



دانشکده مکانیک

پایان نامه برای دریافت کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
(تبدیل انرژی)

عنوان :

مدلسازی کوره عملیات حرارتی دورانی با روش ناحیه ای

توسط : مرتضی کریمی دمنه

استاد راهنما: دکتر محمد حسن کیهانی

استاد مشاور: دکتر محمد رضا حیرانی نوبری

تیر ۱۳۸۴

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

برگه ارزیابی رساله کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی)

عنوان: مدل سازی کوره عملیات حرارتی دورانی با روش ناحیه ای

دانشجو: مرتضی کریمی دمنه

رشته: مکانیک (تبدیل انرژی)

شماره دانشجویی: ۸۱۴۰۱۰۵

استاد راهنما: دکتر محمد حسن کیهانی (استادیار دانشگاه صنعتی شاهرود)

استاد مشاور: دکتر محمد رضا حیرانی نوبری (استادیار دانشگاه صنعتی امیر کبیر)

در تاریخ ۸۴/۴/۸ جلسه دفاع با حضور اساتید زیر برگزار گردید و با درجه عالی ارزیابی شد:

استاد راهنما: دکتر محمد حسن کیهانی

داوران:

۱- دکتر محمد محسن شاه مردان (استادیار دانشگاه صنعتی شاهرود)

۲- دکتر محمود فرزانه (استادیار دانشگاه صنعتی شاهرود)

مدیریت تحصیلات تکمیلی دانشکده مکانیک: دکتر محمود شریعتی

تقدیم به آنان که مرزهای محدود را باور نداشتند

و اندیشیدند تا ثابت کنند می توان دگرگون زیست.

تشکر و قدردانی

با سپاس فراوان از زحمات و راهنمایی های جناب آقای دکتر محمدحسن کیهانی که در دوران تحصیل و در انجام پروژه مرا یاری کردند ، همچنین تشکر از جناب آقای دکتر محمدرضا حیرانی نوبری استاد گرامی که راهنمایی های ایشان راهگشای انجام این پروژه بود. همچنین از دوست عزیز جناب آقای مهندس محمود نوروزی نیز کمال تشکر را دارم که همواره از همفکری شان استفاده کرده ام.

چکیده :

در رابطه با مدل سازی حرارتی کوره های عملیات حرارتی مطالعات زیادی صورت گرفته . اما پیچیدگی فرآیند مدل سازی ریاضی کوره های عملیات حرارتی برای انطباق شرایط مدل شده کوره با حالت واقعی باعث ایجاد روشهای متفاوت در مدل سازی انتقال حرارت در کوره ها شده است . در این پروژه هدف مدل سازی حرارتی کوره عملیات حرارتی دورانی است که به دلیل هندسه ویژه این دسته از کوره ها مورد توجه قرار گرفته است .

به منظور مدل سازی تشعشع از روش ناحیه ای هاتل و ویژگی های تشعشعی محیط داخل کوره استفاده شده است و با استفاده از روابط فیزیکی بین انتقال حرارت تشعشعی و انتقال حرارت جابجایی و همچنین هدایت حرارتی بار درون کوره موازنه انرژی در نواحی مختلف گرمایی کوره نوشته شده است .

در مدل سازی تشعشع ابتدا محصولات احتراق را با مدل مجموع وزنی گازهای خاکستری شبیه سازی نموده و ضریب وزنی و ضریب جذب گاز واقعی (محصولات احتراق) محاسبه می شود . سطوح تبادل مستقیم به روشهای انتگرال گیری عددی برای نواحی کوره محاسبه شده و با نوشتن موازنه کلی انرژی برای هر ناحیه سطحی و حجمی معادلات حاصل که یک دستگاه معادلات غیر خطی بر حسب دما است با هدف بدست آوردن شار حرارتی ورودی به بار به روش تکراری نیوتن حل می شود . در انتها کوره عملیات حرارتی دورانی با سه ناحیه و پنج ناحیه گازی بررسی شده است و تاثیر پارامترهایی چون پیش گرمایش هوای مصرفی در احتراق و همچنین ضریب صدور دیوارهای کوره بر بازدهی کوره مورد ارزیابی قرار گرفته است .

صفحه	فهرست مطالب :
۱	تقدیم
ب	تشکر و قدردانی
ج	چکیده
د	فهرست مطالب
و	فهرست شکل ها ، عکس ها
ح	فهرست جداول
ط	فهرست علائم و نشانه ها

فصل اول - مقدمه

۲	۱-۱- کوره های عملیات حرارتی
۴	۱-۱-۲- مقایسه ای بین کوره های پخت و کوره های عملیات حرارتی پیوسته
۵	۲-۱- کوره های عملیات حرارتی دورانی
۶	۱-۳- مطالعات انجام شده در کوره های عملیات حرارتی
۸	۱-۴- هدف از مدل سازی

فصل دوم - روش های انتقال حرارت

۱۰	۲-۱- انتقال حرارت در کوره های عملیات حرارتی
۱۱	۲-۲- هدایت
۱۱	۲-۳- جابجایی
۱۲	۲-۴- تشعشع
۱۳	۲-۵- مدل احتراق گاز طبیعی در کوره های عملیات حرارتی

فصل سوم - مدل تشعشعی سطوح و گازها

۱۶	۳-۱- انتقال حرارت تشعشعی از سطوح و گازها
۱۸	۳-۲- صدور و جذب تشعشع بوسیله گازها
۱۹	۳-۳- گازهای غیر خاکستری

۲۱ ۳-۴- مدل تلفیقی گاز خاکستری برای محصولات احتراق.....

فصل چهارم - مدل سازی تشعشعی کوره عملیات حرارتی دورانی

- ۲۵ ۴-۱- مدل تشعشعی در کوره های عملیات حرارتی
- ۲۵ ۴-۱-۱- مدل شار تشعشعی
- ۲۶ ۴-۱-۲- روش های آماری
- ۲۶ ۴-۱-۳- تحلیل ناحیه ای
- ۲۷ ۴-۲- پیش زمینه ای از روش ناحیه ای
- ۲۸ ۴-۲-۱- سطوح تبادل مستقیم
- ۳۰ ۴-۲-۲- سطوح تبادل کل
- ۳۰ ۴-۲-۳- محاسبه سطوح تبادل کل
- ۳۴ ۴-۲-۴- قوانین جمع پذیری در سطوح تبادل مستقیم
- ۳۵ ۴-۳- سطوح شار مستقیم
- ۳۷ ۴-۴- معادلات موازنه انرژی تشعشعی

فصل پنجم - مدل سازی ریاضی

- ۴۰ ۵-۱- مدل ریاضی اعمالی برای کوره عملیات حرارتی دورانی
- ۴۲ ۵-۲- موازنی انرژی کلی برای ناحیه حجمی
- ۴۳ ۵-۳- مدل سازی انجام شده در کوره عملیات حرارتی دورانی
- ۴۵ ۵-۴- حل عددی دستگاه معادلات غیر خطی
- ۴۷ ۵-۵- انجام شبیه سازی در کوره عملیات حرارتی دورانی
- ۵۰ ۵-۶- هدایت در قطعات کاری درون کوره

فصل ششم - بحث و نتیجه گیری

- ۵۵ ۶-۱- مدل سازی احتراق و گاز غیر خاکستری
- ۶۲ ۶-۲- شبیه سازی کوره عملیات حرارتی دورانی
- ۶۷ ۶-۳- کوره عملیات حرارتی دورانی با سه ناحیه گازی
- ۷۳ ۶-۴- کوره عملیات حرارتی دورانی با پنج ناحیه گازی
- ۸۱ ۶-۵- پیشنهادها
- ۸۲ ۶-۶- فهرست منابع و مراجع

فهرست شکل ها و عکس ها

- ۱- نوع کوره های بارگذاری نوبتی ۳
- ۲- کوره های از نوع پیوسته ۴
- ۳- کوره های عملیات حرارتی دورانی ۶
- ۴- شکل های مختلف انتقال حرارت در کوره های احتراقی ۱۱
- ۵- توزیع دمایی و طیفی توان صدور جسم سیاه ۱۶
- ۶- تبادل تشعشع برای محفظه ای با سطوح خاکستری ۱۸
- ۷- ضریب صدور محصولات احتراق وقتی $PH_2O/PCO_2 = 2$ ۲۰
- ۸- ضریب صدور محصولات احتراق وقتی $PH_2O/PCO_2 = 1$ ۲۱
- ۹- معرفی پارامترهای موثر بر محاسبه سطوح تبادل مستقیم ۲۸
- ۱۰- تشعشع ورودی و صادر شده از یک سطح ۳۱
- ۱۱- موازنه انرژی روی سطح ۳۱
- ۱۲- منحنی آنتالپی و گرمای ویژه در محصولات احتراق ۵۵
- ۱۳- منحنی آنتالپی و گرمای ویژه برای هوای احتراقی ۵۶
- ۱۴- اثر پیش گرمایش هوای مصرف در انرژی احتراقی ۵۷
- ۱۵- مقایسه مدل سازی گاز غیر خاکستری با منحنی هاتل ۵۸
- ۱۶- مقایسه منحنی ضریب صدور مدل سازی شده با منحنی هاتل ۵۹
- ۱۷- تاثیر دمای گاز بر ضریب صدور گاز واقعی ۶۰
- ۱۸- تاثیر PL بر ضریب صدور گاز واقعی ۶۱
- ۱۹- تاثیر درصد هوای اضافی بر ضریب صدور گاز واقعی ۶۲
- ۲۰- شماتیک کوره عملیات حرارتی دورانی ۶۳
- ۲۱- شماتیک کوره عملیات حرارتی دورانی - نمای جانبی ۶۳
- ۲۲- توزیع دمای گاز در هر ناحیه در یک کوره با سه ناحیه گازی ۶۸
- ۲۳- مصرف سوخت در هر ناحیه گازی برای کوره با سه ناحیه گازی ۶۹

- ۲۴- اثر پیش گرمایش هوای احتراق در مصرف سوخت در کوره
 ۷۰ با سه ناحیه گازی.....
- ۲۵- اثر درصد هوای اضافی بر انرژی هوای پیش گرم شده ۷۱
- ۲۶- تغییرات دمای سطح و مرکز بار استوانه ای در کوره
 ۷۲ با سه ناحیه گازی
- ۲۷- تغییرات اختلاف دمای سطح و مرکز بار استوانه ای در کوره با سه ناحیه گازی ۷۳
- ۲۸- توزیع دمای گاز و دیوار جانبی برای حالت دمای سطح بار معلوم
 ۷۴ در کوره با پنج ناحیه.....
- ۲۹- میزان مصرف سوخت در هر ناحیه برای هوای احتراقی پیش گرم نشده ۷۵
- ۳۰- میزان مصرف سوخت در هر ناحیه برای هوای احتراقی پیش گرم شده ۷۶
- ۳۱- تغییرات کاهش مقدار سوخت مصرفی با پیش گرمایش هوای احتراقی..... ۷۷
- ۳۲- تغییرات دمای سطح و مرکز بار استوانه ای در کوره با پنج ناحیه گازی ۷۸
- ۳۳- تاثیر ضریب صدور دیوارهای کوره بر بازدهی حرارتی ۷۹
- ۳۴- تاثیر ضریب صدور دیوارهای کوره بر مصرف سوخت ۸۰

فهرست جداول

- ۱- مقایسه کوره های پخت و پیوسته ۴
- ۲- خصوصیات گاز طبیعی مصرفی در مدلسازی..... ۱۴
- ۳- ضرایب وزنی در مدل سازی گاز غیر خاکستری ۲۲
- ۴- وابستگی سطوح تبادل یا فاکتورهای تشعشی ۲۷
- ۵- سطوح تبادل مستقیم برای گاز شفاف در کوره پنج ناحیه ای ۶۵
- ۶- مقایسه مقدار دقیق و مقدار محاسباتی سطوح در کوره پنج ناحیه ای..... ۶۶
- ۷- سطوح تبادل مستقیم برای گاز خاکستری در کوره پنج ناحیه ای ۶۷
- ۸- بازدهی حرارتی در کوره عملیات حرارتی دورانی با سه ناحیه گازی ۷۱
- ۹- بازدهی مصرف سوخت با پیش گرم کوره هوای مصرفی..... ۷۷

فهرست علائم

A - مساحت سطح (m^2)

$a_g a_{g,n}$ - ضرایب وزنی در مدل تلفیقی گاز خاکستری

C_p - گرمای مخصوص در فشار ثابت ($Jkg^{-1}K^{-1}$)

CV_{net} - ارزش حرارتی سوخت (MJm^{-3})

D - قطر (m)

E - توان صدور جسم سیاه (Wm^{-2})

D_{eq} - قطر هیدرولیکی (m)

$\overline{s_i s_j}$ - سطح تبادل مستقیم سطح به سطح (m^2)

$\overline{g_i g_j}$ - سطح تبادل مستقیم گاز به گاز (m^2)

$\overline{g_i s_j}$ - سطح تبادل مستقیم گاز به سطح (m^2)

Gr - عدد گرافش

H - تشعشع تابیده (W)

h - ضریب جابجایی ($wm^{-2}k^{-1}$)

$H(T)$ - انتالپی مخصوص (Jkg^{-1})

I - شدت تابش ($wm^{-2}Sr^{-1}$)

i, j, k - بردارهای واحد

K - ضریب میرایی تشعشعی (m^{-1})

kg - ضریب جذب گاز خاکستری ($m^{-1}atm^{-1}$)

L - طول (m)

L_m - طول متوسط پرتو (m)

m - نرخ جریان جرمی (kg/s)

Nu - عدد نوسلت

P - فشار مطلق کل (Nm^{-2})

p - فشار جزئی (Nm^{-2})

pr - عد پراتل

P_s - نسبت حجمی محصولات احتراق به سوخت

Q - انتقال حرارت (w)

q - شار حرارتی (wm^{-2})

r, R - فاصله شعاعی (m)

Re - عدد رینولدز

R_s - نسبت حجمی هوا به سوخت

$\overline{S_i S_j}$ - سطح تبادل مستقیم سطح به سطح (m^2)

$\overline{G_i G_j}$, $\overline{G_i S_j}$, $\overline{S_i S_j}$ - سطوح تبادل کل (m^2)

$\overline{S_i S_j}$, $\overline{G_i S_j}$ - سطوح شار مستقیم (m^2)

$\overline{G_i S_j}$, $\overline{G_i G_j}$ - سطوح شار مستقیم (m^2)

T - دما (K)

t - زمان (s)

V - نرخ جریان حجمی ($m^3 s^{-1}$)

W - تشعشع خارج شده (w)

x - درصد هوای اضافی (%)

فهرست علائم یونانی :

α - ضریب جذب

ε - ضریب صدور

θ - زاویه (rad)

η - بازده حرارتی (%)

μ - ویسکوزیته دینامیکی (Nsm^{-2})

ρ - چگالی (kgm^{-3}) و ضریب انعکاسی

σ - ثابت استفن بولتزمن ($wm^{-2}k^{-4}$)

τ - ضریب عبور

فهرست ضمایم :

- الف- مشخصات حرارتی مواد عایق مصرفی در کوره ها ۸۴
- ب- مشخصات احتراقی سوخت مصرفی در مدل سازی ۸۵
- پ- ضرایب عددی چند جمله ای در محاسبه آنتالپی فلزات ۸۶
- ت- ضرایب چند جمله ای برای محاسبه ضرایب هدایت حرارتی مواد ۸۷
- ث- ضرایب چند جمله ای در محاسبه گرمای مخصوص فلزات ۸۸
- ج- کد برنامه نوشته شده برای محاسبه سطوح تبادل مستقیم ۸۹
- چ- کد برنامه نوشته شده برای تشکیل معادلات غیر خطی و حل آن ۱۰۲
- ح- برنامه اصلی در مدل سازی کوره و بار درون آن ۱۱۰

فصل اول

مقدمه

۱-۱- کوره های عملیات حرارتی

کوره های عملیات حرارتی به آن دسته از کوره ها اطلاق می شود که هدف از بکارگیری آنها بالا بردن دمای فلزات به عنوان عمده ترین بار درون کوره تا دمای مشخصی می باشد ، تا بر آنها عملیات ویژه ای صورت پذیرد و از ویژگی این دسته از کوره ها اینست که تغییر خاص شیمیایی از جمله تغییر فاز فلز و یا همان ذوب شدگی بار درون کوره اتفاق نمی افتد .

مرز پائین دمایی در این نوع از کوره ها بایستی بالاتر از دمای مشخصی باشد و حد بالایی دما نیز توسط دمای تغییر فاز بار درون کوره و فرم خاص دانه بندی فلزات و همچنین نوع عملیات حرارتی لازم محدود می شود .

دمای درون این کوره ها معمولا برای هر ناحیه گرمایی یکنواخت می باشد اما در کوره های یک ناحیه ای از نوع کوره های پخت این دما به زمان وابسته است . در مدل های کوره های پیوسته ماده شارژ شده به درون کوره در طول کوره حرکت می کند و در مناطق مختلف حرارتی، گرم می شود . تفاوت های موجود در عملکرد انواع مختلف کوره های عملیات حرارتی به دو پارامتر طراحی زیر وابسته می باشد [۱]:

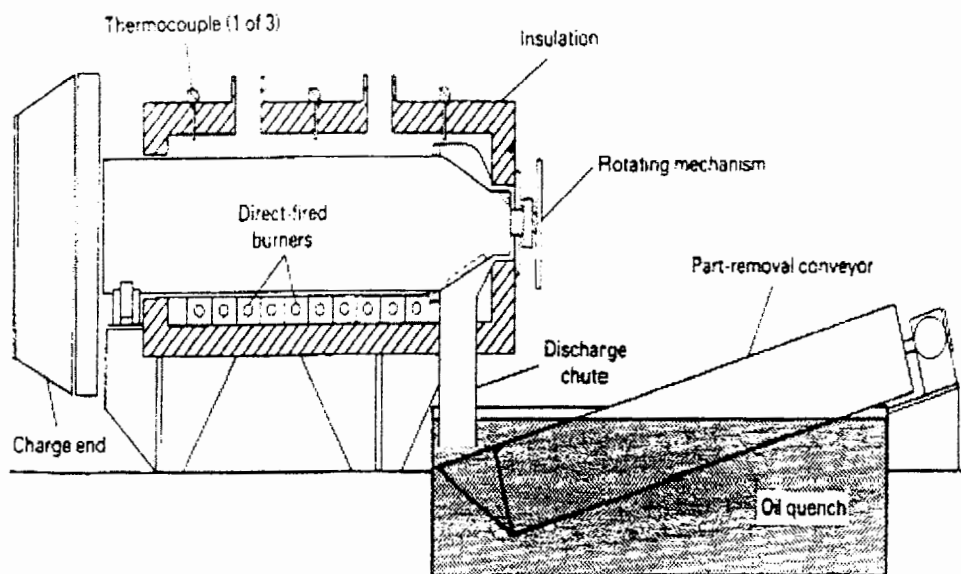
۱- روش تامین حرارت و انرژی در کوره

۲- روش و مکانیزم انتقال بار به درون کوره

در رابطه با تامین حرارت مورد نیاز محیط داخل کوره به طور معمول از یکی از دو منبع استفاده می شود ، که یکی احتراق سوخت های فسیلی می باشد و دیگری تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی گرمایی است . همچنین در مورد چگونگی انتقال بار درون کوره و خروج بار از کوره پس از رسیدن به دمای مشخص ، دو روش متفاوت وجود دارد .

الف- بارگذاری از نوع نوبتی^۱ که این دسته از کوره های عملیات حرارتی را کوره تناوبی می گویند . در این دسته از کوره ها بار در موقعیت مشخصی درون کوره قرار می گیرد و تا رسیدن به دمای مناسب در همان موقعیت قرار می گیرد و پس از رسیدن بار به دمای مشخص از همان در ورودی کوره و یا درب خروج کوره خارج می شود .

^۱ In – and – out



شکل ۱-۱- نوع کوره های بارگذاری نوبتی

ب- کوره های عملیات حرارتی پیوسته^۱ که در این دسته از کوره ها ، بار به درون کوره شارژ می شود و در طول کوره حرکت می کند تا وقتی که به دمای مورد نظر برسد .

در تقسیم بندی کوره های عملیات حرارتی ، کوره های پخت^۲ یا بارگذاری نوبتی را کوره های بدون ناحیه^۳ و کوره های پیوسته را ، کوره هایی با ناحیه بندی دمایی می نامند .

-
- ^۱ Continus
 - ^۲ batch
 - ^۳ Zoneless

۱-۲- کوره های عملیات حرارتی دورانی

یکی از طراحی های خاص و ویژه کوره های عملیات حرارتی که برای انجام کار حرارتی روی بارهای بزرگ استفاده می شود ، کوره های عملیات حرارتی دورانی می باشد .

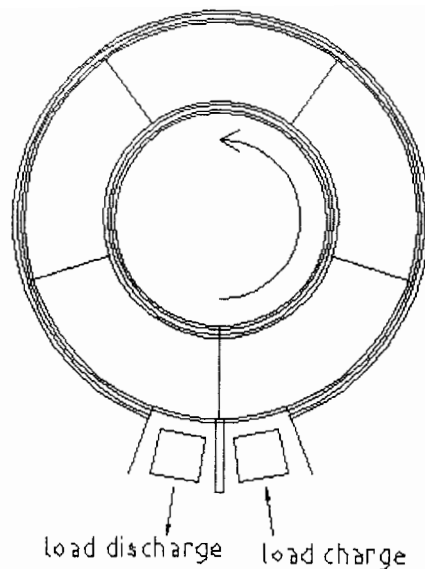
در این نوع از کوره بار که می تواند شامل قالبها و یا شمش ها باشد بر روی شبکه تغذیه کننده ای بر روی کف کوره قرار می گیرد و این بار جابجا می شود . مدل جابجایی بار در این کوره ها به دو صورت گام به گام و یا جابجایی پیوسته می باشد . بنابر تطابقی که بین برنامه ریزی دمایی در قطعه وجود دارد ، هر کوره می تواند به تعدادی ناحیه دمایی مشخص تقسیم شود که هوا و سوخت در هر قسمت بطور خودکار کنترل می شود و بار درون کوره زمان مشخص را در هر ناحیه دمایی می ماند وبعد بار وارد ناحیه دمایی بعدی می شود .

برای ثابت نگه داشتن دمایی محیط داخل کوره در هر ناحیه می توان از دیوارها و تیغه های مختلف استفاده کرد در صورتی که یک فاصله فضایی بین این دیوارهای معلق در کوره دورانی به عنوان گذرگاه عبور قطعات در نظر گرفته می شود. این پرده های جدا کننده معمولا در مکان های زیر نصب می شوند :

- در بین درب ورودی و درب خروجی و این مساله برای حذف تاثیر سرمایش قطعات با حرارت بالا است .

- بین ناحیه گرمادهی و ناحیه پیش گرمایش و هدف از آن کم کردن انتقال حرارت تشعشعی از نواحی با دمایی بالا می باشد .

یکی دیگر از مزیت های کوره های عملیات حرارتی دورانی نسبت به سایر کوره ها پائین بودن پدیده اکسیداسیون قطعات فلزی می باشد بطوری که اکسیداسیون در حدود ۱٪ کم تر است [۵].



شکل ۱-۳- کوره عملیات حرارتی دورانی

۳-۱- مطالعات انجام شده در کوره های عملیات حرارتی :

در طی پنجاه سال گذشته حجم زیادی از مطالعات و تحقیقات انجام شده در زمینه کوره های عملیات حرارتی صورت گرفته است . این مطالعات در کوره های عملیات حرارتی به دو دسته کلی تقسیم می شود .

۱- تامین گرما و حرارت تغذیه کننده کوره

۲- کارکرد کوره در حالتی که مصرف سوخت در حالت کمینه باشد .

در مدل سازی و همچنین طراحی ماشین آلات حرارتی با سوخت فسیلی ، مهارت طراح و همچنین روشهایی که طراح استفاده می کند بطور گسترده ای در چگونگی مدل سازی موثر است . بنابراین چگونگی شبیه سازی یک فرآیند حرارتی در کوره به توسعه شبیه سازی مدل ریاضی و فیزیکی مدل بستگی دارد .

به خصوص در سالهای اخیر با استفاده از امکانات نرم افزاری و قوی تر شدن امکانات محاسباتی و بکارگیری روشهای گوناگون شبیه سازی ، طراحی و مدل سازی کوره های عملیات حرارتی توسعه چشمگیری داشته است.

در گذشته طراحی کوره های عملیات حرارتی بیشتر به نظر و تجربه طراحی و روش تحلیل دستگاه حرارتی وابسته بود و در بعضی موارد این تجربیات به عنوان نمودارهایی مرتبط به یکدیگر ثبت می شد که از این طریق ، مطالعات انجام شده به سایر مهندسين طراح منتقل می شد .

اما امروزه برای شبیه سازی و توسعه روشهای مدل سازی ریاضی و فیزیک کوره های عملیات حرارتی از قابلیت های جدید محاسبات کامپیوتری استفاده می شود .

در تمامی روش های مدل سازی کوره های عملیات حرارتی چنین فرض می شود که حرارت و گرمای زیادی به سطح قطعه کاری درون کوره توسط انتقال حرارت تشعشی^۱ منتقل می شود . گرمای محیط درون کوره با سوختن سوخت گازی تولید می شود و انتقال حرارت جابجایی^۲ و تشعشی به بار صورت می گیرد .

امروزه با گسترش مصرف سوخت گازی بجای سایر سوخت های فسیلی و همچنین بالا رفتن ظرفیت بارگذاری کوره ها ، استفاده از کوره های عملیات حرارتی چند ناحیه ای گسترش یافته است . هاتل^۳ و کوهن مطالعاتی پیرامون توزیع دمایی گازی غیر یکنواخت در یک کوره انجام دادند و ایده سطوح تبادل کل را ارائه دادند [۲].

این مطالعات نشان داد که همواره اختلاف دمایی بین لایه های مختلف و ناحیه مرکزی یک قطعه کاری وجود دارد که می توان این اختلاف دما را با نگر داشتن قطعه کاری در دمای محیط درون کوره به مدت طولانی به کم ترین مقدار رساند .

همچنین سرعت گرمایش به سطح مقطع قطعه کاری و تمایل ماده مورد نظر برای گرم شدن بستگی دارد . کوره عملیات حرارتی به عنوان یک بخش مهم از فرآیند کاری روی قطعه کار نیازمند انرژی است و این انرژی به شکل انرژی شیمیایی ناشی از احتراق سوخت می باشد . بخشی از این انرژی که در تغذیه مواد داخل کوره مورد مصرف است همان انرژی مفید مصرفی است .

^۱ Radiation
^۲ Convection
^۳ Hottel

در مدل سازی کوره های عملیات حرارتی برای کاربردهای کنترلی کوره از مدل های ساده تر و با درصد کمتری از واقعیت های مدل سازی استفاده می شود از آن جمله می توانیم به مطالعات فیتز جرالده^۱ اشاره کرد [۴] که یک رویه محاسباتی را برای انتقال حرارت در احتراق گاز طبیعی را در یک کوره توسعه داد ، همچنین توزیع درجه حرارت قطعه درون کوره عملیات حرارتی را با استفاده از روش های تفاضل محدود برای یک مدل یک بعدی انتقال حرارت هدایت بدست آورد .

فیتز جرالده و شریدن^۲ مطالعاتی پیرامون تشعشع گازها و معادلات موازنه انرژی برای یک سیستم گازی انجام داده اند و با حل دستگاه معادلات درجه حرارت را در محفظه کوره بدست آورده اند که یافته های تجربه را به خوبی تائید کرد [۴] .

۱-۴- هدف از مدل سازی

در اینجا هدف مدل سازی حرارتی کوره عملیات حرارتی از نوع دورانی می باشد که با استفاده از روش های توسعه یافته ای چون روش ناحیه ای^۳ که اولین بار بوسیله هاتل ارائه شد [۲] محیط کوره را شبیه سازی می کنیم و با در نظر گرفتن توزیع دمایی یکنواخت در هر ناحیه با اعمال بار درون کوره، توزیع حرارت بار درون کوره را نیز مدل می کنیم. و در نهایت می توانیم تاثیر پارامترهای مختلف طراحی، از جمله مصرف سوخت تاثیر پیش گرمایش هوای مصرفی - پارامترهای تشعشعی درون کوره و چگونگی مدل سازی گاز حاصل از احتراق سوخت و در نهایت تاثیر تمام عوامل موثر بر نرخ تغییرات دمایی بار درون کوره را بررسی کنیم . برنامه نوشته شده نتایج را برای یک مدل کوره عملیات حرارتی دورانی با پنج ناحیه گرمایی نمایش می دهد همچنین برای شرایط دمایی بار معلوم از مدل با سه ناحیه استفاده شده است .

بدیهی است با تغییر داده های ورودی می توانیم برای سایر مدل های کوره دورانی با تعداد نواحی متفاوت نیز محاسبات را انجام دهیم . اما از آنجا که به طور معمول این دسته از کوره ها در انواع یک تا شش ناحیه ای بکار می روند ، مدل سازی انجام شده رفتار مدل های مشابه را توجیه می کند .

^۱ Fitzgerald

^۲ Shrieden

^۳ Zone method

فصل دوم

روشهای انتقال حرارت

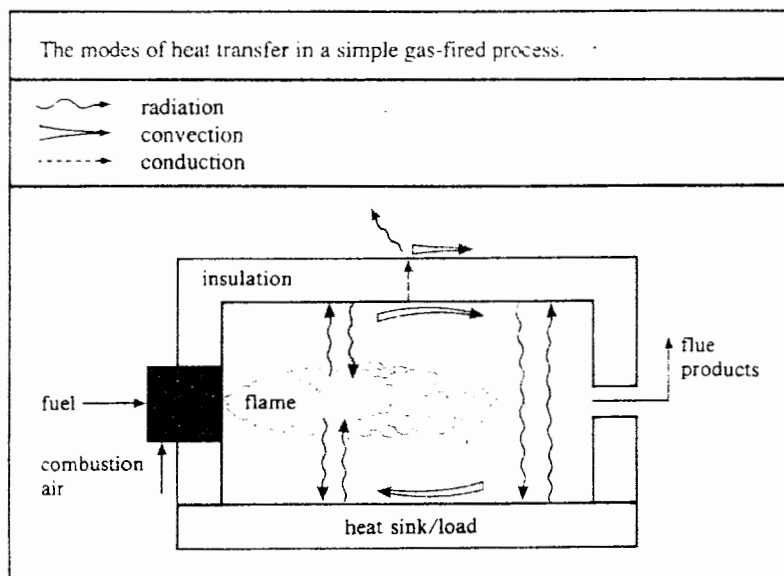
۲-۱- انتقال حرارت در کوره های عملیات حرارتی

همانطور که گفته شد هدف از مدل سازی کامپیوتری یک فرآیند اینست که این امکان ایجاد شود تا با بررسی تغییرات گوناگون روی مدل شبیه سازی شده ، به نتیجه گیری بهتر در طراحی ماشین آلات دست یابیم . و از آنجای که پایه تمام مدل سازی های عددی و محاسباتی ایجاد مدل ریاضی مورد نظر است . بایستی در ابتدا پدیده انتقال حرارت در کوره های عملیات حرارتی مدل سازی ریاضی بشود تا بتوانیم از آن در شبیه سازی کلی استفاده کنیم .

از آنجایی که کوره های عملیات حرارتی و محفظه های احتراقی آنها دماهای بالایی دارند، انتقال حرارت تشعشی مکانیزم غالب انتقال حرارت می باشد . همچنین ضرایب صدور سطوح و رفتار غیر خاکستری گازهای ناشی از محصولات احتراق تاثیر زیادی روی میزان تشعشع دارند . بنابراین ارائه یک مدل ریاضی درست نیازمند تحلیل صحیح از تبادل تشعشی بین سطوح و بار درون کوره و بین سطوح و حجم گاز درون نواحی مختلف کوره عملیات حرارتی است .

انتقال حرارت به صورت های تشعشع - جابجایی - هدایت حرارتی در یک کوره عملیات حرارتی با سوخت فسیلی ما صورت می گیرد .

یک محفظه احتراقی ساده را می توانیم به صورت سطوح عایق و یک چاه حرارتی که همان بار درون کوره می باشد نشان دهیم . بنابراین هر سه صورت انتقال حرارت که بیان شد در این محفظه وجود دارد که می توانیم برای هر حالت انتقال حرارت مدل سازی مربوطه را بدست آوریم . و برای محاسبه کل مجموعه حرارتی بایستی معادلات بطور همزمان یکدیگر را تصدیق کنند . یعنی یک موازنه انرژی برای کل مجموعه نوشته می شود .



شکل ۲-۱- شکل های مختلف انتقال حرارت در کوره های احتراقی

۲-۲- هدایت - انتقال حرارت به صورت هدایت از میان دیواره های کوره عملیات حرارتی که معمولاً عایق هستند صورت می گیرد و به صورت تشعشع و جابجایی آزاد از سطوح بیرونی به محیط منتقل می شود.

$$A_i \frac{T_i - T_o}{\sum (x/\lambda)} = A \varepsilon \sigma (T_o^4 - T_\infty^4) + A h_o (T_o - T_\infty) \quad (1-2)$$

۲-۳- جابجایی - این شکل از انتقال حرارت بین محصولات احتراق با سطح بار درون کوره و همچنین سطح بیرونی دیواره کوره عملیات حرارتی و محیط آزاد صورت می گیرد. در بعضی از کوره های عملیات حرارتی به منظور دستیابی به راندمان بالاتر سعی می شود که انتقال حرارت جابجایی اجباری بالایی بین محصولات احتراق و سطح بار درون کوره بوجود آید.

لبدوف^۱ و سولوکف^۲ پس از انجام آزمایش ها و اندازه گیری های تجربی برای کوره ها رابطه زیر را ارائه دادند: [۵]:

^۱ Lebedov
^۲ Solokov

$$Nu = \frac{hD_{eq}}{k_g} = c \left[\frac{m_g \cdot D_{eq}}{A\mu_q} \right]^{0.75} \quad (2-2)$$

$$D_{eq} = \frac{4 \cdot A}{L_p} \quad (3-2)$$

و در این رابطه A سطح مقطع جریان و m_g دبی جرمی محصولات احتراقی است و ثابت c برای دیواره های انتهایی در کوره برابر $0/283$ و برای سقف کوره $0/175$ و دیواره های کناری $0/142$ می باشد. و μ و kg از مشخصات محصولات احتراق می باشند.

همانطور که گفته شد علاوه بر جابجایی درون فضای احتراقی، روی سطح بیرونی دیواره های کوره نیز جابجایی آزاد وجود دارد. این جریان روی سطح بوسیله عدد گراشف^۱ و عدد پرانتل^۲ توصیف می شود و در اینجا از روابط پیشنهادی جابجایی آزاد استفاده می شود [۶].

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h} \cdot l}{K} = a \{Gr \cdot pr\}^b \quad (4-2)$$

برای جریان آرام می توانیم $b=0,25$ را در نظر بگیریم و برای جریان مغشوش $b=0,33$ می باشد. با توجه به اینکه دیواره مورد نظر عمودی و یا افقی است می توانیم روابط را بدست آوریم. همچنین عدد a بستگی به عمودی و افقی بودن دیواره ها دارد.

۴-۲- تشعشع - در بیشتر کوره های عملیات حرارتی با سوخت گازی می توانیم انتقال حرارت تشعشعی ناشی از شعله غیر درخشان^۳ و تشعشع از گازهای محصولات احتراقی در نظر بگیریم. در فرآیند احتراق سوخت های فسیلی، گازهای حاصل از محصولات احتراق شامل SO_2, CO, CO_2, H_2O می باشد. اما در مدل سازی تشعشعی گاز توجه ما معطوف به CO_2, H_2O است چون غلظت این گازها در محصولات احتراق بیشتر است.

^۱ Grashof

^۲ Prantle

^۳ Non-Luminous

رفتار گازها را در تشعشع می توانیم به دو صورت تقسیم کنیم، دسته اول گازهایی مانند O_2, N_2, H_2 و هوای خشک است که دارای ساختار مولکولی متقارن هستند که دسته دوم گازهایی چون CO_2, H_2O می باشد که دارای مولکول قطبی هستند و انرژی تشعشعی را جذب و صادر می کنند.

۲-۵- احتراق گاز طبیعی در کوره های عملیات حرارتی

تنوع و گوناگونی مشعل های گازسوز و دستگاه های احتراق بسیار زیاد است. اما آنچه در احتراق کوره های عملیات حرارتی نیاز است ، تعیین ترکیب گازهای حاصل از احتراق و خصوصیات ترمودینامیکی احتراق می باشد.

در این مدل احتراق، نسبت هوا به سوخت – نرخ جریان سوخت مصرفی در هر ناحیه گرمایی، ارزشی حرارتی سوخت مصرفی، درصد هوای اضافی مورد مصرف در احتراق و خصوصیات وابسته به دمای محصولات احتراق مورد استفاده می باشد .

به عبارت دیگر از خصوصیات ترمودینامیکی زیر در مدل سازی استفاده می کنیم [۴].

- ارزش حرارتی سوخت (CV_{net})

- نسبت حجمی هوا به سوخت استوکیومتریک (R_s)

- نسبت حجمی محصولات احتراق به سوخت (P_s)

- چگالی سوخت مصرفی (ρ_a)

- آنتالپی ویژه محصولات احتراق بصورت تابعی از دما ($H_g(T)$)

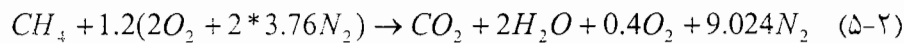
- درصد هوای اضافی در احتراق سوخت (X)

در این شبیه سازی در رابطه با کوره عملیات حرارتی دورانی از سوخت گاز طبیعی که در حدود ۹۵٪ از متان تشکیل شده است و سایر ترکیبات و خصوصیات ترمودینامیکی آن بر اساس جدول زیر می باشد.

احتراق گاز طبیعی با فرض ۲۰٪ هوای اضافی صورت می گیرد [۷].

Properties of a typical natural gas from the North Sea and of its stoichiometric products of combustion						
Composition (% by volume):						
CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	N ₂
94.4	3.22	0.6	0.2	0.07	0.05	1.46
Property:						
CV _{gross}				38.69 × 10 ⁶		J m ⁻³ (s)
CV _{net}				34.91 × 10 ⁶		J m ⁻³ (s)
Density ρ _g				0.719		kg m ⁻³ (s)
Air/fuel ratio R _s				9.76		m ³ (s) m ⁻³ (s)
Combustion product/fuel ratio P _s				10.785		m ³ (s) m ⁻³ (s)
Adiabatic flame temperature				2220		K
Combustion product composition (% by volume):						
CO ₂	H ₂ O	N ₂				
9.627	18.753	71.617				

جدول ۲-۱- خصوصیت گاز طبیعی مصرفی در مدل سازی



یعنی به ازای هر مول متان در حدود ۱۱/۴۲۴ مول هوا مصرف شده است و یک مول دی اکسید کربن و دو مول آب و ۰/۴ مول اکسیژن و ۹/۰۲۴ مول نیتروژن تولید شده است .
در این مدل احتراقی دمای آدیاباتیک شعله بدون گرمایش هوای احتراق در حدود 2070° K می باشد و نسبت فشار جزئی آب به دی اکسید کربن در محصولات احتراق تقریباً برابر ۲ است .

$$\frac{P_w}{P_c} \cong 2 \quad (6-2)$$

نکته دیگری که لازم به ذکر است اینست که ترکیب گازی محصولات حاصل از احتراق گاز طبیعی یکنواخت است و محصولات احتراق بدون تجزیه مولکولی فرض می شوند . همچنین احتراق سوخت در فشار اتمسفر صورت می گیرد .

