



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)
دانشکده مهندسی مکانیک

عنوان درس:

سوخت و احتراق

عنوان پروژه:

طراحی مقدماتی محفظه احتراق توربین گاز

نگارش:

هانیه عطریان سرشت 9926070

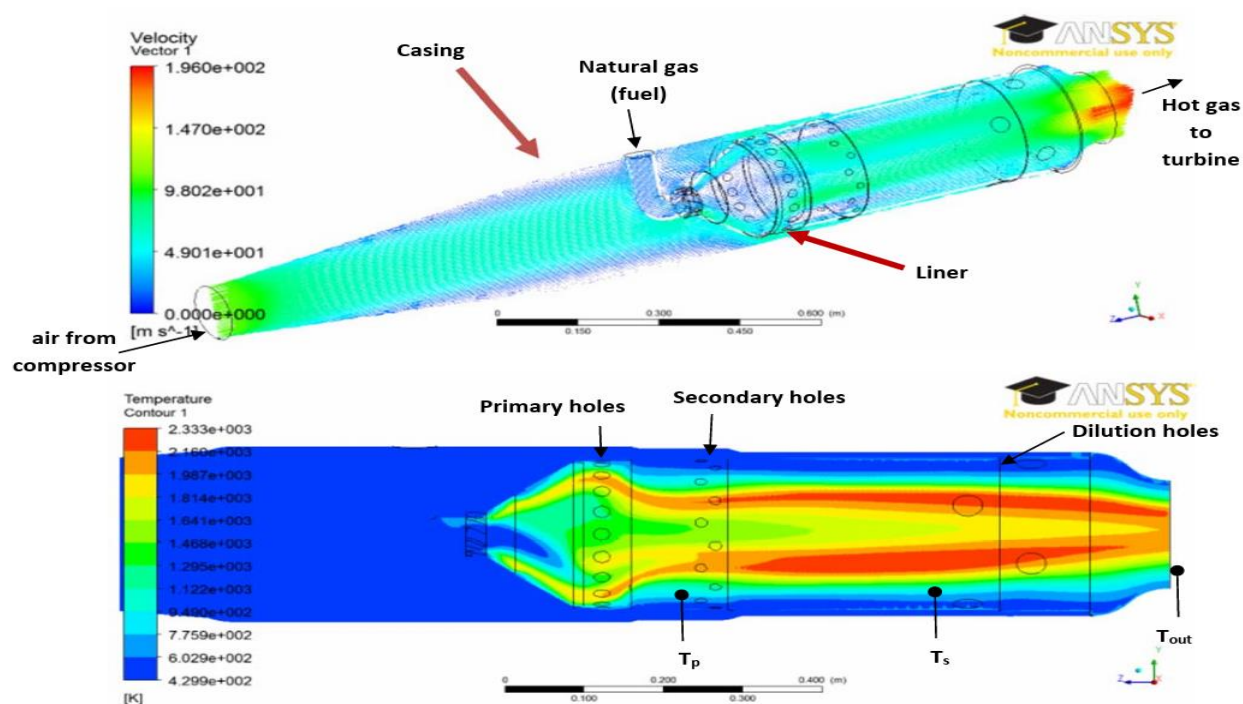
پرهام نظری 9926135

استاد درس:

