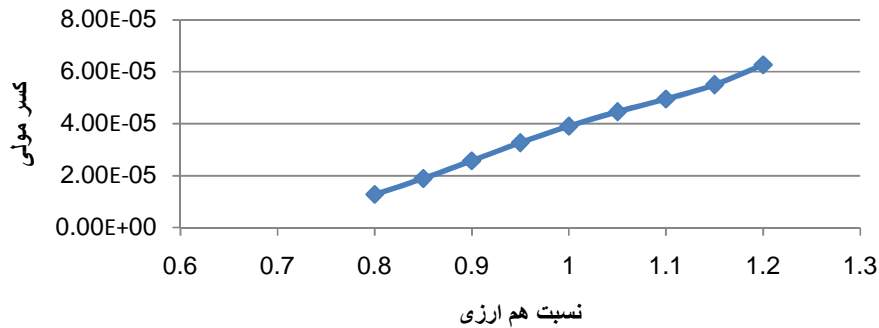
شکل ذیل می باشد.



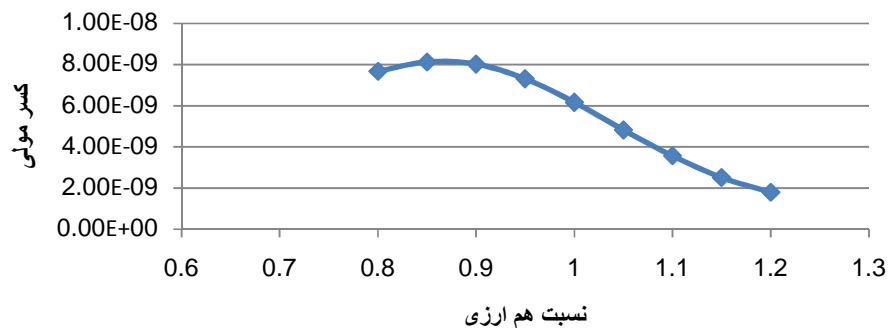
شکل (۱-۱) بررسی تولید CO در احتراق متان -هوا