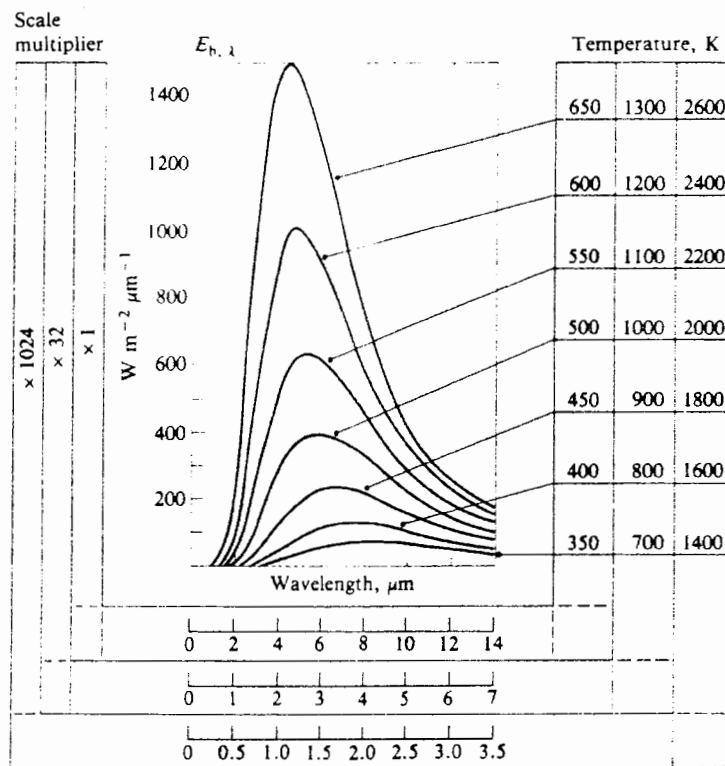
فصل سوم

مدل تشعشعی سطوح و

گازها

۳-۱- انتقال حرارت تشعشعی از سطوح و گازها

همانطور که اشاره شد شکل انتقال حرارت تشعشعی در کوره های عملیات حرارتی شکل غالب می باشد و از آنجایی که محیط درون کوره عملیات حرارتی در هر ناحیه گرمایی از یک سری سطوح دیواره کوره و حجم گازی داخل کوره تشکیل شده بایستی در ابتدا روش مدل سازی تشعشعی این سطوح و حجم گازی بطور دقیق بررسی شود. برای یک جسم که در محدوده حرارتی 500°C تا 1500°C قرار دارد بیشتر از ۹۸٪ انرژی تشعشعی در محدوده طول موجی مادون قرمز قرار دارد. که این طول موج در محدوده $0.176\ \mu\text{m}$ تا $0.125\ \mu\text{m}$ می باشد. بنابراین خاصیت تشعشع یک خاصیت طیفی می باشد. به عنوان نمونه می توانیم تصور^۱ یک جسم سیاه^۲ را بر اساس توزیع دمایی و طیفی آن به صورت زیر نشان دهیم [۸].



شکل ۳-۱- توزیع دمایی و طیفی توان صدور جسم سیاه

^۱ Emissive power
^۲ Black body

در کوره های عملیات حرارتی تمام سطوح غیر سیاه هستند و درعمل سطوح خاکستری^۱ فرض می شوند و این سطوح از کل محیط اطرافشان انرژی تشعشعی جذب می کنند ، همچنین صادر کننده تشعشع به محیط اطراف خودشان می باشند. بنابراین دانستن خصوصیات تشعشعی سطوح در طراحی و مدل سازی حرارتی نقش مهمی دارد .

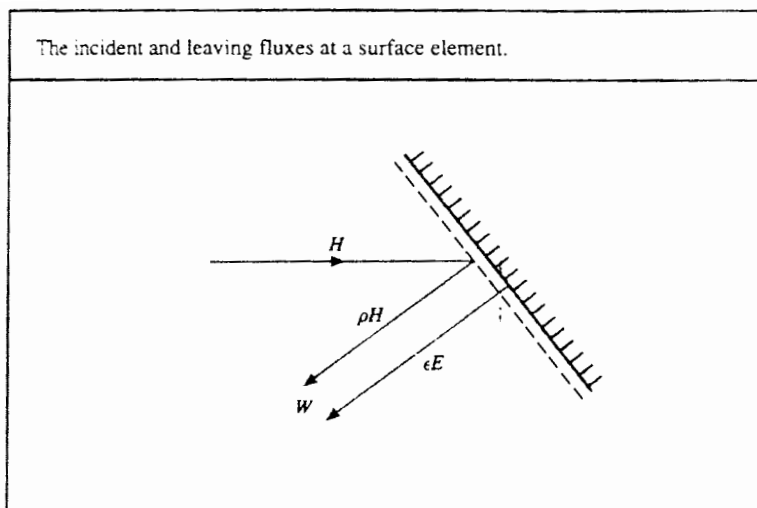
خوشبختانه ضرایب صدور کلی برای مواد مختلف و سطوح گوناگون بوسیله هاتل و ساروفیم^۲ بدست آمده و همچنین می توانیم ضریب جذب و انعکاس سطوح را با فرض سطح خاکستری لامبرت^۳ بدست می آوریم.

$$\epsilon = \alpha = 1 - \rho$$

بنابراین برای یک محفظه تشعشعی بدون در نظر گرفتن تشعشع گازهای حاصل از احتراق درون آن می توانیم تبادل انرژی تشعشعی بین سطوح محفظه را به صورت ریاضی مدل کنیم .
مثلا برای دو سطح ۱ و ۲ می توانیم چنین مدل ریاضی را بنویسیم [۲]:

$$Q_{1 \rightarrow 2} = \frac{E_{b,r1} - E_{b,r2}}{\frac{1}{A_1 \epsilon_1} + \frac{1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} \quad (2-3)$$

^۱ Gray Areas
^۲ Sarofim
^۳ Lambert



شکل ۳-۲- تبادل تشعشع برای محفظه ای با سطوح خاکستری

در شکل بالا H کل تشعشع دریافتی بوسیله سطح است و ρH کل تشعشع منعکس شده از سطح به محفظه است و صدور مستقیم تشعشع از سطح ϵE برابر $\epsilon E_{b/2}$ می باشد که [۲]:

$$E_{b/2} = \sigma T_2^4 \quad (3-3)$$

۳-۲- صدور و جذب تشعشع بوسیله گازها

در گازهای ناقطبی نظیر O_2 یا N_2 یا هوای خشک چون تشعشع را صادر نمی کنند در برابر تشعشع شفاف اند بنابراین از اثرات تشعشع آنها صرفنظر می شود. اما در مورد مولکولهای قطبی نظیر H_2O, CO_2 (بخار) در گستره وسیع دمایی تشعشع را جذب و صادر می کنند.

در چنین گازهایی بر خلاف تشعشع انرژی از جامد یا مایع که دارای توزیع پیوسته ای بر حسب طول موج است، تشعشع گازها در بازه های طول موجی ویژه ای که نوار^۱ نامیده می شود متمرکز است. همچنین جذب تشعشع در یک گاز خاکستری تابعی از قابلیت میرایی^۲ و ضخامت حجم گازی است.

$$-\frac{dI}{I} = Kdx \quad (4-3)$$

^۱ Band
^۲ Attenuation

در رابطه ذکر شده $K(m^{-1})$ ضریب میرایی گاز می باشد که برابر است با کسر میرا شده تشعشع بر واحد طول. در گازها معمولا K را با توجه به ضریب جذب $k_g (m^{-1} atm^{-1})$ گاز و فشار جزئی آن گاز $P(atm)$ درون محفظه تشعشعی بیان می کنند.

$$K = k_g \cdot p \quad (5-3)$$

بنابراین برای یک طول مانند L می توانیم ضریب عبور و همچنین ضریب جذب و صدور گاز خاکستری

$$\tau = \frac{I}{I_0} = \exp(-k_g p L) \quad (6-3) \quad \text{را بدست می آوریم.}$$

$$\alpha_g = 1 - \tau = 1 - \exp(-k_g p L) \quad (7-3)$$

$$\epsilon_g = 1 - \exp(-K_g p L) \quad (8-3)$$

۳-۳- گازهای غیر خاکستری

در مورد تشعشع گازهای غیر درخشان حاصل از احتراق سوخت های فسیلی که معمولا در کوره های عملیات حرارتی چنین فرضی صورت می گیرد. ترکیب گازی محصول احتراقی به شدت غیر خاکستری می باشد. زیرا ترکیبی از دو گاز CO_2, H_2O می باشد که هر کدام تشعشع را در باندهای طیفی حول طول موجهای زیر صادر و جذب می کنند [۴].

$$H_2O: 2.7 - 6.3 - 20(\mu m)$$

$$CO_2: 2.7 - 4.3 - 15(\mu m)$$

دیده می شود که در بعضی از محدوده ها این باندها نسبت به هم همپوشانی دارند و برای تعیین ضریب صدور کلی مخلوط گازهای غیر درخشان می توانیم از ضریب صدور طیفی انتگرال گیری کنیم.

این ضریب صدور تابعی از فشار جزئی P_i هر گاز و طول متوسط پرتو L_m و فشار کلی p و دمای گاز T_g می باشد [۴].

$$\epsilon_g = f(p_i, L_m, P, T_g) \quad (9-3)$$

طول متوسط پرتو^۱ برای قرار خاصی از شکل های هندسی محفظه های تشعشعی از رابطه زیر بدست

می آید. (۱۰-۳) $L_m = 3.5 \frac{V}{A}$ که در این رابطه V حجم گازی مورد نظر است و A کل سطحی که

^۱ Mean beam length

محفظه تشعشعی را تشکیل داده است. هاتل و ساروفیم لیست کاملی از طول متوسط پرتو برای هندسه های ساده ارائه داده اند [۲].

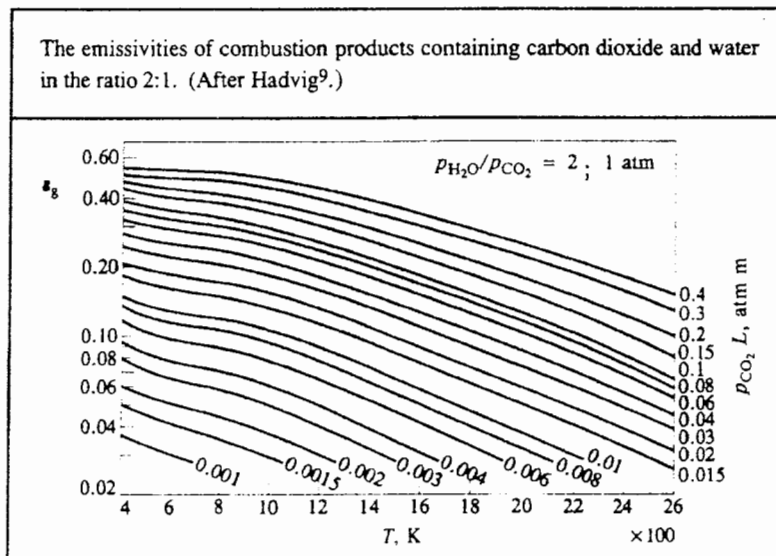
از طرفی ضریب صدور گاز تابعی از دمای سطح محفظه نیز می باشد زیرا توزیع طیفی انرژی منتشر شده توسط سطح نیز تغییر می کند. بنابراین بر اساس قانون پلانک^۱ انرژی جذب شده درون هر باند طیفی گاز تغییر می کند.

$$\alpha_g(T_g, T_s, PL) = \left(\frac{T_g}{T_s}\right)^{0.65} \left\{ \epsilon_g \left(T_s, PL \left(\frac{T_s}{T_g}\right)\right) \right\} \quad (11-3)$$

بدلیل همپوشانی باندهای طیفی ضریب صدور مخلوط دو گاز H_2O و CO_2 مقداری از مجموع تک تک مقادیرشان کمتر است.

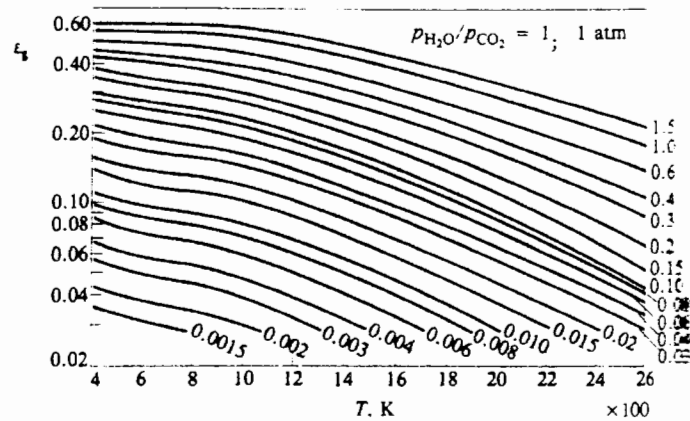
$$\epsilon_g = \epsilon_{H_2O} + \epsilon_{CO_2} - \Delta \epsilon \quad (12-3)$$

داده های تجربی بدست آمده بوسیله هادویگ^۲ به صورت نمودارهایی نشان داده شده است [۴].



شکل ۳-۳- ضریب صدور محصولات احتراق وقتی $P_{H_2O} / P_{CO_2} = 2$

^۱ Planck
^۲ Hadwig



شکل ۳-۴- ضریب صدور محصولات احتراق وقتی $P_{H_2O}/P_{CO_2} = 1$

اما همانطور که مشخص است استفاده از جداول تجربی برای استفاده در مدل سازی محیط تشعشعی نواحی گرمایی کوره های عملیات حرارتی روش مناسبی نمی باشد. (بدلیل محدودیت کاربری در مدل سازی) به همین دلیل بایستی روشی را برای مدل سازی گاز غیر خاکستری بکار ببریم.

۳-۴- مدل تلفیقی گاز خاکستری برای محصولات احتراق

در این روش مدل سازی ضریب صدور کل یک گاز واقعی غیر خاکستری را می توانیم به صورت تلفیق N گاز خاکستری در نظر بگیریم. این مدل را بعضی مراجع مدل جمع وزنی گازهای خاکستری یا بطور خلاصه SWGG نامیده اند.

در این مدل صدور کل برای یک گاز واقعی غیر خاکستری (محصولات احتراق) به صورت عبارت ریاضی مقابل مدل می شود [۲].

$$\epsilon'_g = \sum_{n=1}^N a_{g,n} [1 - \exp(-K_{g,n} pL)] \quad (۳-۱۳)$$

$a_{g,n}$ ضرایب وزنی هستند که شرط $\sum_{n=1}^N a_{g,n} = 1$ در مورد ضرایب وزنی صادق است.

$K_{g,n}$ ضرایب جذب برای گاز خاکستری می باشد و N تعداد گازها خاکستری به علاوه یک گاز شفاف است. در مدل سازی یک گاز واقعی یکی از گازها را شفاف در نظر می گیریم یعنی برای آن $K_{g,n} = 0$ می باشد که از نظر فیزیکی فضاهای موجود طیف بین باندهای محصور را می پوشاند.

$K_{g,n}$ را مستقل از دمای گاز در نظر می‌گیریم و وابستگی به دما را روی ضرایب وزنی $a_{g,n}$ اعمال می‌کنیم. چگونگی این فرض در روش ناحیه ای مشخص می‌شود. [۲].

$$\epsilon'_g = \sum_{n=1}^N a_{g,n}(T_g) [1 - \exp(-K_{g,n}(PH_{20} + P_{CO_2})L)] \quad (14-3)$$

$$a_{g,n}(T_g) = b_{1/n} + b_{2/n}T_g \quad (15-3)$$

مقادیر عددی ضریب وزنی $b_{2/n}, b_{1/n}$ توسط هارول در جدول هایی برای مدل های مختلف گاز خاکستری و شفاف بدست آمده است [۸]. در شبیه سازی که در اینجا صورت می‌گیرد مدل گاز غیر خاکستری را به صورت تلفیقی از دو گاز خاکستری و یک گاز شفاف مدل کرده ایم.

ضرایب وزنی در مدل سازی گاز غیر خاکستری محصولات احتراقی وقتی که $\frac{PH_2O}{P_{CO_2}} = 2$

n	$b_{1/n}$	$b_{2/n} * 10^{-3} (K^{-1})$	$k_{g,n} (m^{-1} atm^{-1})$
۱	۰,۴۳۷	۰,۰۷۱۳	.
۲	۰,۳۹	-۰,۰۰۵۲	۱,۸۸
۳	۰,۱۷۳	-۰,۰۶۶۱	۶۸,۸

جدول ۳-۱- ضرایب وزنی در مدل سازی گاز غیر خاکستری

بطور مشابه می‌توانیم ضریب جذب گاز نسبت به تشعشع ساطع شده از سطحی به دمای T_s را بدست بیاوریم.

$$\alpha_{g,s} = \sum_{n=1}^N a_{s,n}(T_s) [1 - \exp(-k_{g,n}(P_{H20} + P_{CO_2})L)] \quad (16-3)$$

$$a_{s,n}(T_s) = b_{1/n} + b_{2/n}T_s \quad (17-3)$$

مدل های دقیق تری از مدل سازی تلفیقی گاز خاکستری را می توانیم برای ضرایب وزنی با مرتبه های بالاتر از تابع دمای T_g و یا T_s در مراجع مربوطه بدست آوریم [۹].

در مدل سازی های انجام شده تطابق خوبی بین مدل بکار رفته و نتایج تجربی حاصل از داده های هاتل دیده می شود. همچنین تاثیر پارامترهای موثر در شبیه سازی کوره عملیات حرارتی دورانی همچون اثر درصد هوای اضافی بکاررفته در احتراق سوخت بر ضریب صدور گازهای حاصل از احتراق همچنین تاثیر دمای گازهای حاصل از احتراق بررسی شده است.

فصل چهارم

مدل سازی تشعشعی کوره

عملیات حرارتی دورانی

۴-۱- مدل تشعشعی در کوره های عملیات حرارتی

برای مدل سازی انتقال حرارت تشعشعی در محفظه هایی که یک گاز جاذب تشعشع و صادر کننده تشعشع در آن وجود دارد (مثل نواحی حرارتی مختلف در کوره عملیات حرارتی دورانی) روشهای گوناگونی وجود دارد. اصول اولیه تمامی روشهای مدل سازی بر اساس موازنه انرژی تشعشعی روی المان های حجمی و سطحی محفظه تشعشعی می باشد. در اینجا به سه روش متداول مدل سازی اشاره می کنیم و در نهایت روش ناحیه ای را به عنوان روش مورد استفاده در این پروژه می باشد بطور مفصل تشریح می شود.

۴-۱-۱- مدل شار تشعشعی

در این روش معادله موازنه انرژی تشعشعی به صورت زیر نوشته می شود و معادله موازنه انرژی به صورت حل دستگاه معادلات دیفرانسیل برای جهات زاویه ای مشخص می باشد. و برای حل این دستگاه می توانیم از روش استاندارد تفاضل محدود استفاده کنیم. همچنین برای مدل سازی گاز غیر خاکستری ناشی از محصولات احتراق در مدل شار تشعشعی بایستی برای هر جزء از گاز یک مدل تقریبی از مخلوط گاز شفاف و خاکستری در هر معادله موازنه انرژی در نظر گرفته شود [۱۰].

$$(\hat{n}\nabla)I_{\lambda} = -(K_{a,\lambda} + K_{s,\lambda})I_{\lambda} + K_{a,\lambda}I_{b,\lambda} + \frac{K_{s,\lambda}}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_{\lambda} d\omega \quad (1-4)$$

$$(\hat{n}\nabla) = \sum_{n=1}^N (\hat{n}\nabla)I_n \quad (2-4)$$

شکل های اصلی مدل شار تشعشعی در سالهای اخیر توسط لاک وود^۱ و شاه^۲ توسعه داده شده است و منجر به استفاده از روش Discrete Transfer شده است که یکی از روشهای متداول دینامیک سیالات محاسباتی می باشد.

^۱ lockwood
^۲ shah

۴-۱-۲- روش های آماری

یکی از متداول ترین روش های آماری، روش مونت کارلو^۱ می باشد که بوسیله مدل سازی مسیره های احتمالی تعداد زیادی از باندهای انرژی تشعشعی متوسط شار تشعشعی را بدست می آورد. کاربرد اصلی روش مونت کارلو برای مسائل اصلی انتقال حرارت تشعشعی توسط هاول^۲ و استوارد توضیح داده شده است [۱۱ و ۱۲].

۴-۱-۳- تحلیل ناحیه ای

توسعه ابتدایی روش ناحیه ای توسط هاتل و ساروفیم صورت گرفت به همین دلیل گاهی این روش را روش ناحیه ای هاتل می نامند. این روش با تقسیم محوطه تشعشعی به یک سری ناحیه حجمی و سطحی صورت می پذیرد و در نهایت یک موازنه انرژی کلی روی نواحی حجمی و سطحی انتخاب شده محوطه تشعشعی نوشته می شود.

معادله انرژی بر اساس ترم های ضریب تبادل تشعشعی که آنرا سطوح شار مستقیم^۳ می نامیم نوشته می شود.

این سطوح شار مستقیم را با نمادهای $\overline{GG}, \overline{GS}, \overline{GS}, \overline{SS}$ که نشان دهنده سطوح شار مستقیم سطح به سطح - گاز به سطح - سطح به گاز - گاز به گاز می باشد نمایش می دهیم.

به عنوان نمونه، نرخ تبادل تشعشع بین ناحیه حجمی i و ناحیه سطحی j برابر است با:

$$\dot{Q}_{i \rightarrow j} = \overline{G_i S_j} E_{g,i} - \overline{G_i S_j} E_j \quad (3-4)$$

نکته قابل توجه اینست که سطوح شار مستقیم تاثیر پارامترهای چون ضریب صدور سطح و رفتار گاز غیر خاکستری (محصولات احتراق) در تبادل تشعشع درون یک محوطه تشعشعی را بیان می کنند. با نوشتن موازنه انرژی برای هر ناحیه گازی و سطحی به یک سری دستگاه معادله غیر خطی می رسیم که بایستی بطور همزمان حل شوند.

^۱ Monte carlo
^۲ Howell
^۳ Direct flux areas

با حل این دستگاه های معادلات می توانیم دما در هر ناحیه را بدست آوریم و در ادامه شار تشعشعی را محاسبه می کنیم . روش ناحیه ای بطور اختصاصی از روشهایی است که در محدوده وسیعی از مدل سازی های ریاضی کوره های عملیات حرارتی باهندسه های مختلف همچنین برای مدل های تک ناحیه ای تا چند ناحیه ای استفاده می شود [۱۳].

۴-۲- پیش زمینه ای از روش ناحیه ای .

همانطور که گفته شد سطوح شار مستقیم تاثیر تمام فاکتورهای هندسی محفظه تشعشعی ، همچنین تاثیر ضریب جذب و صدور گازهای غیر خاکستری محصولات احتراق و وابستگی به دمای گاز و سطح را شامل می شود . بر اساس تئوری بیان شده توسط هاتل و ساروفیم سطوح شار مستقیم از سطوح تبادل کل محاسبه می شوند و خود سطوح تبادل کل نیز با استفاده از مقادیر عددی سطوح تبادل مستقیم محاسبه می شوند که این سطوح را با $\overline{gg}, \overline{sg}, \overline{ss}$ نشان می دهیم .

می توانیم وابستگی هر کدام از این سطوح تبادل به پارامترهای هندسی - ضریب صدور سطح و ضریب صدور گاز و دمای سطوح و ناحیه گازی را در غالب جدول زیر نمایش داد [۴].

The exchange areas used in the zone method of radiation analysis		
Exchange area	Designation	Function of:
Direct exchange area	$\overline{g_i g_j}, \overline{g_i s_j}, \overline{s_i s_j}$	Geometry, grey gas attenuation coefficient K
Total exchange area	$\overline{G_i G_j}, \overline{G_i S_j}, \overline{S_i S_j}$	Geometry, K , surface emissivities ϵ_i (all i)
Directed flux area	$\overline{G_i G_j}, \overline{G_i S_j}$ $\overline{G_j S_i}, \overline{S_i S_j}$	Geometry, K, ϵ_i Radiation source temperature T_i or $T_{g,i}$

جدول ۴-۱- وابستگی سطوح تبادل با فاکتورهای تشعشعی

۴-۲-۱- سطوح تبادل مستقیم

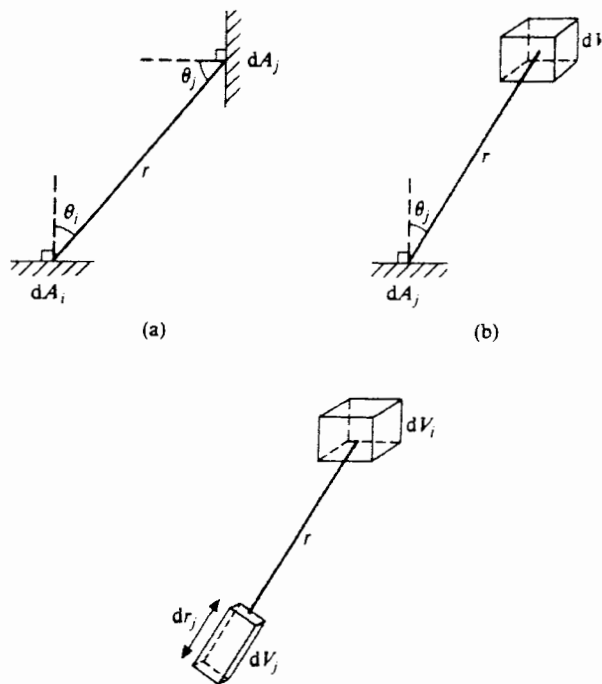
الف- سطح تبادل مستقیم سطح به سطح مستقل از ضریب صدور و یا بازتابش سطح می باشد اما به ضریب میرایی گاز غیر خاکستری درون محفظه تشعشعی وابسته است. اگر این ضریب میرایی را با K نشان بدهیم آنگاه سطح تبادل مستقیم سطح به سطح بر اساس رابطه زیر بیان می شود [۲].

$$\overline{s_i s_j} = \int_{A_j} \int_{A_i} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j \exp(-Kr)}{\pi r^2} dA_i dA_j \quad (4-4)$$

بنابراین اگر به عنوان مثال بخواهیم تشعشع صادر شده از سطح سیاه ناحیه i را به سطح سیاه ناحیه j بدست آوریم.

با توجه به تقارن انتگرال گیری روی سطوح A_j, A_i می توانیم روابطه تقابل بین سطوح تبادل را در نظر بگیریم:

$$\overline{s_i s_j} = \overline{s_j s_i} \quad (4-5)$$



شکل ۴-۱- معرفی پارامترهای موثر بر محاسبه سطوح تبادل مستقیم

ب- سطح تبادل مستقیم سطح به حجم نسبت تشعشع صادر شده از تمام سطح i را به حجم j و برعکس نشان می دهد. همچنین رابطه تقابلی برای سطوح تبادل سطح به حجم نیز معتبر است [۲].

$$(7-4) \quad = 4Kdv_i E_{g/i} \quad \text{صدر تشعشع در } 4\pi \text{ استرادیان (واحد زاویه فضایی)}$$

$$(8-4) \quad = dA_j \cos \theta_j / 4\pi r^2 \quad \text{کسر تشعشع صادره به جزء سطح } dA_j$$

$$(9-4) \quad = \exp(-kr) \quad \text{پارامتر میرایی تشعشع توسط گاز غیر شفاف}$$

$$(10-4) \quad \dot{Q}_{i \rightarrow j} = \frac{kdv_i E_{g/i} dA_j \cos \theta_j \exp(-kr)}{\pi r^2} \quad \text{انرژی تشعشعی از حجم } i \text{ به سطح } j$$

$$(11-4) \quad \frac{\dot{Q}_{i \rightarrow j}}{E_{g/i}} = \int_{A_j} \int_{V_i} \frac{k \cos \theta_j \exp(-kr)}{\pi r^2} dv_i dA_j$$

پ- تبادل حجم به حجم به این صورت تعریف می شود که اگر دوالمان حجمی i و j را در نظر بگیریم آنگاه انرژی تشعشعی از dv_i که توسط dv_j جذب می شود به صورت مقابل است [۲].

$$(12-4) \quad \dot{Q}_{i \rightarrow j} = \frac{k^2 dv_i (dA_j dr_j) \exp(-kr)}{\pi r^2} E_{g/i}$$

بنابراین تعریف سطح تبادل مستقیم بین ناحیه حجمی V_j, V_i عبارتست از :

$$(13-4) \quad \frac{\dot{Q}_{i \rightarrow j}}{E_{g/i}} = \int_{V_j} \int_{V_i} \frac{k^2 \exp(-kr)}{\pi r^2} dv_i dv_j$$

۴-۲-۲- سطوح تبادل کل

نکته ای که در تحلیل تشعشع مورد توجه قرار میگیرد تاثیر پارامترهایی چون ضریب جذب و ضریب صدور سطح محفظه تشعشعی می باشد. بنابراین تشعشع تابیده شده به سطحی از محفظه که هم غیر سیاه است و هم دارای قابلیت های انعکاسی و صدور تشعشع می باشد بایستی قابل محاسبه باشد. بنابراین نرخ تبادل بین دو جفت سطح i, j با در نظر گرفتن تاثیر پارامترهای انعکاسی سطح درون محفظه تشعشعی با سطح تبادل کل $\overline{S_i S_j}$ متناسب است [۲].

$$\dot{Q}_{i \rightarrow j} = \overline{S_i S_j} (E_i - E_j) \quad (۴-۱۴)$$

بطور مشابه می توانیم همچنین تعریف را برای تبادل تشعشع بین یک سطح و یک حجم گازی و یا دو حجم گازی در نظر بگیریم و سطوح تبادل کل $\overline{G_i G_j}, \overline{S_i G_j}$ را تعریف کنیم. بنابراین دیده می شود که مجموعه سطوح تبادل کل، مشخصات کاملی از تاثیر شکل محفظه ضریب صدور سطوح و ضرایب جذب گاز روی انتقال حرارت تشعشعی را فراهم می کند. برای محفظه خاکستری، سطوح تبادل کل مستقل از دما است. بنابراین برای نواحی سطحی و گازی انتخاب شده ضریب صدور و ضریب جذب گاز معلوم، سطوح تبادل کل تنها یکبار محاسبه می شود.

۴-۳- محاسبه سطوح تبادل کل

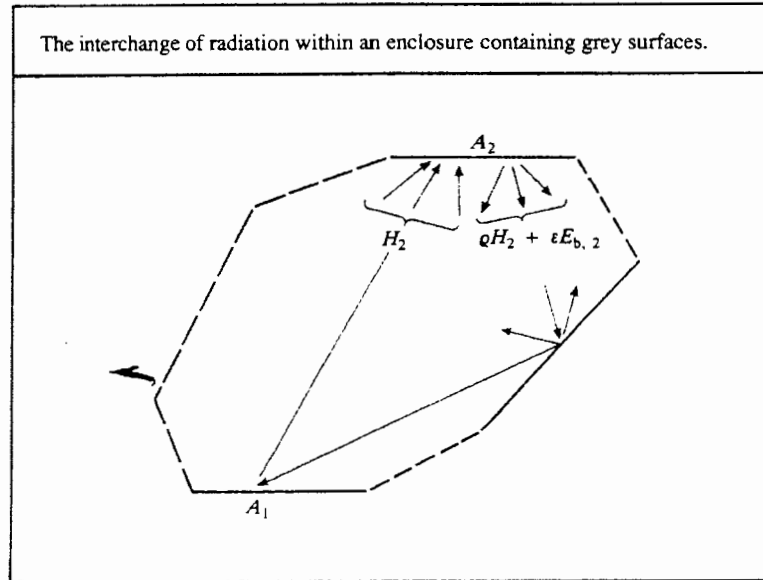
لازمه محاسبه سطوح تبادل کل برای سطوح و حجم ها در یک محفظه تشعشعی بدست آوردن معادلی موازنه انرژی تشعشعی برای هر ناحیه است. روشی که ما برای محاسبه سطوح تبادل کل استفاده کرده ایم توسط نوبل^۱ ارائه شده است [۱۴].

مطابق شکل سطح خاکستری را با ضریب صدور ϵ در نظر می گیریم. اگر شار تشعشعی ورودی به سطح را با H و شار تشعشعی خروجی از سطح را با W نشان دهیم. با نوشتن موازنه انرژی روی سطح به رابطه مقابل می دهیم:

^۱ Noble

$$W = \varepsilon E + \rho H$$

(۱۵-۴)



شکل ۴-۲- تشعشع ورودی و صادر شده از یک سطح

با فرض اینکه محفظه تشعشعی مورد نظر از تعداد m سطح دلخواه و L حجم گازی تشکیل شده باشد که هر کدام از نواحی هم دما هستند آنگاه می توانیم موازنه انرژی را برای هر المان سطحی چنین بنویسیم :

$$A_i H_i = \sum_{j=1}^m \overline{s_i s_j} W_j + \sum_{j=1}^L \overline{s_i g_j} E_{g,j} \quad (17-4)$$

و اگر رابطه بالا را بتوانیم به شکل ماتریسی بنویسیم ، عبارت زیر بدست می آید :

$$AI.H = \overline{ss}.W + \overline{sg}.E_g \quad (18-4)$$

$$W = \varepsilon I.E + \rho I.H$$

(۱۹-۴)

باید توجه داشت که AI و $\rho I, \varepsilon I$ ماتریس های قطری با عناصر قطری $\rho_i, \varepsilon_i, A_i$ هستند .

به عنوان نمونه می توانیم ماتریس قطری AI را نشان دهیم .

$$AI = \begin{vmatrix} A_1 & 0 & . & . & . & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & . & . & . & . & 0 \\ 0 & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . \\ 0 & 0 & . & . & . & . & A_n \end{vmatrix} \quad (20-4)$$

و بطور مشابه سایر ماتریس های قطری را نیز تشکیل می دهیم.

بنابراین می توانیم انرژی تشعشی خالص خروجی از هر منطقه سطحی i و برای m المان سطحی را به شکل یک معادله ماتریسی بنویسیم .

$$\dot{Q}_i = A_i(W_i - H_i) = A_i \varepsilon_i (E_i - H_i) \quad (21-4)$$

$$\dot{Q}_i = AI.(W - H) = \varepsilon AI.(E - H) \quad (22-4)$$

برای ناحیه حجمی i نیز بطور مشابه موازنه انرژی تشعشی را می نویسیم .

$$4K_i V_i H_{g,i} = \sum_{j=1}^m \overline{g_i s_j} . W_j + W_j + \sum_{j=1}^L \overline{g_i g_j} . E_{g,j} \quad (23-4)$$

در این معادلات Q, W, H, E بردارهایی از مرتبه m هستند در حالیکه W_g, H_g, E_g بردارهایی از مرتبه L هستند . بنابراین $\overline{gg}, \overline{ss}$ ماتریس های متقارن $m*m$ و $L*L$ می باشند که همان سطوح تبادل مستقیم اند .

\overline{gs} ماتریس $L*m$ و \overline{sg} ماتریس $m*L$ می باشد .

برای یک منطقه سطحی که Q_i بیان کننده تشعشع خالص از منطقه سطحی است می توان گفت :

$$\dot{Q}_i = \varepsilon_i A_i E_i - \sum_{j=1}^m \overline{S_i S_j} \cdot E_j - \sum_{j=1}^L \overline{S_i G_j} \cdot E_{g,j} \quad (24-4)$$

برای یک منطقه حجمی i می توانیم موازنه انرژی تشعشی را بصورت زیر بنویسیم :

تشعشع جذب شده توسط حجم V_i از تمام جهات = مجموع تشعشع صادر شده از سطوح و نواحی حجمی دیگر .

$$\dot{Q}_{g,i} = \sum_{j=1}^L \overline{G_i G_j} E_{g,j} + \sum_{j=1}^m \overline{G_i S_j} E_j - 4K_i V_i E_{g,i} \quad (25-4)$$

$$\dot{Q}_{g,i} = 4k_i V_i (H_{g,i} - E_{g,i}) \quad (26-4)$$

با نوشتن معادلات موازنه انرژی تشعشی به شکل ماتریسی به معادلات زیر می رسیم :

$$\dot{Q} = \varepsilon AI \cdot E - \overline{SS} \cdot E - \overline{SG} \cdot E_g \quad (27-4)$$

$$\dot{Q}_g = \overline{GG} \cdot E_g + \overline{GS} \cdot E - 4KVI \cdot E_g \quad (28-4)$$

$$\dot{Q}_g = 4KVI \cdot (H_g - E_g) \quad (29-4)$$

با تلفیق معادلات (۱۸-۴) تا (۲۶-۴) عبارت هایی جبری برای مقادیر سطوح تبادل کل $\overline{GG}, \overline{SG}, \overline{SS}$ بدست می آوریم .

$$AI \cdot H = \overline{ss}(\varepsilon I \cdot E + \rho I \cdot H) + \overline{sg} \cdot E_g \quad (30-4)$$

$$H = R \cdot \overline{ss} \cdot \varepsilon I \cdot E + R \cdot \overline{sg} \cdot E_g \quad (31-4)$$

$$R = [AI - \overline{ss} \cdot \rho I]^{-1} \quad (32-4)$$

و بطور مشابه :

$$4KVI.H_g = \overline{gs}(\varepsilon I.E + \rho I.H) + \overline{gg}.E_g \quad (۳۳-۴)$$

$$H_g = [4KVI]^{-1} \cdot [\overline{gs}(\varepsilon I.E + \rho I.H) + \overline{gg}.E_g] \quad (۳۴-۴)$$

حالا اگر معادله (۳۱-۴) را در معادله (۳۴-۴) جایگذاری کنیم :

$$H_g = [4KVI]^{-1} [\overline{gs}(\varepsilon I.E + \rho I.R.\overline{ss}.\varepsilon I.E + \ell I.R.\overline{sg}.E_g) + [\overline{gg}.E_g]] \quad (۳۵-۴)$$

بامرتب کردن عبارت بالا و در نهایت می توانیم فرم ماتریسی نهایی \dot{Q}_i را بدست آوریم.

$$\dot{Q}_i = \varepsilon AI.(E - R.\overline{ss}.\varepsilon IE - R.\overline{sg}.E_g) \quad (۳۶-۴)$$

با مقایسه معادله بدست آمده با معادله دیگر برای \dot{Q}_i یعنی معادله (۲۴-۴) می توانیم فرم ماتریسی سطوح تبادل کل $\overline{SG}, \overline{SS}$ را بدست بیاوریم .

$$\overline{SS} = \varepsilon AI.R.\overline{ss}.\varepsilon I \quad (۳۷-۴)$$

$$\overline{SG} = \varepsilon AI.R.\overline{sg} \quad (۳۸-۴)$$

و بطور مشابه H_g را از معادله موازنه انرژی تشعشعی منطقه گازی محاسبه می کنیم و در نهایت :

$$\overline{GG} = \overline{gs}.\rho I.R.\overline{sg} + \overline{gg} \quad (۳۹-۴)$$

۴-۲-۴- قوانین جمع پذیری برای سطوح تبادل مستقیم :

برای بررسی صحت محاسبات انجام شده در خصوص سطوح تبادل مستقیم که از انتگرال گیری های عمومی محاسبه می شوند می توانیم از قانون جمع پذیری سطوح تبادل مستقیم استفاده کنیم . بدین صورت که بایستی در رابطه زیر در مورد هر ناحیه سطحی و حجمی صادق باشد .

$$A_i = \sum_{j=1}^m \overline{s_i s_j} + \sum_{j=1}^L \overline{s_i g_j} \quad (40-4)$$

$$4k_i V_i = \sum_{j=1}^m \overline{g_i s_j} + \sum_{j=1}^L \overline{g_i g_j} \quad (41-4)$$

روابطی مشابه برای سطوح تبادل کل وجود دارد :

$$\varepsilon_i A_i = \sum_{j=1}^m \overline{S_i S_j} + \sum_{j=1}^L \overline{S_i G_j} \quad (42-4)$$

$$4K_i V_i = \sum_{j=1}^m \overline{G_i S_j} + \sum_{j=1}^L \overline{G_i G_j} \quad (43-4)$$

۴-۳- سطوح شار مستقیم

در بخش مدل سازی گاز غیر خاکستری بیان شد که چگونه ضریب صدور گاز واقعی به ضرایب وزنی $a_{g,n}$ و همچنین دمای گاز وابسته است. شار تشعشی بین دو ناحیه متناسب با ضرایب وزنی بکار رفته و همچنین سطوح تبادل کل می باشد. و این محاسبه برای هر گاز مدل شده توسط مدل جمع وزنی گازهای خاکستری بطور جداگانه محاسبه می شود.

برای هر مدل گاز در مدل سازی گاز غیر خاکستری یک گاز شفاف نیز در نظر گرفته می شود. در این پروژه مدل گاز واقعی تلفیقی از دو گاز خاکستری و یک گاز شفاف می باشد، بنابراین :

$$K_1 = 0$$

$$K_2 = k_2 p$$

$$K_3 = k_3 p$$

به عنوان مثال می خواهیم نرخ شار تشعشی مبادله شده بین ناحیه گازی i در دمای $T_{g,i}$ و سطح j در دمای T_j به صورت مقابل است :

$$Q_{i \rightarrow j} = \overline{G_i S_j} E_{g/i} - \overline{G_i S_j} . E_j \quad (44-4)$$

که در این رابطه $\overline{G_i S_j}, \overline{G_i S_j}$ سطوح شار مستقیم هستند که برابرند با :

$$\overline{G_i S_j} = \sum_{n=1}^{N_g} a_{g,n}(T_{g,i})(\overline{G_i S_j})_{k=k_n} \quad (45-4)$$

$$\overline{G_i S_j} = \sum_{n=1}^{N_s} a_{s,n}(T_j)(\overline{G_i S_j})_{k=k_n} \quad (46-4)$$

به طور مشابه می توانیم سطوح شار مستقیم سطح به سطح و گاز به گاز را نیز بدست آوریم :

$$\overline{S_i S_j} = \sum_{n=1}^{N_s} a_{s,n}(T_i)(S_i S_j)_{k=k_n} \quad (47-4)$$

$$\overline{S_i S_j} = \sum_{n=1}^{N_g} a_{s,n}(T_j)(S_i S_j)_{k=k_n} \quad (48-4)$$

$$\overline{G_i G_j} = \sum_{n=1}^{N_g} a_{g,n}(T_{g,i})(G_i G_j)_{k=k_n} \quad (49-4)$$

$$\overline{G_i G_j} = \sum_{n=1}^{N_s} a_{g,n}(T_{g,i})(G_i G_j)_{k=k_n} \quad (50-4)$$

برای مدل سازی انجام شده در یک کوره عملیات حرارتی دورانی گاز واقعی محصولات احتراقی را با دو گاز خاکستری و یک گاز شفاف مدل کرده ایم یعنی $N_g = 3$ می باشد.