شرح پروژه

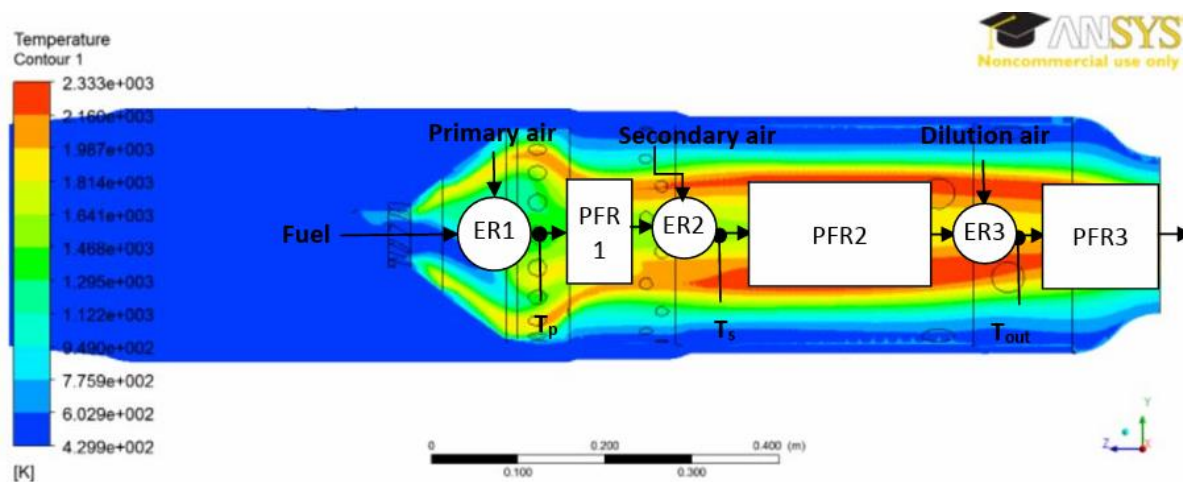
در این پروژه به طراحی مقدماتی محفظه احتراق یک توربین گازی میپردازیم. این پروژه متشکل از دو بخش بوده، در بخش اول مقدار هوای ورودی به هر یک از محفظه ها در دو حالت احتراق کامل و احتراق ناقص میپردازیم. در بخش دوم به بررسی یکی از بزرگترین چالش های مربوط به محفظه های احتراق یعنی آلاینده های NO_x میپردازیم که در این قسمت ابتدا به محاسبه غلظت خروجی این آلاینده از هر یک از محفظه ها و در نهایت به بررسی مقدار کل این آلاینده که از محفظه احتراق ما خارج میشود میپردازیم.

محفظه احتراق توربین گازی به شرح شکل یک میباشد:



شکل 1-نمای کلی محفظه احتراق

برای تحلیل این محفظه، 3 حجم کنترل در نظر گرفته شد به نام های ER1,ER2,ER3 که به شرح شکل 2 میباشد:



شکل 2- شماتیک حجم های کنترل

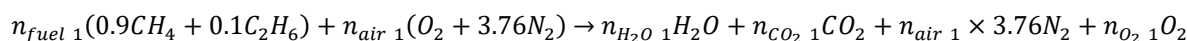
بخش اول:

برای تحلیل این محفظه، دمای ورودی هوا، دمای ورودی سوخت، دمای خروجی هر محفظه، غلظت مولی و اجزای تشکیل دهنده سوخت و دبی ورودی سوخت به ما داده شده.

مسئله اول:

ER1:

با فرض کامل بودن احتراق داریم:



معادلات حاکم عبارتند از: بقای انرژی، بقای اجزای اتمی و دبی ورودی سوخت
بقای اجزای اتمی:

$$[C]: n_{fuel_1} \times (0.9 + 0.1 \times 2) = n_{CO_2_1}$$

$$[H]: n_{fuel_1} \times (0.9 \times 4 + 0.1 \times 6) = 2(n_{H_2O_1})$$

$$[O]: 2(n_{air_1}) = n_{H_2O_1} + 2(n_{CO_2_1}) + 2(n_{O_2_1})$$

بقای انرژی:

$$\sum n_i [\bar{h}_f^0(T_i) + (\bar{h}^0(T_i) - \bar{h}_f^0(298K))]_i = \sum n_o [\bar{h}_f^0(T_o) + (\bar{h}^0(T_o) - \bar{h}_f^0(298K))]_o$$

همچنین با توجه به دبی ورودی از صورت پروژه داریم:

$$\dot{m}_{fuel} = 0.07 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{fuel} = n_{fuel_1} \times MW_{fuel} \rightarrow n_{fuel_1} = \frac{0.07 \text{ kg/s}}{(0.9 \times 16.043 + 0.1 \times 30.69) \text{ kg/kmol}} = 4.01 \text{ kmol}$$

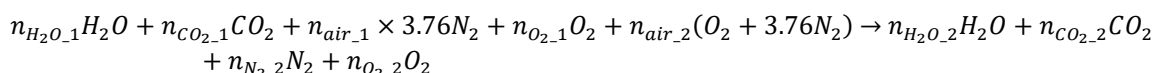
البته معادلات در کد مربوطه به ازای یک کیلو مول سوخت محاسبه شده است و نرخ جرمی سوخت در محاسبه نهایی نرخ هوا آورده شده است.