شکل (۱-۲) بررسی تولید CO2 در احتراق متان -هوا

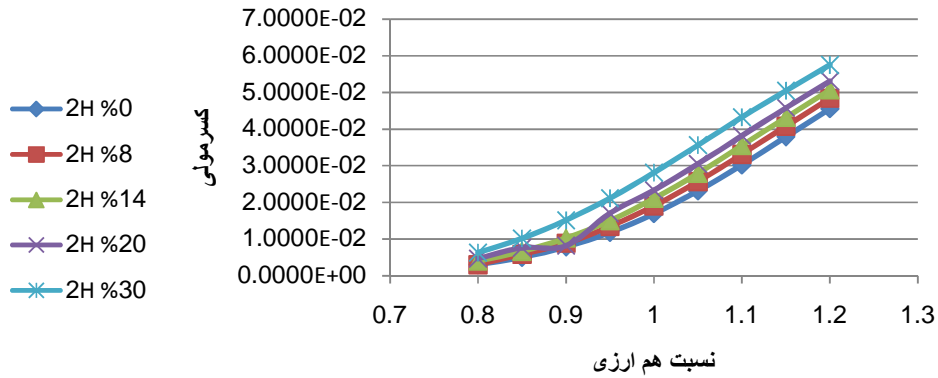


شکل (۱-۳) بررسی تولید NO در احتراق متان-هوا

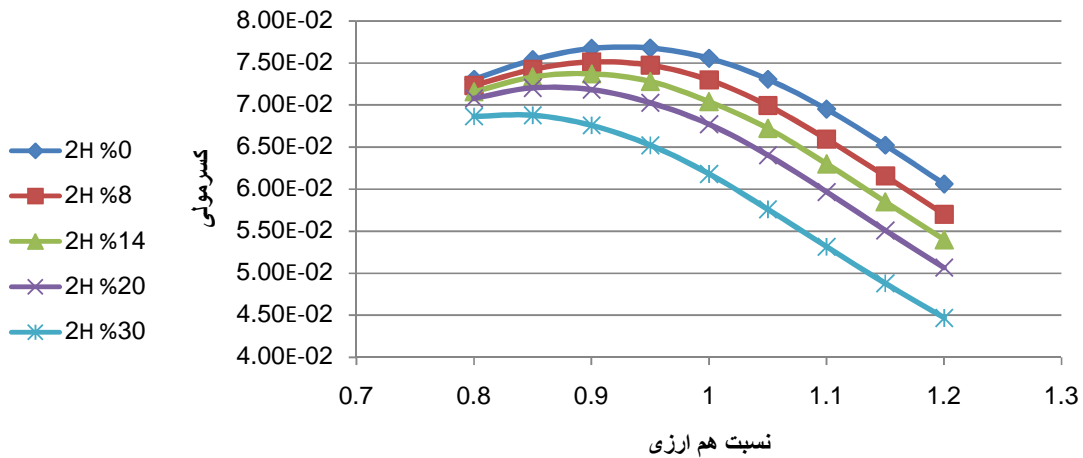


شکل (۱-۴) بررسی تولید NO2 در احتراق متان-هوا

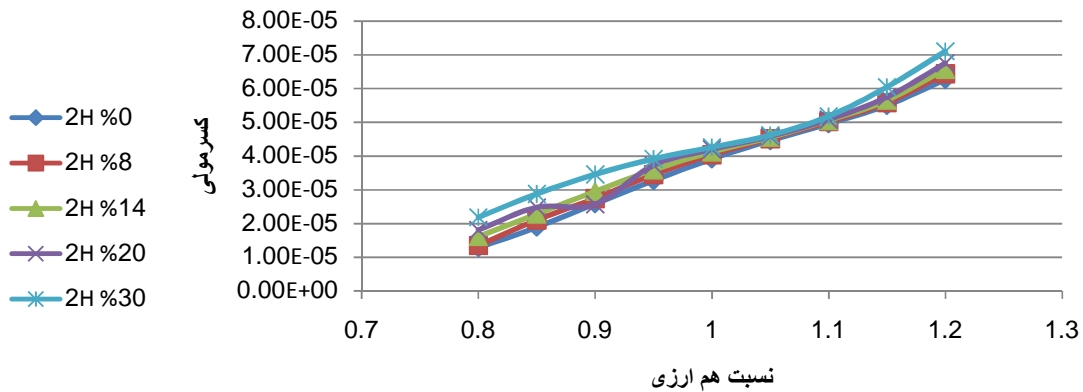
ب- تاثیر وجود درصدهای مختلف هیدروژن بر انتشار آلاینده ها در احتراق متان-هوا و با نسبتهای هم ارزی مختلف در نمودار ذیل قابل مشاهده می باشد.



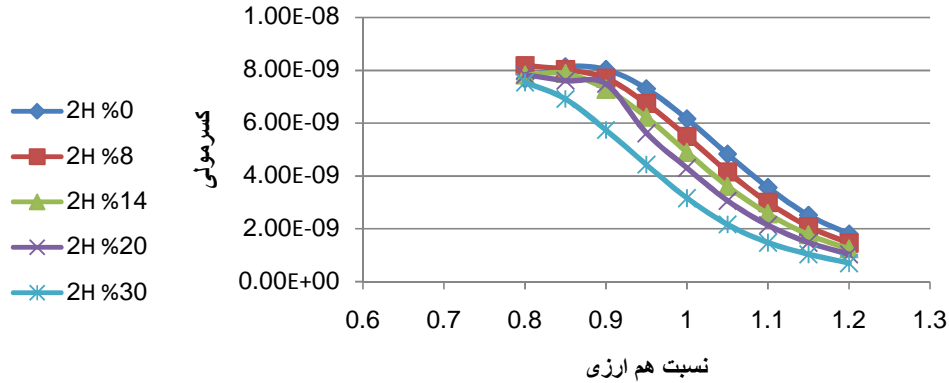
شکل ۱-۲) بررسی میزان تولید CO در احتراق متان-هوا-هیدروژن