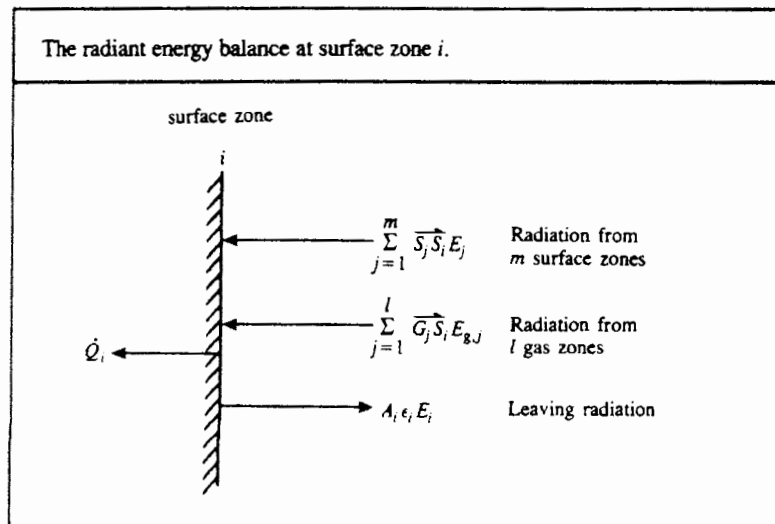
به عنوان مثال اگر بخواهیم شار مستقیم در یک ناحیه گرمایی و برای ناحیه گازی و سطح شماره یک را بدست آوریم . آنگاه چون یک گاز شفاف است بنابراین $\overline{GS_1}(k_1) = 0$ می باشد .

$$\overline{GS_1} = a_2(T_g)\overline{GS_1}(k_2) + a_3(T_g)\overline{GS_1}(k_3) \quad (51-4)$$

یعنی بایستی با توجه به مقادیر مختلف ضریب میرایی گاز خاکستری که در مدل سازی گاز واقعی استفاده کرده ایم ابتدا سطوح تبادل مستقیم را بدست آورده و سطوح تبادل کل متناظر با آن را نیز بدست آوریم تا در نهایت سطوح شار مستقیم متناظر با مدل گاز واقعی مورد نظر محاسبه شود . سایر سطوح شار مستقیم نیز به روش مشابه محاسبه می شوند .

۴-۴- معادلات موازنه انرژی تشعشعی

اگر ناحیه سطحی i و ناحیه گازی j در مجاورت سطح i را در نظر بگیریم. آنگاه می توانیم معادله موازنه انرژی تشعشعی را برای سطح و ناحیه گازی بنویسیم .



شکل ۴-۳- موازنه انرژی روی سطح

اگر $\dot{Q}_{o,i}$ تشعشع خروجی از سطح i باشد و ناحیه سطحی i را خاکستری در نظر بگیریم (در عمل نیز دیواره های عایق نواحی مختلف کوره های عملیات حرارتی را خاکستری در نظر می گیرند) آنگاه می توانیم چنین بنویسیم :

$$\dot{Q}_{o,i} = \left[\sum_{j=1}^m \overline{S_i S_j} + \sum_{j=1}^L \overline{S_i G_j} \right] E_i = \left[\sum_{j=1}^m \sum_{n=1}^{N_g} a_{s,n} (\overline{S_i S_j})_{k=kn} + \sum_{j=1}^L \sum_{n=1}^{N_g} a_{s,n} (\overline{S_i S_j})_{k=k_n} \right] E_i \quad (52-4)$$

با مرتب کردن و تغییر جمع پذیری پارامترها به معادله زیر می‌رسیم :

$$\dot{Q}_{o,i} = \left[\sum_{n=1}^{N_g} a_{s,n} \left\{ \sum_{j=1}^m \overline{(S_i S_j)} + \sum_{j=1}^L \overline{(S_i S_j)} \right\}_{k=k_n} \right] E_i \quad (53-4)$$

اگر عبارت داخل براکت را با استفاده از قوانین جمع پذیری مقایسه کنیم می‌توانیم به عبارت ساده‌تری برسیم.

$$\dot{Q}_{o,i} = \left[\sum_{n=1}^{N_g} a_{s,n} \varepsilon_i A_i \right] E_i \quad (54-4)$$

$$\sum_{n=1}^{N_g} a_{s,n} = 1 \quad (55-4)$$

$$Q_{o,i} = \varepsilon_i A_i E_i \quad (56-4)$$

بنابراین معادله موازنه انرژی تشعشعی بر روی نواحی سطحی یک محفظه تشعشعی به صورت زیر است :

$$\sum_{j=1}^m \overline{S_j S_i} E_j + \sum_{j=1}^L \overline{G_j S_i} E_{g,j} - A_i \varepsilon_i E_i = \dot{Q}_i \quad (57-4)$$

که در این معادله \dot{Q}_i نرخ انرژی ورودی به ناحیه i می‌باشد که در بخش بعد چگونگی محاسبه آن برای کوره‌های عملیات حرارتی دورانی توضیح داده می‌شود.

برای ناحیه گازی محفظه تشعشعی می‌توانیم معادله موازنه انرژی تشعشعی را به صورت زیر بنویسیم:

$$\dot{Q}_{o,i} = 4 \sum_{n=1}^{N_g} a_{g,n} K_{g,n} P_i V_i E_{g,i} \quad (58-4)$$

$$\sum_{j=1}^L \overline{G_i G_j} E_{g,j} + \sum_{j=1}^m \overline{S_j G_i} E_j - 4 \sum_{N=1}^{N_g} a_{g,n} k_{g,n} P_i V_i E_{g,i} = \dot{Q}_i \quad (59-4)$$

فصل پنجم

مدل سازی ریاضی

۵-۱- مدل ریاضی اعمالی برای کوره عملیات حرارتی دورانی

در بخش های قبلی روابط پایه مدل سازی به روش ناحیه ای توضیح داده شد و در این بخش شرایط لازم برای موازنه انرژی نهایی نواحی گرمایی در کوره عملیات حرارتی دورانی و بدست آوردن معادلات موازنه انرژی بیان می شود. با فرض احتراق کامل گاز مصرفی و اینکه محصولات حاصل از احتراق بطور یکنواخت در تمام فضای داخلی محفظه گرمایی کوره بخش شده و در هر ناحیه دمای یکنواختی دارد موازنه انرژی را می نویسیم.

انرژی ورودی به هر ناحیه گرمایی :

$$\dot{Q}_{G,net} + \dot{Q}_a = \dot{V}_G \left[CV_{net} + R_s \left(1 + \frac{X}{100} \right) \rho_a \dot{H}_a(T_a) \right] \quad (۱-۵)$$

در رابطه بالا \dot{V}_G نرخ حجمی سوخت مصرفی در هر ناحیه گرمایی و $\dot{Q}_{G,net}$ انرژی آزاد شده احتراق و \dot{Q}_a انرژی ورودی توسط هوای پیش گرم شده احتراق می باشد.

برای هر ناحیه گرمایی و کوره عملیات حرارتی می توانیم موازنه انرژی شامل ترم های انرژی تشعشی ورودی از تمام سطوح و ناحیه گازی همچنین ترم انرژی اتلافی و سایر عوامل موثر را در نظر بگیریم. معادله موازنه انرژی برای دیواره های داخلی و یا سطح بار که نواحی سطحی هستند :

$$\sum_{j=1}^m \overline{S_j S_i} \sigma T_j^4 + \sum_{j=1}^L \overline{G_j S_i} \sigma T_{g,j}^4 - A_i \varepsilon_i \sigma T_i^4 + A_i \dot{q}_{i,conv} = \dot{Q}_i \quad (۲-۵)$$

بنابراین برای ناحیه حرارتی مورد نظر با m ناحیه سطحی به m معادله می رسیم.

جمله اول در معادله بیانگر مجموع تمام تشعشعات ورودی از تمام سطوح محفظه تشعشی می باشد از جمله خود سطح i جمله دوم معادله معرف مجموع تمام تشعشعات ارسالی از ناحیه حجمی می باشد. جمله سوم معادله تشعشع خروجی و صادر شده از سطح i می باشد و جمله چهارم انتقال حرارت جابجایی به سطح i از محیط گازی درون ناحیه گرمایی کوره را نشان می دهد.

\dot{Q}_i برابر انتقال حرارت به سطح می باشد و چون دمای سطح نامشخص است بایستی \dot{Q}_i را با یک معادله اضافی که وابسته به دمای T_i باشد بدست آوریم بنابراین دو حالت بررسی می شود:

۱- اگر سطح مورد نظر که موازنه انرژی برای آن نوشته شده دیواره کوره باشد در آنصورت T_i وابسته به افت حرارت از دیواره می باشد. در آنصورت اگر دیواره کوره را به صورت عایق چند لایه ای با N لایه در نظر بگیریم:

$$Q_i = A_i(T_i - T_o) / \sum_{n=1}^N \frac{\lambda_n}{Ln(R_{n+1}/R_n)(R_{N+1})} \quad (3-5)$$

که در این رابطه λ_n ضریب هدایت هر لایه و R_n ضخامت هر لایه عایق در دیواره کوره می باشد و اگر T_o دمای سطح خارجی دیواره کوره باشد می توانیم \dot{Q}_i را برای هر سطح بدست آوریم.

۲- اگر سطح مورد نظر همان بار درون کوره باشد و معمولاً با چنین فرضی که بار در کف کوره عملیات حرارتی نقش سطح را دارد تحلیل صورت می گیرد در اینصورت \dot{Q}_i وابسته به نوع بار و مکانیزم انتقال حرارت به بار می باشد [۴].

الف- انتقال حرارت مستقیم و پایدار به بار

ب- انتقال حرارت مستقیم و گذرا به بار

در مورد انتقال حرارت پایدار می توانیم یک فرآیند ورود پیوسته ماده با نرخ \dot{m}_i و با توجه به دماهای ورودی و خروجی مشخصی درهر ناحیه گرمایی را در نظر بگیریم. اگر بار مورد نظر را سطح ۱ در نظر بگیریم:

$$\dot{Q}_i = \dot{m}_i \{H_i(T_{i/o}) - H_i(T_{i/i})\} \quad (4-5)$$

در این حالت می توانیم بطور مستقیم T_i را وارد مساله کنیم که T_i دمای متوسط سطح بار در هر ناحیه گرمایی می باشد. اما بطور معمول دمای خروجی $T_{i/o}$ در هر ناحیه گرمایی و بنابراین \dot{Q}_i نامشخص است پس به یک معادله اضافی نیاز داریم. با در نظر گرفتن دو فرض زیر می توانیم موقعیت های مناسب را در تائید ارتباط بالا انتخاب کنیم:

۱- اگر بار مورد نظر بطور کاملا یکنواخت باشد، مثلا در مورد فلزات مذاب در آنصورت دمای متوسط سطح بار با فرض $T_1 = T_{1o}$ بدست می آید.

این فرض در خصوص کوره های عملیات حرارتی درست نمی باشد.

۲- اگر بار مورد نظر تحت یک برنامه پیوسته و با افزایش دمای پیوسته از یک ناحیه گرمایی وارد ناحیه گرمایی بعدی شود آنگاه $T_{1o} > T_1 > T_{1i}$ در اینصورت میتوانیم فرض کنیم که :

$$T_1 = (T_{1i} + T_{1o}) / 2$$

در خصوص گرم شدن گذرای بار \dot{Q}_1 می تواند با نرخ تغییرات انتالپی یک بار ثابت با دبی جرمی

\dot{m}_L برابر باشد. و اگر $H_L(T_1)$ انتالپی بار در زمان t باشد و $H_L(T_1^1)$ انتالپی بار در زمان $t + \Delta t$

باشد در آنصورت انتالپی بار $H_L(T)$ به صورت یک تابع به شکل زیر است :

$$H_L(T_1^1) = H_L(T_1^0) + \frac{\Delta t \dot{Q}_1}{\dot{m}_L} \quad (5-5)$$

این شکل ارائه شده پایه مدل سازی گذرای کوره عملیات حرارتی می باشد .

۵-۲- موازنه انرژی کلی برای ناحیه حجمی

با فرض احتراق کامل در هر ناحیه حجمی و همچنین مدل سازی گازهای حاصل از احتراق به

صورت ترکیبی از یک گاز شفاف و دو گاز خاکستری معادله موازنه انرژی به صورت زیر است :

$$\sum_{j=1}^L \overline{G_j} \overline{G_i} \sigma T_{g,j}^4 + \sum_{j=1}^m \overline{G_i} \overline{S_j} \sigma T_j^4 - 4 \sum_{n=1}^N a_n k_n v_i \sigma T_{g,i}^4 - (\dot{Q}_{con})_i + (\dot{Q}_{G.net} + \dot{Q}_a)_i + (\dot{Q}_{enth})_i = 0 \quad (6-5)$$

در کوره عملیات حرارتی دورانی $(\dot{Q}_{con})_i$ انتقال حرارت جابجایی به تمام سطوح در تماس با ناحیه

حجمی می باشد و $(\dot{Q}_{enth})_i$ بوسیله معادله (۷-۵) بدست می آید .

$$(\dot{Q}_{enth})_i = \dot{m}_{i-1}^+ H_g(T_{g,i-1}) + \dot{m}_{i+1}^- H_g(T_{g,i+1}) - \{\dot{m}_i^- + \dot{m}_i^+ + (\dot{m}_o)_i\} H_g(T_{g,i}) \quad (7-5)$$

همچنین بایستی معادله موازنه جرمی در هر ناحیه نیز در نظر گرفته شود .

$$(\dot{m}_G)_i + (\dot{m}_a)_i + \dot{m}^+_{i-1} + \dot{m}^-_{i+1} - (\dot{m}^+ + \dot{m}^-)_i - (\dot{m}_o)_i = 0 \quad (۸-۵)$$

و از آنجایی که در کوره عملیات حرارتی دورانی بار در نواحی مختلف گرمایی توقف دارد و از هر ناحیه گرمایی وارد ناحیه گرمایی دیگری می شود بنابراین بایستی در موازنه انرژی روی سطح بار در هر ناحیه باید عامل انتقال انتالپی توسط بار به نواحی مختلف را در نظر بگیریم. در نهایت برای مدل سازی هر ناحیه گرمایی از کوره عملیات حرارتی دورانی به یک دستگاه معادله غیر خطی با $m+L$ مجهول می رسیم که مرتبه مجهولات (دما) از مرتبه پنج می باشد .

۵-۳- مدل سازی انجام شده در کوره عملیات حرارتی دورانی

همانطور که اشاره شد در مورد این نوع کوره می توانیم شار حرارتی موثر بر بار را از طریق مدل سازی پایدار محاسبه کنیم . بدین صورت که ابتدا با مدل سازی پایدار و با توجه به اینکه دمای ورود و خروج در هر ناحیه گرمایی جزء داده های مدل سازی می باشد . در اینصورت افزایش انتالپی بار در هر ناحیه را داریم :

$$(\dot{Q}_L)_i = \dot{m}_i [H_i(T_{i,i}) - H_i(T_{i,i+1})] \quad (۹-۵)$$

اما با توجه به اینکه دمای سطح بار درون کوره با گذشت زمانی بالا می رود بایستی بر طبق روند

زیر مدل سازی را انجام دهیم [۴].

۱- مدل سازی کوره (ناحیه گرمایی)

۲- استفاده از یک گام زمانی برای مدل سازی بار

۳- تحلیل حرارتی بار با توجه به شار حرارتی محاسبه شده

۴- بدست آوردن دمای سطح بار در گام زمانی

۵- محاسبه شار جدید موثر بر بار درون کوره با توجه به شرایط دمایی جدید

۶- تکرار روند تحلیل حرارتی بار

بدیهی است که در این مدل سازی دمای گاز در هر ناحیه گرمایی کوره ثابت در نظر گرفته شده است .
و با ورود بار به ناحیه حرارتی جدید شرایط مرزی نیز تغییر می کند .

معمولا می توانیم از هر دو روش مدل سازی حالت پایدار و گذرا در شبیه سازی کوره های عملیات
حرارتی استفاده کنیم. تونیکز^۱ و سالتر^۲ همچنین فیلتز جرالده^۳ و شرایدن^۴ از هر دو روش مدل سازی
برای مدل سازی کوره های ساده استفاده کرده اند [۱۶ و ۱۵].

در معادله های موازنه انرژی کلی اگر f_i معادله موازنه انرژی روی نواحی سطحی j باشد در آن صورت :

$$\frac{\partial f_i}{\partial T_i} = 4\sigma \overline{S_i S_j} T_i^3 \quad (۱۰-۵)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial T_j} = -4\sigma A_j \varepsilon_j T_j^3 - A_j h_j - \frac{\partial \dot{Q}_j}{\partial T_j} \quad (۱۱-۵)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial T_g} = 4\sigma \overline{GS_j} \varepsilon_j T_g^3 + A_j h_j \quad (۱۲-۵)$$

همچنین می توانیم برای منطقه گازی نیز عناصر ماتریس $H(X_k)$ را تعیین کنیم .

$$\frac{\partial f_i}{\partial T_i} = 4\sigma \overline{S_i GT_i}^3 - A_i h_i \quad (۱۳-۵)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial T_g} = -16 \sum_{n=1}^3 a_n k_n v_j \sigma T_g^3 - \frac{\partial \dot{Q}_{conv}}{\partial T_g} - \frac{\partial \dot{Q}_{net}}{\partial T_g} \quad (۱۴-۵)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial v_G} = \rho_G \left\{ CV_{net} + R_s \left(1 + \frac{X}{100}\right) \rho_a H_a(T_g) - \left(P_s + R_s \frac{X}{100}\right) \rho_g H_g(T_g) \right\}$$

^۱ tonicks
^۲ salter
^۳ fitzgelald
^۴ shreiden

بنابراین دیده می شود که برای تعیین مجهولات نیاز داریم که مشتقات جزئی هر معادله موازنه انرژی را نسبت به متغیرها بدست آوریم. در نهایت به دستگاه معادله به فرم ماتریسی زیر می رسم:

$$[H] [E]=[F] \quad (۱۶-۵)$$

که مقدار ماتریسی H و بردار F از حدس های اولیه محاسبه می شوند .

۵-۴- حل عددی دستگاه معادلات غیر خطی

همانطور که در بدست آوردن معادلات موازنه انرژی در نواحی سطحی و حجمی بیان شد ، این معادلات تابعی از دمای سطحی یا ناحیه گازی می باشد. و به تعداد مجهولات در دستگاه ، معادله غیر خطی ر حسب دما وجود دارد . روش حل عددی دستگاه معادلات غیر خطی روش تکراری نیوتن می باشد [۱۷،۱۸].

اگر n معادله غیر خطی با n مجهول x_1, x_2, \dots, x_n داشته باشیم .

$$\begin{aligned} f_1 &= (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ f_2 &= (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ f_n &= (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (۱۷-۵)$$

اگر به صورت خلاصه دستگاه را به صورت $F(X)=0$ نشان دهیم. بنابه روش محاسباتی نیوتن:

$$X_{k+1} = X_k - F(X_k).H^{-1}(X_k) \quad (۱۸-۵)$$

در این رابطه X_{k+1}, X_k بردارهای از مرتبه n هستند که در تکرار مرتبه k و $k+1$ محاسبه شده اند . همچنین :

بنابراین در نهایت به یک دستگاه از معادلات خطی می‌رسیم که می‌توانیم با روش‌های استاندارد چون روش گوس سایدل این دستگاه را حل کنیم [۱۷ و ۱۸].

نکته مهم در برنامه‌نویسی برای حل عددی دستگاه معادلات غیر خطی گذاشتن یک شرط منطقی برای خروج از حلقه تکرار است که معمولاً مقدار خطای نسبی را به عنوان یک تیرانس در نظر می‌گیرند.

$$\max |x_{i/k+1} - x_{i/k}| / x_{i/k} \leq \text{tolerance} \quad (24-5)$$

۵-۵- انجام شبیه‌سازی در کوره عملیات حرارتی دورانی

روند برنامه‌نویسی برای مدل‌سازی حرارتی کوره عملیات حرارتی دورانی بر اساس یک روش مرحله‌ای می‌باشد.

۱- ابتدا با توجه به احتراق گاز طبیعی و معادله احتراق با در نظر گرفتن ۲۰٪ هوای اضافی در

احتراق و کامل بودن احتراق فشار جزئی گازهای حاصل از احتراق CO_2, H_2O تعیین می‌شود.

۲- سپس با استفاده از روش جمع وزنی گازهای خاکستری، ضریب صدور گاز واقعی حاصل از

محصولات احتراق صورت می‌گیرد که توضیح داده شده است.

۳- مرحله بعدی محاسبه عددی سطوح تبادل مستقیم با توجه به تعداد نواحی حرارتی کوره و

هندسه هر ناحیه می‌باشد.

نتایجی که در این قسمت بررسی می‌شوند مربوط به مدل‌سازی یک کوره با پنج ناحیه حرارتی می‌

باشد که اشکال هندسی نواحی حرارتی با یکدیگر برابر می‌باشد.

بنابراین هر ناحیه حرارتی خود یک محفظه تشعشی می‌باشد، که از سطوح کناری و سقف و کف

کوره تشکیل شده و یک ناحیه گازی نیز منطقه حجمی راتشکیل می‌دهد.

در محاسبه انتگرال‌های چندگانه برای بدست آوردن سطوح تبادل مستقیم با توجه به یکسان نبودن

اندازه سطوح از روش انتگرال‌گیری گوس مربعی استفاده می‌کنیم. برای هر المان سطحی در انتگرال

گیری چهار مشخصه محاسباتی در نظر گرفته می‌شود. که شامل شماره صفحه مورد نظر بر اساس

شمارنده i, j همچنین شعاع r و زاویه θ نسبت به صفحه مقابل و یا المان حجمی مورد نظر می‌باشد.

مختصات سطحی j, i در دستگاه استوانه ای از مرجع زاویه $\theta = 0$ شروع می شود اما i در راستای افزایش r و از پائین به بالا تغییر می کند و z در جهت افزایش θ . به طور مشابه چهار مشخصه عددی نیز برای هر المان حجمی در انتگرال گیری عددی در نظر گرفته می شود. K, j, i که وابسته به r و θ و z در مختصات استوانه ای هستند و برای تعیین مختصات فضایی المان حجمی و یک شمارنده n که ردیف نواحی گازی را تعیین می کند.

دقت محاسبات بر اساس روش ارائه شده توسط اروکو^۱ با انتخاب ۲۰ نقطه انتگرال گیری قابل قبول است. اما مشخص است که با افزایش نقاط تقسیم نواحی دقت محاسبات بالاتر رفته ولی زمان انجام محاسبه به شدت افزایش می یابد.

از آنجایی که هر پنج ناحیه از نظر هندسی کاملاً مشابه می باشند کافی است سطوح تبادل مستقیم در یک ناحیه گرمایی را بدست آوریم.

۴- با توجه به روش ارائه شده توسط نوبل که در بخش های گذشته بیان شد سطوح تبادل را به روش ماتریسی محاسبه می کنیم.

۵- حدس اولیه دمای محفظه احتراق برای حل دستگاه معادلات غیر خطی

۶- محاسبه سطوح شار مستقیم با توجه به مدل سازی گاز غیر خاکستری و دماهای حدس زده شده

۷- نوشتن معادلات موازنه انرژی کلی در هر ناحیه گرمایی کوره عملیات حرارتی

۸- حل دستگاه معادلات غیر خطی بروش نیوتن با توجه به روش ارائه شده.

۹- محاسبه ماتریس خطای E و اگر $E < \text{tolerance}$ بود حل درست است و گرنه با توجه به مقادیر جدید دماهای سطوح و ناحیه گازی سطوح شار مستقیم دوباره محاسبه شوند.

در این مدل سازی تolerانس قابل قبول خطاهای نسبی را 10^{-4} در نظر گرفته ایم.

۱۰- در نهایت توزیع دمای نواحی سطحی و گازی در هر ناحیه حرارتی کوره عملیات حرارتی دورانی بدست می آید.

در خصوص چگونگی انجام شرایط مدل سازی می توانیم با در نظر گرفتن دو حالت محاسبات دما و شار روی بار را تحلیل کنیم.

اول اینکه دمای سطح بار در هر لحظه معلوم است .

دوم هنگامی که دمای ناحیه گازی مشخص باشد .

اگر دمای سطح بار را داشته باشیم می توانیم دبی سوخت مصرفی در هر ناحیه گرمایی ، همچنین توزیع دمای دیواره های عایق در هر ناحیه و همچنین دمای نواحی گازی و راندمان حرارتی کوره را محاسبه کنیم و اگر دمای گاز معلوم باشد می توانیم هدایت حرارتی درون بار و پروفیل های لحظه ای دمای سطح بار و درون بار و همچنین تلفات حرارتی از دیواره ها را مشخص کنیم همچنین میزان سوخت مصرفی .

همچنین با معلوم بودن شار اعمالی به بار درون کوره نیز می توانیم توزیع دما در بار را تعیین کنیم. در کوره های عملیات حرارتی با چند ناحیه گرمایی برای جابجا کردن و حرکت دادن بار در نواحی مختلف از دو روش استفاده می شود. یکی حرکت مرحله به مرحله بار در نواحی مختلف گرمایی است (مدلی که در این پروژه استفاده شده) و دیگر حرکت پیوسته کوره می باشد.

در مدل سازی ریاضی مدل های متحرک می توانیم دو روش را استفاده کنیم یکی دیدگاه لاگرانژی می باشد . که تحلیل را روی یک موقعیت و وضعیت مشخص انجام می دهد و دیدگاه دیگر روش اولری است که حرکت را روی یک جزء یا نمونه در نظر می گیرد . برای مدل کوره عملیات حرارتی دورانی با حرکت گام به گام بار درون کوره ما از مدل اولری استفاده می کنیم.

در کوره های نسل جدید بار روی سکوهای خاصی قرار می گیرد و سیستم هل دهنده به جای هل دادن مستقیم بار ، سکوها را جلو می راند و در اصل بارها روی میزهای مخصوصی قرار گرفته اند .

۵-۶- هدایت در قطعات کاری درون کوره

در مدل سازی حرارت قطعات کاری مورد نظر را به سه دسته محدود می کنیم :

برای یک قطعه کروی شکل ، هدایت فقط در راستای شعاعی در نظر گرفته می شود ، همچنین برای یک قطعه استوانه ای شکل یا صرفنظر کردن از هدایت محوری آنرا وابسته به تغییرات شعاعی در استوانه، در نظر می گیریم و برای یک صفحه ، هدایت تنها در طول ضخامت مورد نظر است.

در اینجا ما بار استوانه ای شکل را بررسی می کنیم .

برای یک قطعه کاری استوانه ای معادله هدایت حرارتی به صورت زیر است :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (25-5)$$

$$T_i^{m+1} = T_i^m + \frac{\lambda \cdot \Delta t}{\rho l} \left(\frac{T_{i+1}^m - 2T_i^m + T_{i-1}^m}{\Delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{T_{i+1}^m - T_i^m}{\Delta r} \right) \quad (26-5)$$

شرایط مرزی : $r=R$

$$\begin{aligned} r=0 \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= q_{rad} + q_{conv} \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= 0 \end{aligned} \quad (27-5)$$

لازم است به این نکته توجه شود که با توجه به اینکه بار در کف کوره قرار دارد در محاسبه شار تشعشعی اعمالی به بار بایستی اثر توزیع بار در کف کوره را در نظر بگیریم که ساده ترین راه همان استفاده از ضریب صدور موثر^۱ برای بار در محاسبه شار تشعشعی اعمالی به بار می باشد، ضریب صدور بار را ۰/۵ در نظر گرفته ایم .

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{1 - \frac{A'}{A} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_L} \right)} \quad (28-5)$$

^۱ Effective emissivity

می‌باشد. در هر گام زمانی A مساحت کف کوره در ناحیه مورد نظر می‌باشد و A' که در این رابطه دمای سطح بار محاسبه شده و شار اعمالی برای گام بعدی با توجه به شرایط جدید دمایی بار بدست می‌آید. بنابراین یک مدل‌سازی گذرا برای بار انجام می‌شود. اما محاسبات وابسته به کوره با شرایط ثابت و پایدار در نظر گرفته می‌شود. تغییر گرمای ورودی به هر ناحیه و کافی بودن قدرت کوره عملیات حرارتی برای ثابت نگهداشتن دمای کوره در سیستم کوره تحلیل می‌شود. با توجه به شرایط مرزی و معادله انتقال حرارت یک بعدی در بار استوانه‌ای برای هدایت یک حل دقیق و تحلیلی نیز وجود دارد و برای بالا بردن سرعت محاسبات در برنامه شبیه‌سازی از این حل استفاده می‌کنیم:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (29-5)$$

شرط مرزی $T(O, t) =$ محدود

$$\frac{\partial T}{\partial r}(r_o, t) = \frac{(q_{rad} + q_{con})}{k} \quad (30-5)$$

$$T(r, 0) = f(r) \quad (31-5)$$

با استفاده از روشهای حل معادله دیفرانسیل:

$$T = \psi(r, t) + \phi(r) + G(t) \quad (32-5)$$

با جاگذاری در معادله دیفرانسیل انتقال حرارت هدایت یک بعدی:

$$\frac{1}{\alpha} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial t} \right) = \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) \quad (33-5)$$

با استفاده از تکنیک جدا سازی پارامتر ها برای استفاده از شرایط مرزی همگن به دو معادله می رسیم:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{d^2 \psi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (34-5)$$

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial G}{\partial t} = \frac{d^2 \phi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \quad (35-5)$$

با اعمال شرایط مرزی و اولیه به دو عبارت برای توابع می رسیم

$$\frac{d\phi}{dr}(r = r_0) = (q_{rad} + q_{con}) / k \quad (36-5)$$

$$\frac{d\psi}{dr}(r = r_0) = 0 \quad (37-5)$$

با استفاده از معادله 35-5 به دو معادله زیر می رسیم و در ادامه حل معادلات نیز دیده می شود :

$$\frac{1}{\alpha} \left(\frac{dG}{dt} \right) = c \quad (38-5)$$

$$\frac{d^2 \phi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} = c \quad (39-5)$$

$$G = \alpha ct + c_1 \quad (40-5)$$

$$\phi = c_0 r^2 / 4 + c_2 \ln(r) + c_3 \quad (41-5)$$

$$c_2 = 0 \quad (42-5)$$

$$c_0 = 2(q_{rad} + q_{con}) / r_0 k \quad (43-5)$$

$$c_1 = c_3 = 0 \quad (44-5)$$

$$G(t) = 2qt / pc_p r_o \quad (45-5)$$

$$\phi(r) = qr^2 / 2r_o k \quad (46-5)$$

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (47-5)$$

$$\psi(0, t) = \text{محدود} \quad (48-5)$$

$$\psi(r, 0) = f(r) - \phi(r) - G(0) \quad (49-5)$$

با استفاده از روش جداسازی معادله دیفرانسیل قابل حل است.

$$\psi(R, T) = F(r).H(t) \quad (50-5)$$

حل معادله مورد نظر حل سری بسل است که بایستی مقادیر ضرایب آن به صورت عددی محاسبه شود.

$$F(r) = AJ_o(\lambda_n r) + B\gamma_o(\lambda_n r) \quad (51-5)$$

$B = 0$ باشد و اگر است بایستی $\gamma_o(0)$ و باقی پارامترها را بدست آوریم :

$$F(r) = AJ_o(\lambda_n r) \quad (52-5)$$

$$J_1(\lambda_n r_o) = 0 \quad (53-5)$$

معادله 48-5 از اعمال شرط مرزی بدست آمد و در بدست آوردن مقادیر ویژه کاربرد دارد. در معادله دوم نیز به یکسری می‌رسیم.

$$\dot{H} + \alpha\lambda_n^2 H = 0 \quad (54-5)$$

$$H(t) = B \exp(-\alpha\lambda_n^2 t) \quad (55-5)$$

بنابراین می‌توانیم به تابع برسیم:

$$\psi(r, t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n j_0(\lambda_n r) \exp(-\alpha \lambda_n^2 t) \quad (56-5)$$

$$\psi(r, 0) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n J_0(\lambda_n r) = f(r) - \phi(r) - G(0) \quad (57-5)$$

$$a_n = \frac{\int_0^c [f(r) - \phi(r) - G(0)] r J_0(\lambda_n r) dr}{\int_0^c r J_0^2(\lambda_n r) dr} \quad (58-5)$$

در نهایت معادله کلی توزیع دما در بار استوانه‌ای را بدست می‌آوریم:

$$T = \psi(r, t) + \phi(r) + G(t) \quad (59-5)$$

فصل ششم

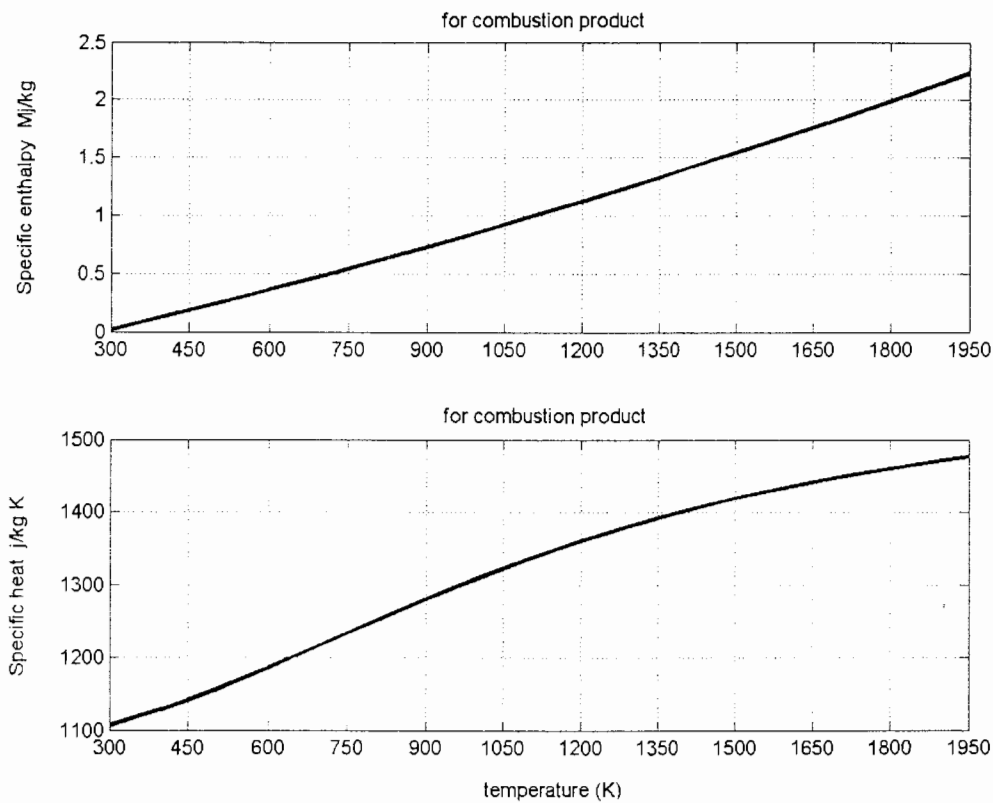
بحث و نتیجه گیری

۱-۶- مدل سازی احتراق و گاز غیر خاکستری

آنچه در موازنه انرژی نهایی در مورد احتراق مورد نیاز است بدست آوردن رابطه بین آنتالپی در محصولات حاصل از احتراق و هوای مصرفی در احتراق با دمای گاز و همچنین تاثیر پیش گرم کردن هوای احتراقی در انرژی آزاد شده در احتراق سوخت می باشد .

در خصوص آنتالپی محصولات احتراق و هوای مصرفی با استفاده از روش حداقل مربعات خطا برای پردازش منحنی می توانیم به مدل های دقیقی برسیم و در نهایت با استفاده از ضرایب چند جمله ای بدست آمده از این پارامترها در معادلات موازنه انرژی استفاده کنیم.

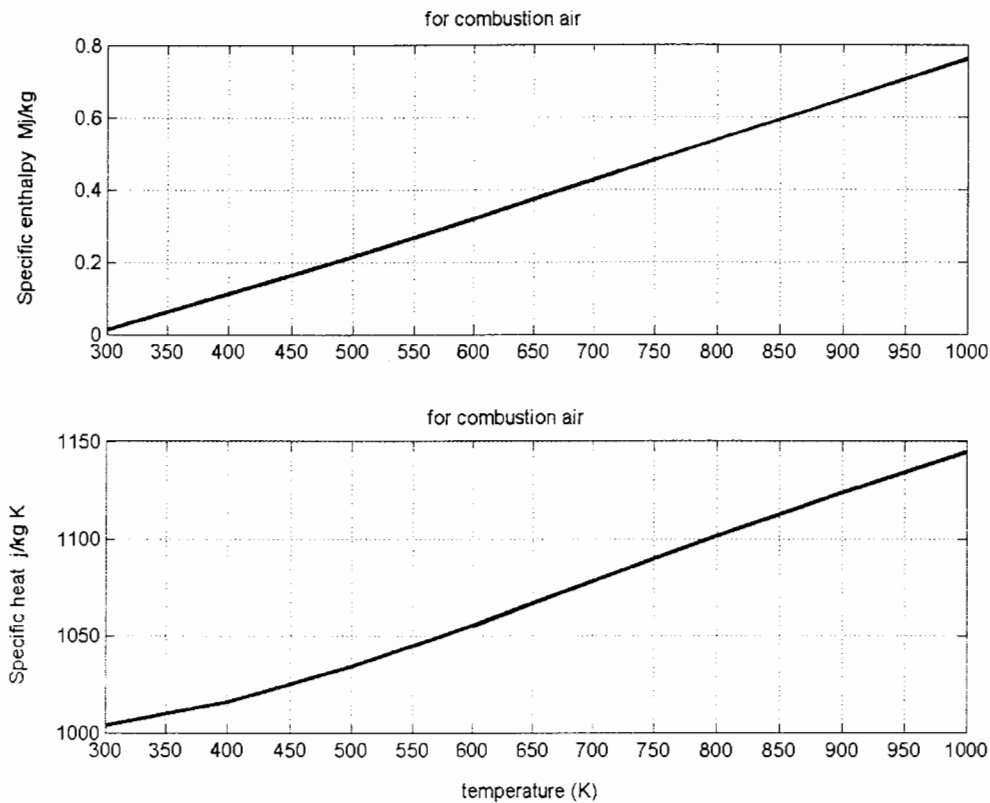
الف- منحنی تغییرات انتالپی و گرمای ویژه برای محصولات احتراقی بر حسب تغییرات دمای گاز



شکل ۱-۶- منحنی آنتالپی و گرمای ویژه در محصولات احتراق

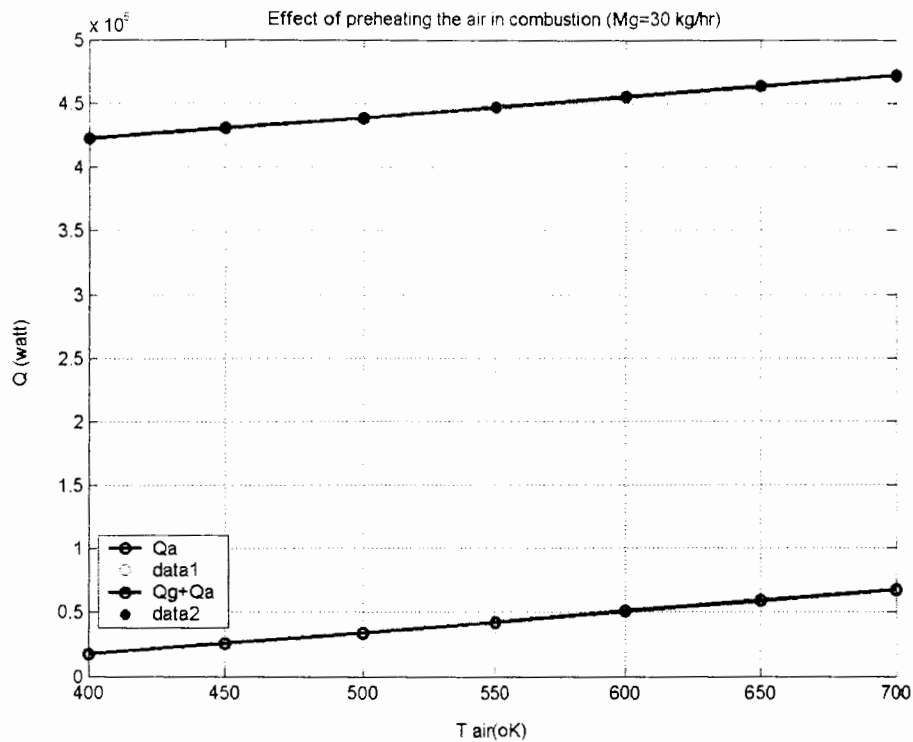
همچنین مقایسه ای بین مقدار مدل سازی شده با داده های تجربی صورت گرفته که خطای کمی در دامنه دمایی مورد بررسی در کوره های عملیات حرارتی دیده می شود.