پنج معادله و پنج مجهول داریم بنابراین مسئله قابل حل میشود.

$$\dot{m}_{air_1} = n_{air_1} \times MW_{air} = 17.03 \times 28.96 \text{ kg/s}$$

ER2:

در مرحله دوم احتراق، فرآورده های مرحله اول با هوای ورودی واکنش داده و داریم:



بقای اجزای اتمی:

$$[C]: n_{CO_2-1} = n_{CO_2-2}$$

$$[H]: 2(n_{H_2O-1}) = 2(n_{H_2O-2})$$

$$[O]: n_{H_2O-1} + 2(n_{CO_2-1}) + 2(n_{O_2-1}) + 2(n_{air-2}) = n_{H_2O-2} + 2(n_{CO_2-2}) + 2(n_{O_2-2})$$

$$[N]: (n_{air-1} \times 3.76) + (n_{air-2} \times 3.76) = 2(n_{N_2-2})$$

بقای انرژی:

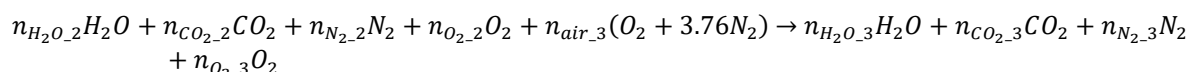
$$\sum n_i [\bar{h}_f^0(T_i) + (\bar{h}^0(T_i) - \bar{h}_f^0(298K))]_i = \sum n_o [\bar{h}_f^0(T_o) + (\bar{h}^0(T_o) - \bar{h}_f^0(298K))]_o$$

پنج معادله و پنج مجهول داریم بنابراین مسئله قابل حل میشود.

$$\dot{m}_{air-2} = n_{air-2} \times MW_{air} = 3.713 \times 28.96 \text{ kg/s}$$

ER3:

همانند مرحله قبل، محصولات احتراق با هوا ورودی واکنش داده و داریم:



بقای اجزای اتمی:

$$[C]: n_{CO_2-2} = n_{CO_2-3}$$

$$[H]: 2(n_{H_2O-2}) = 2(n_{H_2O-3})$$

$$[O]: n_{H_2O-2} + 2(n_{CO_2-2}) + 2(n_{O_2-2}) + 2(n_{air-3}) = n_{H_2O-3} + 2(n_{CO_2-3}) + 2(n_{O_2-3})$$

$$[N]: (n_{air-2} \times 3.76) + (n_{air-3} \times 3.76) = 2(n_{N_2-3})$$

بقای انرژی:

$$\sum n_i [\bar{h}_f^0(T_i) + (\bar{h}^0(T_i) - \bar{h}_f^0(298K))]_i = \sum n_o [\bar{h}_f^0(T_o) + (\bar{h}^0(T_o) - \bar{h}_f^0(298K))]_o$$

پنج معادله و پنج مجهول داریم بنابراین مسئله قابل حل میشود.

$$\dot{m}_{air-3} = n_{air-3} \times MW_{air} = 13.6 \times 28.96 \text{ kg/s}$$

هوای ورودی کل از جمع هوای ورودی از سه مرحله قبل بدست میاد و داریم:

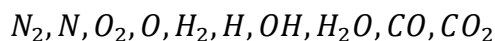
$$\dot{m}_{air,total} = \dot{m}_{air-1} + \dot{m}_{air-2} + \dot{m}_{air-3}$$

نتایج استخراج شده از EES :

$$\dot{m}_{air, total} = 3.975$$

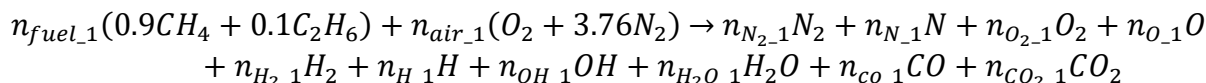
مسئله دوم:

در این قسمت، احتراق ناقص داریم و محصولات احتراق عبارتند از :



ER1:

با توجه به محصولات احتراق میتوان واکنش سوخت و هوا رو به صورت زیر نوشت:



معادلات حاکم: بقای انرژی، بقای اجزای اتمی، دبی ورودی سوخت و معادلات قابل استخراج مربوط به ثابت تعادل.

$$\dot{m}_{fuel} = 0.07 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{fuel} = n_{fuel_1} \times MW_{fuel} \rightarrow n_{fuel} = \frac{0.07 \text{ kg/s}}{(0.9 \times 16.043 + 0.1 \times 30.69) \text{ kg/mol}} = 4.01 \text{ kmol}$$