شکل ۲-۲) بررسی میزان تولید CO<sub>2</sub> در احتراق متان-هوا-هیدروژن

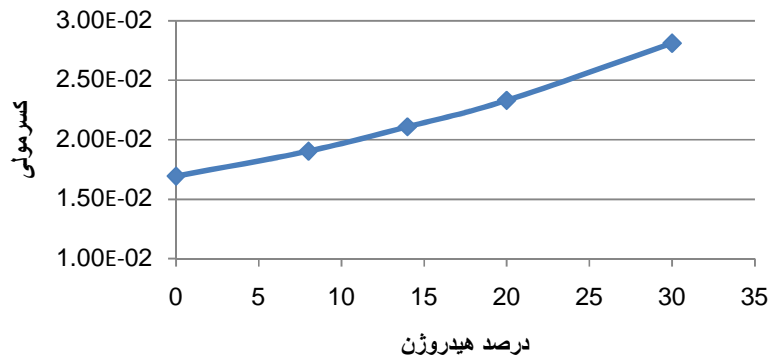


شکل ۳-۲) بررسی میزان تولید NO در احتراق متان-هوا-هیدروژن

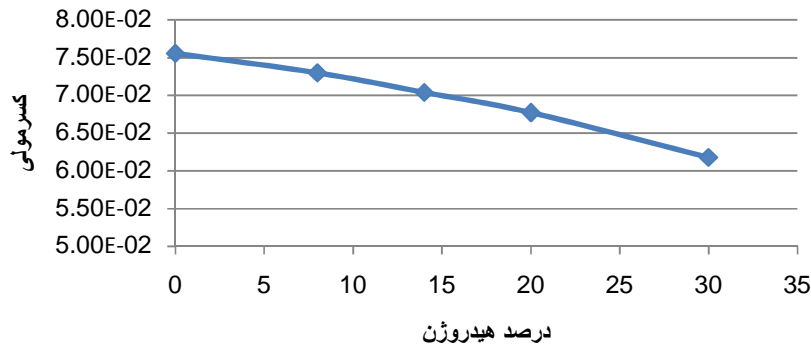


شکل ۴-۲) بررسی میزان تولید NO<sub>2</sub> در احتراق متان-هوا-هیدروژن

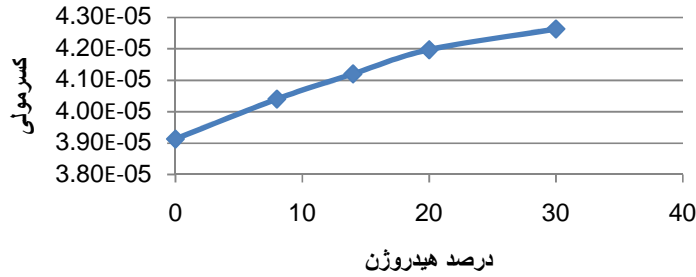
پ - در نسبت هم ارزی ۰.۸ و ۱ میزان آلاینده‌گی احتراق در حضور درصدهای مختلف هیدروژن نمایش داده شده است.



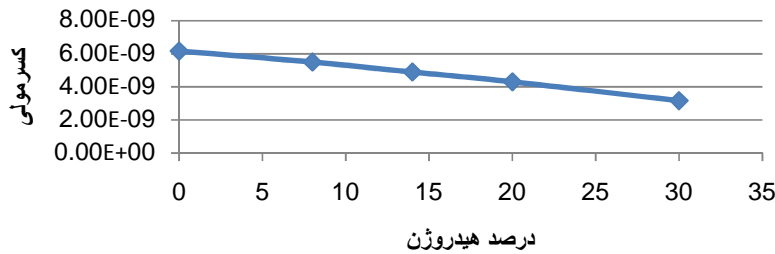
شکل ۳-۱) بررسی میزان تولید CO در احتراق متان هوا هیدروژن با نسبت هم ارزی ۱



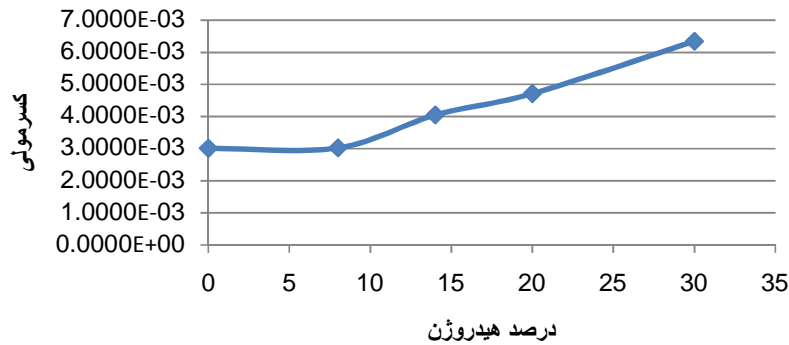
شکل ۳-۲) بررسی میزان تولید CO<sub>2</sub> در احتراق متان هوا هیدروژن با نسبت هم ارزی ۱