ب- منحنی تغییرات آنتالپی برای هوای مصرفی در احتراق سوخت بر حسب تغییرات دمای هوا و پیش گرمایش هوای احتراقی.



شکل ۶-۲- منحنی آنتالپی و گرمای ویژه برای هوای احتراقی

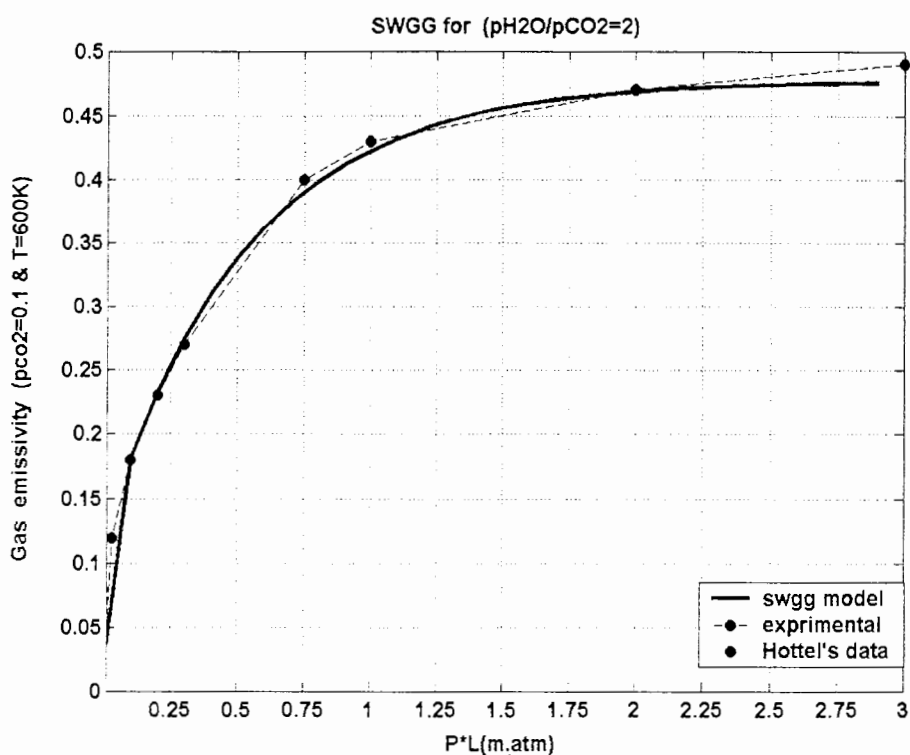
پ- تاثیر پیش گرمایش هوای مصرفی در احتراق سوخت را می توانیم در مدل سازی انرژی آزاد شده در هر ناحیه گازی در کوره عملیات حرارتی مشاهده کنیم. همانطور که دیده می شود، با افزایش دمای هوای مصرفی در احتراق انرژی ورودی به هر ناحیه نیز بیشتر شده است .



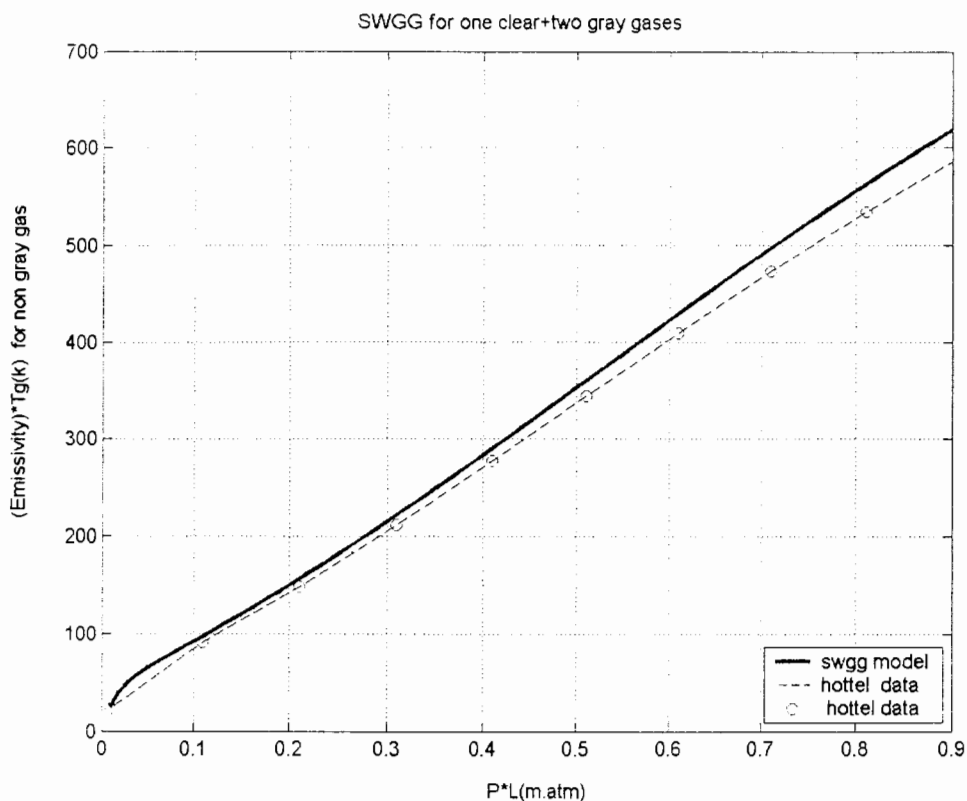
شکل ۶-۳- اثر پیش گرمایش هوای مصرفی در انرژی احتراق

ت- در مدل سازی ضریب صدور گاز غیر خاکستری می توانیم با فرض تلفیق دو گاز خاکستری و یک گاز شفاف و یا سه گاز خاکستری و یک گاز شفاف مدل سازی را انجام دهیم. دیده می شود که ضرایب وزنی $\alpha_{g,n}$ در هر دو مدل با هم متفاوت است. در شبیه سازی کوره عملیات حرارتی دورانی ما از مدل تلفیقی دو گاز خاکستری و یک گاز شفاف استفاده کرده ایم. با افزایش دمای گاز غیر خاکستری ضرایب وزنی مدل نیز یک تغییر خطی با دما دارند و افزایش می یابند.

ث- از مهمترین بخش های مدل سازی رفتار گاز غیرخاکستری بررسی چگونگی تغییرات ضریب صدور گاز با پارامترهای موثر در تشعشع گاز می باشد . در ابتدا با استفاده از روش جمع وزنی گازهای خاکستری مدل ضریب صدور گاز را ایجاد می کنیم . با مقایسه مدل ایجاد شده با داده های تجربی که به منحنی های هاتل معروف است دیده می شود که مدل سازی انجام شده با روش SWGG دقت بالایی دارد و تقریباً با داده های تجربی هاتل منطبق است [۲].

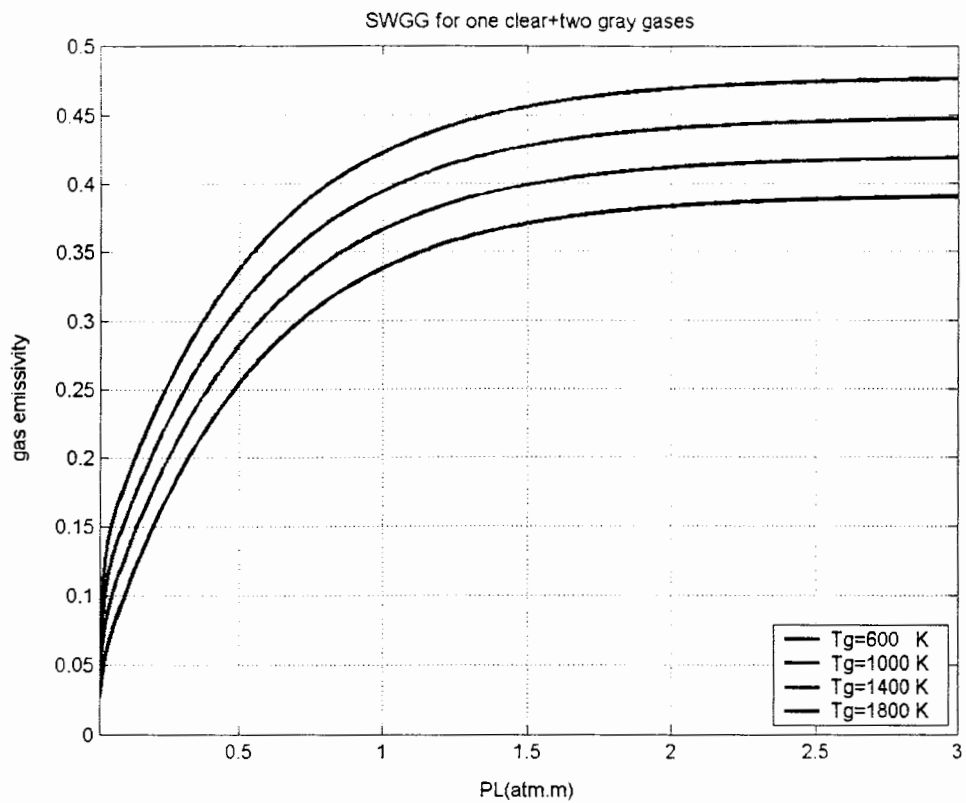


شکل ۶-۵- مقایسه مدل سازی گاز غیرخاکستری با منحنی هاتل



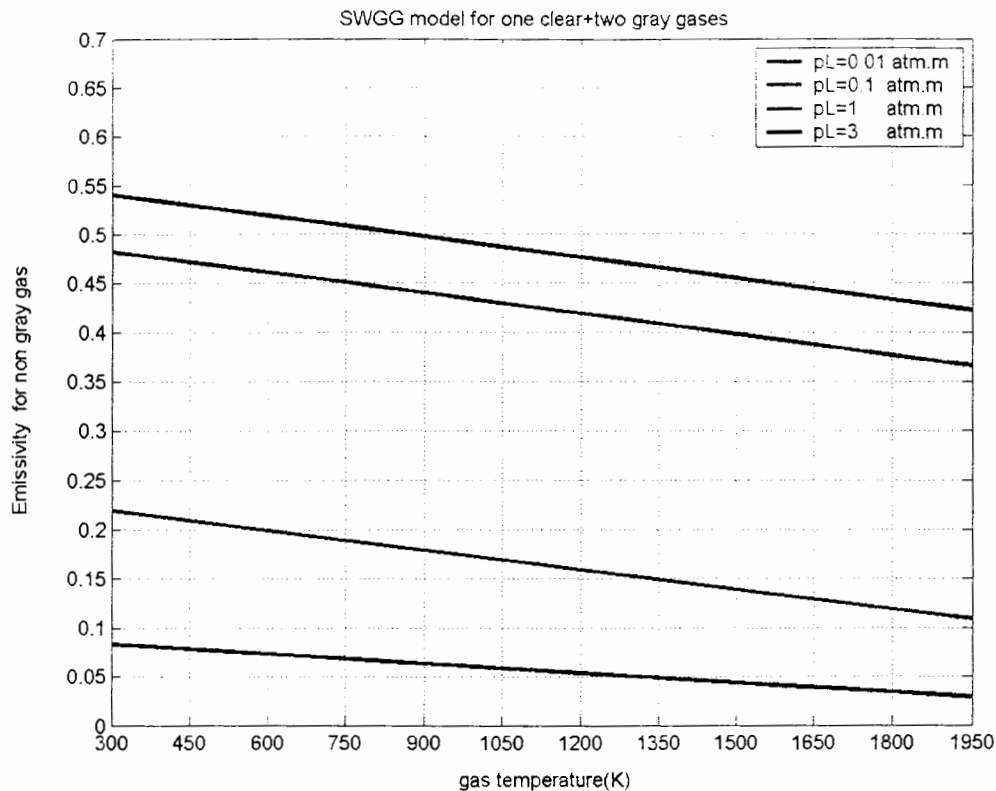
شکل ۶-۶- مقایسه منحنی ضریب صدور مدل سازی شده با منحنی هاتل

ج- همچنین پس از ایجاد مدل ضریب صدور گاز غیر خاکستری با روش SWGG می توانیم رفتار ضریب صدور گاز غیر خاکستری را در مقابل تغییر سایر پارامترهای موثر بر تشعشع گاز بررسی کنیم. همانطور که دیده می شود برای تغییرات PL در یک محیط گازی با افزایش PL ضریب صدور گاز واقعی افزایش می یابد ، این افزایش وابسته به دمای گاز نیز می باشد و با افزایش دمای گاز نیز ضریب صدور گاز واقعی کاهش می یابد.



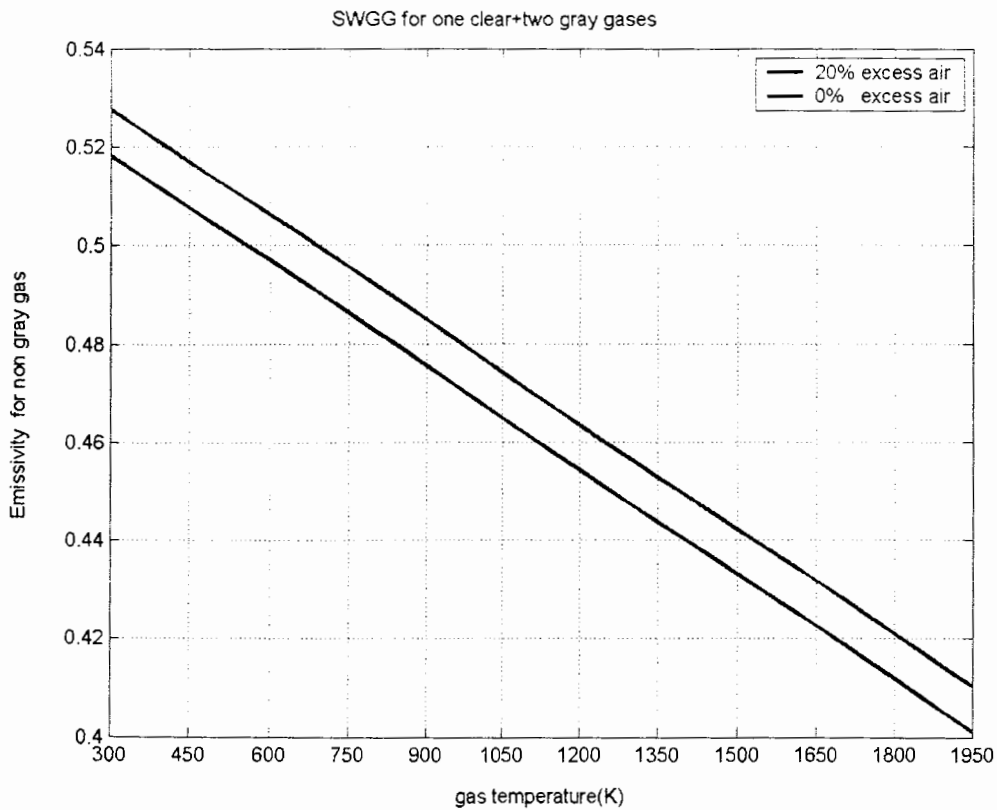
شکل ۶-۷- تاثیر دمای گاز بر ضریب صدور گاز واقعی

همچنین می توانیم این موضوع را به صورت منحنی زیر نیز نشان دهیم . لازم به ذکر است که در محدوده دمایی مورد نظر در کوره های عملیات حرارتی فرض تجزیه ناپذیری محصولات احتراق صادق است .



شکل ۶-۸- تاثیر PL بر ضریب صدور گاز واقعی

اثر درصد هوای اضافی هنگام احتراق سوخت در کوره عملیات حرارتی را می توانیم نشان دهیم . با اضافه کردن هوای اضافی برای احتراق کامل سوخت فشارهای جزئی محصولات احتراقی به خصوص گازهای قطبی H_2O, CO_2 که موثر بر تشعشع گاز هستند تغییر می کند که در نهایت اضافه کردن هوای اضافه باعث کاهش ضریب صدور کلی گاز واقعی نسبت به حالتی است که هوای اضافی در احتراق وجود نداشت . ندارد . در اینجا مقایسه ای بین ضریب صدور کلی گاز واقعی برای ۲۰٪ هوای اضافی و حالت بدون هوای اضافی صورت گرفته است.

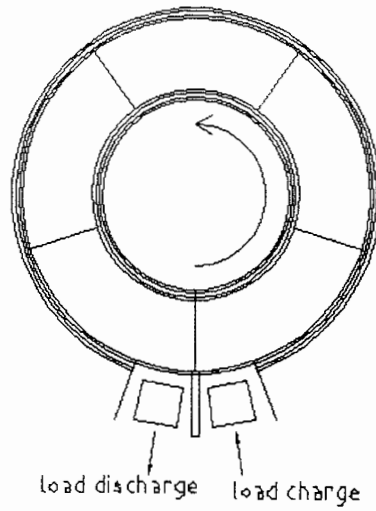


شکل ۶-۹- تاثیر درصد هوای اضافی بر ضریب صدور گاز واقعی

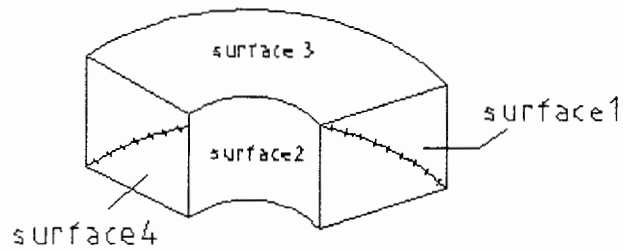
۶-۲- شبیه سازی کوره عملیات حرارتی دورانی

کوره عملیات حرارتی دورانی مورد نظر را برای حالت سه ناحیه گازی و دمای سطح بار معلوم و حالت پنج ناحیه گازی با دمای نواحی گازی معلوم شبیه سازی می کنیم و تاثیر پارامترهای چون تغییرات دمای سطح بار و دمای مرکز بار و عواملی چون پیش گرمایش هوای مصرفی در احتراق و تاثیر ضریب صدور دیواره های کوره بر بازدهی گرمایی کوره عملیات حرارتی را بررسی می کنیم .

کوره مورد نظر کوره ای با مشعل های گازی در هر ناحیه حرارتی و قرارگیری مشعل ها به صورت جانبی می باشد .



شکل ۶-۱۰- شماتیک کوره عملیات حرارتی دورانی



شکل ۶-۱۱- شماتیک کوره عملیات حرارتی دورانی - نمای جانبی

$R_{out} = 5m$ شعاع بیرونی کوره

$R_{in} = 3m$ شعاع داخلی کوره

$H = 2m$ ارتفاع کف کوره تا سقف آن

در هردو نمونه کوره با سه ناحیه گازی و پنج ناحیه گازی اندازه طولی و زاویه ای نواحی گازی با هم برابر است .

ضخامت عایق دیواره های جانبی کوره دورانی = ۵۰ cm

ضخامت عایق کف و سقف کوره دورانی = ۵۰ cm

ضریب صدور مواد عایق در دیواره ها و سقف = ۰,۸

ضریب صدور بار درون کوره = ۰,۵

دمای محیط بیرون کوره عملیات حرارتی دورانی را ۳۰۰ K در نظر می گیریم و ضریب جابجایی محیط

را $10 \frac{W}{m^2.k}$ فرض می کنیم .

نوع بار که در کوره قرار می گیرد فولاد نرم^۱ می باشد و شکل بار به صورت بلوک های استوانه ای شکل است . و توزیع درجه حرارت در جهت طولی یکنواخت فرض شده است و توزیع درجه حرارت در جهت شعاع در نظر گرفته می شود .

در ابتدا جزء مولی محصولات حاصل از احتراق و همچنین فشار جزئی محصولات احتراقی موثر بر تشعشع گازی چون CO_2, H_2O تعیین می شود :

به ازای هر مول گاز متان ۱۱,۴۲۴ مول هوا مصرف شده و یک مول دی اکسید کربن ، دو مول آب و ۰,۴ مول اکسیژن و ۹,۰۲۴ مول نیتروژن بدست می آید .

$$P_{H_2O} = 0.1610 atm$$

$$P_{CO_2} = 0.0805 atm$$

$$P_{H_2O} / P_{CO_2} = 2, P = P_{H_2O} + P_{CO_2} = 0.2415 atm$$

با استفاده از جدول ضرایب جذب که توسط هارول ارائه شده است می توانیم مقادیر عددی فاکتور میرای را بدست آوریم .

$$K_1 = k_{g1} * p$$

$$K_2 = k_{g2} * p$$

$$K_3 = k_{g3} * p$$

^۱ Mild steel

برای هر کدام از K های بدست آمده بایستی سطوح تبادل مستقیم (DEA) را بدست آوریم . که روشی بدست آوردن آنها در بخش های قبلی توضیح داده شد .

برای کوره عملیات حرارتی دورانی مدل شده با پنج ناحیه گازی وقتی که $k_{g,1} = 0$ است :

$\overline{s_i s_j}$	۱	۲	۳	۴
۱	۰,۴۳۱۷۱	۵,۹۴۴۰	۳,۰۸۶۱	۳,۰۸۶۱
۲	۵,۹۴۴۰	۰	۰,۷۶۵۷	۰,۷۶۵۷
۳	۳,۰۸۶۱	۰,۷۶۵۷	۰	۶,۱۶۵۷۲
۴	۳,۰۸۶۱	۰,۷۶۵۷	۶,۱۶۵۷۲	۰

جدول ۶-۱- سطوح تبادل مستقیم برای گاز شفاف در کوره پنج ناحیه ای

برای یک گاز شفاف سطوح تبادل مستقیم سطح به گاز صفر است همچنین $\overline{gg} = 0$ می باشد . می توانیم با استفاده از قانون جمع پذیری مقدار خطای محاسبه را محاسبه سطوح تبادل مستقیم بدست آوریم .

(m^2)	مقدار دقیق	مقدار محاسباتی	درصد خطای مطلق	درصد خطای نسبی
A _۱	۱۲,۵۶۶۴	۱۲,۵۴۷۹	۱,۸۵٪	۰,۱۵٪
A _۲	۷,۵۳۹۸	۷,۴۷۵۴	۶,۴٪	۰,۸۵٪
A _۳	۱۰,۰۵۳۱	۱۰,۰۱۷۵	۳,۵۶	۰,۳۵٪
A _۴	۱۰,۰۵۳۱	۱۰,۰۱۷۵	۳,۵۶٪	۰,۳۵٪

جدول ۶-۲- مقایسه مقدار دقیق و مقدار محاسباتی سطوح در کوره پنج ناحیه ای

هنگامی که $k_{g_2} = 1.88$

$\overline{s_i s_j} (m^2)$	۱	۲	۳	۴
۱	۰,۲۰۲۵۱	۳,۹۴۶۳۰	۱,۷۲۳۵	۱,۷۲۳۵
۲	۳,۹۴۶۳۰	۰	۰,۴۷۶۱۳	۰,۴۷۶۱۳
۳	۱,۷۲۳۵	۰,۴۷۶۱۳	۰	۴,۱۵۳۲
۴	۱,۷۲۳۵	۰,۴۷۶۱۳	۴,۱۵۳۲	۰

جدول ۶-۳- سطوح تبادل مستقیم برای گاز خاکستری در کوره پنج ناحیه ای

i	۱	۲	۳	۴
$\overline{s_i g} (m^2)$	۴,۹۳۱۱	۲,۶۱۵۰	۳,۶۸۲۵	۳,۶۸۲۵

جدول ۶-۴- سطوح تبادل مستقیم سطح به گاز در کوره پنج ناحیه ای

و $\overline{gg} = 21.6 m^2$ می باشد.

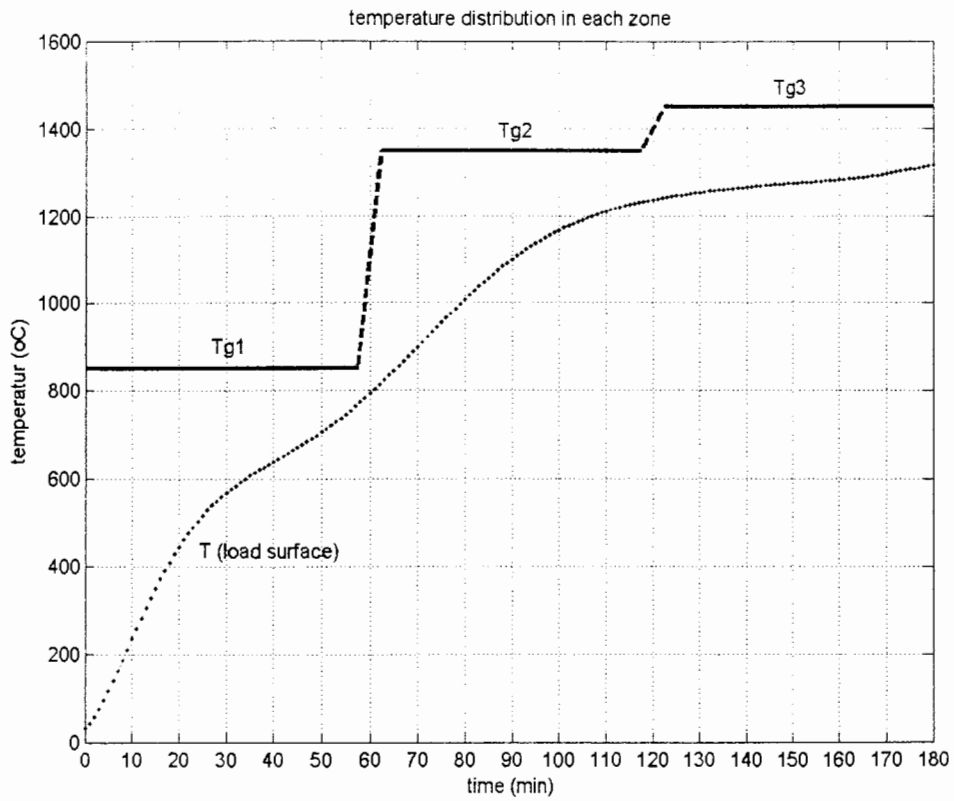
بنابراین به همین ترتیب می توانیم با استفاده از مقادیر بدست آمده برای سطوح تبادل مستقیم به سطوح شار مستقیم برسیم و در نهایت معادلات موازنه انرژی راتشکیل دهیم که در بخش های قبلی توضیح داده شده است.

۳-۶- کوره عملیات حرارتی دورانی با سه ناحیه گازی :

توزیع دمای سطحی بار درون کوره را معلوم فرض می کنیم و دمای سطح بار بر اساس الگوی مورد نظر است . در نهایت می توانیم دمای گاز در هر سه ناحیه گازی کوره و همچنین میزان مصرف سوخت در هر ناحیه را بدست آوریم . همچنین بازدهی حرارتی کوره در هر ناحیه گازی بدست می آید [۵].

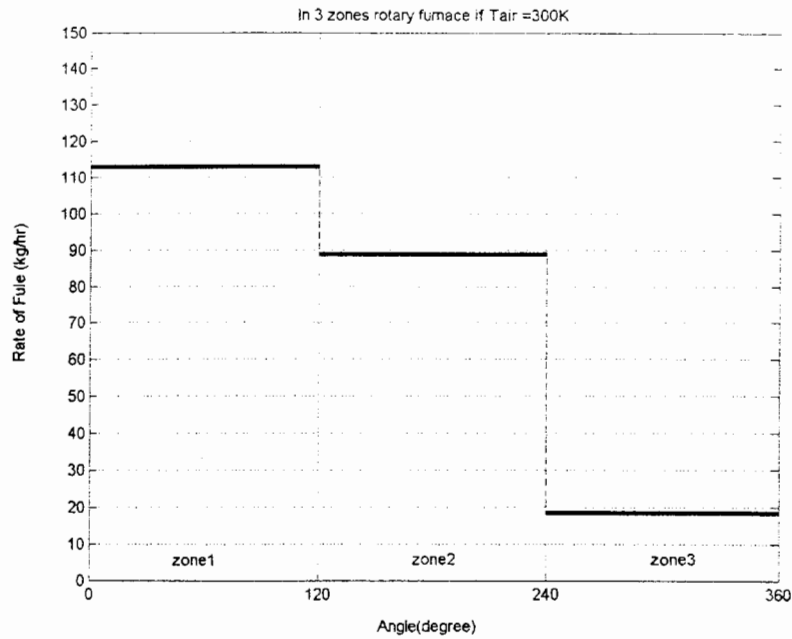
$$T(t) = 81.1632 + 10.1259t + 1.9008t^2 - 0.112808t^3 + 2.8779 \cdot 10^{-3}t^4 - 3.99561 \cdot 10^{-5}t^5 + 3.24554 \cdot 10^{-7}t^6 - 1.54597 \cdot 10^{-9}t^7 + 4.01121 \cdot 10^{-12}t^8 - 4.38485 \cdot 10^{-15}t^9 \quad 0 < t \leq 180 \text{min}$$

دیده می شود که دمای سطح بار بیشترین نرخ افزایش را در ناحیه یک کوره معمولا به ناحیه پیش گرم معروف است دارد . و در ناحیه سوم کمترین نرخ افزایش را دارد و در عمل ناحیه تثبیت دمایی می باشد.



شکل ۶-۱۲- توزیع دمای گاز در هر ناحیه در یک کوره با سه ناحیه گازی

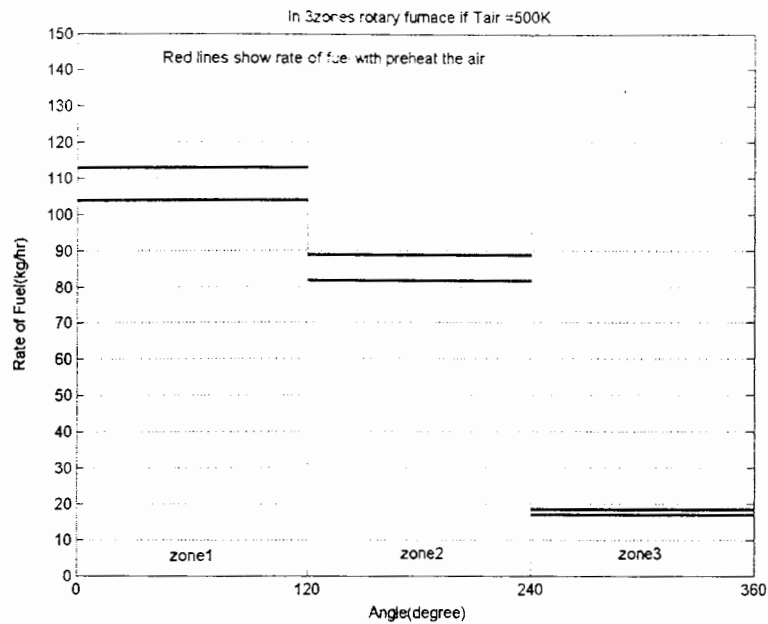
میزان مصرف سوخت در هر ناحیه گازی را بدست آورده و می توانیم بر حسب مکان زاویه ای نواحی مختلف گازی در کوره عملیات حرارتی دورانی ترسیم کنیم. لازم به ذکر است که مقدار بار ورودی به کوره در این مدل سازی با توجه به هندسه کوره محاسبه شده است که در حدود 5300kg/hr می باشد و دمای هوای احتراقی را 300K در نظر گرفته ایم.



شکل ۶-۱۳ مصرف سوخت در هر ناحیه گازی برای کوره با سه ناحیه گازی

اثر پیش گرم کردن هوا مصرفی

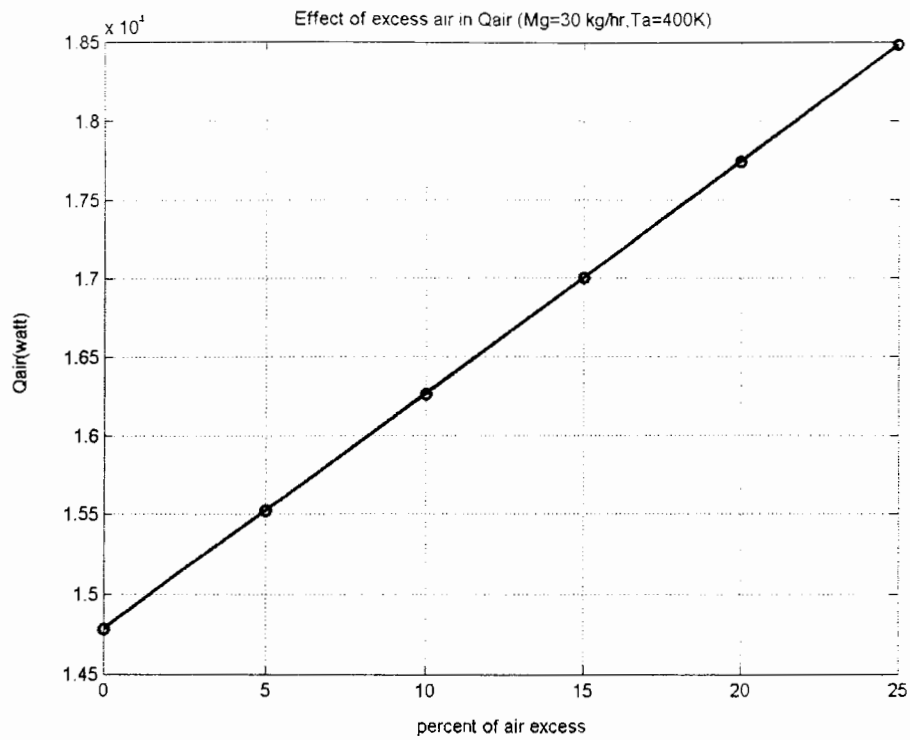
اگر هوای مصرفی در احتراق را تا دمای معینی پیش گرم کنیم . میزان قابل توجهی کاهش در مصرف سوخت داریم . در شکل زیر مدل سازی انجام شده برای پیش گرمایش هوای مصرفی تا دمای $T_{air} = 500K$ می باشد که دلیل آن تاثیر آنتالپی هوای گرم شده در معادله موازنه انرژی در ناحیه حجمی می باشد .



شکل ۶-۱۴- اثر پیش گرمایش هوای احتراقی در مصرف سوخت در کوره با سه ناحیه گازی

اثر درصد هوای اضافه در احتراق بر انرژی هوای پیش گرم شده :

در حالت کلی برای تمام فرآیند احتراقی در نواحی مختلف کوره می توانیم این افزایش انرژی هوای پیش گرم یا افزایش درصد هوای اضافی را تعمیم دهیم . در مدل سازی نشان داده شده در شکل میزان سوخت مصرفی در ناحیه مورد نظر $30kg/hr$ است و دمای هوای احتراقی $T_{air} = 400k$ می باشد .



شکل ۶-۱۵- اثر درصد هوای اضافی بر انرژی هوای پیش گرم شده

ناحیه	راندمان حرارتی	سوخت مصرفی
۱	۴۸,۹٪	۱۱۲,۸۵kg/hr
۲	۳۶,۸٪	۸۸,۶۹kg/hr
۳	۳۷,۳٪	۱۸,۳۰kg/hr

جدول ۶-۵- بازدهی حرارتی برای کوره با سه ناحیه حرارتی

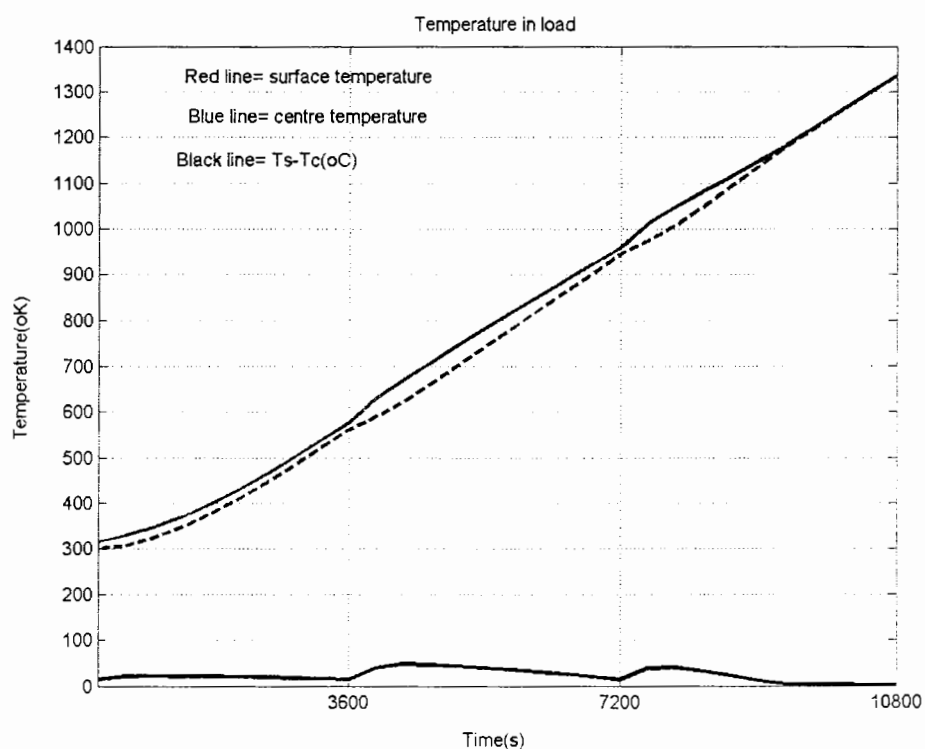
می توانیم دمای گاز در نواحی مختلف را معلوم فرض کنیم و آنگاه با محاسبه شار اعمالی به بار درون کوره و با توجه به زمان قرار گیری بار در هر ناحیه گرمایی در کوره دمای سطح بار و دمای مرکز آنرا محاسبه کنیم. برای الگوی دمای گاز نواحی مختلف به صورت زیر :

$$T_{g_1} = 800^{\circ}c$$

$$T_{g_2} = 1200^{\circ}c$$

$$T_{g_3} = 1300^{\circ}c$$

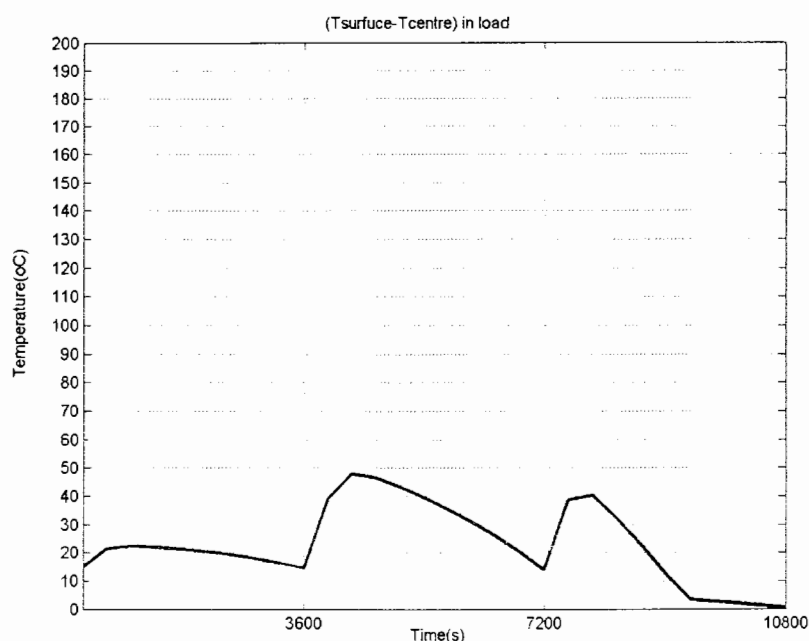
و مدل سازی حرارتی کوره برای مدت سه ساعت در کل طول کوره به الگوی رفتاری دمای سطح و مرکز بار استوانه ای داخل کوره و اختلاف دمای سطح و مرکز می رسمیم.



شکل ۶-۱۶- تغییرات دمای سطح و مرکز بار استوانه ای در کوره با سه ناحیه گازی

در هر گام زمانی یکبار شار اعمالی به بار محاسبه می شود و با توجه به این شار دمای سطح و مرکز بار محاسبه می شود . در گام زمانی بعدی شار جدید با لحاظ کردن شرایط جدید دمایی بار محاسبه و دوباره اعمال می شود .

