

بررسی عمق نفوذ کربن و جریان گاز در فرایند کربن دهی گازی توسط یک مدل عددی سه بعدی

فریبرز قرهی قهی

استادیار گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی مجلسی

چکیده

در این مقاله عمق نفوذ کربن از روی سطح قطعه و نحوه جریان گاز در داخل کوره کربن دهی گازی توسط یک مدل عددی سه بعدی در کوره مداوم فشاری با شکل هندسه پیچیده مورد بررسی قرار گرفت. برای محاسبه عمق نفوذ کربن، با استفاده از مدل ریاضی، مقدار گردایان کربن در سطح فولاد به دست آمد. علاوه بر آن مدل توانایی پیشگویی نحوه جریان گاز در داخل کوره و چگونگی توزیع درجه حرارت و توزیع جرم واکنش دهنده های گازی را دارا است. برای این منظور معادلات حاکم بر فرایند شامل معادله پیوستگی و معادلات حاکم بر انتقال مومنتم، حرارت و جرم واکنش دهنده ها و شرایط مرزی مناسب با شرایط کار کوره با توجه به فرایند ارائه شد. چون معادلات حاکم بر فرایند به شکل مشتقات جزئی غیر خطی هستند، از روش المان حجمی بر مبنای تفاضل محدود و انطباق محورهای مختصات برای تبدیل معادلات حاکم به معادلات جبری استفاده شد. سپس معادلات جبری با روش SIMPLER حل شد.

اعتبار و صحت مدل عددی ارائه شده در این بررسی، با مقایسه عمق نفوذ کربن محاسبه شده از مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی منتشر شده مشخص شد. از این مقایسه معلوم شد که تطبیق نتایج محاسبه شده با داده های آزمایشگاهی خوب است و مدل قادر به محاسبه نتایج صحیح با دقت بالا در کوره های کربن دهی گازی مداوم می باشد. بنابراین از این مدل می توان در طراحی و به کار گیری کوره های کربن دهی گازی مداوم استفاده نمود.

واژه های کلیدی

کربن دهی گازی، مدل عددی، سختگردانی سطحی، جریان گاز، نفوذ کربن.

۱- مقدمه

دفاعی و غیره استفاده می شود. کوره های کربن دهی گازی به دو دسته مداوم و منقطع تقسیم بندی می گردند. در کوره فشاری مداوم قطعات مورد عملیات بر روی قیدها یا بر روی سبدهای مخصوص بر روی سینی قرار می گیرند. نحوه عمل بارگیری و تخلیه بدین صورت است که اولین سینی قطعات توسط یک فشار دهنده مکانیکی به داخل کوره هل داده می شود و همزمان تمام سینی های داخل کوره به یک اندازه رو به جلو جابه جا شده و نهایتاً یک سینی از انتهای کوره خارج می شود. در کوره های مدرن امروزی تمام عملیات کنترل و زمان بندی باز شدن در، هل دادن، و سریع سرد کردن (کوئنچ) به طور تمام خودکار توسط

کربن دهی گازی یک روش عملیات حرارتی است که از آن برای سخت کردن سطح قطعات فولادی کم کربن استفاده می شود. در این روش، کربن حاصله از تجزیه گاز متان در درجه حرارتی بالای دمای بحرانی AC (معمولاً بین ۸۵۰ تا ۹۵۰ درجه سانتیگراد) بر روی سطح قطعه نشسته و در عمق آن نفوذ می کند. بر اثر نفوذ کربن و تشکیل کاربید در سطح قطعه، سختی و مقاومت به سایش قطعه افزایش یافته، در صورتیکه عمق قطعه از نظر خواص مکانیکی تغییر نمی کند [۱]. از این فرایند در صنایع گوناگون مانند صنایع خودرو، صنایع ماشین سازی، صنایع

کربن به سمت داخل قطعه است. به طور معمول عمل افزودن گازهای مختلف به درون کوره در مناطق مختلف کوره متفاوت بوده و این امر باید در نظر گرفته شود.