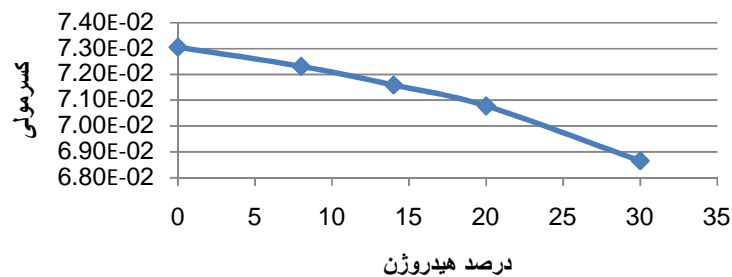
شکل ۳-۳) بررسی میزان تولید NO در احتراق متان هوا هیدروژن با نسبت هم ارزی ۱



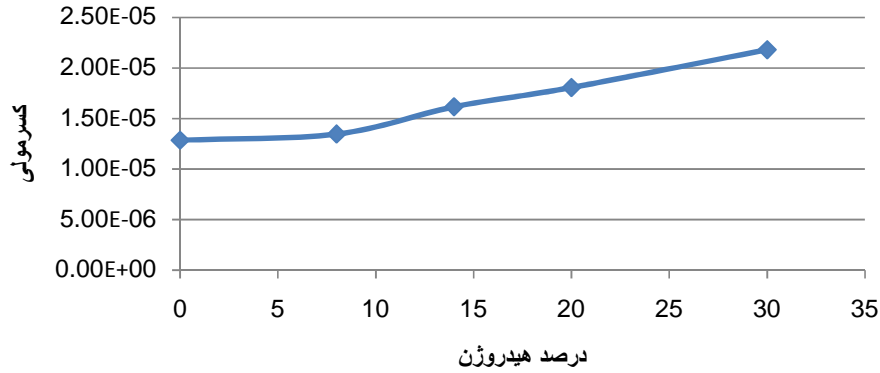
شکل ۳-۴) بررسی میزان تولید NO<sub>2</sub> در احتراق متان هوا هیدروژن و با نسبت هم ارزی ۱



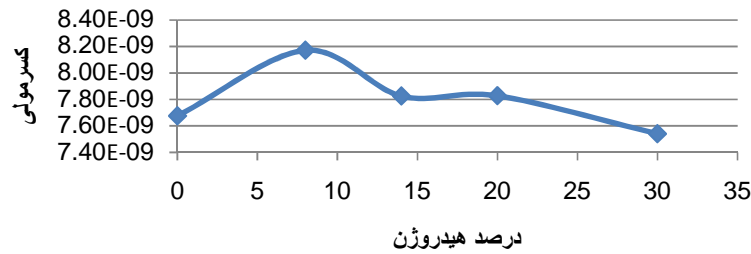
شکل ۴-۱) بررسی میزان تولید CO در احتراق متان هوا هیدروژن با نسبت هم ارزی ۰.۸



شکل ۴-۲) بررسی میزان تولید CO<sub>2</sub> در احتراق متان هوا هیدروژن با نسبت هم ارزی ۰.۸