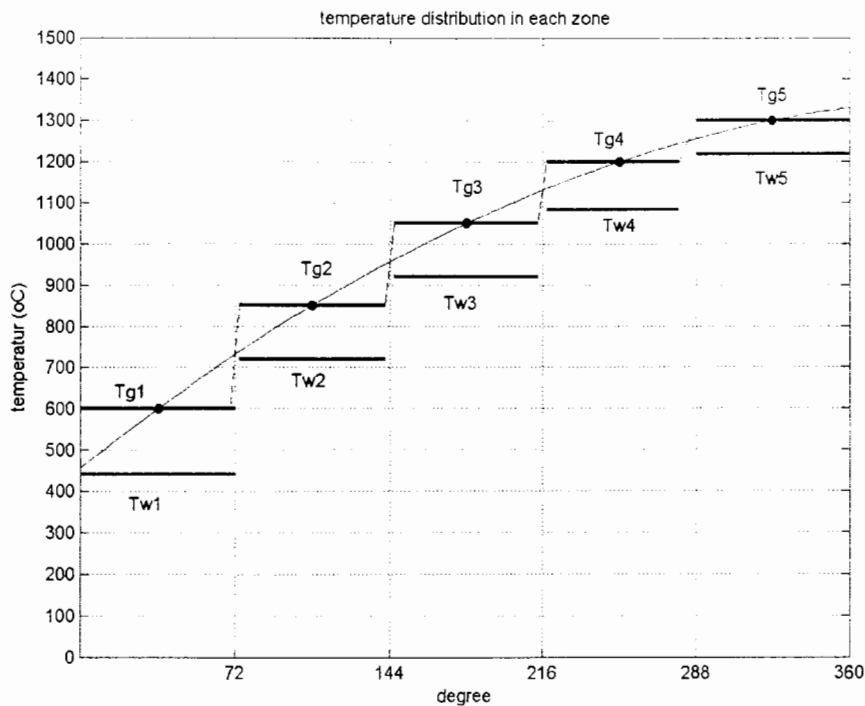
دیده می شود که در ابتدای ورود بار به هرناحیه گرمایی در کوره اختلاف دمای سطح بار و مرکز بار زیاد می شود و با گذشت زمان این اختلاف کم می شود و تا حدودی دمای سطح و مرکز بار به هم نزدیک می شوند.



شکل ۶-۱۷- تغییرات اختلاف دمای سطح و مرکز بار استوانه ای در کوره با سه ناحیه گازی

۴-۶- شبیه سازی کوره عملیات حرارتی دورانی با پنج ناحیه گازی :

در این مدل نیز مشابه حالت کوره با سه حالت گازی می توانیم توزیع دمای گاز و همچنین دیوار جانبی کوره را در نواحی مختلف گرمایی بدست آوریم . معمولا ناحیه اول را ناحیه پش گرمایش و نواحی دیگر را ناحیه پخت می گویند و ناحیه آخر در کوره را ناحیه تثبیت دمایی می نامند .

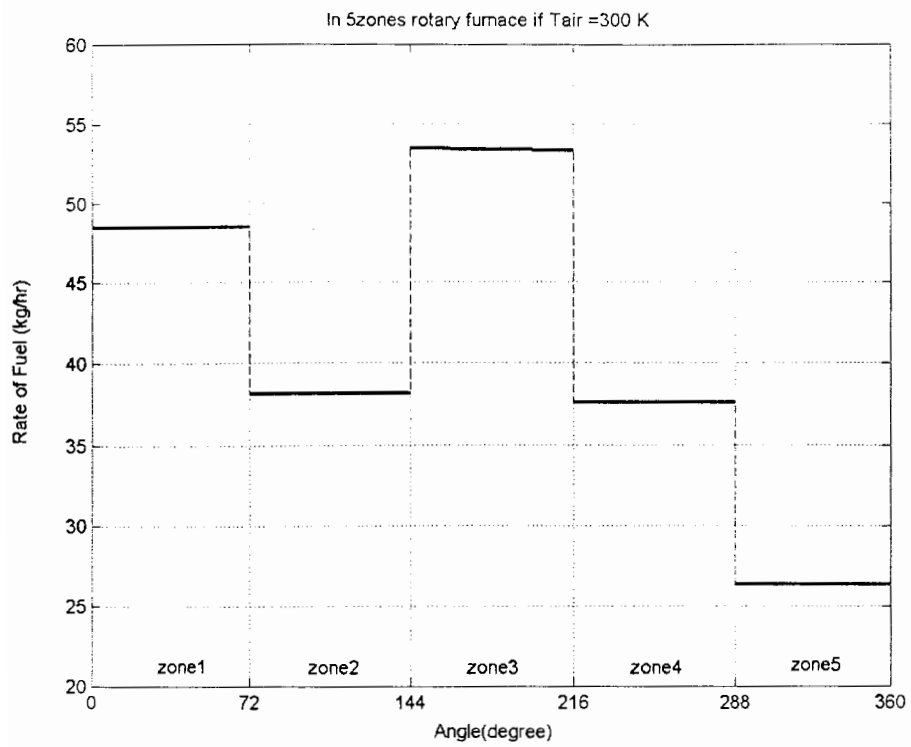


شکل ۶-۱۸- توزیع دمای گاز و دیوار جانبی برای حالت دمای سطح بار معلوم

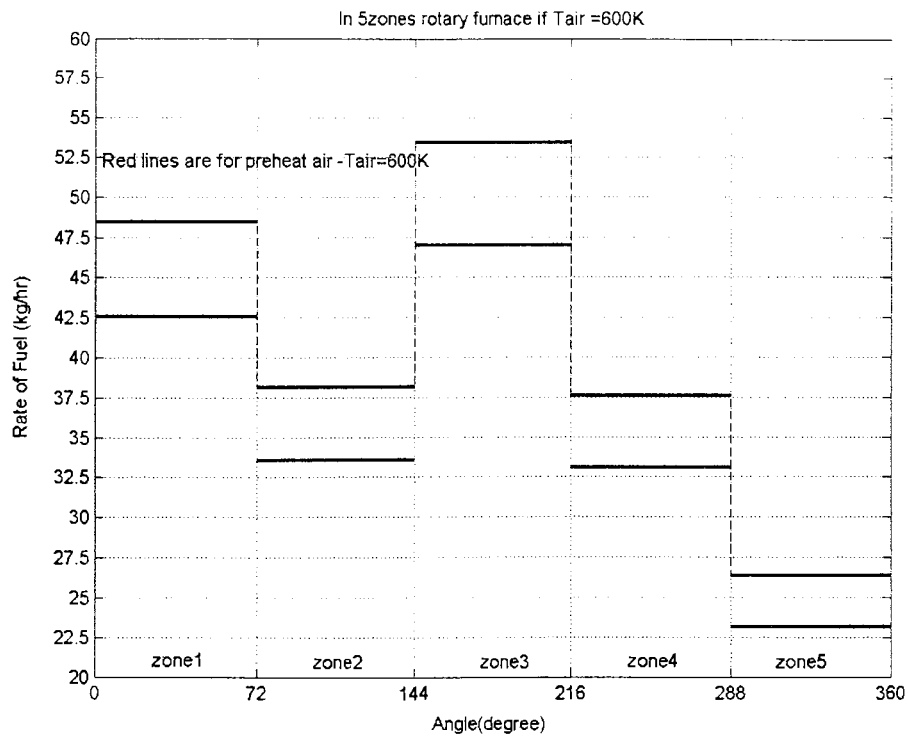
در عمل دیده می شود که در کوره با پنج ناحیه دو ناحیه اول نقش ناحیه پیش گرم در کوره با سه ناحیه را دارد . یعنی با افزایش تعداد نواحی گرمایی افزایش دمای گاز در کوره عملیات حرارتی دورانی تدریجی تر بوده و از نظر بار حرارتی اختلاف دما در نواحی مختلف گازی کم تر می شود که در عملکرد بهتر افزایش تدریجی دمای بار و دقت محاسبات کوره نقش مهمی دارد .

تأثیر پیش گرمایش هوا در مصرف سوخت :

در شکل ابتدا منحنی توزیع مصرف سوخت در نواحی مختلف را برای هنگامی که $T_{air} = 300K$ است نشان می دهیم . اگر هوای احتراقی را تا $T_{air} = 600K$ پیش گرم کنیم تأثیر زیادی در مصرف سوخت دارد.

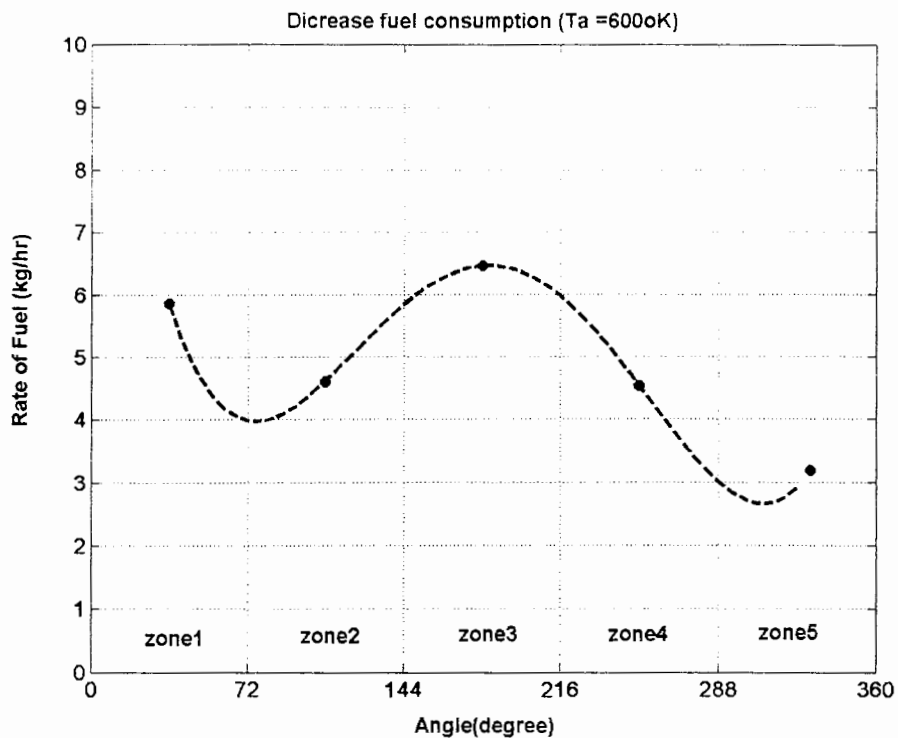


شکل ۶-۱۹- میزان مصرف سوخت در هر ناحیه برای هوای احتراقی پیش گرم نشده



شکل ۶-۲۰- میزان مصرف سوخت در هر ناحیه برای هوای احتراقی پیش گرم شده

اگر مقدار کاهش مصرف سوخت برای هر ناحیه را بدست آوریم تغییرات نرخ کاهش مصرف سوخت برای نواحی مختلف گرمایی در کوره عملیات حرارتی دورانی به صورت زیر است .



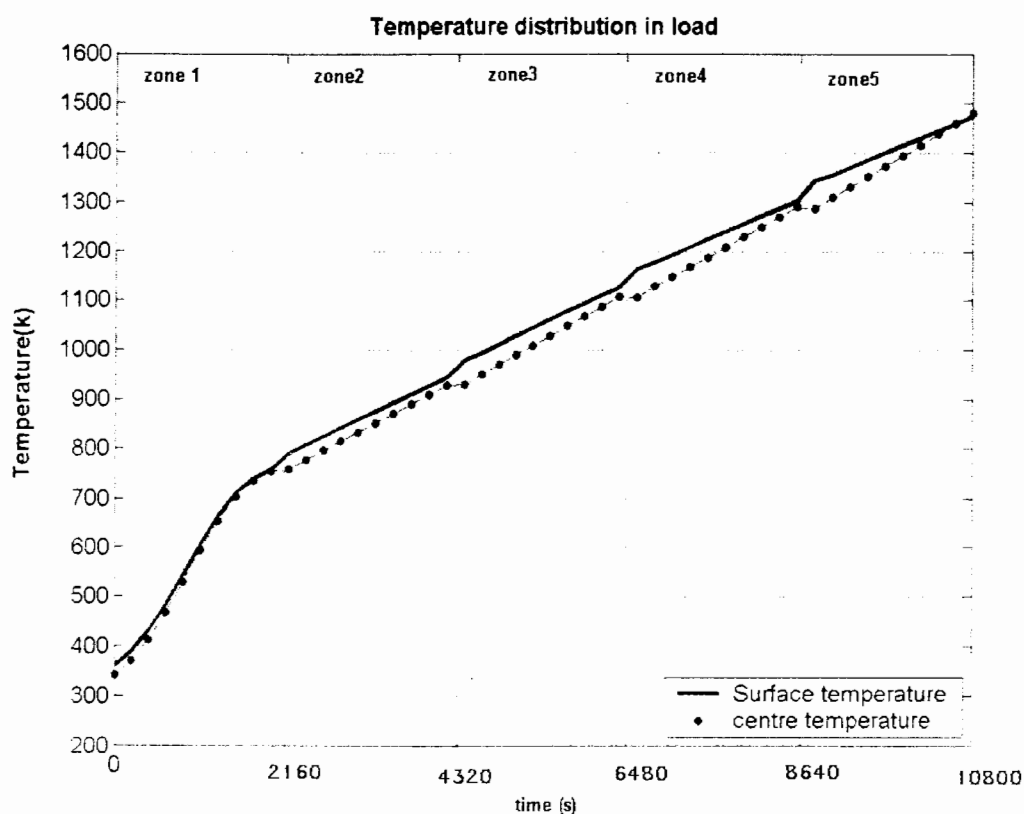
شکل ۶-۲۱- کاهش مقدار سوخت مصرفی با پیش گرمایش هوای احتراقی

می توانیم اثر پیش گرم کردن هوای مصرفی در احتراق را بر بازدهی مصرف سوخت در کوره در نظر بگیریم.

ناحیه گرمایی	مصرف سوخت بدون پیش گرمایش هوا	مصرف سوخت وقتی $T_{air} = 600K$	درصد کاهش مصرف
ناحیه ۱	۴۸,۴۴ kg/hr	۴۲,۵۸ kg/hr	۱۲,۱٪
ناحیه ۲	۳۸,۱۵ kg/hr	۳۳,۵۴ kg/hr	۱۲,۰۸٪
ناحیه ۳	۵۳,۴۳ kg/hr	۴۶,۹۷ kg/hr	۱۲,۰۹٪
ناحیه ۴	۳۷,۵۹ kg/hr	۳۳,۰۵ kg/hr	۱۲,۰۸٪
ناحیه ۵	۲۶,۳۴۱ kg/hr	۲۳,۱۵ kg/hr	۱۲,۱۱٪

جدول ۶-۶- بازدهی مصرف سوخت با پیش گرمایش هوای مصرفی

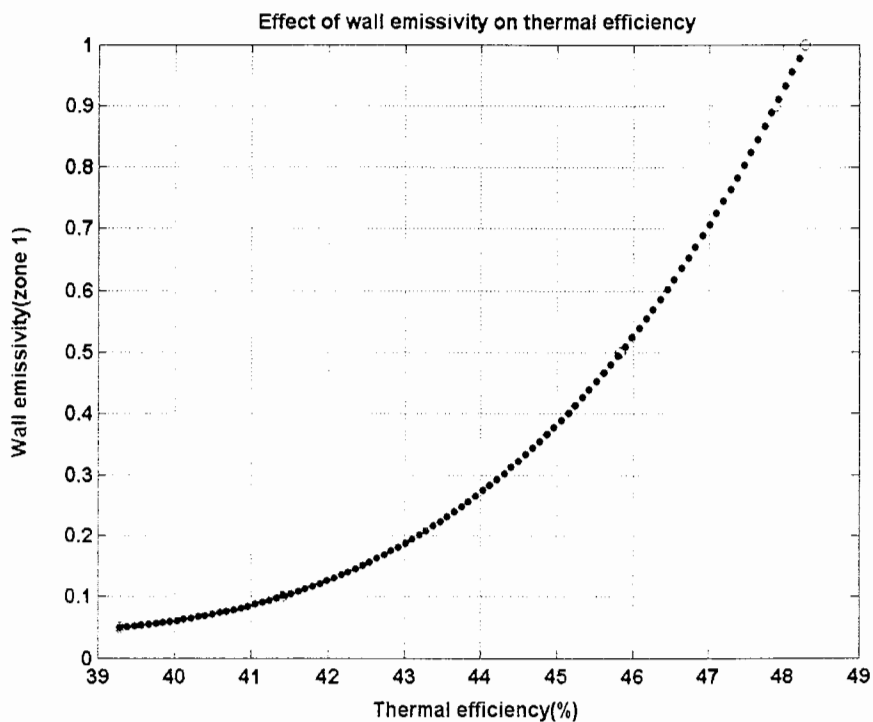
در حالت دمای گاز ثابت می توانیم تغییرات دمای سطح بار و مرکز بار استوانه ای درون کوره را بدست آوریم. الگوی رفتاری دمای سطح و مرکز بار تقریباً مشابه حالت قبل در کوره با سه ناحیه گازی است. شکل ۶-۲۳ تغییرات دمای سطح و مرکز بار استوانه ای در کوره با پنج ناحیه گازی را نشان می دهد. با ورود بار به هر ناحیه دمایی جدید ابتدا اختلاف دمای سطح و مرکز بار زیاد است و پس از گذشت زمان این اختلاف کم می شود.



شکل ۶-۲۳- تغییرات دمای سطح و مرکز بار استوانه ای در کوره با پنج ناحیه گازی

تأثیر ضریب صدور دیواره های کوره بر بازدهی حرارتی

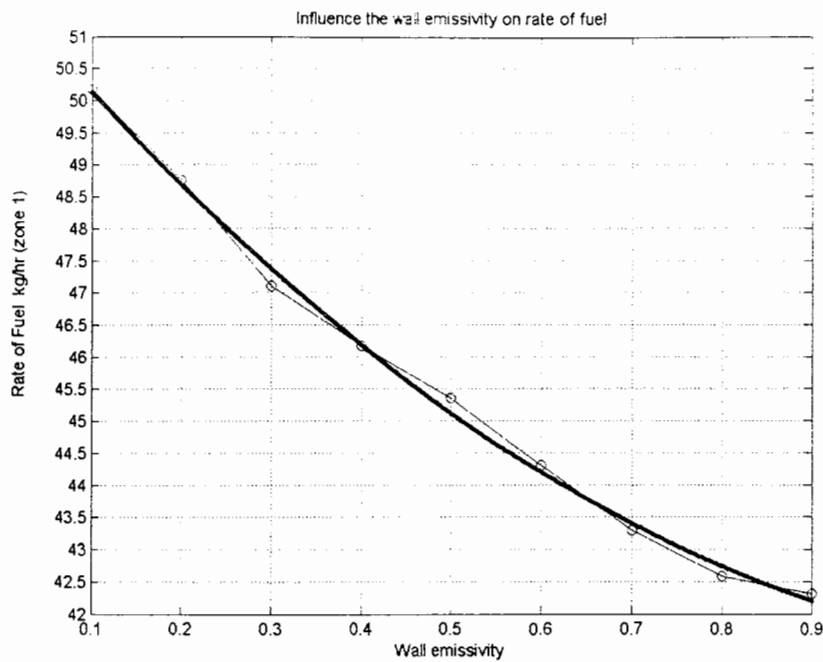
در شبیه سازی انجام شده برای کوره عملیات حرارتی دورانی با پنج ناحیه گازی اگر ضریب صدور دیواره ها ϵ_w را افزایش دهیم انتقال حرارت به بار نیز افزایش می یابد که بدلیل افزایش شار تشعشعی اعمالی به بار می باشد. بنابراین با افزایش ضریب صدور دیوارها ، بازدهی حرارتی کوره نیز افزایش دارد که با نتایج بدست آمده به وسیله الیستون^۱ در کوره های گرمایشی پیوسته همخوانی دارد [۲۰].



شکل ۶-۲۴- تأثیر ضریب صدور دیوارهای کوره بر بازدهی حرارتی

بنابراین در مدل سازی بار درون کوره برای الگوی افزایش دمای مشخص می توانیم تأثیر افزایش ضریب صدور دیوارهای کوره را بر کاهش مصرف سوخت محاسبه کنیم و نشان بدهیم .

^۱ Elliston



شکل ۶-۲۵- تاثیر ضریب صدور دیوارهای کوره بر مصرف سوخت

بنابر این مشخص می شود که تاثیر یک پارامتر موثر بر انتقال حرارت تشعشعی چگونه می تواند بر بازدهی حرارتی کوره عملیات حرارتی اثر گذار باشد و از آنجا که یکی از معیار های سنجش عملکرد کوره ها بازدهی حرارتی آن کوره می باشد برای یک بازدهی مشخص میزان کاهش مصرف سوخت را در هر ناحیه گرمایی می توانیم محاسبه کنیم . همانطور که در منحنی بالا این کاهش در ناحیه اول کوره نشان داده شده است .

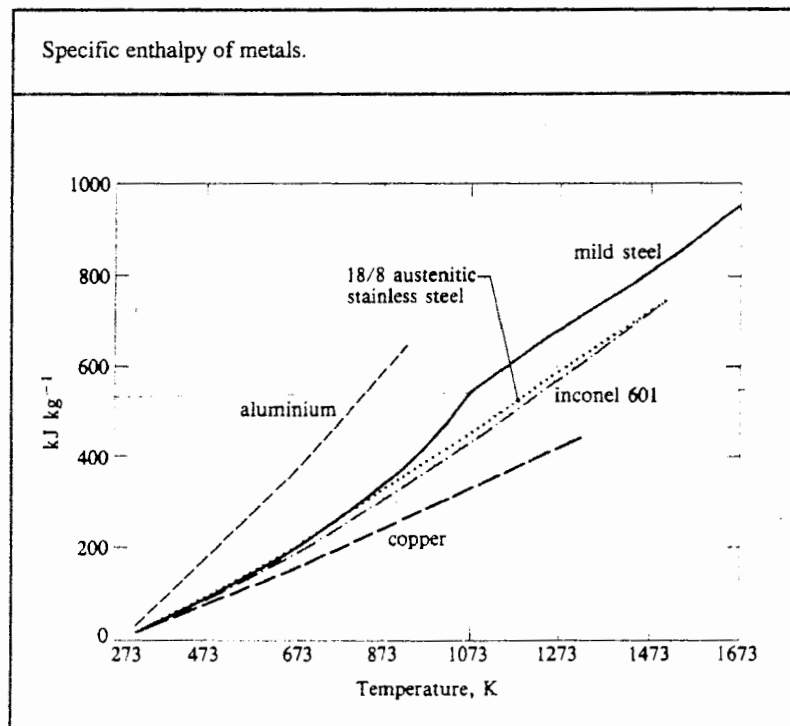
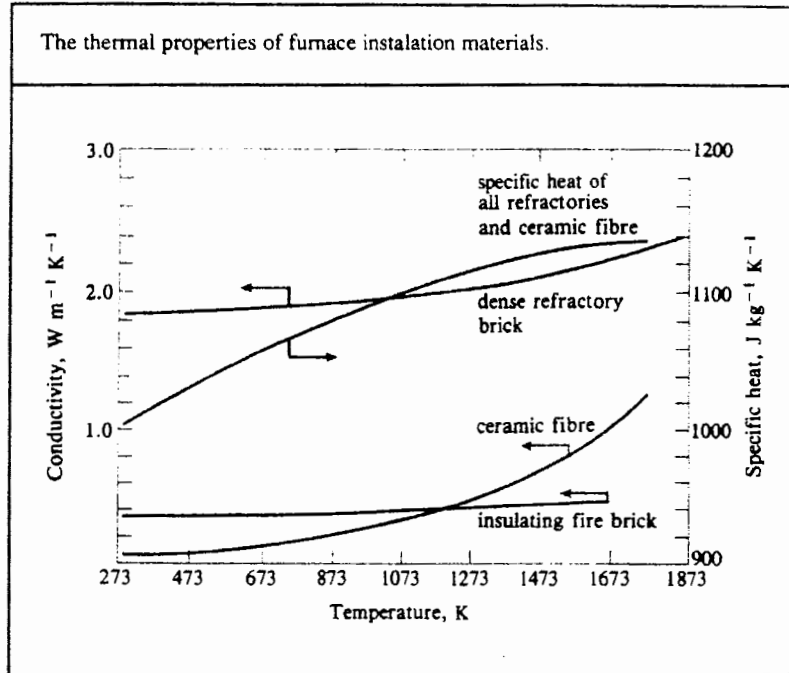
۶-۵- پیشنهادها :

- ۱- شبیه سازی تشعشعی کوره عملیات حرارتی دورانی با استفاده از روش آماری مونت کارلو
- ۲- مدل سازی کوره عملیات حرارتی دورانی با استفاده از مدل شار تشعشعی و روش **Discret Transfer**
- ۳- مدل سازی کوره عملیات حرارتی دورانی با فرض شعله درخشان و حالت واقعی تر تشعشع گازی.
- ۴- مدل سازی به عنوان یک مدل دینامیکی و طراحی سیستم کنترل کننده PID در سیستم برای مشعل ها .
- ۵- اعمال حالت سه گاز خاکستری و یک گازی شفاف در مدل سازی گاز غیر خاکستری و مقایسه با مدل سازی های دیگر گاز واقعی.

- 1- Heat exchanger design Hand book, Section 3.11 : "furnaces and combustion chambers", Hemisphere publishing corp , 1983.
- 2- H.C.Hottel , A.F.Sarofim , "Radiative transfer", 1st edition , MC Graw – Hill , 1967.
- 3- M.M.El-Wakil, "Power plant Technology", 2nd edition , MC Graw-Hill, 1985.
- 4- J.M.Rhine,R.J.Tucker, "Modeling of gas-fired furnaces and boilers and other industrial heating processes", 1st edition, MC Graw Hill, 1991.
- 5- K.S.Chapman , S, Ramadhyani, R.Viskanta, "Modeling and Analysis of Heat Transfer in a Direct-Fired continuous Reheating furnace".
- 6- Frank.p.Incropera , "Fundamentals of Heat Transfer", 1st edition , John Wiley sons, 1981.
- 7- Pritchard, R,Guy,J.J and Connor , N.E. "Industrial Gas utilization Engineering principles and practice ", Bowker Publishing company Epping , Essex , 1977.
- 8- Truelove , J.S.A , "Mixed grey gas model for flame radiation", United Kingdom Atomic Energy Report AERF-R-8494 , Harwell, 1976.
- 9- Smith , T.F, Sher.Z.F and Friedman , J.N, "Evaluation of coefficients for the weighted sum of gray gas model", Trans of the ASME,J.Heat Transfer , 104,PP 602-608,1982.
- 10-Lockwood, F.C, and Shah , N.G. Eighteenth symp. (Intl) on combust.,PP 1405-1414. The combustion institute , pittsburgh, 1981.
- 11-Howell, J.R. "Advances in Heat Transfer", Irvine , T.F. And Hartnett J.P,5,pp 1-54 Academic press, New york , 1968.
- 12- Steward , F.R and Carron , P."The Calculation of radiative Heat flux in a cylindrical furnace using the monte carlo method, Intl J.Heat mass Transfer, 14,pp 245-262,1971.

- 13- Johnson . T.R . and Beer.J.M."Radiative Heat Transfer in Furnace : futher development of the zone method of analysis". Fourteenth symposium (Intl) on Combust. PP 639-649, The combnstion Instatute Pittsburgh,1973.
- 14- Noble.J.J. "the zone method:"Explicit matrix relations for total exchange areas"- Intl J.Heat mass transfer, 18.pp 261-169, 1975.
- 15- Salter.F.M and costick , J.A. "Mathematical Model of the heat transfer within a reheating furnace". J.Inst, fuel , 47,pp 3-19, Mar 1974.
- 16- Fitzgerald, F.and sheridam A.T."prediction of temperature and Heat Transfer distribution in gas-fired pusher reheating furuaces".J.Inst fuel,47,pp 21-27 mar 1974.
- 17- Johnton .R.L,"Numerical methods –A software Apporach", John wiley , New york, 1982.
- 18- Gerald C.F,p.o.Wheatley, "Applied Numerical Analysis, New york , 1999.
- 19- Y.Rong,J.Kang,R.vadar and c.Bai, "Development of an Analytical tool for part food Design and Temperature Control within loaded furuance and parts", Report 00-2 At CHTE consortium meeting , Nov 2000.
- 20- Elliston,D.G.Gray,W.A,Hibberd,D.F/Ho,T-y and Williams,A, "the effect of surface emissivity on furuace per formance , J.Inst Energy, 60,pp 155-167 Dec.1987.
- 21- Wixue Tian and Wilson K.s.chiu, calculation of Direct Exchange Areas for Non uniform Zones Using a Redueed integration Scheme", Trans of the ASME J.Heat Transfer, 125,pp 839-844 oct 2003.
- 22- J.Sika,"Evaluation of Direct-Exchange Areas for a cylindrical Enclosure", the ASME J.Heat Transfer, 113,pp 1040-1044,Nov 1991.

الف - مشخصات حرارتی مواد عایق مصرفی در کوره ها



Properties of a typical natural gas from the North Sea and of its stoichiometric products of combustion

Composition (% by volume):

CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	N ₂
94.4	3.22	0.6	0.2	0.07	0.05	1.46

Property:

CV _{gross}	38.69 × 10 ⁶	J m ⁻³ (s)
CV _{net}	34.91 × 10 ⁶	J m ⁻³ (s)
Density ρ _G	0.719	kg m ⁻³ (s)
Air/fuel ratio R _s	9.76	m ³ (s) m ⁻³ (s)
Combustion product/fuel ratio P _s	10.785	m ³ (s) m ⁻³ (s)
Adiabatic flame temperature	2220	K

Combustion product composition (% by volume):

CO ₂	H ₂ O	N ₂
9.627	18.753	71.617

پ-ضرایب عددی در چند جمله ای در محاسبه انتالپی فلزات

Polynomial coefficients for the specific enthalpy of some metals			
Units J kg ⁻¹			
Polynomial coefficient	Ferrous metals		
	Mild steel 0 – 800°C	Mild steel > 800°C	18/8 Austenitic stainless steel
<i>a</i>	-0.81997E+04	-0.394790E+06	-0.7058E+04
<i>b</i>	0.54145E+03	0.18757E+04	0.4801E+03
<i>c</i>	-0.7122E+00	-1.18137E+00	0.1562E+00
<i>d</i>	0.3444E-02	0.37703E-3	-0.4365E-04
<i>e</i>	-0.5628E-05	-	-
<i>f</i>	0.3405E-08	-	-
<i>g</i>	-	-	-
Non-ferrous metals			
	Inconel 601	Aluminium	Copper
<i>a</i>	0.666E+04	-0.1394E+05	-0.5673E+04
<i>b</i>	0.442E+03	0.9263E+03	0.3773E+03
<i>c</i>	0.1345E+00	0.2091E+00	0.06245E+00
<i>d</i>	-	-0.3758E-03	-0.6568E-05
<i>e</i>	-	0.66583E-06	-0.6332E-07
<i>f</i>	-	-0.4253E-09	0.7952E-10
<i>g</i>	-	-	-0.30E-13

ت-ضرایب چند جمله ای برای محاسبه ضرایب هدایت حرارتی مواد

Polynomial coefficients for thermal conductivity (λ)			
Units $W m^{-1}K^{-1}$			
Polynomial coefficient	Ferrous metals		
	Mild steel 0 – 800°C	Mild steel > 800°C	18/8 Austenitic stainless steel
<i>a</i>	0.519059E+02	0.302492E+02	0.148397E+02
<i>b</i>	-0.369417E-03	-0.155686E-01	0.946518E-02
<i>c</i>	-0.768098E-04	0.144759E-04	0.137840E-04
<i>d</i>	-0.811310E-08	-0.982726E-08	-0.924956E-08
<i>e</i>	0.212134E-09	0.159948E-10	-
<i>f</i>	-0.180744E-12	-0.936461E-14	-
<i>g</i>	-	0.148732E-17	-
Non-ferrous metals			
	Inconel 601	Aluminium	Copper
<i>a</i>	0.110000E+02	0.207725E+03	0.385186E+03
<i>b</i>	0.168000E-01	0.161262E+00	-0.481482E-01
<i>c</i>	-	-0.459894E-03	-
<i>d</i>	-	0.282840E-06	-
Refractories and insulating materials			
	Ceramic fibre	Insulating fire brick	Dense refractory brick
<i>a</i>	0.82297E-01	0.34166735E+00	1.8406105E+00
<i>b</i>	-0.14283E-03	0.71161834E-04	0.10118265E-03
<i>c</i>	0.95429E-06	-0.3412567E-07	-0.516367E-07
<i>d</i>	-0.81346E-09	0.3240756E-10	0.12778578E-09
<i>e</i>	0.38894E-12	-	-
The densities of some common materials			
Units $kg m^{-3}$			
Mild steel			7800
Stainless steel			7930
Inconel 601			8050
Aluminium			2698
Copper			8930
Ceramic fibre			128 *
Insulating brick			880 *
Dense brick			2600 *
* Typical values only: density of these materials can vary widely.			

ث-ضرایب چند جمله ای در محاسبه گرمای مخصوص فلزات

Table A2.1

Polynomial coefficients for specific heat (C_p)

Units $J\ kg^{-1}K^{-1}$				
Polynomial coefficient	Ferrous metals			
	Mild steel 0 – 750°C	Mild steel 750 – 900°C	Mild steel > 900°C	18/8 Austenitic stainless steel
<i>a</i>	0.459389E+03	0.960497E+04	0.595783E+03	0.480000E+03
<i>b</i>	0.927605E+00	0.311055E+02	0.809290E+00	0.312400E+00
<i>c</i>	-0.892667E-02	-0.821919E-01	-0.172302E-02	-0.130950E-03
<i>d</i>	0.427170E-04	-0.996642E-05	0.113957E-05	-
<i>e</i>	-0.823237E-07	-0.291067E-08	-0.946037E-10	-
<i>f</i>	0.617737E-10	0.166675E-09	-0.762604E-13	-
<i>g</i>	-0.885174E-14	-0.112167E-12	-	-
Non-ferrous metals				
	Inconel 601	Aluminium	Copper	
<i>a</i>	0.442000E+03	0.926288E+03	0.377273E+03	
<i>b</i>	0.269000E+00	0.418140E+00	0.124909E+00	
<i>c</i>	-	-0.112759E-02	-0.197052E-04	
<i>d</i>	-	0.266327E-05	-0.253276E-06	
<i>e</i>	-	-0.212654E-08	0.397578E-09	
<i>f</i>	-	-	-0.180032E-12	
Refractories and insulating materials				
<i>a</i>	0.100164E+04			
<i>b</i>	0.1583E+00			
<i>c</i>	-0.458133E-04			

ج- کد برنامه نوشته شده برای محاسبه سطوح تبادل مستقیم

```

%for combustion natural gas with 20% excess air
% upper is for 2 grey gas plus one clear gas
Rin=input('inter Rin(m) ');
Rout=input('inter Rout(m) ');
H=input('inter H(m) ');
%K=input('inter K ');
%B=input('inter B ');
R1=Rout;
R2=Rout;
B1=(Rout-Rin);
B2=(Rout-Rin);
R=Rout/Rin;
t=H/Rin;
kg=1.88;
pC=1./(1+2+3.76*2)
pH=2./(1+2+2*3.76)
pt=pC+pH;
K=kg*pt;
A=t^2+R^2+1;B=t^2-R^2+1;
A1=pi*Rout^2;A2=A1;
A3=2*pi*Rout*H;
n=0;
n1=0.1;n2=1000;
for i=n:0.1:10
    i=i+1
end
b= eps:pi/1000:pi;
% numerical integration for calculate s1s2|o(R1,R2,H)
s1s1=0; s2s2=0 ;s4s4=0;
b1= eps:pi/1000:pi;
r1=2*R1*sin(b1./2);
m1=(r1.^2+H^2);
P1=R1^2*(pi-(b1)-sin(b1)).*sin(b1);
s1=(2*R1*R2*H^2)*(P1).*(exp(-K*(sqrt(r1.^2+H^2)))/(m1.^2));
z1 = trapz(b1,s1);
w1=z1;

f = fcnchk(funfcn);
if nargin < 4 | isempty(tol), tol = 1.e-6; end;
if nargin < 5 | isempty(trace), trace = 0; end;

% Initialize with three unequal subintervals.
h = 0.13579*(b-a);
x = [a a+h a+2*h (a+b)/2 b-2*h b-h b];

```

```

y = feval(f, x, varargin{:});
fcnt = 7;
% Fudge endpoints to avoid infinities.
if ~isfinite(y(1))
    y(1) = feval(f,a+eps*(b-a),varargin{:});
    fcnt = fcnt+1;
end
if ~isfinite(y(7))
    y(7) = feval(f,b-eps*(b-a),varargin{:});
    fcnt = fcnt+1;
end

% Call the recursive core integrator.
hmin = eps/1024*abs(b-a);
[Q(1),fcnt,warn(1)] = ...
    quadstep(f,x(1),x(3),y(1),y(2),y(3),tol,trace,fcnt,hmin,varargin{:});
[Q(2),fcnt,warn(2)] = ...
    quadstep(f,x(3),x(5),y(3),y(4),y(5),tol,trace,fcnt,hmin,varargin{:});
[Q(3),fcnt,warn(3)] = ...
    quadstep(f,x(5),x(7),y(5),y(6),y(7),tol,trace,fcnt,hmin,varargin{:});
Q = sum(Q);
warn = max(warn);

switch warn
case 1
    warning('MATLAB:quad:MinStepSize', ...
        'Minimum step size reached; singularity possible.')
case 2
    warning('MATLAB:quad:MaxFcnCount', ...
        'Maximum function count exceeded; singularity likely.')
case 3
    warning('MATLAB:quad:ImproperFcnValue', ...
        'Infinite or Not-a-Number function value encountered.')
otherwise
end

function [Q,fcnt,warn] = quadstep (f,a,b,fa,fc,fb,tol,trace,fcnt,hmin,varargin)
%QUADSTEP Recursive core routine for function QUAD.

maxfcnt = 1000;

% Evaluate integrand twice in interior of subinterval [a,b].
h = b - a;
c = (a + b)/2;
if abs(h) < hmin | c == a | c == b
    % Minimum step size reached; singularity possible.