بقای اجزای اتمی:

$$[C]: n_{fuel_1} \times (0.9 + 0.1 \times 2) = n_{CO_1} + n_{CO_2_1}$$

$$[H]: n_{fuel_1} \times (0.9 \times 4 + 0.1 \times 6) = 2(n_{H_2_1}) + n_{H_1} + n_{OH_1} + 2(n_{H_2O_1})$$

$$[O]: 2(n_{air_1}) = 2(n_{O_2_1}) + n_{O_1} + n_{OH_1} + n_{H_2O_1} + n_{CO_1} + 2(n_{CO_2_1})$$

$$[N]: 2(n_{air_1}) = 2(n_{N_2_1}) + n_{N_1}$$

بقای انرژی:

$$\sum n_i [\bar{h}_f^0(T_i) + (\bar{h}^0(T_i) - \bar{h}_f^0(298K))]_i = \sum n_o [\bar{h}_f^0(T_o) + (\bar{h}^0(T_o) - \bar{h}_f^0(298K))]_o$$

ثابت تعادل:

$$k_p = \prod_i x_i^{(v_i'' - v_i')} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{(v_i'' - v_i')}$$

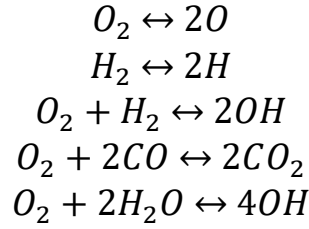
$$k_p = \exp \left(- \frac{\Delta G^0}{R_u T} \right)$$

با مساوی قرار دادن دو معادله بالا به معادله سومی میرسیم که به شرح زیر میباشد. با استفاده از معادله‌ی زیر و واکنش‌های تعادلی داده شده دیگر معادلات را استخراج میکنیم.

$$\prod_i x_i^{(v_i'' - v_i')} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{(v_i'' - v_i')} = \exp \left(- \frac{\Delta G^0}{R_u T} \right)$$

واکنش‌های تعادلی داده شده:





معادلات نمونه استخراج شده برای واکنش سوم به عنوان شرحی بر روند حل مسئله به صورت زیر میباشد:

$$\begin{aligned}
O_2 &\leftrightarrow 2O \\
\Delta G_{13} &= \Delta g_1(T_{out}, P_C) \\
KP &= \left(\frac{n_{O_2-3}}{n_{total_3}} \right)^{(2-0)} \times \left(\frac{n_{O_2}}{n_{total_3}} \right)^{(0-1)} \times \left(\frac{P_C}{P_0} \right)^{(2-1)} \\
KP &= \frac{\exp(-\Delta G)}{R T_{out}}
\end{aligned}$$

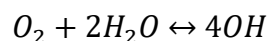
$$\begin{aligned}
N_2 &\leftrightarrow 2N \\
\Delta G_{23} &= \Delta g_2(T_{out}, P_C) \\
KP &= \left(\frac{n_{N_2-3}}{n_{total_3}} \right)^{(2-0)} \times \left(\frac{n_{N_2}}{n_{total_3}} \right)^{(0-1)} \times \left(\frac{P_C}{P_0} \right)^{(2-1)} \\
KP &= \frac{\exp(-\Delta G)}{R T_{out}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_2 &\leftrightarrow 2H \\
\Delta G_{33} &= \Delta g_3(T_{out}, P_C) \\
KKP &= \left(\frac{n_{H_2-3}}{n_{total_3}} \right)^{(2-0)} \times \left(\frac{n_{H_2}}{n_{total_3}} \right)^{(0-1)} \times \left(\frac{P_C}{P_0} \right)^{(2-1)} \\
KP &= \frac{\exp(-\Delta G)}{R T_{out}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
O_2 + H_2 &\leftrightarrow 2OH \\
\Delta G_{43} &= \Delta g_4(T_{out}, P_C) \\
KP &= \left(\frac{n_{OH-3}}{n_{total_3}} \right)^{(2-0)} \times \left(\frac{n_{H_2-3}}{n_{total_3}} \right)^{(0-1)} \times \left(\frac{n_{O_2-3}}{n_{total_3}} \right)^{(0-1)} \times \left(\frac{P_C}{P_0} \right)^{(2-2)} \\
KP &= \frac{\exp(-\Delta G)}{R T_{out}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
O_2 + 2CO &\leftrightarrow 2CO_2 \\
\Delta G_{53} &= \Delta g_5(T_{out}, P_C) \\
KP &= \left(\frac{n_{CO_2-3}}{n_{total_3}} \right)^{(2-0)} \times \left(\frac{n_{CO-3}}{n_{total_3}} \right)^{(0-2)} \times \left(\frac{n_{O_2-3}}{n_{total_3}} \right)^{(0-1)} \times \left(\frac{P_C}{P_0} \right)^{(2-1)}
\end{aligned}$$