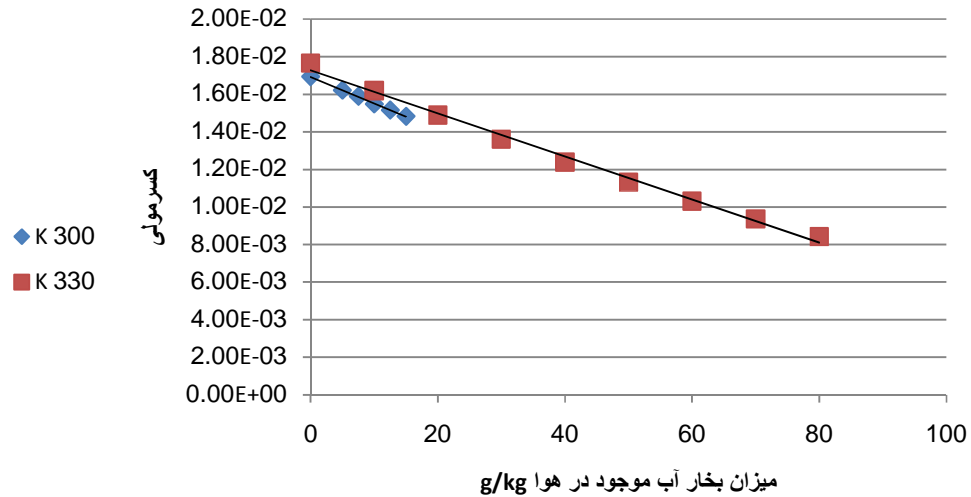


شکل ۳-۴) بررسی میزان تولید NO در احتراق متان هوا هیدروژن با نسبت هم ارزی ۰.۸

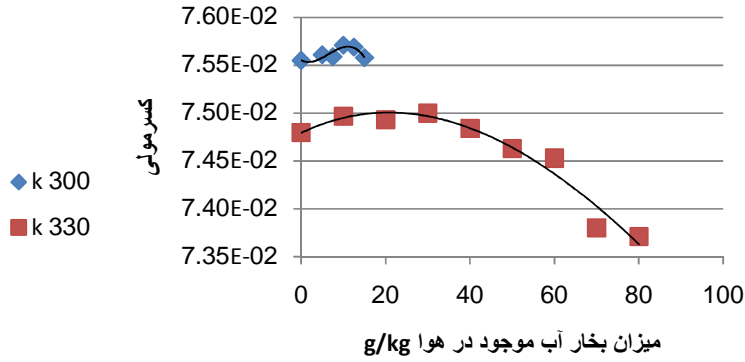


شکل ۴-۴) بررسی میزان تولید NO2 در احتراق متان هوا هیدروژن با نسبت هم ارزی ۰.۸

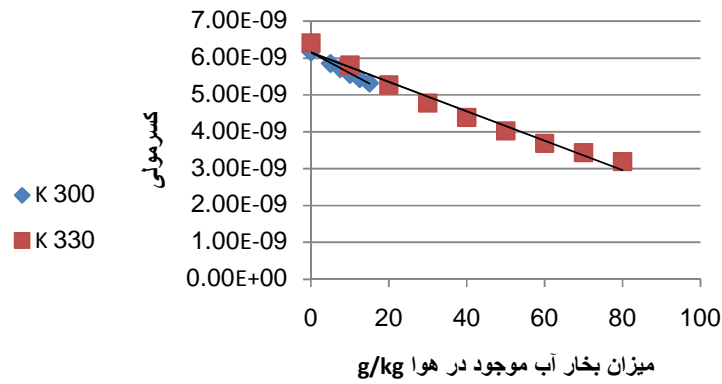
ت - در نمودار ذیل میزان آلاینده‌گی در حضور بخار آب و با نسبت‌های مختلف در دماهای ۳۰۰ و ۳۳۰ درجه کلین ملاحظه می‌گردد.