```

```

    Q = h*fc;
    warn = 1;
    return
end
x = [(a + c)/2, (c + b)/2];
y = feval(f, x, varargin{:});
fcnt = fcnt + 2;
if fcnt > maxfcnt
    % Maximum function count exceeded; singularity likely.
    Q = h*fc;
    warn = 2;
    return
end
fd = y(1);
fe = y(2);

% Three point Simpson's rule.
Q1 = (h/6)*(fa + 4*fc + fb);

% Five point double Simpson's rule.
Q2 = (h/12)*(fa + 4*fd + 2*fc + 4*fe + fb);

% One step of Romberg extrapolation.
Q = Q2 + (Q2 - Q1)/15;

if ~isfinite(Q)
    warn = 3;
    return
end
if trace
    disp(sprintf('%8.0f %16.10f %18.8e %16.10f',fcnt,a,h,Q))
end

% Check accuracy of integral over this subinterval.
if abs(Q2 - Q) <= tol
    warn = 0;
    return

% Subdivide into two subintervals.
else
    [Qac,fcnt,warnac] = quadstep(f,a,c,fa,fd,fc,tol,trace,fcnt,hmin,varargin{:});
    [Qcb,fcnt,warncb] = quadstep(f,c,b,fc,fe,fb,tol,trace,fcnt,hmin,varargin{:});
    Q = Qac + Qcb;
    warn = max(warnac,warncb);
end

```



```

>>
% numerical integration for calculate s1s2|o(R1,R2-B2,H)
b2= eps:pi/1000:pi;
r2=2*R1*sin(b./2);
m2=(r2.^2+H^2);
P2=R1^2*(pi-(b2)-sin(b2)).*sin(b2);
s2=(2*R1*(R2-B2)*H^2)*(P2).*(exp(-K*(sqrt(r2.^2+H^2)))/(m2.^2));
z2 = trapz(b2,s2);

say3=atan(B2/H);
b3=eps:say3/1000:say3;
s3=(2*pi*(R2-B2)^2)*sin(b3).*cos(b3).*exp(-K*H./cos(b3));
z3 = trapz(b3,s3);
w2=z2+z3;
% numerical integration for calculate s1s2|o(R1-B1,R2,H)
b4= eps:pi/1000:pi;
r4=2*R1*sin(b./2);
m4=(r4.^2+H^2);
P4=R1^2*(pi-(b4)-sin(b4)).*sin(b4);
%t=acos(R1-R2.*cos(b4))./(r4)
%P4=R1^2*(pi-(b)-sin(b)).*sin(b);
s4=(2*(R1-B1)*R2*H)*(P4).*(exp(-K*(sqrt(r4.^2+H^2)))/(m4.^2));
z4 = trapz(b4,s4);
say5=atan(B2/H);
b5=eps:say5/1000:say5;
s5=(2*pi*(R1-B1)^2)*sin(b5).*cos(b5).*exp(-K*H./cos(b5));
z5 = trapz(b5,s5);
w3=z4+z5;
% numerical integration for calculate s1s2|o(R1-B1,R2-B2,H)
b6= eps:pi/1000:pi;
r6=2*R1*sin(b./2);
P6=R1^2*(pi-(b4)-sin(b4)).*sin(b4);
m6=(r6.^2+H^2);
s6=(P6).*(exp(-K*(sqrt(r6.^2+H^2)))/(m6.^2));
z6 = 2*(R1-B1)*(R2-B2)*H^2*trapz(b6,s6);

say7=atan(2*B1/H);
b7=eps:say7/1000:say7;
s7=(2*pi*(R2-B2)^2)*sin(b7).*cos(b7).*exp(-K*H./cos(b7));
z7 = trapz(b7,s7);
w4=z6+z7;
s1s2=w1-w2-w3+w4;
s1s2
s2s1=s1s2
b8= eps:pi/1000:pi;
r8=sqrt(R1^2+R2^2-2*R1*R2*cos(b8./2));

```

```

P8=(R1)^2*(pi-(b8)-sin(b8)).*sin(b8);
m8=(r8.^2+H^2);
s8=(P8).*(exp(-K*(sqrt(r8.^2+H^2)))./(m8.^2));
z8 = 2*(R1)*(R2)*H^2*trapz(b8,s8);
s1s20=z8
% calculate s1s3 and s3s1 in enclosure
% describing parameter in numerical integration
% for this geometry s1s3(R1,B1,R2,B2,H)=
%=s1s2|o(R1,R2,H)-s1s2|o(R1,R2,0)-s1s2|o(R1,R2-B2,H)+s1s2|o(R1,R2-B2,0)
%numerical integration for calculate s1s3|o(R1,R2,H)
b9= eps:pi/1000:pi;
r9=2*R1*sin(b9./2);
u9=(2.*b9-sin(2.*b9)).*sin(b9);
m9=(r9.^2+H^2);
s9=u9.*((exp(-K.*r9)./(r9.^4))-exp(-K.*sqrt(r9.^2+H^2))./(m9.^2));
z9 = (R1)^2*(R2)^2*trapz(b9,s9);
say10=atan(H/(R1+R2));
b10=eps:say10/1000:say10;
s10=((2*pi*R1^2*R2^2/(R1+R2)^2)*sin(b10).*cos(b10).*exp(-K*(R1+R2)./cos(b10)));
z10 = trapz(b10,s10);
%numerical integration for calculate s1s3|o(R1,R2-B2,H)
b11= eps:pi/1000:pi;
r11=2*R1*sin(b11./2);
u11=((2.*b11)-sin(2.*b11)).*sin(b11);
m11=(r11.^2+H^2);
s11=u11.*((exp(-K.*r11)./(r11.^4))-exp(-K.*sqrt(r11.^2+H^2))./(m11.^2));
z11 = (R1)^2*(R2-B2)^2*trapz(b11,s11);

say12=atan(H/(R1+R2-B2));
b12=eps:say12/1000:say12;
s12=((2*pi*R1^2*(R2-B2)^2/(R1+R2-B2)^2)*sin(b12).*cos(b12).*exp(-K*(R1+R2-
B2)./cos(b12)));
z12 = trapz(b12,s12);
s1s3=z9+z10-z11-z12;
s1s3
s3s1=s1s3
%numerical integration for calculate s1s3o
b13= eps:pi/1000:pi;
r13=2*R1*sin(b13./2);
u13=((2.*b13)-sin(2.*b13)).*sin(b13);
m13=(r13.^2+H^2);
s13=u13.*((exp(-K.*r13)./(r13.^4))-exp(-K.*sqrt(r13.^2+H^2))./(m13.^2));
z13 = (R1^2*R2^2)*trapz(b13,s13);
say14=atan(H/(R1+R2));
b14=eps:say14/1000:say14;

```

```

s14=sin(b14).*cos(b14).*exp(-K*(R1+R2)./cos(b14));
z14 = (2*pi*R1^2*R2^2/(R1+R2)^2)*trapz(b14,s14);
s1s3o=z13+z14;
s1s3o
F34=(1/R)-(1/(pi*R))*(acos(B/A)*(1/(2*t))*(sqrt((A+2)^2-
(2*B)^2)*acos(B/(B*A))+B*asin(1/R)-(pi*A/2)));
b= eps:pi/1000:pi;
r=2*R1*sin(b./2);
ss=exp(-K.*r);
zz=((A3*F34)*0.43);
s3s4=zz
zzz=(A3*F34);
s4s3=s3s4
%F33=(sqrt(4*R^2+t^2))/t*asin(
% calculate g1s2 and s2g1 in enclosure
% describing parameter in numerical integration
% for this geometry g1s2(R1,B1,R2,B2,H)=
% =g1s2|o(R1,R2,H)-g1s2|o(R1,R2,0)-g1s2|o(R1,R2-B2,H)+g1s2|o(R1,R2-B2,0)-
% -g1s2|o(R1-B1,R2,H)+g1s2|o(R1-B1,R2,0)+g1s2|o(R1-B1,R2-B2,H)-g1s2|o(R1-
B1,R2-B2,0)

% numerical integration for calculate g1s2|o(R1,R2,H)
b15= eps:pi/1000:pi;
r15=2*R1*sin(b15./2);
P15=(R1)^2*(pi-(b15)-sin(b15)).*sin(b15);
u15=((2.*b15)-sin(2.*b15)).*sin(b15);
m15=(r15.^2+H^2);
j1=((exp(-K.*r15)/(r15.^3))-exp(-K.*sqrt(r15.^2+H^2))./sqrt(m15.^3));
f1=2*P15.*r15.^2+u15.*R1^2*R2^2;
z15=j1.*f1;
q15=K*(R1*R2)/2*trapz(b15,z15);

say16=atan(H/(R1+R2));
b16=eps:say16/1000:say16;
s16=sin(b16).*exp(-K*(R1+R2)./cos(b16));
q16 = (K*pi*R1^2*R2^2/(R1+R2))*trapz(b16,s16);
ans1=q15+q16;
% numerical integration for calculate g1s2|o(R1,R2,0)
h=0;
b15= eps:pi/1000:pi;
r15=2*R1*sin(b15./2);
P15=(R1)^2*(pi-(b15)-sin(b15)).*sin(b15);
u15=((2.*b15)-sin(2.*b15)).*sin(b15);
m15=(r15.^2+h^2);
j2=((exp(-K.*r15)/(r15.^3))-exp(-K.*sqrt(r15.^2+h^2))./sqrt(m15.^3));
f2=2*P15.*r15.^2+u15.*R1^2*R2^2;

```

```

z15=j2.*f2;
q15=K*(R1*R2)/2*trapz(b15,z15);
say16=atan(h/(R1+R2));
b16=eps:say16/1000:say16;
s16=sin(b16).*exp(-K*(R1+R2)./cos(b16));
ans2=0;
% numerical integration for calculate g1s2|o(R1,R2-B2,H)
b17= eps:pi/1000:pi;
r17=2*R1*sin(b17./2);
P17=(R1)^2*(pi-(b17)-sin(b17)).*sin(b17);
u17=((2.*b17)-sin(2.*b17)).*sin(b17);
m17=(r17.^2+H^2);
j3=((exp(-K.*r17)./(r17.^3))-exp(-K.*sqrt(r17.^2+H^2))./sqrt(m17.^3));
f3=2*P17.*(r17.^2)+u17.*R1^2*(R2-B2)^2;
z17=j3.*f3;
q17=K*(R1*(R2-B2))/2*trapz(b17,z17);

say18=atan(H/(R1+R2-B2));
b18=eps:say18/1000:say18;
s18=sin(b18).*exp(-K*(R1+R2-B2)./cos(b18));
q18 = (((K*pi*R1^2*(R2-B2)^2))/(R1+R2-B2))*trapz(b18,s18);

phi1=abs(R2-B2-R1);
L1=eps:phi1/1000:phi1;
x1=exp(-K*L1);
q19=trapz(L1,x1);
phi2=sqrt((R2-B2-R1)^2+H^2);
L2=H:(phi2)/1000:phi2;
x2=(1-(H^2./L2)).*exp(-K*L2);
q20=trapz(L2,x2);
q21=(K*pi*R1^2)*(q19-q20);
ans3=q17+q18+q21;
% numerical integration for calculate g1s2|o(R1,R2-B2,0)
phi3=abs(R2-B2-R1);
L3=eps:phi1/1000:phi1;
x3=exp(-K*L3);
q22=trapz(L3,x3);
phi4=abs(R2-B2-R1);
L4=eps:(phi4)/1000:phi4;
x4=exp(-K*L4);
q23=trapz(L4,x4);
q24=K*pi*(R2^2)*(q22-q23);
ans4=q24;
% numerical integration for calculate g1s2|o(R1-B1,R2,H)
b19= eps:pi/1000:pi;
r19=2*R1*sin(b17./2);

```

```

P19=(R1)^2*(pi-(b19)-sin(b19)).*sin(b19);
u19=((2.*b19)-sin(2.*b19)).*sin(b19);
m19=(r19.^2+H^2);
j4=((exp(-K.*r19)./(r19.^3))-exp(-K.*sqrt(r19.^2+H^2))./sqrt(m19.^3));
f4=2*P19.*(r19.^2)+u19.*(R1-B1)^2*(R2^2);
z19=j4.*f4;
q25=(K*(R1-B1)*(R2))/2*trapz(b19,z19);

say20=atan(H/(R1-B1+R2));
b20=eps:say20/1000:say20;
s20=sin(b20).*exp(-K*(R1-B1+R2))./cos(b20));
q26 = (((K*pi*(R1-B1)^2*R2^2))/(R1-B1+R2))*trapz(b20,s20);

phi5=abs(R2-R1+B1);
L5=eps:phi5/1000:phi5;
x5=exp(-K*L5);
q27=trapz(L5,x5);
phi6=sqrt((R2-R1+B1)^2+H^2);
L6=H:(phi6)/1000:phi6;
x6=(1-(H^2./L6)).*exp(-K*L6);
q28=trapz(L6,x6);
q29=(K*pi*R1^2)*(q27-q28);
ans5=q25+q26+q29;
% numerical integration for calculate g1s2|o(R1-B1,R2,0)
phi7=abs(R2-R1+B1);
L7=eps:phi7/1000:phi7;
x7=exp(-K*L7);
q30=trapz(L7,x7);
phi8=abs(R2-R1+B1);
L8=eps:(phi8)/1000:phi8;
x8=exp(-K*L8);
q31=trapz(L8,x8);
q32=K*pi*(R2^2)*(q30-q31);
ans6=q32;
% numerical integration for calculate g1s2|o(R1-B1,R2-B2,H)
b21=eps:pi/1000:pi;
r21=2*R1*sin(b21./2);
P21=(R1)^2*(pi-(b21)-sin(b21)).*sin(b21);
u21=((2.*b21)-sin(2.*b21)).*sin(b21);
m21=(r21.^2+H^2);
j5=((exp(-K.*r21)./(r21.^3))-exp(-K.*sqrt(r21.^2+H^2))./sqrt(m21.^3));
f5=2*P21.*(r21.^2)+u21.*((R1-B1)^2*(R2-B2)^2);
z21=j5.*f5;
q33=(K*(R1-B1)*(R2-B2))/2*trapz(b21,z21);

```

```

if nargin < 5, error('Requires at least five inputs'); end
if nargin < 6 | isempty(tol), tol = 1.e-6; end
if nargin < 7 | isempty(quadf), quadf = @quad; end
intfcn = fcnchk(intfcn);

trace = []; Q = zeros(size(y));
trace = [];
for i = 1:length(y)
    Q(i) = feval(quadf, intfcn, xmin, xmax, tol, trace, y(i), varargin{:});
end
Q = feval(quadf, @innerintegral, ymin, ymax, tol, trace, intfcn, ...
    xmin, xmax, tol, quadf, varargin{:});
say22=atan(H/(R1-B1+R2-B2));
b22=eps:say22/1000:say22;
s22=sin(b22).*exp(-K*(R1-B1+R2-B2)./cos(b22));
q34 = (((K*pi*(R1-B1)^2*(R2-B2)^2)/(R1-B1+R2-B2))*trapz(b22,s22);

phi9=abs(R2-R1+B1);
L9=eps:phi9/1000:phi9;
x9=exp(-K*L9);
q35=trapz(L9,x9);
phi10=sqrt((R2-B2-R1+B1)^2+H^2);
L10=H:(phi10)/1000:phi10;
q36=0;
q37=(K*pi*R1^2)*(q35-q36);
ans7=q33+q34+q37;
% numerical integration for calculate g1s2|o(R1-B1,R2-B2,0)
ans8=0;
g1s2=-(ans1-ans2-ans3+ans4-ans5+ans6+ans7-ans8);
g1s2
s2g1=g1s2
% numerical integration for calculate g1s2o
b21= eps:pi/1000:pi;
r21=2*R1*sin(b21./2);
P21=(R1)^2*(pi-(b21)-sin(b21)).*sin(b21);
u21=((2.*b21)-sin(2.*b21)).*sin(b21);
m21=(r21.^2+H^2);
j6=((exp(-K.*r21)./(r21.^3))-exp(-K.*sqrt(r21.^2+H^2))./sqrt(m21.^3));
f6=2*P21.*(r21.^2)+u21.*((R1)^2*(R2)^2);
z21=j5.*f5;
q38=(K*(R1*R2)/2)*trapz(b21,z21);

say23=atan(H/(R1+R2));
b23=eps:say23/1000:say23;
s23=sin(b23).*exp(-K*(R1+R2)./cos(b23));
q39 = (((K*pi*(R1)^2*(R2)^2)/(R1+R2))*trapz(b23,s23);

```

```

phi11=abs(R2-R1);
L11=eps:phi11/1000:phi11;
x11=exp(-K*L11);
q40=trapz(L9,x9);
phi12=sqrt((R2-R1)^2+H^2);
L12=H:(phi12)/1000:phi12;
q36=0;
q37=0;
anso=q38+q39+0;
g1s20=anso
% calculate s3s3 in enclosure
% describing parameter in numerical integration
b24= eps:pi/1000:pi;
r24=2*R1*sin(b21./2);
say25=atan(H./2*R1);
%d=atan(H./2*R1);
%Q = dblquad(inline('tan(h)-tan(b)', eps, pi, eps, h))
d=H/(2*R1);
global K R1 R2 d H
result1 = dblquad(@int1,eps,d,eps,pi);
res1=8*(R1.^2)*(result1);
s3s3=res1
% calculate g1g1 in enclosure
% describing parameter in numerical integration
% g1g1=g1g1|o(R1,R2,H)-g1g1|o(R1,R2,0)-g1g1|o(R1,R2-B2,H)+g1g1|o(R1,R2-
B2,O)
if nargin < 7, error('Requires at least seven inputs'); end
if nargin < 8 | isempty(tol), tol = 1.e-6; end
if nargin < 9 | isempty(quadf), quadf = @quad; end
intfcn = fcnchk(intfcn);
trace = [];
Q = zeros(size(z));
trace = [];
for i = 1:length(y)
    Q(i) = feval(quadf, intfcn, xmin, xmax, tol, trace, y(i), z, varargin{:});
end
Q = dblquad(@innerintegral, ymin, ymax, zmin, zmax, tol, trace, intfcn, ...
    xmin, xmax, tol, quadf, varargin{:});
% -g1g1|o(R1-B1,R2,H)+g1g1|o(R1-B1,R2,0)+g1g1|o(R1-B1,R2-B2,H)-g1g1|o(R1-B1
% ,R2-B2,0)
%numerical calculation for g1g1|o(R1,R2,H)
d=H/(2*R1);
global K R1 R2 d H B1 B2
result2 = dblquad(@int2,eps,d,eps,pi);
res2=K^2*4*R1*R2*(result2);

```

```

b24=eps:H/1000:H;
v1=b24;
s24=((v1.^2-(R2-R1)^2)-2*H*sqrt(v1.^2-(R2-R1)^2)).*(exp(-K.*v1)./v1);
q41=trapz(s24,v1);
b25=eps:H/1000:H;v2=b25;
s25=(2*H-v2).*exp(-K.*v2);
q42=trapz(s25,v2);
b26=H:H/10000:H;v3=b26;
s26=(H-v3).^2.*exp((-K.*v3)./v3);
q43=0;
%q43=trapz(s26,v3);
q45=K^2*(2*pi*R1^2)*(q41+q42+q43);
g1=res2+q45;
%numerical calculation for g1g1|o(R1,R2,0)
global K R1 R2 d H B1 B2
result3 =0;
g2=0;
%numerical calculation for g1g1|o(R1,R2-B2,H)
res3=K^2*4*R1*(R2-B2)*(result2);
b27=B2:H/1000:sqrt(B2^2+H^2);
v4=b27;
s27=((v4.^2-(R2-B2-R1)^2)-2*H*sqrt(v4.^2-(R2-B2-R1)^2)).*(exp(-K.*v4)./v4);
q46=(2*pi*R1^2*K^2)*trapz(s27,v4);
b28=eps:H/1000:sqrt(B2^2+H^2);v5=b28;
s28=(2*H-v5).*exp(-K.*v5);
q47=(2*pi*R1^2*K^2)*trapz(s28,v5);

b29=H:H/1000:sqrt(B2^2+H^2);v6=b29;
s29=(H-v6).^2.*exp((-K.*v6)./v6);
q48=(2*pi*R1^2*K^2)*trapz(s29,v6);
g3=res3+q46+q47+q48;
%numerical calculation for g1g1|o(R1,R2-B2,0)
res4=0;
b30=eps:B2/1000:B2;v7=b30;
s30=(2*H-v7).*exp(-K.*v7);
q49=(2*pi*R1^2*K^2)*trapz(s30,v7);

b31=eps:B2/1000:B2;v8=b31;
s31=(H-v8).^2.*exp((-K.*v8)./v8);
q50=(2*pi*R1^2*K^2)*trapz(s31,v8);
g4=res4+q49+q50;
%numerical calculation for g1g1|o(R1-B1,R2,H)
res5=K^2*4*(R1-B1)*R2*(result2);
q51=q46;
q52=q47;
q53=q48;

```



```

g5=res5+q51+q52+q53;
%numerical calculation for g1g1|o(R1-B1,R2,0)
res6=res4;
q54=q49;
q55=q50;
g6=res6+q54+q55;
%numerical calculation for g1g1|o(R1-B1,R2-B2,H)
res7=K^2*4*(R1-B1)*(R2-B2)*(result2);
q56=q45;
g7=res7+q45;
%numerical calculation for g1g1|o(R1-B1,R2-B2,0)
g8=0;
g1g1=g1-g2-g3+g4-g5+g6+g7-g8;
g1g1;
%numerical calculation for g1g1o(R1,R1,H)
d=H/(2*R1);
global K R1 R2 d H B1 B2
result2 = dblquad(@int2,eps,d,eps,pi);
res2=K^2*4*R1*R2*(result2);
b24=eps:H/1000:H;
v1=b24;
s24=((v1.^2-(R2-R1)^2)-2*H*sqrt(v1.^2-(R2-R1)^2)).*(exp(-K.*v1)./v1);
q41=trapz(s24,v1);
b25=eps:H/1000:H;v2=b25;
s25=(2*H-v2).*exp(-K.*v2);
q42=trapz(s25,v2);
b26=H:H/1000:H;v3=b26;
s26=(H-v3).^2.*exp((-K.*v3)./v3);
%q43=trapz(s26,v3);
q45=K^2*(2*pi*R1^2)*(q41+q42+q43);
g11=res2+q45;
g1g10=g11
% calculate g1s3 in enclosure
% describing parameter in numerical integration
% g1s3=1/2*(g1s3|o(R1,R2,H)-g1s3|o(R1,R2,O)-g1s3|o(R1-B1,R2,H)+g1s3|o(R1-B1
% ,R2,0)
%numerical calculation for g1s3|o(R1,R2,H)
d=H/(2*R1);
global K R1 R2 d H B1 B2
result8 = dblquad(@int3,eps,d,eps,pi);
res8=(8*K*R1^2*R2^2)*result8;
res8;
global K R1 R2 d H B1 B2
result9 = dblquad(@int3,eps,eps,eps,pi);
res9=(8*K*R1^2*R2^2)*result9 ;
res9;

```

```

%numerical calculation for g1s3|o(R1-B1,R2,H)
d=H/(2*R1);
global K R1 R2 d H B1 B2
result10 = dblquad(@int3,eps,d,eps,pi);
res10=(8*K*((R1-B1)^2)*R2^2)*result10 ;
res10;
%numerical calculation for g1s3|o(R1-B1,R2,0)
global K R1 R2 d H B1 B2
result11 = dblquad(@int3,eps,eps,eps,pi);
res11=(8*K*R1^2*R2^2)*result11 ;
res11;
g1s3=(res8-res9-res10+res10)/2;
g1s3
s3g1=g1s3
%numerical calculation for g1s3o
g1s30=res8
s2s1=s1s20;s1s2=s2s1;s2s3=s1s30;s3s2=s2s3;s3s1=s3s10;s1s3=s3s1;
s3g1=A3-(s3s1+s3s2+s3s3);
sisj=[s1s1 s1s2 s1s3;s2s1 s2s2 s2s3;s3s1 s3s2 s3s3]
s1g1=g1s20;s2g1=s1g1;
sigj=[s1g1;s2g1;s3g1]
gigj=(4*K*(A1*H))-sum(sigj)
gigj=g1g10

```

چ- کد برنامه نوشته شده برای تشکیل معادلات غیر خطی و حل آن

```

% in this part we need to simulate free convection and free radiation
%from outer surface of furnace to the surrond
% we suppose that To=350K and Tsur=300K
% free convection in roof -buttom walls
To=350;Tsur=300;g=9.81;sigma=5.67*10^(-8);
Tf=(To+Tsur)/2;cp=1.008;v=18.4050*10^(-6);k=28*10^(-3);alfa=26.2*10^(-
6);pr=0.703;
beta=(1/Tf);
Ls=AA/(4*B);
Grr=(g*beta*(To-Tsur)*Ls^3)/(v^2);
Rar=Grr*pr;
if Rar>=(10^7)
    Nur=0.15*(Rar^(1/3));
else
    Nur=0.54*(Rar^(1/4));
end
hor=(k*Nur)/Ls;% h for roof of furnace
Nub=0.27*(Rar^(1/4));
hb=(k*Nub)/Ls;% h for bottom of furnace
% free convection in vertical walls
Grw=(g*beta*(To-Tsur)*B^3)/(v^2);
Raw=Grw*pr;
Nuw=0.68+(0.67*Raw^(1/4))/(((1+(0.492/pr)^(9/16))^4/9));
how=(Nuw*k)/B;% in vertical walls
%free convection+radiation
%hor=(e1*sigma*(To^4-Tsur^4)+hr*(To-Tsur))/(To-Tsur);
%how=(e1*sigma*(To^4-Tsur^4)+hv*(To-Tsur))/(To-Tsur);
for s=1:1:6
    Q(s)=Ai(1,1)*e1*sigma*(To^4-Tsur^4)+Ai(1,1)*hor*(To-Tsur);
end
Q(1)=Q(s);Q(2)=Q(s);Q(4)=Q(s);Q(6)=Q(s);
Q(3)=Ai(3,1)*e3*sigma*(To^4-Tsur^4)+Ai(3,1)*hor*(To-Tsur);

% for load in furnace we use direct heating-steady state heat
% transfer in continuos rotary heat treating furnace
%load is at Tsur and we need load at TLo=1500K
% for mild steel
h0=-0.394790*10^6;h1=0.18757*10^4;h2=-1.18137;h3=0.37703*10^(-3);
h4=0;h5=0;to=1200;ti=23;% t in celesios degre
HLTL0=(h0+h1.*to+h2.*to.^2+h3.*to.^3+h4.*to.^4+h5.*to.^5)/1000;
c0=-0.81997*10^4;c1=0.54145*10^3;c2=-0.7122;c3=0.3444*10^(-2);
c4=-0.5628*10^(-5);c5=0.3405*10^(-8);
HLTLi=(c0+c1.*ti+c2.*ti.^2+c3.*ti.^3+c4.*ti.^4+c5.*ti.^5)/1000;
%LOAD IN FURNACE for calculate Q3 in equations

```

```

Ml=3000;% kg/h rate of loat input in furnace
Q(3)=Ml.*(HLTLo-HLTLi)/(3600);
t1=23:1:800;
t2=800:1:1200;
%HLTLi=c0+c1.*t1+c2.*t1.^2+c3.*t1.^3+c4.*t1.^4+c5.*t1.^5;

HLTLo1=h0+h1.*(t1+273)+h2.*(t1+273).^2+h3.*(t1+273).^3+h4.*(t1+273).^4+h5.*(t1
+273).^5;

HLTLo2=h0+h1.*(t2+273)+h2.*(t2+273).^2+h3.*(t2+273).^3+h4.*(t2+273).^4+h5.*(t2
+273).^5;
t=[t1,t2];
HL=[HLTLo1./1000,HLTLo2./1000];
%plot(t+273,HL)
%grid on
%xlabel('temperature (K)')           %label horizontal axis
%ylabel('specific enthalpy of load (KJ/Kg)') %label vertical axis
%title('load in furnace')

% sum of weighted gray gas modeling for calculate direct flux areas (DFA)
% these DFA are dependen on geometry,emissivity,temperature

Q=[Q(1);Q(2);Q(3);Q(4)] ;

%Nu=0.54*(Ra^(1/4))
% calculatr direct flux areas (DFA) for energy balancing for first equation
% coefficient for SWGG modeling
s=5.67*10^-8;% stefan-boltzman factor
b11=0.437;b21=0.0713*10^-3;
b12=0.39;b22=-0.0052*10^-3;
%
FSiSj11=((b11*SiSj(1,1)*T1^4+b21*SiSj(1,1)*T1^5)+(b12*SiSjk(1,1)*T1^4+b22*SiSjk
(1,1)*T1^5))*s
%
FSiSj21=((b11*SiSj(2,1)*T2^4+b21*SiSj(2,1)*T2^5)+(b12*SiSjk(2,1)*T2^4+b22*SiSjk
(2,1)*T2^5))*s
%
FSiSj31=((b11*SiSj(3,1)*T3^4+b21*SiSj(3,1)*T3^5)+(b12*SiSjk(3,1)*T3^4+b22*SiSjk
(3,1)*T3^5))*s
%
FSiSj41=((b11*SiSj(4,1)*T4^4+b21*SiSj(4,1)*T4^5)+(b12*SiSjk(4,1)*T4^4+b22*SiSjk
(4,1)*T4^5))*s

FSiSj51=((b11*SiSj(5,1)*T5^4+b21*SiSj(5,1)*T5^5)+(b12*SiSjk(5,1)*T5^4+b22*SiSjk
(5,1)*T5^5))*s

```

```

%
FSiSj61=((b11*SiSj(6,1)*T6^4+b21*SiSj(6,1)*T6^5)+(b12*SiSjk(6,1)*T6^4+b22*SiSjk
(6,1)*T6^5))*s

% calculate coefficient for Ti^4 parameter
E1t4=(b11*SiSj(:,1)+b12*SiSjk(:,1))*s;
ae1=-(A1*e1*s);
xx1=[E1t4(1,1)+ae1 E1t4(2,1) E1t4(3,1) E1t4(4,1) E1t4(5,1) E1t4(6,1)];
% calculate coefficient for Ti^5 parameter
E1t5=(b21*SiSj(:,1)+b22*SiSjk(:,1))*s;
yy1=[E1t5(1,1) E1t5(2,1) E1t5(3,1) E1t5(4,1) E1t5(5,1) E1t5(6,1)];
% calculate coefficient for Tg^4 parameter
E1tg4=((b11*GiSj(1,:)+b12*GiSjk(1,:))*s;
%zz1=[E1tg4(1,1) E1tg4(1,2) E1tg4(1,3) E1tg4(1,4) E1tg4(1,5) E1tg4(1,6)]
zz1=E1tg4(1,1);
% calculate coefficient for Tg^5 parameter
E1tg5=((b21*GiSj(1,:)+b22*GiSjk(1,:))*s;
mm1=E1tg5(1,1);
% convection term
betag=(1/1400);prg=0.705;vg=50/g;k1=0.0997;
Grwg=(g*betag*(200)*B^3)/(vg^2);
Rawg=Grwg*prg;
Nuwg=0.68+(0.67*Rawg^(1/4))/(((1+(0.492/prg)^(9/16))^4/9));
hiwg=(Nuwg*k1)/B; % in vertical walls
hiwg=how;
E1tg1=A1*hiwg;
E1t1=(A1*hiwg);
% program for calculate Q1 in equations
% calculate thermal conductivity for walls(refractory brick)
t1=27:1:1200;
ar=1.84061;br=0.1011826*10^(-3);cr=-0.516367*10^(-7);dr=0.1277857*10^(-9);
fil=ar+br*t1+cr*t1.^2+dr*t1.^3 ;
kr1=sum(fil(1,:))/(901+273);% kr1(W/mK)
x1=0.3;s=sigma;
% hcon=8;atg1=A1*hcon; at1=-A1*hcon;
To1=320;Tsur=300;% first guess for To1(K) (wall surface in out of furnace)
ho1=(e1*s*(To1^4-Tsur^4)+how*(To1-Tsur))/(To1-Tsur);
Q1t1=A1/((kr1/x1)+(1/ho1));
Q1t0=(-A1*Tsur)/((kr1/x1)+(1/ho1));
%coefficients for equation 1:
f1=E1t5(:,1);
ff1=(f1)';
E1=[ff1 mm1 xx1 zz1 E1tg1 -(E1t1+Q1t1) -(Q1t0)];
% sum{(xx1(i))*(Ti^4)}+sum{(yy1(i))*(Ti^5)}+
% +sum{(zz1)*(Tg^4)}+sum{(mm1)*(Tg^5)}+(atg1)*Tg-(at1)*T1-Q1=0

```

```

% calculatr coefficients for energy balancing in second equation
% calculate coefficient for Ti^4 parameter
E2t4=(b11*SiSj(:,2)+b12*SiSjk(:,2))*s;
ae2=-(A2*e2*s);
xx2=[E2t4(1,1)+ae2 E2t4(2,1) E2t4(3,1) E2t4(4,1) E2t4(5,1) E2t4(6,1)];
% calculate coefficient for Ti^5 parameter
E2t5=(b21*SiSj(:,2)+b22*SiSjk(:,2))*s;
yy2=[E2t5(1,1) E2t5(2,1) E2t5(3,1) E2t5(4,1) E2t5(5,1) E2t5(6,1)];
% calculate coefficient for Tg^4 parameter
E2tg4=((b11*GiSj(1,:)+b12*GiSjk(1,:)))*s;
%zz1=[E1tg4(1,1) E1tg4(1,2) E1tg4(1,3) E1tg4(1,4) E1tg4(1,5) E1tg4(1,6)]
zz2=E2tg4(1,2);
% calculate coefficient for Tg^5 parameter
E2tg5=((b21*GiSj(1,:)+b22*GiSjk(1,:)))*s;
mm2=E2tg5(1,2);
% convection term
%hcon=8;atg2=A2*hcon; at2=-A2*hcon;
kr2=kr1;x2=x1;
To2=320;% first guess for To2 (wall surface in out of furnace)
ho2=(e2*s*(To2^4-Tsur^4)+how*(To2-Tsur))/(To2-Tsur);
Q2t1=A2/((kr2/x2)+(1/ho2));
Q2t0=(-A2*Tsur)/((kr2/x2)+(1/ho2));
%coefficients for eguation 1:
E2tg1=A2*hiwg;
E2t1=(A2*hiwg);
f2=E1t5(:,1);
ff2=(f2)';
E2=[ff2 mm2 xx2 zz2 E2tg1 -(E2t1+Q2t1) -(Q2t0)];

```

```

% calculatr coefficients for energy balancing in thirth equation
% calculate coefficient for Ti^4 parameter
E3t4=(b11*SiSj(:,3)+b12*SiSjk(:,3))*s;
ae3=-(A3*e3*s);
xx3=[E3t4(1,1)+ae3 E3t4(2,1) E3t4(3,1) E3t4(4,1) E3t4(5,1) E3t4(6,1)];
% calculate coefficient for Ti^5 parameter
E3t5=(b21*SiSj(:,3)+b22*SiSjk(:,3))*s;
yy3=[E3t5(1,1) E3t5(2,1) E3t5(3,1) E3t5(4,1) E3t5(5,1) E3t5(6,1)];
% calculate coefficient for Tg^4 parameter
E3tg4=((b11*GiSj(1,:)+b12*GiSjk(1,:)))*s;
%zz1=[E1tg4(1,1) E1tg4(1,2) E1tg4(1,3) E1tg4(1,4) E1tg4(1,5) E1tg4(1,6)]
zz3=E3tg4(1,3);
% calculate coefficient for Tg^5 parameter
E3tg5=((b21*GiSj(1,:)+b22*GiSjk(1,:)))*s;
mm3=E3tg5(1,3);
% convection term
%hcon=8;atg3=A3*hcon; at3=-A3*hcon;

```

```

% roof of rotary furnace design of ceramic fibre
% we need to calculate thermal conductivity for roof
ac=0.82297*10^(-1);bc=-0.14283*10^(-3);cc=0.95429*10^(-6);
dc=-0.81346*10^(-9);ec=0.38894*10^(-12);
t3=1000;
f3=ac+bc*t3+cc*t3.^2+dc*t3.^3+ec*t3.^4 ;
kr3=kr1;% kr3(W/mK)
x3=x1;
To3=320;% first guess for To3 (wall surface in out of furnace)
ho3=(e3*s*(To3^4-Tsur^4)+hor*(To3-Tsur))/(To3-Tsur);
Q3t1=A3/((kr3/x3)+(1/ho3));
Q3t0=(-A3*Tsur)/((kr3/x3)+(1/ho3));
%coefficients for equation 3:
E3tg1=A3*hiwg;
E3t1=(A3*hiwg);
f3=E3t5(:,1);
ff3=(f3)';
E3=[ff3 mm3 xx3 zz3 E3tg1 -(E3t1+Q3t1) -(Q3t0)];

% calculatr coefficients for energy balancing in forth equation
% calculate coefficient for Ti^4 parameter
E4t4=(b11*SiSj(:,4)+b12*SiSjk(:,4))*s;
ae4=-(A4*e4*s);
xx4=[E4t4(1,1)+ae4 E4t4(2,1) E4t4(3,1) E4t4(4,1) E4t4(5,1) E4t4(6,1)];
% calculate coefficient for Ti^5 parameter
E4t5=(b21*SiSj(:,4)+b22*SiSjk(:,4))*s;
yy4=[E4t5(1,1) E4t5(2,1) E4t5(3,1) E4t5(4,1) E4t5(5,1) E4t5(6,1)];
% calculate coefficient for Tg^4 parameter
E4tg4=((b11*GiSj(1,:)+b12*GiSjk(1,:)))*s;
%zz1=[E1tg4(1,1) E1tg4(1,2) E1tg4(1,3) E1tg4(1,4) E1tg4(1,5) E1tg4(1,6)]
zz4=E4tg4(1,4);
% calculate coefficient for Tg^5 parameter
E4tg5=((b21*GiSj(1,:)+b22*GiSjk(1,:)))*s;
mm4=E4tg5(1,4);
% convection term
% hcon=8;atg4=A4*hcon; at4=-A4*hcon;
kr4=kr1;x4=x1;
To4=320;% first guess for To4 (wall surface in out of furnace)
ho4=(e4*s*(To4^4-Tsur^4)+how*(To4-Tsur))/(To4-Tsur);
Q4t1=A4/((kr4/x4)+(1/ho4));
Q4t0=(-A4*Tsur)/((kr4/x4)+(1/ho4));
%coefficients for equation 4:
E4tg1=A4*hiwg;
E4t1=(A4*hiwg);
f4=E4t5(:,1);

```

```

ff4=(f4)';
E4=[ff4 mm4 xx4 zz4 E4tg1 -(E4t1+Q4t1) -(Q4t0)];

for ii=1:1:4
g=1:4;
FSiSj=((b11*SiSj(:,g)+b21*SiSj(:,g))+(b12*SiSjk(:,g)+b22*SiSjk(:,g)))*s;
end
% calculatr coefficients for energy balancing in gas zone equation
% calculate coefficient for Tg^4 parameter
E7tg4=(b11*GiGj(:,:)+b12*GiGjk(:,:))*s;
Erad4=4*V*s*(b11*K1+b12*K2);
zz7=E7tg4(1,1)-Erad4;
% calculate coefficient for Tg^5 parameter
E7tg5=((b21*GiGj(:,:)+b22*GiGjk(:,:)))*s;
Erad5=4*V*s*(b21*K1+b22*K2);
mm7=E7tg5-Erad5;
% calculate coefficient for Ti^4 parameter
E7t4=((b11*GiSj(1,:)+b12*GiSjk(1,:)))*s;
xx7=[E7t4(1,1) E7t4(1,2) E7t4(1,3) E7t4(1,4) E7t4(1,5) E7t4(1,6)];
% calculate coefficient for Ti^5 parameter
E7t5=(b21*GiSj(1,:)+b22*GiSjk(1,:))*s;
yy7=[E7t5(1,1) E7t5(1,2) E7t5(1,3) E7t5(1,4) E7t5(1,5) E7t5(1,6)];
%calculate coefficient for Ti parameter

for m=1:1
for n=1:4
E7t1(m,n)=A(i)*hiwg;
end
end
Econt=(E7t1(1,1));
Econtg=sum(E7t1(1,:));% badan bayesti moadeleye antalpi niz lahaz shavad

%in this part we need to calculate convection coefficient
% in furnace for product combustion gaz in gas zones

%in this part we need to input m(mass flow for gas(kg/h)),cp(gas flow)
% for example:
m=4000;cp=1.025;
mctg=m*cp;

%in this part we need to input fuel property and combustion condition as:
%VG,CVnet,Rs,x,roa(air density),Ha(Ta)(for air)
% for example :
% Ta=300
cpair=1.007;roa=1.1614;
Rs=9.76;x=0;rog=0.719;

```



```

%VGm=3000;%1950 kg/h we need m^3/h
VGv=VGm/rog;%we need m^3/h
CVnet=34.91;% we need Mj/m^3
% we need to calculate Ha(Ta) for air in combustion
Ta=288;
z1=(Ta-1400)./200;
aa=1.234164;ba=0.243788;ca=0.003322;da=-0.000059;ea=0.000041;fa=0.000006;
Ha=aa+ba.*z1+ca.*z1.^2+da.*z1.^3+ea.*z1.^4+fa.*z1.^5;
%we need to calculate energy input in furnace
%(release from fuel+combustion air at Ta temperature)
Q7=VGv*(CVnet+Rs*(1+(x./100)).*roa.*Ha);
Q7g=Q7/3600;
% the sensible energy loss in the flue product at Tg leaving the zone
ps=10.785 ;%combustion product/fuel
ag=1.399955;bg=0.28089;cg=0.004526;dg=0.000402;eg=0.000224;fg=0.000023;
Tg=1700;
z2=(Tg-1400)./200;
Hg=ag+bg.*z2+cg.*z2.^2+dg.*z2.^3+eg.*z2.^4+fg.*z2.^5;% Hg(T) Mj/kg
Qg=VGv*(ps+Rs*(x/100)*roa*Hg);% Qg Mj/h
% calculate enthalpy for combustion products(gas)
acp=1401.65961;bcp=36.60067;ccp=-4.43026;dcp=0.316066;ecp=0.046715;fcp=-
0.0099;
cpgas=acp+bcp*z2+ccp*z2^2+dcp*z2^3+ecp*z2^4+fcp*z2^5;

E7=[yy7 mm7 xx7 zz7 Econtg -Econt Q7g];
E=[E1;E2;E3;E4;];

% we want to solve non-linear equations simultanios ,then use
% newton method and we must guess Ti at first:
T1=900;T2=950;T3=950;T4=950;T7=1400;
T=[T1;T2;T3;T4;T7];
for u=1:ni

n1=E1t5(1,1)*T1^5+E1t5(2,1)*T2^5+E1t5(3,1)*T3^5+E1t5(4,1)*T4^5+E1t5(5,1)*T5^5
+E1t5(6,1)*T6^5;

n2=(E1t4(1,1)+ae1)*T1^4+E1t4(2,1)*T2^4+E1t4(3,1)*T3^4+E1t4(4,1)*T4^4+E1t4(5,1)
*T5^4+E1t4(6,1)*T6^4;
n3=E1tg5(1,1)*T7^5+E1tg4(1,1)*T7^4+E1tg1*T7-(E1t1+Q1t1)*T1-(Q1t0);
eq1=n1+n2+n3;

n4=E2t5(1,1)*T1^5+E2t5(2,1)*T2^5+E2t5(3,1)*T3^5+E2t5(4,1)*T4^5+E2t5(5,1)*T5^5
+E2t5(6,1)*T6^5;