$$KP = \frac{\exp(-\Delta G)}{R T_{out}}$$



$$KP = \left(\frac{n_{OH_3}}{n_{total_3}} \right)^{(4-0)} \times \left(\frac{n_{O_2}}{n_{total_3}} \right)^{(0-1)} \times \left(\frac{n_{H_2O_3}}{n_{total_3}} \right)^{(0-2)} \times \left(\frac{P_C}{P_0} \right)^{(4-3)}$$

$$KP = \frac{\exp(-\Delta G)}{R T_{out}}$$

از روابط زیر در معادلات بالا جهت وارد کردن کد در نرم افزار استفاده میشود.

$$n_{tot} = n_{N_2} + n_N + n_{O_2} + n_O + n_{H_2} + n_H + n_{OH} + n_{H_2O} + n_{CO} + n_{CO_2}$$

معادلات بالا را برای دو حجم کنترل دیگر به ترتیب بالا استخراج میکنیم.

به منظور همگرایی جوابها و پاسخ بهینه، حدس های اولیه و بازه ی هر پارامتر به صورت منطقی مشخص شده است و یا از بخش اول استخراج شده است.

$$\dot{m}_{air, total} = 3.975$$

همانگونه که مشاهده میشود نرخ جرمی هوای ورودی بر هر دو گونه احتراق یکسان به دست آمده است.

بخش دوم:

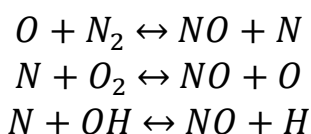
در این بخش به بررسی میزان آلاینده NO_x توسط محفظه احتراق میپردازیم.

مسئله اول:

در این قسمت با استفاده از معادلات مربوط به سینتیک احتراق، به استخراج غلظت NO در هر یک از خروجی ها میپردازیم.

فرضیات لازم برای حل مسئله در صورت پروژه آورده شده، با استفاده از داده های مربوط به بخش اول داریم:

معادلات تعادلی:



نرخ تغییرات غلظت NO:

$$\frac{dC_{NO}}{dt} = k_{N,1f} C_{N_2} C_O - k_{N,1r} C_{NO} C_N + k_{N,2f} C_N C_{O_2} - k_{N,2r} C_{NO} C_O + k_{N,3f} C_N C_{OH} - k_{N,3r} C_{NO} C_H$$

با ساده سازی معادله بالا به معادله زیر میرسیم:

$$\frac{dC_{NO}}{dt} + C_{NO}(k_{N,1r} C_N + k_{N,2r} C_O + k_{N,3r} C_H) = k_{N,1f} C_{N_2} C_O + k_{N,2f} C_N C_{O_2} + k_{N,3f} C_N C_{OH}$$

همچنین با توجه به معادلات مربوط به درس و معادلات داده شده در صورت پروژه داریم:

$$C_i = \frac{x_i P}{R_u T}$$

$$t_r = \frac{l}{v}$$

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho A_L}$$

$$\rho = cte \rightarrow \rho = \sum C_i \times MW_i$$

با وارد کردن معادلات بالا در EES و حل آن ها داریم:

$$C_{NO,1} = 3.375E-08 \text{ [kmol/m}^3\text{]}$$

$$C_{NO,2} = 1.875E-07$$

$$C_{NO,3} = 1.388E-09$$

$$C_{NO,tot} = C_{NO,1} + C_{NO,2} + C_{NO,3}$$

$$C_{NO,tot} = 2.227E-07$$

مسئله دوم:

در این مسئله میزان کل این آلاینده در خروجی محفظه احتراق را محاسبه میکنیم:

$$NO_x \text{ total} = NO_{x,out}$$

$$x_{NO,out} = \frac{C_{NO} \times R_u \times T}{P}$$

$$x_{NO,ppm} = x_{NO,out} \times 10^6$$

$$x_{NO,ppm} = 7.727$$