شکل ۵-۱) میزان تولید CO در احتراق متان هوا بخار آب در دماهای ۳۰۰ و ۳۳۰ درجه کلین

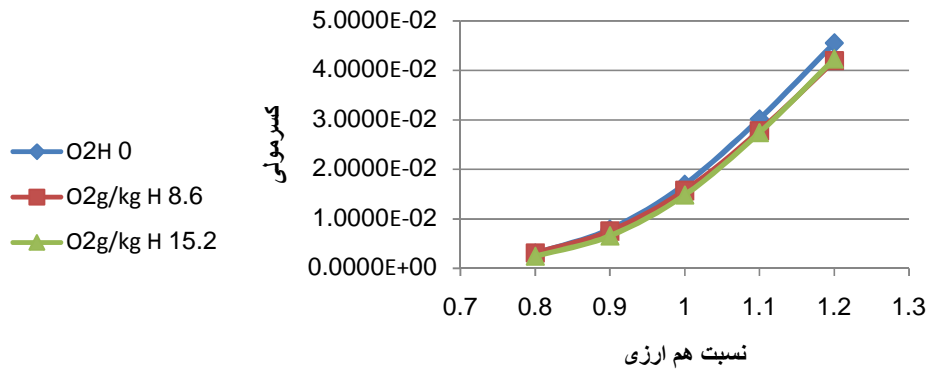


شکل ۲-۵) میزان انتشار  $CO_2$  در احتراق متان هوا بخار آب



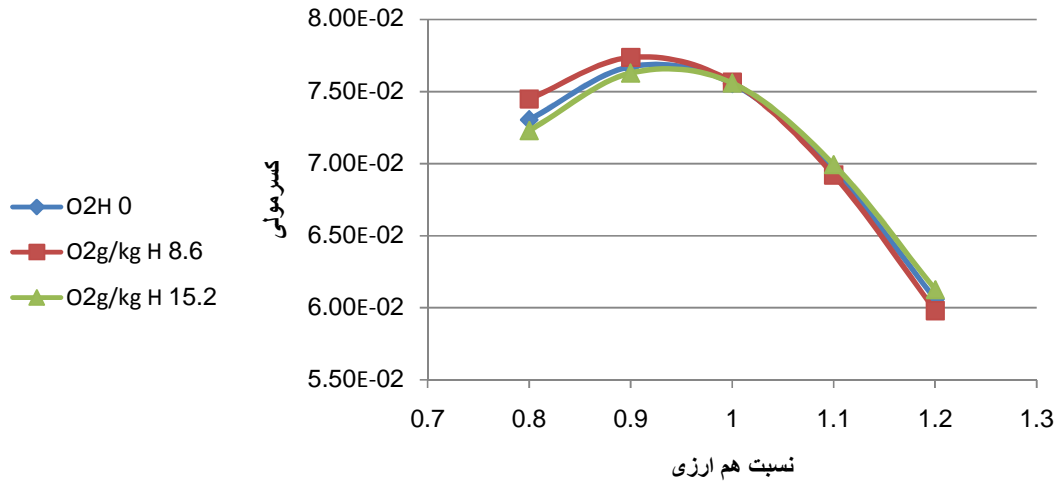
شکل ۴-۵) میزان انتشار  $NO_2$  در احتراق متان هوا بخار آب

ث - در نسبتهای هم ارزی مختلف میزان انتشار آلاینده ها با حضور آب بررسی گردیده و به صورت نمودار ذیل قابل مطالعه می باشد.