```

$$n5=(E2t4(1,1)+ae2)*T1^4+E2t4(2,1)*T2^4+E2t4(3,1)*T3^4+E2t4(4,1)*T4^4+E2t4(5,1)*T5^4+E2t4(6,1)*T6^4;$$

$$n6=E2tg5(1,2)*T7^5+E2tg4(1,2)*T7^4+E2tg1*T7-(E2t1+Q2t1)*T2-(Q2t0);$$

$$eq2=n4+n5+n6;$$

$$n7=E3t5(1,1)*T1^5+E3t5(2,1)*T2^5+E3t5(3,1)*T3^5+E3t5(4,1)*T4^5+E3t5(5,1)*T5^5+E3t5(6,1)*T6^5;$$

$$n8=(E3t4(1,1)+ae3)*T1^4+E3t4(2,1)*T2^4+E3t4(3,1)*T3^4+E3t4(4,1)*T4^4+E3t4(5,1)*T5^4+E3t4(6,1)*T6^4;$$

$$n9=E3tg5(1,3)*T7^5+E3tg4(1,3)*T7^4+E3tg1*T7-(E3t1+Q3t1)*T3-(Q3t0);$$

$$eq3=n7+n8+n9;$$

$$n10=E4t5(1,1)*T1^5+E4t5(2,1)*T2^5+E4t5(3,1)*T3^5+E4t5(4,1)*T4^5+E4t5(5,1)*T5^5+E4t5(6,1)*T6^5;$$

$$n11=(E4t4(1,1)+ae4)*T1^4+E4t4(2,1)*T2^4+E4t4(3,1)*T3^4+E4t4(4,1)*T4^4+E4t4(5,1)*T5^4+E4t4(6,1)*T6^4;$$

$$n12=E4tg5(1,4)*T7^5+E4tg4(1,4)*T7^4+E4tg1*T7-(E4t1+Q3t1)*T4-(Q4t0);$$

$$eq4=n10+n11+n12;$$

$$n19=mm7*T7^5+zz7*T7^4;$$

$$n20=E7t5(1,1)*T1^5+E7t5(1,2)*T2^5+E7t5(1,3)*T3^5+E7t5(1,4)*T4^5+E7t5(1,5)*T5^5+E7t5(1,6)*T6^5;$$

$$n21=E7t4(1,1)*T1^4+E7t4(1,2)*T2^4+E7t4(1,3)*T3^4+E7t4(1,4)*T4^4+E7t4(1,5)*T5^4+E7t4(1,6)*T6^4;$$

$$n22=Econtg*T7;$$

$$n23=(-Econt)*T1+(-Econt)*T2+(-Econt)*T3+(-Econt)*T4+(-Econt)*T5+(-Econt)*T6+Q7g;$$

$$eq7=n19+n20+n21+n22+n23;$$

% to make F(Ti) matrix

$$FT=[eq1;eq2;eq3;eq4;eq7];$$

% calculate matrix of partial derivative for equations

$$d1T1=5*E1t5(1,1)*T1^4+4*(E1t4(1,1)+ae1)*T1^3-(E1t1+Q1t1);$$

$$d1T2=5*E1t5(2,1)*T2^4+4*E1t4(2,1)*T2^3;$$

$$d1T3=5*E1t5(3,1)*T3^4+4*E1t4(3,1)*T3^3;$$

$$d1T4=5*E1t5(4,1)*T4^4+4*E1t4(4,1)*T4^3;$$

$$d1T7=5*E1tg5(1,1)*T7^4+4*E1tg4(1,1)*T7^3+E1tg1;$$

% calculate matrix of partial derivative for equations

$$d2T1=5*E2t5(1,1)*T1^4+4*(E2t4(1,1)+ae2)*T1^3;$$

$$d2T2=5*E2t5(2,1)*T2^4+4*E2t4(2,1)*T2^3-(E2t1+Q2t1);$$

```

d2T3=5*E2t5(3,1)*T3^4+4*E2t4(3,1)*T3^3;
d2T4=5*E2t5(4,1)*T4^4+4*E2t4(4,1)*T4^3;
d2T7=5*E2tg5(1,2)*T7^4+4*E2tg4(1,2)*T7^3+E2tg1;
% calculate matrix of partial derivative for equations
d3T1=5*E3t5(1,1)*T1^4+4*(E3t4(1,1)+ae3)*T1^3;
d3T2=5*E3t5(2,1)*T2^4+4*E3t4(2,1)*T2^3;
d3T3=5*E3t5(3,1)*T3^4+4*E3t4(3,1)*T3^3-(E3t1+Q3t1);
d3T4=5*E3t5(4,1)*T4^4+4*E3t4(4,1)*T4^3;
d3T5=5*E3t5(5,1)*T5^4+4*E3t4(5,1)*T5^3;
d3T6=5*E3t5(6,1)*T6^4+4*E3t4(6,1)*T6^3;
d3T7=5*E3tg5(1,3)*T7^4+4*E3tg4(1,3)*T7^3+E3tg1;
% calculate matrix of partial derivative for equations
d4T1=5*E4t5(1,1)*T1^4+4*(E4t4(1,1)+ae4)*T1^3;
d4T2=5*E4t5(2,1)*T2^4+4*E4t4(2,1)*T2^3;
d4T3=5*E4t5(3,1)*T3^4+4*E4t4(3,1)*T3^3;
d4T4=5*E4t5(4,1)*T4^4+4*E4t4(4,1)*T4^3-(E4t1+Q4t1);
d4T7=5*E4tg5(1,4)*T7^4+4*E4tg4(1,4)*T7^3+E4tg1;
% calculate matrix of partial derivative for equations
d7T1=5*E7t5(1,1)*T1^4+4*(E7t4(1,1)+ae3)*T1^3+(-Econt);
d7T2=5*E7t5(1,2)*T2^4+4*E7t4(1,2)*T2^3+(-Econt);
d7T3=5*E7t5(1,3)*T3^4+4*E7t4(1,3)*T3^3+(-Econt);
d7T4=5*E7t5(1,4)*T4^4+4*E7t4(1,4)*T4^3+(-Econt);
d7T7=5*mm7*T7^4+4*zz7*T7^3+Econtg;
dFTi=[d1T1 d1T2 d1T3 d1T4 d1T5 d1T6 d1T7;d2T1 d2T2 d2T3 d2T4 d2T5 d2T6
d2T7;
d3T1 d3T2 d3T3 d3T4 d3T5 d3T6 d3T7;d4T1 d4T2 d4T3 d4T4 d4T5 d4T6 d4T7;
d7T1 d7T2 d7T3 d7T4 d7T5 d7T6 d7T7];
dFTi;
%Ti=[T1 T2 T3 T4 T7];
D=- (FT)'*inv(dFTi);
Tnew=T+D';
T=Tnew;
T1=T(1,1);T2=T(2,1);T3=T(3,1);T4=T(4,1);T7=T(7,1);
if (T-Tnew)/T < 10^-4
Tans=Tnew
end
end

```

ح- برنامه اصلی در مدل سازی کوره و بار درون آن

```

e1=0.8;e2=0.8;e3=0.8;e4=0.8;
e=[e1 e2 e3 e4];
Rout=5;Rin=3;H=2;ML=5000;ta=600;nz=5;
za=(ta-1400)./200;
aa=1.234164;ba=0.243788;ca=0.003322;da=-0.000059;ea=0.000041;fa=0.000006;
Ha=(aa+ba.*za+ca.*za.^2+da.*za.^3+ea.*za.^4+fa.*za.^5)*10^6;%j/kg
roair=1.1;
Rs=9.76;
Ea=Rs.*(1+0.2).*(1.1).*Ha;%j/m^3

%Ml=2500;VGm=100;
%Rout=input('inter Rout(m) ');
%Rin=input('inter Rin(m) ');
%H=input('inter H(m) ');
%combustion conditions:
% property of surface:
ro1=1-e1;ro2=1-e2;ro3=1-e3;ro4=1-e4;
roi=[1-e1,1-e2,1-e3,1-e4];

%in this modeling CH4 burn with 20% excess air
%CH4+1.2(2*O2+3.76*2N2)----> CO2+2*H2O+0.4* O2+9.024 *N2
pC=1./(1+2.4+1.2*2*3.76);%atm
pH=2./(1+2.4+1.2*2*3.76);%atm
pt=pC+pH;%atm
% CH4 combustion in p=1 atm
kg(1)=0;kg(2)=1.88;kg(3)=68.8;
kg1=0;kg2=1.88;kg3=68.8;
K1=kg1*pt;K2=kg2*pt;K3=kg3*pt;
% geometry conditions:
Rxx=Rout-Rin;
Ryy=H; Rres=sqrt(Rxx^2+Ryy^2);
B=Rres*(sqrt(2))/2;
% real area and volume:
Au1=((Rout-Rin)*H);Au6=Au1;
Au2=(2*Rin*pi*H)/(nz);Au4=(2*Rout*pi*H)/(nz);
Au5=(pi*(Rout^2-Rin^2))/(nz);Au3=Au5;
Aut=Au1+Au2+Au3+Au4+Au5+Au6;
Vu=(pi*(Rout^2-Rin^2)*H)/(nz);
for i=1:1:3
    K(i)=kg(i)*pt;
    K(i);
n=n+1;
%calculate (sisj)Kn=1 for use in calculate direct exchange areas(DEA)
c1=0.1998;a=1.1053;
s16=(B^2)*c1*exp(-a*K(i)*B);

```

```

f16=s16;
s24=f16;s35=f16;
% other DEA
s11=0;s22=s11;s33=s22;s44=s33;s55=s44;s66=s55;
c2=0.200;
a0=0.539;a1=-0.615*10^(-1);a2=0.429*10^(-2);
a3=-0.151*10^(-3);a4=0.206*10^(-5);
aa1=a0+a1*K(i).*B+a2*(K(i).*B).^2+a3*(K(i).*B).^3+a4*(K(i).*B).^4;
f12=(B^2)*c2*exp(-aa1*K(i).*B);
s12=f12;s13=f12;s14=f12;s15=f12;
s23=f12;s25=f12;s26=f12;
s34=f12;s36=f12;s45=f12;
s46=f12;s56=f12;

% receprocity law:
s61=s16;s42=s24;s63=s36;s53=s35;
% new receprocity law:
s21=s12;s31=s13;s41=s14;s51=s15;
s32=s23;s52=s25;s62=s26;
s43=s34;s63=s36;s54=s45;s64=s46;s65=s56;
% calculate gb:
aa4=(-0.50513*10^(-4)*K(i).*B+0.23416*10^(-2)*K(i).*B-
0.042148)*K(i).*B+0.43288;
gb=4*K(i).(B.^3).*exp(-aa4.*K(i).*B);
% continue:
c3=0.0337;g0=0.4563;g1=-0.311*10^(-1);g2=0.824*10^(-3);
aa3=g0+g1.*(K(i).*B)+g2.*(K(i).*B).^2;
g1a1(n)=gb/6;
end
if K*B> 3
    GS=(4*A/(3*K(i)*(B/2+2/3)));
else
    % to calculate main part of program
    c1=0.1998;a=1.1053;
    s16=(B^2)*c1*exp(-a*K1*B);
    f16=s16;
    s24=f16;s35=f16;
    % other DEA
    s11=0;s22=s11;s33=s22;s44=s33;s55=s44;s66=s55;
    c2=0.200;
    a0=0.539;a1=-0.615*10^(-1);a2=0.429*10^(-2);
    a3=-0.151*10^(-3);a4=0.206*10^(-5);
    aa1=a0+a1*K1.*B+a2*(K1.*B).^2+a3*(K1.*B).^3+a4*(K1.*B).^4;
    f12=(B^2)*c2*exp(-aa1*K1.*B);
    s12=f12;s13=f12;s14=f12;s15=f12;
    s23=f12;s25=f12;s26=f12;

```

```

s34=f12;s36=f12;s45=f12;
s46=f12;s56=f12;
% receprocity law:
s61=s16;s42=s24;s63=s36;s53=s35;
% new receprocity law:
s21=s12;s31=s13;s41=s14;s51=s15;
s32=s23;s52=s25;s62=s26;
s43=s34;s63=s36;s54=s45;s64=s46;s65=s56;

aijk1=[s11 s12 s13 s14 s15 s16;s21 s22 s23 s24 s25 s26;
s31 s32 s33 s34 s35 s36;s41 s42 s43 s44 s45 s46;
s51 s52 s53 s54 s55 s56;s61 s62 s63 s64 s65 s66];
wu1=Au1/Aut;wu2=Au2/Aut;wu3=Au3/Aut;wu4=Au4/Aut;

% continue:
% calculate gb:
aa4=((-0.50513*10^(-4))*K1.*B+0.23416*10^(-2))*K1.*B-0.042148)*K1.*B+0.43288;
gb=4*K1.*(B.^3).*exp(-aa4.*K1.*B);
gb1=4*K1.*(B.^3).*exp(-aa4.*K1.*B);
gbu1=[wu1*gb1;wu2*gb1;wu3*gb1;wu4*gb1;wu5*gb1;wu6*gb1];

% continue:
c3=0.0337;g0=0.4563;g1=-0.311*10^(-1);g2=0.824*10^(-3);
aa3=g0+g1.*(K1.*B)+g2.*(K1.*B).^2;
giajk1=gb/6;
ga1=[giajk1;giajk1;giajk1;giajk1;giajk1;giajk1];
%continue:
si=s11+s12+s13+s14+s15+s16;
%sj=sum(si);
x1=6*giajk1;
gigjk1=(4*K1*V)-(x1);
gigjk1;
gigjuk1=(4*Vu*K1)-sum(gbu1);
end
c1k=0.1998;ak=1.1053;
s16k=(B^2)*c1k*exp(-ak*K2*B);
f16k=s16k;
s24k=f16k;s35k=f16;
% other DEA
s11k=0;s22k=s11k;s33k=s22k;s44k=s33k;s55k=s44k;s66k=s55k;
c2k=0.200;
a0k=0.539;a1k=-0.615*10^(-1);a2k=0.429*10^(-2);
a3k=-0.151*10^(-3);a4k=0.206*10^(-5);
aa1k=a0k+a1k*K2.*B+a2k*(K2.*B).^2+a3k*(K2.*B).^3+a4k*(K2.*B).^4;
f12k=(B^2)*c2k*exp(-aa1k*K2.*B);
s12k=f12k;s13k=f12k;s14k=f12k;s15k=f12k;

```

```

s23k=f12k;s25k=f12k;s26k=f12k;
s34k=f12k;s36k=f12k;s45k=f12k;
s46k=f12k;s56k=f12k;

% receprocity law:
s61k=s16k;s42k=s24k;s63k=s36k;s53k=s35k;
% new receprocity law:
s21k=s12k;s31k=s13k;s41k=s14k;s51k=s15k;
s32k=s23k;s52k=s25k;s62k=s26k;
s43k=s34k;s63k=s36k;s54k=s45k;s64k=s46k;s65k=s56k;

s1s1k=s11;s1s2k=0.3951;s2s1k=s1s2k;s6s2k=s1s2k;s2s6k=s6s2k;
% calculate gbk:
aa4k=(((-0.50513*10^(-4)*K2.*B+0.23416*10^(-2))*K2.*B-
0.042148)*K2.*B+0.43288;
gbk=4*K2.*(B.^3).*exp(-aa4k.*K2.*B);
gb2=4*K2.*(B.^3).*exp(-aa4k.*K2.*B);
gbk1=wu1*gb2;gbk2=wu2*gb2;gbk3=wu3*gb2;gbk4=wu4*gb2;gbk5=wu5*gb2;gbk6=
wu6*gb2;
gbu2=[gbk1;gbk2;gbk3;gbk4;gbk5;gbk6];
% continue:
c3=0.0337;g0=0.4563;g1=-0.311*10^(-1);g2=0.824*10^(-3);
aa3=g0+g1.*(K2.*B)+g2.*(K2.*B).^2;
giajk2=gbk/6;
ga2=[giajk2;giajk2;giajk2;giajk2;giajk2;giajk2];
%continue:
x2=6*giajk2;
gigjk2=(4*K2*V)-(x2);
gigjk2;
gigjuk2=(4*Vu*K2)-(gbk1+gbk2+gbk3+gbk3+gbk5+gbk6);

%for third gray gas with k3:
c1t=0.1998;at=1.1053;
s16t=(B^2)*c1t*exp(-at*K3*B);
f16t=s16t;
s24t=f16t;s35t=f16t;
% other DEA
s11t=0;s22t=s11t;s33t=s22t;s44t=s33t;s55t=s44t;s66t=s55t;
c2t=0.200;
a0t=0.539;a1t=-0.615*10^(-1);a2t=0.429*10^(-2);
a3t=-0.151*10^(-3);a4t=0.206*10^(-5);
aa1t=a0t+a1t*K3.*B+a2t*(K3.*B).^2+a3t*(K3.*B).^3+a4t*(K3.*B).^4;
f12t=(B^2)*c2t*exp(-aa1t*K3.*B);
s12t=f12t;s13t=f12t;s14t=f12t;s15t=f12t;
s23t=f12t;s25t=f12t;s26t=f12t;
s34t=f12t;s36t=f12t;s45t=f12t;

```

```

s46t=f12t;s56t=f12t;

% reciprocity law:
s61t=s16t;s42t=s24t;s63t=s36t;s53t=s35t;
% new reciprocity law:
s21t=s12t;s31t=s13t;s41t=s14t;s51t=s15t;
s32t=s23t;s52t=s25t;s62t=s26t;
s43t=s34t;s63t=s36t;s54t=s45t;s64t=s46t;s65t=s56t;

% calculate gbt:
aa4t=(-0.50513*10^(-4)*K3.*B+0.23416*10^(-2)*K3.*B-0.042148)*K3.*B+0.43288;
gbt=4*K3.*(B.^3).*exp(-aa4t.*K3.*B);
% continue:
c3t=0.0337;g0t=0.4563;g1t=-0.311*10^(-1);g2t=0.824*10^(-3);
aa3t=g0t+g1t.*(K3.*B)+g2t.*(K3.*B).^2;
giajk3=gbt/6 ;
giajk3=gbt/6;
ga3=[giajk3;giajk3;giajk3;giajk3;giajk3;giajk3];
%continue:
x3=6*giajk3;
gigjk3=(4*K3*V)-(x3);
gigjk3;

% calculate TEA:
if K1*B> 3
    GiSjk1=(4*A/(3*K1*((B/2)+(2/3))));
    GiGjk1=4*Ai(1)/(3*K1*B);
    SiSjk1=eAi-(GiSjk1)';
else
ei=[e1,e2,e3,e4];
Ai=[A1;A2;A3;A4;A5;A6];
Au=[Au1;Au2;Au3;Au4];
eI=diag(ei,0);
AI=diag(Ai,0);
AuI=diag(Au,0);
eAi=[e1*A1;e2*A2;e3*A3;e4*A4];
eAu=[e1*Au1;e2*Au2;e3*Au3;e4*Au4];
eAI=diag(eAi,0);
eAI=diag(eAi,0);
eAuI=diag(eAu,0);

%another matrix:
roi=[ro1,ro2,ro3,ro4];
roI=diag(roi,0);

```



```

% matrix relations:
RRk1=AI-(aiajk1*roI);
RRuk1=AuI-(sisjk1*roI);

Rk1=inv(RRk1);
Ruk1=inv(RRuk1);
ddd=eAI*Rk1*aiajk1*eI
SiSj1=ddd;
SiGjk1=eAI*Rk1*ga1;
GiSjk1=(SiGjk1)';
aigjk1=(ga1)';
GiGjk1=aigjk1*roI*Rk1*ga1+gigjk1;

SiSjuk1=eAuI*Ruk1*sisjk1*eI;
SiGjuk1=eAuI*Ruk1*gbu1;
GiSjuk1=(SiGjuk1)';
sigjuk1=(gbu1)';
GiGjuk1=sigjuk1*roI*Ruk1*gbu1+gigjuk1;

end
%continue for TEA with K2
if K2*B> 3
    GiSjk2=(4*A/(3*K2*((B/2)+(2/3))));
    GiGjk2=4*Ai(1)/(3*K2*B);
    SiSjk2=eAi-(GiSjk2)';
else
ei=[e1,e2,e3,e4];
Ai=[A1;A2;A3;A4];
Au=[Au1;Au2;Au3;Au4];
eI=diag(ei,0);
AI=diag(Ai,0);
AuI=diag(Au,0);
eAi=[e1*A1;e2*A2;e3*A3;e4*A4];
eAu=[e1*Au1;e2*Au2;e3*Au3;e4*Au4];
eAI=diag(eAi,0);
eAI=diag(eAi,0);
eAuI=diag(eAu,0);
%another matrix:
roi=[ro1,ro2,ro3,ro4];
roI=diag(roi,0);
% matrix relations:
RRk2=AI-(aiajk2*roI);
RRuk2=AuI-(sisjk2*roI);

Rk2=inv(RRk2);
Ruk2=inv(RRuk2);

```

```

SiSjk2=eAI*Rk2*aijk2*eI;
SiSjuk2=eAuI*Ruk2*sisjk2*eI;
SiGjk2=eAI*Rk2*ga2;
SiGjuk2=eAuI*Ruk2*gbu2;
GiSjk2=(SiGjk2)';
GiSjuk2=(SiGjuk2)';
aigjk2=(ga2)';
aigjuk2=(gbu2)';
GiGjk2=aigjk2*roI*Rk2*ga2+gigjk2;
GiGjuk2=aigjuk2*roI*Ruk2*gbu2+gigjuk2;
end

```

```

% continue for k3 TEA:

```

```

if K3*B>3

```

```

    GiSjs1=(4*A1/(3*K3*((B/2)+(2/3))));
    GiSjs2=(4*A2/(3*K3*((B/2)+(2/3))));
    GiSjs3=(4*A3/(3*K3*((B/2)+(2/3))));
    GiSjs4=(4*A4/(3*K3*((B/2)+(2/3))));
    GiSjs=[GiSjs1 GiSjs2 GiSjs3 GiSjs4];
    GiGjk3=4*A1/(3*K3*B);
    SiGjk3=(GiSjs)';

```

```

end

```

```

if K3*B > 3

```

```

    GiSjt1=(4*Au1/(3*K3*((B/2)+(2/3))));
    GiSjt2=(4*Au2/(3*K3*((B/2)+(2/3))));
    GiSjt3=(4*Au3/(3*K3*((B/2)+(2/3))));
    GiSjt4=(4*Au4/(3*K3*((B/2)+(2/3))));
    SiSjk1=eAi-(GiSjk1)';

```

```

end

```

```

for wi=1:1:6

```

```

    SiSjk3(1,wi)=e(wi)*A(wi)-SiGjk3(wi,1);
    SiSjk3(1,wi);

```

```

end

```

```

for si=1:1:6

```

```

    for ri=1:1:6

```

```

        SiSjk3(si,ri)= SiSjk3(1,wi);

```

```

    end

```

```

end

```

```

ei=[e1,e2,e3,e4];

```

```

Ai=[A1;A2;A3;A4];

```

```

eI=diag(ei,0);

```

```

AI=diag(Ai,0);

```

```

eAi=[e1*A1;e2*A2;e3*A3;e4*A4];

```

```

eAI=diag(eAi,0);

```

```

%another matrix:
roi=[ro1,ro2,ro3,ro4];
roI=diag(roi,0);
% matrix relations:
RRk3=AI-(aijk3*roI);
Rk3=inv(RRk3);
SiSjk3=eAI*Rk3*aijk3*eI;
SiGjk3=eAI*Rk3*ga3
GiSjk3=(SiGjk3)';
aigjk3=(ga3)';
GiGjk3=aigjk3*roI*Rk3*ga3+gigjk3;
% radiation equation :
s=5.67*10^-8;
  b11=0.437;b21=0.0713*10^-3;
  b12=0.39;b22=-0.0052*10^-3;
  b13=0.173;b23=-0.0661*10^-3;

tg=873;
t1=720;t2=720;t3=720;t4=720;t5=(400+273+300)/2;t6=720;

% balance for combustion product in zone1;
fsg1=(((b11+b21.*tg)*GiSjk1(1,1)+(b12+b22.*tg)*GiSjk2(1,1)+(b13+b23.*tg)*GiSjs(1,
1))).*s.*(tg.^4);% j/s
fsg2=(((b11+b21.*tg)*GiSjk1(1,2)+(b12+b22.*tg)*GiSjk2(1,2)+(b13+b23.*tg)*GiSjs(1,
2))).*s.*(tg.^4);%j/s
fsg3=(((b11+b21.*tg)*GiSjk1(1,3)+(b12+b22.*tg)*GiSjk2(1,3)+(b13+b23.*tg)*GiSjs(1,
3))).*s.*(tg.^4);%j/s
fsg4=(((b11+b21.*tg)*GiSjk1(1,4)+(b12+b22.*tg)*GiSjk2(1,4)+(b13+b23.*tg)*GiSjs(1,
4))).*s.*(tg.^4);%j/s
ugs1=(((b11+b21.*tg)*GiSjuk1(1,1)+(b12+b22.*tg)*GiSjuk2(1,1)+(b13+b23.*tg)*GiSjt
1)).*s.*(tg.^4);% j/s
ugs2=(((b11+b21.*tg)*GiSjuk1(1,2)+(b12+b22.*tg)*GiSjuk2(1,2)+(b13+b23.*tg)*GiSjt
2)).*s.*(tg.^4);%j/s
ugs3=(((b11+b21.*tg)*GiSjuk1(1,3)+(b12+b22.*tg)*GiSjuk2(1,3)+(b13+b23.*tg)*GiSjt
3)).*s.*(tg.^4);%j/s
ugs4=(((b11+b21.*tg)*GiSjuk1(1,4)+(b12+b22.*tg)*GiSjuk2(1,4)+(b13+b23.*tg)*GiSjt
4)).*s.*(tg.^4);%j/s
% for GS from s to g:
fsg1=(((b11+b21.*t1)*GiSjk1(1,1)+(b12+b22.*t1)*GiSjk2(1,1)+(b13+b23.*t1)*GiSjs(1,
1))).*s.*(t1.^4);% j/s
fsg2=(((b11+b21.*t2)*GiSjk1(1,2)+(b12+b22.*t2)*GiSjk2(1,2)+(b13+b23.*t2)*GiSjs(1,
2))).*s.*(t2.^4);% j/s
fsg3=(((b11+b21.*t3)*GiSjk1(1,3)+(b12+b22.*t3)*GiSjk2(1,3)+(b13+b23.*t3)*GiSjs(1,
3))).*s.*(t3.^4);% j/s
fsg4=(((b11+b21.*t4)*GiSjk1(1,4)+(b12+b22.*t4)*GiSjk2(1,4)+(b13+b23.*t4)*GiSjs(1,
4))).*s.*(t4.^4);% j/s

```

```

usg1=(((b11+b21.*t1)*GiSjuk1(1,1)+(b12+b22.*t1)*GiSjuk2(1,1)+(b13+b23.*t1)*GiSjt
1)).*s.*(t1.^4);% j/s
usg2=(((b11+b21.*t2)*GiSjuk1(1,2)+(b12+b22.*t2)*GiSjuk2(1,2)+(b13+b23.*t2)*GiSjt
2)).*s.*(t2.^4);% j/s
usg3=(((b11+b21.*t3)*GiSjuk1(1,3)+(b12+b22.*t3)*GiSjuk2(1,3)+(b13+b23.*t3)*GiSjt
3)).*s.*(t3.^4);% j/s
usg4=(((b11+b21.*t4)*GiSjuk1(1,4)+(b12+b22.*t4)*GiSjuk2(1,4)+(b13+b23.*t4)*GiSjt
4)).*s.*(t4.^4);% j/s
%sumation of parameters:
FGS=fgs1+fgs2+fgs3+fgs4+fgs5+fgs6;
FSG=fsg1+fsg2+fsg3+fsg4+fsg5+fsg6;
Qrad1=abs(FGS-FSG);
% j/s=watt
%sumation of parameters:
uFGS=ugs1+ugs2+ugs3+ugs4+ugs5+ugs6;
uFSG=usg1+usg2+usg3+usg4+usg5+usg6;
uQrad1=abs(uFGS-uFSG);
Qrad1;
uQrad1;
h=12; %
Qconv1=A1.*h.*(tg-t1)+A2.*h.*(tg-t2)+A3.*h.*(tg-t3)+A4.*h.*(tg-t4)
uQconv1=Au1.*h.*(tg-t1)+Au2.*h.*(tg-t2)+Au3.*h.*(tg-t3)+Au4.*h.*(tg-
t4)+Au5.*h.*(tg-t5)+Au6.*h.*(tg-t6);
Qconv1;
conload1=A5.*h.*(tg-t5);
uconload1=Au5.*h.*(tg-t5);
% for combustion:
Rs=9.76;
ps=10.785;
rog=0.719;
cvnet=34.91*10^6;% j/(m^3);
% Qg:
z=(tg-1400)/200;
Hg1=(1.399+0.28089.*z+0.004526.*z.^2+0.000402.*z.^3+0.000224.*z.^4+0.000023.*z.
^5)*10^(6);% j/kg
zarib1=Hg1.*0.7.*(ps+0.2.*Rs);%j/m^3
%QGen=(VG*cvnet)/3600;
% for load:

ah1=-0.81997*10^4;ah2=-0.394790*10^6;
bh1=0.54145*10^3;bh2=0.18757*10^4;
ch1=-0.7122;ch2=-1.18137;
dh1=0.3444*10^(-2);dh2=0.37703*10^(-3);
eh=-0.5628*10^(-5);
fh1=0.3405*10^(-8);
Ti1=25;To1=400;

```

```

if Ti1<=(800)
HL1i1=ah1+bh1.*Ti1+ch1.*(Ti1.^2)+dh1.*(Ti1.^3)+eh.*(Ti1.^4)+fh1.*(Ti1.^5);
else
HL1i1=ah2+bh2.*Ti1+ch2.*(Ti1.^2)+dh2.*(Ti1.^3);
end
if To1<=(800)
HL1o1=ah1+bh1.*To1+ch1.*(To1.^2)+dh1.*(To1.^3)+eh.*(To1.^4)+fh1.*(To1.^5);
else
HL1o1=ah2+bh2.*To1+ch2.*(To1.^2)+dh2.*(To1.^3);
end
deltaH1=(HL1o1- HL1i1);
Q1=ML.*deltaH1;%j/hr
QL1=Q1/3600;%j/s=watt
% calculate qout with
z2tg=1123;z3tg=1323;z4tg=1473;z5tg=1573;
z2=(z2tg-1400)./200;
Hg2=(1.399+0.28089.*z2+0.004526.*z2.^2+0.000402.*z2.^3+0.000224.*z2.^4+0.00002
3.*z2.^5)*10^(6);%j/kg
zarib2=Hg2.*0.7.*(ps+0.2.*Rs);%j/m^3
z3=(z3tg-1400)./200;
Hg3=(1.399+0.28089.*z3+0.004526.*z3.^2+0.000402.*z3.^3+0.000224.*z3.^4+0.00002
3.*z3.^5)*10^(6);%j/kg
zarib3=Hg3.*0.7.*(ps+0.2.*Rs);%j/m^3
z4=(z4tg-1400)./200;
Hg4=(1.399+0.28089.*z4+0.004526.*z4.^2+0.000402.*z4.^3+0.000224.*z4.^4+0.00002
3.*z4.^5)*10^(6);%j/kg
zarib4=Hg4.*0.7.*(ps+0.2.*Rs);%j/m^3
z5=(z4tg-1400)./200;
Hg5=(1.399+0.28089.*z5+0.004526.*z5.^2+0.000402.*z5.^3+0.000224.*z5.^4+0.00002
3.*z5.^5)*10^(6);%j/kg
zarib5=Hg5.*0.7.*(ps+0.2.*Rs);%j/m^3

VG1=(Qrad1+Qconv1+QL1)/(cvnet-zarib1);% m^3/s
uVG1=(uQrad1+uQconv1+QL1)/(cvnet-zarib1);% m^3/s

VGh1=VG1*3600;
uVGh1=uVG1*3600;

MG1=rog*VGh1;
uMG1=rog*uVGh1;

MG1;
VGh1;
Qout=VG1.*zarib1;
uQout=uVG1.*zarib1;

```

```

% balance for combustion product in zone2;
z2tg=1123;t=850;
z2t1=1050;z2t2=1050;z2t3=1050;z2t4=1050;z2t5=(650+273+273+400)/2;z2t6=1050;

z2gs1((((b11+b21.*z2tg)*GiSjk1(1,1)+(b12+b22.*z2tg)*GiSjk2(1,1)+(b13+b23.*z2tg)*
GiSjk3(1,1))).*s.*(z2tg.^4);% j/s
z2gs2((((b11+b21.*z2tg)*GiSjk1(1,2)+(b12+b22.*z2tg)*GiSjk2(1,2)+(b13+b23.*z2tg)*
GiSjk3(1,2))).*s.*(z2tg.^4);%j/s
z2gs3((((b11+b21.*z2tg)*GiSjk1(1,3)+(b12+b22.*z2tg)*GiSjk2(1,3)+(b13+b23.*z2tg)*
GiSjk3(1,3))).*s.*(z2tg.^4);%j/s
z2gs4((((b11+b21.*z2tg)*GiSjk1(1,4)+(b12+b22.*z2tg)*GiSjk2(1,4)+(b13+b23.*z2tg)*
GiSjk3(1,4))).*s.*(z2tg.^4);%j/s
u2gs1((((b11+b21.*z2tg)*GiSjuk1(1,1)+(b12+b22.*z2tg)*GiSjuk2(1,1)+(b13+b23.*z2t
g)*GiSjt1))).*s.*(z2tg.^4);% j/s
u2gs2((((b11+b21.*z2tg)*GiSjuk1(1,2)+(b12+b22.*z2tg)*GiSjuk2(1,2)+(b13+b23.*z2t
g)*GiSjt2))).*s.*(z2tg.^4);%j/s
u2gs3((((b11+b21.*z2tg)*GiSjuk1(1,3)+(b12+b22.*z2tg)*GiSjuk2(1,3)+(b13+b23.*z2t
g)*GiSjt3))).*s.*(z2tg.^4);%j/s
u2gs4((((b11+b21.*z2tg)*GiSjuk1(1,4)+(b12+b22.*z2tg)*GiSjuk2(1,4)+(b13+b23.*z2t
g)*GiSjt4))).*s.*(z2tg.^4);%j/s
% for GS from s to g:
z2sg1((((b11+b21.*z2t1)*GiSjk1(1,1)+(b12+b22.*z2t1)*GiSjk2(1,1)+(b13+b23.*z2t1)*
GiSjk3(1,1))).*s.*(z2t1.^4);% j/s
z2sg2((((b11+b21.*z2t2)*GiSjk1(1,2)+(b12+b22.*z2t2)*GiSjk2(1,2)+(b13+b23.*z2t2)*
GiSjk3(1,2))).*s.*(z2t2.^4);% j/s
z2sg3((((b11+b21.*z2t3)*GiSjk1(1,3)+(b12+b22.*z2t3)*GiSjk2(1,3)+(b13+b23.*z2t3)*
GiSjk3(1,3))).*s.*(z2t3.^4);% j/s
z2sg4((((b11+b21.*z2t4)*GiSjk1(1,4)+(b12+b22.*z2t4)*GiSjk2(1,4)+(b13+b23.*z2t4)*
GiSjk3(1,4))).*s.*(z2t4.^4);% j/s
u2sg1((((b11+b21.*z2t1)*GiSjuk1(1,1)+(b12+b22.*z2t1)*GiSjuk2(1,1)+(b13+b23.*z2t
1)*GiSjt1))).*s.*(z2t1.^4);% j/s
u2sg2((((b11+b21.*z2t2)*GiSjuk1(1,2)+(b12+b22.*z2t2)*GiSjuk2(1,2)+(b13+b23.*z2t
2)*GiSjt2))).*s.*(z2t2.^4);% j/s
u2sg3((((b11+b21.*z2t3)*GiSjuk1(1,3)+(b12+b22.*z2t3)*GiSjuk2(1,3)+(b13+b23.*z2t
3)*GiSjt3))).*s.*(z2t3.^4);% j/s
u2sg4((((b11+b21.*z2t4)*GiSjuk1(1,4)+(b12+b22.*z2t4)*GiSjuk2(1,4)+(b13+b23.*z2t
4)*GiSjt4))).*s.*(z2t4.^4);% j/s

%sumation of parameters:
z2FGS=z2gs1+z2gs2+z2gs3+z2gs4+z2gs5+z2gs6;
z2FSG=z2sg1+z2sg2+z2sg3+z2sg4+z2sg5+z2sg6;
Qrad2=abs(z2FGS-z2FSG);% j/s=watt

u2FGS=u2gs1+u2gs2+u2gs3+u2gs4+u2gs5+u2gs6;
u2FSG=u2sg1+u2sg2+u2sg3+u2sg4+u2sg5+u2sg6;
uQrad2=abs(u2FGS-u2FSG);% j/s=watt

```

```

h2=10; %
Qconv2=A1.*h2.*(z2tg-z2t1)+A2.*h2.*(z2tg-z2t2)+A3.*h2.*(z2tg-
z2t3)+A4.*h2.*(z2tg-z2t4)
Qconv2;

uQconv2=Au1.*h2.*(z2tg-z2t1)+Au2.*h2.*(z2tg-z2t2)+Au3.*h2.*(z2tg-
z2t3)+Au4.*h2.*(z2tg-z2t4)+Au5.*h2.*(z2tg-z2t5)+Au6.*h2.*(z2tg-z2t6);
uQconv2;
uconload2=Au5.*h.*(z2tg-z2t5);
% for combustion:
Rs=9.76;
ps=10.785;
rog=0.719;
cvnet=34.91*10^6;% j/(m^3);
% Qg:
z2=(z2tg-1400)./200;
Hg2=(1.399+0.28089.*z2+0.004526.*z2.^2+0.000402.*z2.^3+0.000224.*z2.^4+0.00002
3.*z2.^5)*10^(6);% j/kg
zarib2=Hg2.*0.7.*(ps+0.2.*Rs);%j/m^3
%QGen=(VG*cvnet)/3600;
% for load:
Ti2=400;To2=650;
if Ti1<=(800)
HL1i2=ah1+bh1.*Ti2+ch1.*(Ti2.^2)+dh1.*(Ti2.^3)+eh.*(Ti2.^4)+fh1.*(Ti2.^5);
else
HL1i2=ah2+bh2.*Ti2+ch2.*(Ti2.^2)+dh2.*(Ti2.^3);
end
if To2<=(800)
HL1o2=ah1+bh1.*To2+ch1.*(To2.^2)+dh1.*(To2.^3)+eh.*(To2.^4)+fh1.*(To2.^5);
else
HL1o2=ah2+bh2.*To2+ch2.*(To2.^2)+dh2.*(To2.^3);
end
deltaH2=(HL1o2- HL1i2)
Q2=ML.*deltaH2;
QL2=Q2/3600; % j/s=watt

VG2=((Qrad2+Qconv2+QL2-Qout)/(cvnet-zarib2));% m^3/s
uVG2=((uQrad2+uQconv2+QL2-uQout)/(cvnet-zarib2));% m^3/s

VGh2=VG2*3600;
uVGh2=uVG2*3600;

MG2=rog*VGh2;
uMG2=rog*uVGh2;

```

```

MG2;
VGh2;
%% balance for combustion product in zone3;
z3tg=1323;t=850;
z3t1=1220;z3t2=1220;z3t3=1220;z3t4=1220;z3t5=(900+273+650+273)/2;z3t6=1220;

z3gs1=(((b11+b21.*z4tg)*GiSjk1(1,1)+(b12+b22.*z4tg)*GiSjk2(1,1)+(b13+b23.*z4tg)*
GiSjk3(1,1))).*s.*(z3tg.^4);% j/s
z3gs2=(((b11+b21.*z3tg)*GiSjk1(1,2)+(b12+b22.*z3tg)*GiSjk2(1,2)+(b13+b23.*z3tg)*
GiSjk3(1,2))).*s.*(z3tg.^4);%j/s
z3gs3=(((b11+b21.*z3tg)*GiSjk1(1,3)+(b12+b22.*z3tg)*GiSjk2(1,3)+(b13+b23.*z3tg)*
GiSjk3(1,3))).*s.*(z3tg.^4);%j/s
z3gs4=(((b11+b21.*z3tg)*GiSjk1(1,4)+(b12+b22.*z3tg)*GiSjk2(1,4)+(b13+b23.*z3tg)*
GiSjk3(1,4))).*s.*(z3tg.^4);%j/s
z3gs5=(((b11+b21.*z3tg)*GiSjk1(1,5)+(b12+b22.*z3tg)*GiSjk2(1,5)+(b13+b23.*z3tg)*
GiSjk3(1,5))).*s.*(z3tg.^4);%j/s
z3gs6=(((b11+b21.*z3tg)*GiSjk1(1,6)+(b12+b22.*z3tg)*GiSjk2(1,6)+(b13+b23.*z3tg)*
GiSjk3(1,6))).*s.*(z3tg.^4);%j/s
% for GS from s to g:

u3gs1=(((b11+b21.*z4tg)*GiSjuk1(1,1)+(b12+b22.*z4tg)*GiSjuk2(1,1)+(b13+b23.*z4t
g)*GiSjt1))).*s.*(z3tg.^4);% j/s
u3gs2=(((b11+b21.*z3tg)*GiSjuk1(1,2)+(b12+b22.*z3tg)*GiSjuk2(1,2)+(b13+b23.*z3t
g)*GiSjt2))).*s.*(z3tg.^4);%j/s
u3gs3=(((b11+b21.*z3tg)*GiSjuk1(1,3)+(b12+b22.*z3tg)*GiSjuk2(1,3)+(b13+b23.*z3t
g)*GiSjt3))).*s.*(z3tg.^4);%j/s
u3gs4=(((b11+b21.*z3tg)*GiSjuk1(1,4)+(b12+b22.*z3tg)*GiSjuk2(1,4)+(b13+b23.*z3t
g)*GiSjt4))).*s.*(z3tg.^4);%j/s
u3gs5=(((b11+b21.*z3tg)*GiSjuk1(1,5)+(b12+b22.*z3tg)*GiSjuk2(1,5)+(b13+b23.*z3t
g)*GiSjt5))).*s.*(z3tg.^4);%j/s
u3gs6=(((b11+b21.*z3tg)*GiSjuk1(1,6)+(b12+b22.*z3tg)*GiSjuk2(1,6)+(b13+b23.*z3t
g)*GiSjt6))).*s.*(z3tg.^4);%j/s

z3sg1=(((b11+b21.*z3t1)*GiSjk1(1,1)+(b12+b22.*z3t1)*GiSjk2(1,1)+(b13+b23.*z3t1)*
GiSjk3(1,1))).*s.*(z3t1.^4);% j/s
z3sg2=(((b11+b21.*z3t2)*GiSjk1(1,2)+(b12+b22.*z3t2)*GiSjk2(1,2)+(b13+b23.*z3t2)*
GiSjk3(1,2))).*s.*(z3t2.^4);% j/s
z3sg3=(((b11+b21.*z3t3)*GiSjk1(1,3)+(b12+b22.*z3t3)*GiSjk2(1,3)+(b13+b23.*z3t3)*
GiSjk3(1,3))).*s.*(z3t3.^4);% j/s
z3sg4=(((b11+b21.*z3t4)*GiSjk1(1,4)+(b12+b22.*z3t4)*GiSjk2(1,4)+(b13+b23.*z3t4)*
GiSjk3(1,4))).*s.*(z3t4.^4);% j/s

u3sg1=(((b11+b21.*z3t1)*GiSjuk1(1,1)+(b12+b22.*z3t1)*GiSjuk2(1,1)+(b13+b23.*z3t
1)*GiSjt1))).*s.*(z3t1.^4);% j/s