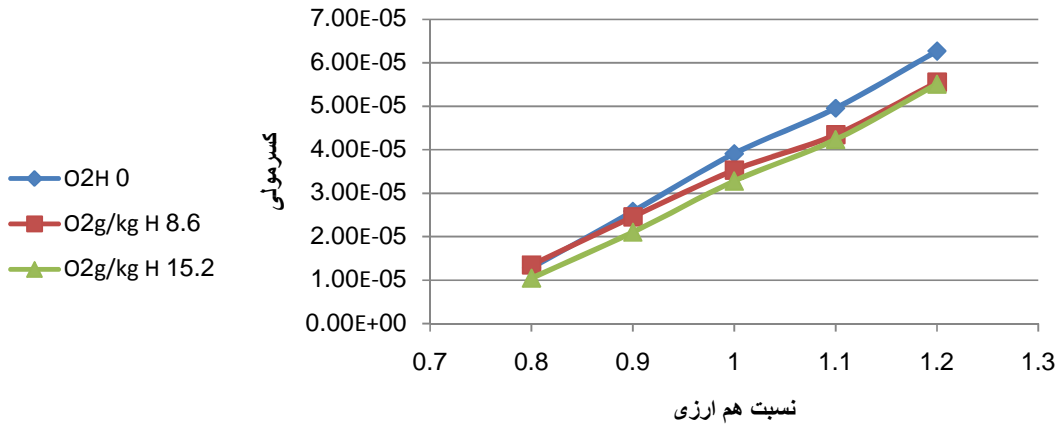


شکل ۱-۶) میزان تولید CO در احتراق متان هوا بخار آب

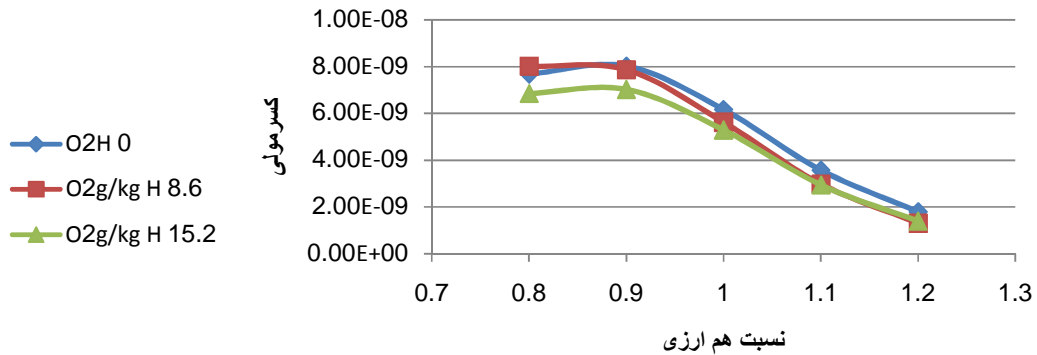




شکل ۲-۶) میزان تولید CO در احتراق متان هوا بخار آب

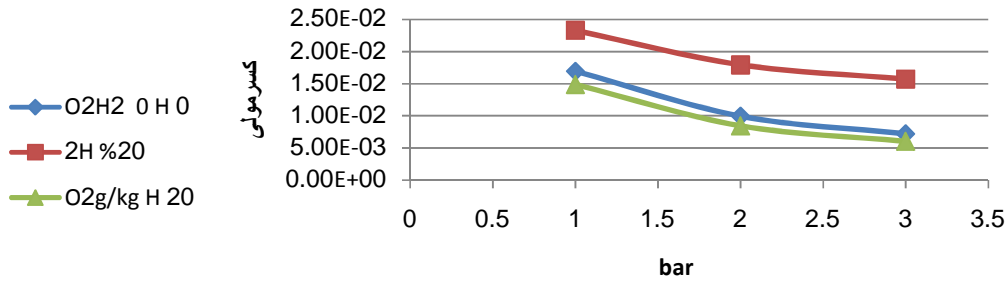


شکل ۳-۶) میزان تولید NO در احتراق متان هوا بخار آب

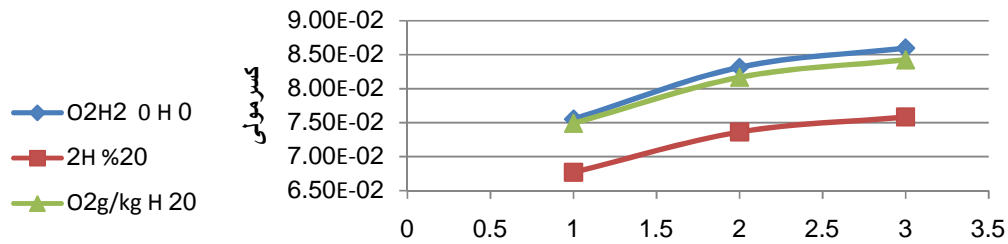


شکل ۴-۶) میزان تولید NO2 در احتراق متان هوا بخار آب

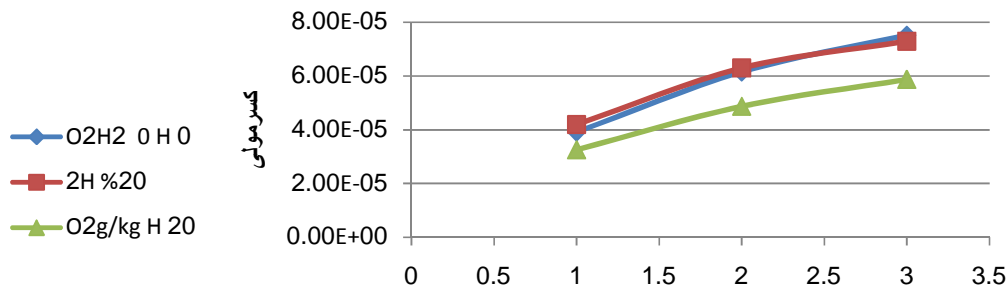
ج - در نمودار ذیل تاثیر فشارهای مختلف در میزان انتشار آلاینده ها قابل ملاحظه می باشد.



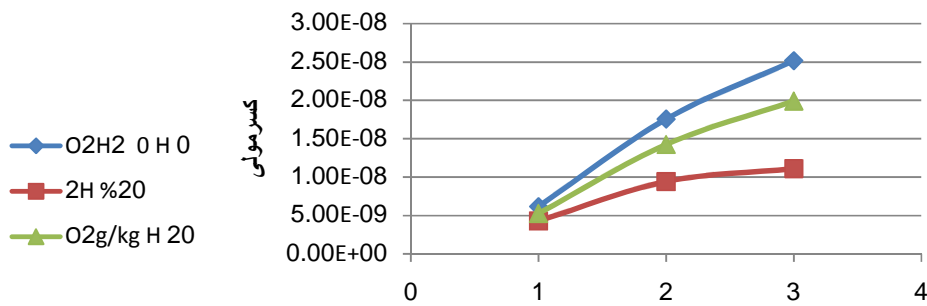
شکل ۷-۱) میزان تولید CO در احتراق متان در فشارهای مختلف



شکل ۷-۲) میزان انتشار CO2 در احتراق متان در فشارهای مختلف



شکل ۷-۳) میزان انتشار NO در احتراق متان در فشارهای مختلف



شکل ۷-۴) میزان انتشار NO2 در احتراق متان در فشارهای مختلف

#### ۴- بحث و نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از نمودارهای مختلف می توان مباحث زیر را نتیجه گیری نمود.

الف - با توجه به نمودارهای بدست آمده در احتراق متان - هوا میزان تولید CO با افزایش نسبت هم ارزی متوالیا افزایش می یابد. همچنین تولید CO<sub>2</sub> در نسبت هم ارزی حدود یک حداکثر مقدار را خواهد داشت. تولید NO با افزایش نسبت هم ارزی افزایش می یابد و تولید NO<sub>2</sub> در مقدار ۰.۸۵ حداکثر می باشد.

ب - در هر نسبت و درصدی از وجود هیدروژن در احتراق با افزایش نسبت هم ارزی میزان تولید CO و NO افزایش و مقدار تولید NO<sub>2</sub> کاهش می یابد. ضمناً میزان تولید CO<sub>2</sub> در نسبت هم ارزی حدود یک ماکزیمم می باشد.

پ - در نسبت هم ارزی یک با افزایش میزان و درصد هیدروژن میزان تولید CO و NO افزایش و میزان تولید CO<sub>2</sub> و NO<sub>2</sub> کاهش می یابد.

در نسبت هم ارزی ۰.۸ نیز موارد این بند صورت می پذیرد.

ت - با افزایش میزان رطوبت موجود در احتراق میزان تولید CO, NO و NO<sub>2</sub> مدام کاهش می یابد. در مورد CO<sub>2</sub> مقدار ماکزیمم تولید این ماده در دمای ۳۰۰ و در رطوبت حدود 12.5 g/kg و در دمای ۳۳۰ حدود 20 g/kg می باشد.

ث - در نسبتها و مقادیر مختلف وجود رطوبت آب در احتراق متان - هوا با افزایش نسبت هم ارزی میزان تولید CO و NO افزایش می یابد. در نسبت هم ارزی حدود ۰.۹۵ الی یک نیز میزان NO<sub>2</sub> و CO<sub>2</sub> در حالت حداکثر می باشد.

ج - با افزایش فشار در سیستم احتراق متان - هوا و متان - هوا - هیدروژن و همچنین متان - هوا - رطوبت آب میزان تولید CO<sub>2</sub>, NO و NO<sub>2</sub> افزایش ولیکن میزان تولید CO کاهش می یابد.

#### مراجع

- 1- R.T.E. Hermanns a, A.A. Konnov b, R.J.M. Bastiaans b, L.P.H. de Goey b, K. Lucka a, H. Ka ,Effects of temperature and composition on the laminar burning velocity of CH<sub>4</sub> + H<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> flames , Volume 89, Issue 1, January, Pages 114–121,2012
- 2- A.A. Konnov a,b,\* , R. Riemeijer a, L.P.H. de Goe ,Adiabatic laminar burning velocities of CH<sub>4</sub> + H<sub>2</sub> + air flames at low pressures,89,(7),1392-1396 :Elsevier,2009
- 3- Erjiang Hu, Zuohua Huang\*, Jianjun Zheng, Qianqian Li, Jiajia He,Numerical study on laminar burning velocity and NO formation of premixed methane–hydrogen–air flames , Volume 34, Issue 15, Pages 6545–6557, August 2009
- 4- Jinhua Wang, Zuohua Huang\*, Chenglong Tang, Haiyan Miao, Xibin Wang ,Numerical study of the effect of hydrogen addition on methane–air mixtures combustion, Volume 34, Issue 2, Pages 1084–1096, January 2009
- 5- Özcan H, Soylümez MS. Experimental investigation of the effects of water addition on the exhaust emissions of a naturally aspirated, liquefied-petroleum-gas-fueled engine. Energy Fuels;19(4):1468e72.2005
- 6- Subramanian V, Mallikarjuna JM, Ramesh A. Effect of water injection and spark timing on the nitric oxide emission and combustion parameters of a hydrogen fuelled spark ignition engine. Int J Hydrogen Energy;32(9):1159e73,2007
- 7- T. Boushaki, Y. Dhué, L. Selle et al. Effects of hydrogen and steam addition on laminar burning velocity of methane–air premixed flame: Experimental and numerical analysis, 9412-9422. In International Journal of Hydrogen Energy 37 (11),2012
- 8- CHEMKIN Tutorials Manual.