```



```

u3sg2=((b11+b21.*z3t2)*GiSjuk1(1,2)+(b12+b22.*z3t2)*GiSjuk2(1,2)+(b13+b23.*z3t
2)*GiSjt2)).*s.*(z3t2.^4);% j/s
u3sg3=((b11+b21.*z3t3)*GiSjuk1(1,3)+(b12+b22.*z3t3)*GiSjuk2(1,3)+(b13+b23.*z3t
3)*GiSjt3)).*s.*(z3t3.^4);% j/s
u3sg4=((b11+b21.*z3t4)*GiSjuk1(1,4)+(b12+b22.*z3t4)*GiSjuk2(1,4)+(b13+b23.*z3t
4)*GiSjt4)).*s.*(z3t4.^4);% j/s
%sumation of parameters:
z3FGS=z3gs1+z3gs2+z3gs3+z3gs4+z3gs5+z3gs6;
z3FSG=z3sg1+z3sg2+z3sg3+z3sg4+z3sg5+z3sg6;
Qrad3=abs(z3FGS-z3FSG);% j/s=watt
h3=10;%

```

```

u3FGS=u3gs1+u3gs2+u3gs3+u3gs4+u3gs5+u3gs6;
u3FSG=u3sg1+u3sg2+u3sg3+u3sg4+u3sg5+u3sg6;
uQrad3=abs(u3FGS-u3FSG);% j/s=watt

```

```

Qconv3=A1.*h3.*(z3tg-z3t1)+A2.*h3.*(z3tg-z3t2)+A3.*h3.*(z3tg-
z3t3)+A4.*h3.*(z3tg-z3t4)+A5.*h3.*(z3tg-z3t5)+A6.*h3.*(z3tg-z3t6);
Qconv3;

```

```

uQconv3=Au1.*h3.*(z3tg-z3t1)+Au2.*h3.*(z3tg-z3t2)+Au3.*h3.*(z3tg-
z3t3)+Au4.*h3.*(z3tg-z3t4)
uQconv3;
uconload3=Au5.*h.*(z3tg-z3t5);
% for combustion:
Rs=9.76;
ps=10.785;
rog=0.719;
cvnet=34.91*10^6;% j/(m^3);
% Qg:
z3=(z3tg-1400)/200;
Hg3=(1.399+0.28089.*z3+0.004526.*z3.^2+0.000402.*z3.^3+0.000224.*z3.^4+0.00002
3.*z3.^5)*10^(6);% j/kg
zarib3=Hg3.*0.7.*(ps+0.2.*Rs);%j/m^3
%QGen=(VG*cvnet)/3600;
% for load:
Ti3=650;To3=900;
if Ti3<=(800)
HLli3=ah1+bh1.*Ti3+ch1.*(Ti3.^2)+dh1.*(Ti3.^3)+eh.*(Ti3.^4)+fh1.*(Ti3.^5);
else
HLli3=ah2+bh2.*Ti3+ch2.*(Ti3.^2)+dh2.*(Ti3.^3);
end
if To3<=(800)
HLlo3=ah1+bh1.*To3+ch1.*(To3.^2)+dh1.*(To3.^3)+eh.*(To3.^4)+fh1.*(To3.^5);

```

```

else
HL1o3=ah2+bh2.*To3+ch2.*(To3.^2)+dh2.*(To3.^3);
end
deltaH3=(HL1o3- HL1i3)
Q3=ML.*deltaH3;
QL3=Q3/3600; % j/s=watt

VG3=((Qrad3+Qconv3+QL3-Qout)/(cvnet-zarib3));% m^3/s
uVG3=((uQrad3+uQconv3+QL3-uQout)/(cvnet-zarib3));% m^3/s

VGh3=VG3*3600;
uVGh3=uVG3*3600;
MG3=rog*VGh3;
uMG3=rog*uVGh3;
MG3;
VGh3;
% result
%% balance for combustion product in zone4;
z4tg=1473;t=850;
z4t1=1360;z4t2=1360;z4t3=1360;z4t4=1360;z4t5=(1100+273+273+900)/2;z4t6=1360;

% for GS from s to g:
z4sg1((((b11+b21.*z4t1)*GiSjk1(1,1)+(b12+b22.*z4t1)*GiSjk2(1,1)+(b13+b23.*z4t1)*
GiSjk3(1,1))).*s.*(z4t1.^4);% j/s
z4sg2((((b11+b21.*z4t2)*GiSjk1(1,2)+(b12+b22.*z4t2)*GiSjk2(1,2)+(b13+b23.*z4t2)*
GiSjk3(1,2))).*s.*(z4t2.^4);% j/s
z4sg3((((b11+b21.*z4t3)*GiSjk1(1,3)+(b12+b22.*z4t3)*GiSjk2(1,3)+(b13+b23.*z4t3)*
GiSjk3(1,3))).*s.*(z4t3.^4);% j/s
z4sg4((((b11+b21.*z4t4)*GiSjk1(1,4)+(b12+b22.*z4t4)*GiSjk2(1,4)+(b13+b23.*z4t4)*
GiSjk3(1,4))).*s.*(z4t4.^4);% j/s
u4sg1((((b11+b21.*z4t1)*GiSjuk1(1,1)+(b12+b22.*z4t1)*GiSjuk2(1,1)+(b13+b23.*z4t
1)*GiSjt1))).*s.*(z4t1.^4);% j/s
u4sg2((((b11+b21.*z4t2)*GiSjuk1(1,2)+(b12+b22.*z4t2)*GiSjuk2(1,2)+(b13+b23.*z4t
2)*GiSjt2))).*s.*(z4t2.^4);% j/s
u4sg3((((b11+b21.*z4t3)*GiSjuk1(1,3)+(b12+b22.*z4t3)*GiSjuk2(1,3)+(b13+b23.*z4t
3)*GiSjt3))).*s.*(z4t3.^4);% j/s
u4sg4((((b11+b21.*z4t4)*GiSjuk1(1,4)+(b12+b22.*z4t4)*GiSjuk2(1,4)+(b13+b23.*z4t
4)*GiSjt4))).*s.*(z4t4.^4);% j/s

z4gs1((((b11+b21.*z4tg)*GiSjk1(1,1)+(b12+b22.*z4tg)*GiSjk2(1,1)+(b13+b23.*z4tg)*
GiSjk3(1,1))).*s.*(z4tg.^4);% j/s
z4gs2((((b11+b21.*z4tg)*GiSjk1(1,2)+(b12+b22.*z4tg)*GiSjk2(1,2)+(b13+b23.*z4tg)*
GiSjk3(1,2))).*s.*(z4tg.^4);%j/s

```

```
z4gs3=(((b11+b21.*z4tg)*GiSjk1(1,3)+(b12+b22.*z4tg)*GiSjk2(1,3)+(b13+b23.*z4tg)*
GiSjk3(1,3))).*s.*(z4tg.^4);%j/s
```

```
z4gs4=(((b11+b21.*z4tg)*GiSjk1(1,4)+(b12+b22.*z4tg)*GiSjk2(1,4)+(b13+b23.*z4tg)*
GiSjk3(1,4))).*s.*(z4tg.^4);%j/s
```

```
u4gs1=(((b11+b21.*z4tg)*GiSjuk1(1,1)+(b12+b22.*z4tg)*GiSjuk2(1,1)+(b13+b23.*z4t
g)*GiSjt1)).*s.*(z4tg.^4);%j/s
```

```
u4gs2=(((b11+b21.*z4tg)*GiSjuk1(1,2)+(b12+b22.*z4tg)*GiSjuk2(1,2)+(b13+b23.*z4t
g)*GiSjt2)).*s.*(z4tg.^4);%j/s
```

```
u4gs3=(((b11+b21.*z4tg)*GiSjuk1(1,3)+(b12+b22.*z4tg)*GiSjuk2(1,3)+(b13+b23.*z4t
g)*GiSjt3)).*s.*(z4tg.^4);%j/s
```

```
u4gs4=(((b11+b21.*z4tg)*GiSjuk1(1,4)+(b12+b22.*z4tg)*GiSjuk2(1,4)+(b13+b23.*z4t
g)*GiSjt4)).*s.*(z4tg.^4);%j/s
```

```
%sumation of parameters:
```

```
z4FGS=z4gs1+z4gs2+z4gs3+z4gs4+z4gs5+z4gs6;
```

```
z4FSG=z4sg1+z4sg2+z4sg3+z4sg4+z4sg5+z4sg6;
```

```
Qrad4=abs(z4FGS-z4FSG);%j/s=watt
```

```
u4FGS=u4gs1+u4gs2+u4gs3+u4gs4+u4gs5+u4gs6;
```

```
u4FSG=u4sg1+u4sg2+u4sg3+u4sg4+u4sg5+u4sg6;
```

```
uQrad4=abs(u4FGS-u4FSG);%j/s=watt
```

```
h4=10;%
```

```
Qconv4=A1.*h4.*(z4tg-z4t1)+A2.*h4.*(z4tg-z4t2)+A3.*h4.*(z4tg-
z4t3)+A4.*h4.*(z4tg-z4t4)+A5.*h4.*(z4tg-z4t5)+A6.*h4.*(z4tg-z4t6);
```

```
Qconv4;
```

```
uQconv4=Au1.*h4.*(z4tg-z4t1)+Au2.*h4.*(z4tg-z4t2)+Au3.*h4.*(z4tg-
z4t3)+Au4.*h4.*(z4tg-z4t4)
```

```
uQconv4;
```

```
uconload4=Au5.*h4.*(z4tg-z4t5);
```

```
% for combustion:
```

```
Rs=9.76;
```

```
ps=10.785;
```

```
rog=0.719;
```

```
cvnet=34.91*10^6;%j/(m^3);
```

```
% Qg:
```

```
z4=(z4tg-1400)/200;
```

```
Hg4=(1.399+0.28089.*z4+0.004526.*z4.^2+0.000402.*z4.^3+0.000224.*z4.^4+0.00002
3.*z4.^5)*10^(6);%j/kg
```

```
zarib4=Hg4.*0.7.*(ps+0.2.*Rs);%j/m^3
```

```
%QGen=(VG*cvnet)/3600;
```

```
% for load:
```

```
Ti4=900;To4=1100;
```

```
if Ti4<=(800)
```

```

HL1i4=ah1+bh1.*Ti4+ch1.*(Ti4.^2)+dh1.*(Ti4.^3)+eh.*(Ti4.^4)+fh1.*(Ti4.^5);
else
HL1i4=ah2+bh2.*Ti4+ch2.*(Ti4.^2)+dh2.*(Ti4.^3);
end
if To4<=(800)
HL1o4=ah1+bh1.*To4+ch1.*(To4.^2)+dh1.*(To4.^3)+eh.*(To4.^4)+fh1.*(To4.^5);
else
HL1o4=ah2+bh2.*To4+ch2.*(To4.^2)+dh2.*(To4.^3);
end
deltaH4=(HL1o4- HL1i4)
Q4=ML.*deltaH4;
QL4=Q4/3600; % j/s=watt

VG4=((Qrad4+Qconv4+QL4-Qout)/(cvnet-zarib4));% m^3/s
VGh4=VG4*3600;
uVG4=((uQrad4+uQconv4+QL4-Qout)/(cvnet-zarib4));% m^3/s
uVGh4=uVG4*3600;

MG4=rog*VGh4;
uMG4=rog*uVGh4;

MG4;
VGh4;

%% balance for combustion product in zone4;
z5tg=1573;t=850;
z5t1=1500;z5t2=1500;z5t3=1500;z5t4=1500;z5t5=(1200+273+1100+273)/2;z5t6=1500;
z5gs1=(((b11+b21.*z5tg)*GiSjk1(1,1)+(b12+b22.*z5tg)*GiSjk2(1,1)+(b13+b23.*z5tg)*
GiSjk3(1,1))).*s.*(z5tg.^4);% j/s
z5gs2=(((b11+b21.*z5tg)*GiSjk1(1,2)+(b12+b22.*z5tg)*GiSjk2(1,2)+(b13+b23.*z5tg)*
GiSjk3(1,2))).*s.*(z5tg.^4);%j/s
z5gs3=(((b11+b21.*z5tg)*GiSjk1(1,3)+(b12+b22.*z5tg)*GiSjk2(1,3)+(b13+b23.*z5tg)*
GiSjk3(1,3))).*s.*(z5tg.^4);%j/s
z5gs4=(((b11+b21.*z5tg)*GiSjk1(1,4)+(b12+b22.*z5tg)*GiSjk2(1,4)+(b13+b23.*z5tg)*
GiSjk3(1,4))).*s.*(z5tg.^4);%j/s
z5gs5=(((b11+b21.*z5tg)*GiSjk1(1,5)+(b12+b22.*z5tg)*GiSjk2(1,5)+(b13+b23.*z5tg)*
GiSjk3(1,5))).*s.*(z5tg.^4);%j/s
z5gs6=(((b11+b21.*z5tg)*GiSjk1(1,6)+(b12+b22.*z5tg)*GiSjk2(1,6)+(b13+b23.*z5tg)*
GiSjk3(1,6))).*s.*(z5tg.^4);%j/s

u5gs1=(((b11+b21.*z5tg)*GiSjk1(1,1)+(b12+b22.*z5tg)*GiSjk2(1,1)+(b13+b23.*z5t
g)*GiSjt1))).*s.*(z5tg.^4);% j/s

```

```

u5gs2=(((b11+b21.*z5tg)*GiSjuk1(1,2)+(b12+b22.*z5tg)*GiSjuk2(1,2)+(b13+b23.*z5t
g)*GiSjt2)).*s.*(z5tg.^4);%j/s
u5gs3=(((b11+b21.*z5tg)*GiSjuk1(1,3)+(b12+b22.*z5tg)*GiSjuk2(1,3)+(b13+b23.*z5t
g)*GiSjt3)).*s.*(z5tg.^4);%j/s
u5gs4=(((b11+b21.*z5tg)*GiSjuk1(1,4)+(b12+b22.*z5tg)*GiSjuk2(1,4)+(b13+b23.*z5t
g)*GiSjt4)).*s.*(z5tg.^4);%j/s

```

% for GS from s to g:

```

z5sg1=(((b11+b21.*z5t1)*GiSjk1(1,1)+(b12+b22.*z5t1)*GiSjk2(1,1)+(b13+b23.*z5t1)*
GiSjk3(1,1))).*s.*(z5t1.^4);%j/s
z5sg2=(((b11+b21.*z5t2)*GiSjk1(1,2)+(b12+b22.*z5t2)*GiSjk2(1,2)+(b13+b23.*z5t2)*
GiSjk3(1,2))).*s.*(z5t2.^4);%j/s
z5sg3=(((b11+b21.*z5t3)*GiSjk1(1,3)+(b12+b22.*z5t3)*GiSjk2(1,3)+(b13+b23.*z5t3)*
GiSjk3(1,3))).*s.*(z5t3.^4);%j/s
z5sg4=(((b11+b21.*z5t4)*GiSjk1(1,4)+(b12+b22.*z5t4)*GiSjk2(1,4)+(b13+b23.*z5t4)*
GiSjk3(1,4))).*s.*(z5t4.^4);%j/s

```

```

u5sg1=(((b11+b21.*z5t1)*GiSjuk1(1,1)+(b12+b22.*z5t1)*GiSjuk2(1,1)+(b13+b23.*z5t
1)*GiSjt1)).*s.*(z5t1.^4);%j/s
u5sg2=(((b11+b21.*z5t2)*GiSjuk1(1,2)+(b12+b22.*z5t2)*GiSjuk2(1,2)+(b13+b23.*z5t
2)*GiSjt2)).*s.*(z5t2.^4);%j/s
u5sg3=(((b11+b21.*z5t3)*GiSjuk1(1,3)+(b12+b22.*z5t3)*GiSjuk2(1,3)+(b13+b23.*z5t
3)*GiSjt3)).*s.*(z5t3.^4);%j/s
u5sg4=(((b11+b21.*z5t4)*GiSjuk1(1,4)+(b12+b22.*z5t4)*GiSjuk2(1,4)+(b13+b23.*z5t
4)*GiSjt4)).*s.*(z5t4.^4);%j/s

```

%sumation of parameters:

```

z5FGS=z5gs1+z5gs2+z5gs3+z5gs4+z5gs5+z5gs6;
z5FSG=z5sg1+z5sg2+z5sg3+z5sg4+z5sg5+z5sg6;
Qrad5=abs(z5FGS-z5FSG);%j/s=watt
u5FGS=u5gs1+u5gs2+u5gs3+u5gs4+u5gs5+u5gs6;
u5FSG=u5sg1+u5sg2+u5sg3+u5sg4+u5sg5+u5sg6;
uQrad5=abs(u5FGS-u5FSG);%j/s=watt
h5=10;%
Qconv5=A1.*h5.*(z5tg-z5t1)+A2.*h5.*(z5tg-z5t2)+A3.*h5.*(z5tg-
z5t3)+A4.*h5.*(z5tg-z5t4)+A5.*h5.*(z5tg-z5t5)+A6.*h5.*(z5tg-z5t6);
Qconv5;

```

```

uQconv5=Au1.*h5.*(z5tg-z5t1)+Au2.*h5.*(z5tg-z5t2)+Au3.*h5.*(z5tg-
z5t3)+Au4.*h5.*(z5tg-z5t4)+Au5.*h5.*(z5tg-z5t5)+Au6.*h5.*(z5tg-z5t6);
uQconv5;

```

% for combustion:

```

Rs=9.76;
ps=10.785;

```

```

rog=0.719;
cvnet=34.91*10^6;% j/(m^3);
% Qg:
z5=(z4tg-1400)/200;
Hg5=(1.399+0.28089.*z5+0.004526.*z5.^2+0.000402.*z5.^3+0.000224.*z5.^4+0.00002
3.*z5.^5)*10^(6);% j/kg
zarib5=Hg5.*0.7.*(ps+0.2.*Rs);%j/m^3
%QGen=(VG*cvnet)/3600;
% for load:
Ti5=1100;To5=1200;
if Ti5<=(800)
HL1i5=ah1+bh1.*Ti5+ch1.*(Ti5.^2)+dh1.*(Ti5.^3)+eh.*(Ti5.^4)+fh1.*(Ti5.^5);
else
HL1i5=ah2+bh2.*Ti5+ch2.*(Ti5.^2)+dh2.*(Ti5.^3);
end
if To5<=(800)
HL1o5=ah1+bh1.*To5+ch1.*(To5.^2)+dh1.*(To5.^3)+eh.*(To5.^4)+fh1.*(To5.^5);
else
HL1o5=ah2+bh2.*To5+ch2.*(To5.^2)+dh2.*(To5.^3);
end
deltaH5=(HL1o5- HL1i5)
Q5=ML.*deltaH5;
QL5=Q5/3600; % j/s=watt

VG5=((Qrad5+Qconv5+QL5-Qout)/(cvnet-zarib5));% m^3/s
VGh5=VG5*3600;
uVG5=((uQrad5+uQconv5+QL5-Qout)/(cvnet-zarib5));% m^3/s
uVGh5=uVG5*3600;

MG5=rog*VGh5;
uMG5=rog*uVGh5;

MG5;
VGh5;
zone1=[MG1 uMG1]
zone2=[MG2 uMG2]
zone3=[MG3 uMG3]
zone4=[MG4 uMG4]
zone5=[MG5 uMG5]

%zone1=[ MG1 VG1*cvnet Qrad1 Qconv1 QL1 VG1*cvnet-(Qrad1+Qconv1)]
%zone2=[ MG2 VG2*cvnet Qrad2 Qconv2 QL2 VG2*cvnet-(Qrad2+Qconv2)]
%zone3=[ MG3 VG3*cvnet Qrad3 Qconv3 QL3 VG3*cvnet-(Qrad3+Qconv3)]
%zone4=[ MG4 VG4*cvnet Qrad4 Qconv4 QL4 VG4*cvnet-(Qrad4+Qconv4)]

```

```

%zone5=[ MG5 VG5*cvnet Qrad5 Qconv5 QL5 VG5*cvnet-(Qrad5+Qconv5)]
% calculate the radiation and convection:

% for zone 1:
n1=10;
time=3600;
tc5=300;
f=300*ones(1,400);
qstep=zeros(1,n1);
qconstep=zeros(1,n1);
TSL1=zeros(1,n1);
TCL1=zeros(1,n1);
for w1=1:n1

    %f=tc5*ones(1,400)
    t1=linspace((w1-1)*(time/n1),w1*(time/n1),10);
    tg=873;
    tc1=720;tc2=720;tc3=720;tc4=720;tc6=720;
    if tc5==tc1
        qrad5=0

    end
    us1s5=((b11+b21.*tc1)*SiSjuk1(1,5)+(b12+b22.*tc1)*SiSjuk2(1,5)+(b13+b23.*tc1)*SiS
    jk3(1,5)).*s*(tc1^4);% j/s
    us2s5=((b11+b21.*tc2)*SiSjuk1(2,5)+(b12+b22.*tc2)*SiSjuk2(2,5)+(b13+b23.*tc2)*SiS
    jk3(2,5)).*s*(tc2^4);% j/s
    us3s5=((b11+b21.*tc3)*SiSjuk1(3,5)+(b12+b22.*tc3)*SiSjuk2(3,5)+(b13+b23.*tc3)*SiS
    jk3(3,5)).*s*(tc3^4);% j/s
    us4s5=((b11+b21.*tc4)*SiSjuk1(4,5)+(b12+b22.*tc4)*SiSjuk2(4,5)+(b13+b23.*tc4)*SiS
    jk3(4,5)).*s*(tc4^4);% j/s
    %us5s5=((b11+b21.*tc5)*SiSjuk1(5,5)+(b12+b22.*tc5)*SiSjuk2(5,5)+(b13+b23.*tc5)*S
    iSjk3(5,5)).*s*(tc5^4);% j/s

    ugs5=((b11+b21.*tg)*GiSjuk1(1,5)+(b12+b22.*tg)*GiSjuk2(1,5)+(b13+b23.*tg)*GiSjt5
    ).*s*(tg^4);% j/s

    qrad5=(us1s5+us2s5+us3s5+us4s5)+ugs5-(Au5.*e5*s*tc5^4);% j/s
    sharz1=qrad5/(Au5);% w/m^2
    % convection heat transfer:
    hzon1=12;
    qcon5=hzon1*(tg-tc5);% j/s
    qtotal=(sharz1+(qcon5));
    %f=input('Give Initial Condition =');

m=400;
T=zeros(length(t1),m);

```

```

say=T;
k=80.2;
Cp=447;
rou=7870;
alpha=2.28E-5;
ro=0.2;
q=qttotal;
r=linspace(0,ro,m);
PHI=q*r.^2/(2*ro*k);
load bank
for i=1:length(RJ1);
    landa(i)=RJ1(i)/ro;
    surat=trapz(r,(f-PHI).*r.*besselj(0,landai)*r));
    makhraj=trapz(r,r.*(besselj(0,landai)*r)).^2);
    a(i)=surat/makhraj;
end
G=2*q*t1/(rou*Cp*ro);
h=waitbar(0,'Please wait...');
for j=1:length(t1)
    for p=1:length(r)
        U=0;
        for i=1:length(a)
            U=U+a(i)*besselj(0,landai)*r(p))*exp(-alpha*landai^2*t1(j));
        end
        say(j,p)=U;
    end
    waitbar(j/length(t1),h);
end
for j=1:length(t1)
    for p=1:length(r)
        T(j,p)=say(j,p)+PHI(p)+G(j);
    end
end
close(h);
f=T(n1,:);
tc5=T(n1,400);
tcen5=T(n1,1);
qstep(1,w1)=qrad5;
qconstep(1,w1)=qcon5;
TSL1(1,w1)=tc5;
TCL1(1,w1)=tcen5;
end
TSL1(1,:)
T(n1,400)
clear X Y
%Ts=input('Give Temperature Profile = ');

```



```

theta=linspace(0,2*pi,360);
clear X Y
%Ts=input('Give Temperature Profile = ');
Ts=T(n1,:)
for i=1:length(r)
    for j=1:360;
        X(i,j)=r(i).*cos(theta(j));
        Y(i,j)=r(i).*sin(theta(j));
        Tplot(i,j)=Ts(i);
    end
end
%Tplot(1,:)=300;
surf(X,Y,Tplot);
view(2);
shading interp
axis equal
colorbar
title('\fontname{areal}\fontsize{14} Temperature Distribution (K)');
% for zone 2:
n2=10;
t2c5=T(n1,400);
time=3600;
%tc5=300;
f2=T(n1,:);
qstep2=zeros(1,n2);
qconstep2=zeros(1,n2);
TSL2=zeros(1,n2);
TCL2=zeros(1,n2);
for w2=1:n2

    %f=tc5*ones(1,400)
    t2=linspace((w2-1)*(time/n2),w2*(time/n2),n2);
    z2tg=1123;
    %z2t1=1050;
    z2t2=1050;z2t3=1050;z2t4=1050;%z2t5=(650+273+273+400)/2;z2t6=1050;
    if t2c5==z2t2
        q2rad5=0
    end
    %u2s1s5=((b11+b21.*tc1)*SiSjuk1(1,5)+(b12+b22.*tc1)*SiSjuk2(1,5)+(b13+b23.*tc1)*
    SiSjk3(1,5)).*s*(tc1^4);% j/s
    u2s2s5=((b11+b21.*z2t2)*SiSjuk1(2,5)+(b12+b22.*z2t2)*SiSjuk2(2,5)+(b13+b23.*z2t2
    )*SiSjk3(2,5)).*s*(z2t2^4);% j/s
    u2s3s5=((b11+b21.*z2t3)*SiSjuk1(3,5)+(b12+b22.*z2t3)*SiSjuk2(3,5)+(b13+b23.*z2t3
    )*SiSjk3(3,5)).*s*(z2t3^4);% j/s
    u2s4s5=((b11+b21.*z2t4)*SiSjuk1(4,5)+(b12+b22.*z2t4)*SiSjuk2(4,5)+(b13+b23.*z2t4
    )*SiSjk3(4,5)).*s*(z2t4^4);% j/s

```

```

%u2s5s5=((b11+b21.*tc5)*SiSjuk1(5,5)+(b12+b22.*tc5)*SiSjuk2(5,5)+(b13+b23.*tc5)*
SiSjk3(5,5)).*s*(tc5^4);% j/s

u2gs5=((b11+b21.*z2tg)*GiSjuk1(1,5)+(b12+b22.*z2tg)*GiSjuk2(1,5)+(b13+b23.*z2tg
)*GiSjt5)).*s*(z2tg^4);% j/s

q2rad5=(u2s2s5+u2s3s5+u2s4s5)+u2gs5-(Au5.*e5*s*t2c5^4);% j/s
sharz2=q2rad5/(Au5);% w/m^2
% convection heat transfer:
hzon2=12;
q2con5=hzon2*(z2tg-t2c5);% j/s
qtotal2=(sharz2+(q2con5));

q2=qtotal2;
r=linspace(0,ro,m);
PHI2=q2*r.^2/(2*ro*k);
load bank
for i=1:length(RJ1);
    landa(i)=RJ1(i)/ro;
    surat=trapz(r,(f2-PHI2).*r.*besselj(0,landai*r));
    makhraj=trapz(r,r.*(besselj(0,landai*r)).^2);
    a(i)=surat/makhraj;
end
G2=2*q2*t2/(rou*Cp*ro);
h=waitbar(0,'Please wait...');
for j=1:length(t2)
    for p=1:length(r)
        U=0;
        for i=1:length(a)
            U=U+a(i)*besselj(0,landai*r(p))*exp(-alpha*landai^2*t2(j));
        end
        say(j,p)=U;
    end
    waitbar(j/length(t2),h);
end
for j=1:length(t2)
    for p=1:length(r)
        T2(j,p)=say(j,p)+PHI2(p)+G(j);
    end
end
close(h);
f2=T2(n2,:);
t2c5=T2(n2,400);
tcen2=T2(n2,1);
qstep2(1,w2)=q2rad5;

```

```

qconstep2(1,w2)=q2con5;
TSL2(1,w2)=t2c5;
TCL2(1,w2)=tcen2;
end
TSL2(1,:);
T2(n2,400)
% for zone 3:
n3=10;
t3c5=T2(10,400);
time=3600;
%tc5=300;
f3=T2(10,:);
qstep3=zeros(1,n3);
qconstep3=zeros(1,n3);
TSL3=zeros(1,n3);
TCL3=zeros(1,n3);
for w3=1:n3

    %f=tc5*ones(1,400)

    t3=linspace((w3-1)*(time/n3),w3*(time/n3),10);
    z3tg=1323;
    z3t2=1220;z3t3=1220;z3t4=1220;%z2t5=(650+273+273+400)/2;z2t6=1050;
    if t3c5==z3t2
        q3rad5=0
    end
    %u2s1s5=((b11+b21.*tc1)*SiSjuk1(1,5)+(b12+b22.*tc1)*SiSjuk2(1,5)+(b13+b23.*tc1)*
    SiSjk3(1,5)).*s*(tc1^4);% j/s
    u3s2s5=((b11+b21.*z3t2)*SiSjuk1(2,5)+(b12+b22.*z3t2)*SiSjuk2(2,5)+(b13+b23.*z3t2
    )*SiSjk3(2,5)).*s*(z3t2^4);% j/s
    u3s3s5=((b11+b21.*z3t3)*SiSjuk1(3,5)+(b12+b22.*z3t3)*SiSjuk2(3,5)+(b13+b23.*z3t3
    )*SiSjk3(3,5)).*s*(z3t3^4);% j/s
    u3s4s5=((b11+b21.*z3t4)*SiSjuk1(4,5)+(b12+b22.*z3t4)*SiSjuk2(4,5)+(b13+b23.*z3t4
    )*SiSjk3(4,5)).*s*(z3t4^4);% j/s
    %u2s5s5=((b11+b21.*tc5)*SiSjuk1(5,5)+(b12+b22.*tc5)*SiSjuk2(5,5)+(b13+b23.*tc5)*
    SiSjk3(5,5)).*s*(tc5^4);% j/s

    u3gs5=((b11+b21.*z3tg)*GiSjuk1(1,5)+(b12+b22.*z3tg)*GiSjuk2(1,5)+(b13+b23.*z3tg
    )*GiSjt5).*s*(z3tg^4);% j/s

    q3rad5=(u3s2s5+u3s3s5+u3s4s5)+u3gs5-(Au5.*e5*s*t3c5^4);% j/s
    sharz3=q3rad5/(Au5);% w/m^2
    % convection heat transfer:
    hzon3=12;
    q3con5=hzon3*(z3tg-t3c5);% j/s
    qtotal3=(sharz3+(q3con5));

```

```

q3=qttotal3;
r=linspace(0,ro,m);
PHI3=q3*r.^2/(2*ro*k);
load bank
for i=1:length(RJ1);
    landa(i)=RJ1(i)/ro;
    surat=trapz(r,(f3-PHI3).*r.*besselj(0,landai*r));
    makhraj=trapz(r,r.*(besselj(0,landai*r)).^2);
    a(i)=surat/makhraj;
end
G3=2*q3*t3/(rou*Cp*ro);
h=waitbar(0,'Please wait...');
for j=1:length(t)
    for p=1:length(r)
        U=0;
        for i=1:length(a)
            U=U+a(i)*besselj(0,landai*r(p))*exp(-alpha*landai^2*t3(j));
        end
        say(j,p)=U;
    end
    waitbar(j/length(t3),h);
end
for j=1:length(t3)
    for p=1:length(r)
        T3(j,p)=say(j,p)+PHI3(p)+G(j);
    end
end
close(h);
f3=T3(10,:);
t3c5=T3(10,400);
tcen3=T3(10,1);
qstep3(1,w3)=q3rad5;
qconstep3(1,w3)=q3con5;
TSL3(1,w3)=t3c5;
TCL3(1,w3)=tcen3;
end

% for zone 4:
n4=10;
t4c5=T3(10,400);
time=3600;
%tc5=300;
f4=T3(10,:);
qstep4=zeros(1,n4);

```

```

qconstep4=zeros(1,n4);
TSL4=zeros(1,n4);
TCL4=zeros(1,n4);
for w4=1:n4

    %f=tc5*ones(1,400)

    t4=linspace((w4-1)*(time/n4),w4*(time/n4),10);
    z4tg=1473;
    z4t2=1360;z4t3=1360;z4t4=1360;%z2t5=(650+273+273+400)/2;z2t6=1050;
    if t4c5==z4t2
        q4rad5=0
    end
    %u2s1s5=((b11+b21.*tc1)*SiSjuk1(1,5)+(b12+b22.*tc1)*SiSjuk2(1,5)+(b13+b23.*tc1)*
    SiSjk3(1,5)).*s*(tc1^4);% j/s
    u4s2s5=((b11+b21.*z4t2)*SiSjuk1(2,5)+(b12+b22.*z4t2)*SiSjuk2(2,5)+(b13+b23.*z4t2
    )*SiSjk3(2,5)).*s*(z4t2^4);% j/s
    u4s3s5=((b11+b21.*z4t3)*SiSjuk1(3,5)+(b12+b22.*z4t3)*SiSjuk2(3,5)+(b13+b23.*z4t3
    )*SiSjk3(3,5)).*s*(z4t3^4);% j/s
    u4s4s5=((b11+b21.*z4t4)*SiSjuk1(4,5)+(b12+b22.*z4t4)*SiSjuk2(4,5)+(b13+b23.*z4t4
    )*SiSjk3(4,5)).*s*(z4t4^4);% j/s
    %u2s5s5=((b11+b21.*tc5)*SiSjuk1(5,5)+(b12+b22.*tc5)*SiSjuk2(5,5)+(b13+b23.*tc5)*
    SiSjk3(5,5)).*s*(tc5^4);% j/s

    u4gs5=((b11+b21.*z4tg)*GiSjuk1(1,5)+(b12+b22.*z4tg)*GiSjuk2(1,5)+(b13+b23.*z4tg
    )*GiSjt5).*s*(z4tg^4);% j/s

    q4rad5=(u4s2s5+u4s3s5+u4s4s5)+u4gs5-((Au5).*e5*s*t4c5^4);% j/s
    sharz4=q4rad5/(Au5);% w/m^2
    % convection heat transfer:
    hzon4=12;
    q4con5=hzon4*(z4tg-t4c5);% j/s
    qtotal4=(sharz4+(q4con5));

    q4=qtotal4;
    r=linspace(0,ro,m);
    PHI4=q4*r.^2/(2*ro*k);
    load bank
    for i=1:length(RJ1);
        landa(i)=RJ1(i)/ro;
        surat=trapz(r,(f4-PHI4).*r.*besselj(0,landai)*r));
        makhraj=trapz(r,r.*(besselj(0,landai)*r).^2);
        a(i)=surat/makhraj;
    end
    end
    G4=2*q4*t4/(rou*Cp*ro);

```

```

h=waitbar(0,'Please wait...');
for j=1:length(t)
    for p=1:length(r)
        U=0;
        for i=1:length(a)
            U=U+a(i)*besselj(0,landa(i)*r(p))*exp(-alpha*landa(i)^2*t4(j));
        end
        say(j,p)=U;
    end
    waitbar(j/length(t4),h);
end
for j=1:length(t4)
    for p=1:length(r)
        T4(j,p)=say(j,p)+PHI4(p)+G(j);
    end
end
close(h);
f4=T4(10,:);
t4c5=T4(10,400);
tcen4=T4(10,1);
qstep4(1,w4)=q4rad5;
qconstep4(1,w4)=q4con5;
TSL4(1,w4)=t4c5;
TCL4(1,w4)=tcen4;
end
% for zone 5:
n5=10;
t5c5=T4(10,400);
time=3600;
%tc5=300;
f5=T4(10,:);
qstep5=zeros(1,n5);
qconstep5=zeros(1,n5);
TSL5=zeros(1,n5);
TCL5=zeros(1,n5);
for w5=1:n5

    %f=tc5*ones(1,400)

    t5=linspace((w5-1)*(time/n5),w5*(time/n5),10);
z5tg=1573;
z5t2=1500;z5t3=1500;z5t4=1500;%z2t5=(650+273+273+400)/2;z2t6=1050;
if t5c5==z5t2
    q5rad5=0
end

```

```

%u2s1s5=((b11+b21.*tc1)*SiSjuk1(1,5)+(b12+b22.*tc1)*SiSjuk2(1,5)+(b13+b23.*tc1)*
SiSjk3(1,5)).*s*(tc1^4);% j/s
u5s2s5=((b11+b21.*z5t2)*SiSjuk1(2,5)+(b12+b22.*z5t2)*SiSjuk2(2,5)+(b13+b23.*z5t2
)*SiSjk3(2,5)).*s*(z5t2^4);% j/s
u5s3s5=((b11+b21.*z5t3)*SiSjuk1(3,5)+(b12+b22.*z5t3)*SiSjuk2(3,5)+(b13+b23.*z5t3
)*SiSjk3(3,5)).*s*(z5t3^4);% j/s
u5s4s5=((b11+b21.*z5t4)*SiSjuk1(4,5)+(b12+b22.*z5t4)*SiSjuk2(4,5)+(b13+b23.*z5t4
)*SiSjk3(4,5)).*s*(z5t4^4);% j/s
%u2s5s5=((b11+b21.*tc5)*SiSjuk1(5,5)+(b12+b22.*tc5)*SiSjuk2(5,5)+(b13+b23.*tc5)*
SiSjk3(5,5)).*s*(tc5^4);% j/s

u5gs5=((b11+b21.*z5tg)*GiSjuk1(1,5)+(b12+b22.*z5tg)*GiSjuk2(1,5)+(b13+b23.*z5tg
)*GiSjt5)).*s*(z5tg^4);% j/s

q5rad5=(u5s2s5+u5s3s5+u5s4s5)+u5gs5-(Au5.*e5*s*t5c5^4);% j/s
sharz5=q5rad5/(Au5);% w/m^2
% convection heat transfer:
hzon5=12;
q5con5=hzon5*(z5tg-t5c5);% j/s
qtotal5=(sharz5+(q5con5));
q5=qtotal5;
r=linspace(0,ro,m);
PHI5=q5*r.^2/(2*ro*k);
load bank
for i=1:length(RJ1);
    landa(i)=RJ1(i)/ro;
    surat=trapz(r,(f5-PHI5).*r.*besselj(0,landai)*r));
    makhraj=trapz(r,r.*(besselj(0,landai)*r).^2);
    a(i)=surat/makhraj;
end
G5=2*q5*t5/(rou*Cp*ro);
h=waitbar(0,'Please wait...');
for j=1:length(t)
    for p=1:length(r)
        U=0;
        for i=1:length(a)
            U=U+a(i)*besselj(0,landai)*r(p))*exp(-alpha*landai^2*t5(j));
        end
        say(j,p)=U;
    end
    waitbar(j/length(t5),h);
end
for j=1:length(t5)
    for p=1:length(r)
        T5(j,p)=say(j,p)+PHI5(p)+G(j);
    end
end

```

```
end
close(h);
f5=T5(10,:);
t5c5=T5(10,400);
tcen5=T5(10,1);
qstep5(1,w5)=q5rad5;
qconstep5(1,w5)=q5con5;
TSL5(1,w5)=t5c5;
TCL5(1,w5)=tcen5;
end
```




Shahrood University of Technology

Modeling of Rotary Heat Treatment Furnace With Zone Method

**A Thesis Submitted in partial fulfillment of
The requirement for the Degree of Master of Science
In
Mechanical Engineering**

By : M .Karimi Demneh

Supervisor : Dr. M.H.Kayhani

Advisor : Dr. M.R. Heyrani Noubari

July 2005