در فرایند کربن دهی گازی تعداد زیادی از پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی نظیر نحوه جریان گاز، انتقال جرم و انتقال حرارت، انجام واکنش‌های شیمیایی و نفوذ کربن از سطح به عمق قطعه هم‌زمان با هم انجام می‌شوند. به طور کلی این مراحل را می‌توان به شرح زیر تقسیم‌بندی نمود:

۱- انتقال واکنش دهنده‌ها از توده گاز حامل به سطح جامد

۲- جذب سطحی واکنش دهنده‌ها

۳- واکنش شیمیایی

۴- دفع سطحی محصولات گازی

۵- انتقال محصولات فاز گازی از سطح جامد به توده گاز

حامل

چون واکنش‌های شیمیایی در فصل مشترک انجام می‌شوند، معمولاً سرعت انجام فرایند به سرعت مرحله انجام واکنش‌های شیمیایی و سرعت مرحله انتقال واکنش دهنده‌ها به فصل مشترک جامد و گاز بستگی دارد.

۲- واکنش‌های شیمیایی فرایند کربن دهی

در کوره‌های کربن دهی گازی واکنش اصلی کربن دهی

به صورت زیر می‌باشد [۱-۴]:



با بررسی مقالات منتشر شده [۲ و ۳] به خوبی مشخص شده که فرایند کربن دهی سریعاً توسط تجزیه CO به صورت زیر انجام می‌شوند:



به هر حال، در شرایط کاری کوره، پتانسیل اصلی برای فرایند کربن دهی توسط گاز متان مطابق با دو واکنش زیر فراهم می‌گردد [۳ و ۵]:

اپراتور کوره با تنظیم زمان سیکلی بین ورود دو سینی متوالی به کوره انجام می‌شوند. معمولاً طول کوره به اندازه ۱۵ تا ۳۰ سینی متناسب با زمان عملیات کربن دهی می‌باشد؛ هر چقدر زمان کربن دهی زیادتر باشد طول کوره هم باید بیشتر باشد. معمولاً زمان سیکل کاری بین ۱۲ تا ۹۰ دقیقه بسته به عمق نفوذ سختی در قطعه، نرخ تولید و طول مفید کوره دارد [۲].

برای بهینه سازی فرایند کربن دهی، کوره‌های فشاری مدرن به سه تا پنج قسمت تقسیم‌بندی شده و دمای هر قسمت توسط ترموکوپل مستقل کنترل می‌شود. برای هر قسمت به طور جداگانه یک ورودی برای گاز حامل و گاز واکنش دهنده در نظر گرفته شده است. جهت چرخش گاز در داخل کوره، عموماً مناطق کربن دهی با یک یا چند فن تجهیز شده‌اند، تا توزیع گاز یک‌نواخت باشد. مناطق کربن دهی مجاور هم توسط جدا کننده کمائی شکل جدا شده که این سبب کاهش سطح مقطع کوره در این نواحی می‌گردد.

استراتژی به کارگیری کوره شامل سه منطقه زیر می‌باشد:

- استفاده از منطقه احتراق برای گرم کردن قطعات تا دمای

کربن دهی مناسب.

- استفاده از منطقه میانی برای انجام فرایند کربن دهی.

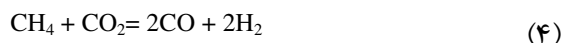
- استفاده از آخرین منطقه برای تنظیم حداکثر مقدار کربن

بر روی سطح.

دمای منطقه نهایی از دمای مناطق دیگر کوره کمتر است و این امر به دلیل کاهش اعوجاج قطعات در طول عملیات کوئنچ کردن می‌باشد. جهت گرم کردن قطعات سرد بدون کربن زدایی در منطقه اول، پتانسیل شیمیایی کم کربن مطلوب بوده، در صورتی که پتانسیل شیمیایی کربن در منطقه کربن دهی بیشتر و در منطقه آخر کمتر می‌باشد [۲ و ۳].

در مورد به کارگیری کوره برای رسیدن به یک عمق

سختی مشخص بر روی قطعه، همچنین رسیدن به نرخ تولید مطلوب باید در محل‌های مناسب گاز طبیعی و یا هوا به مقدار لازم افزوده شود و لازمه این امر دانستن نحوه جریان گاز در داخل کوره و چگونگی انتقال کربن از گاز به سطح قطعه و نفوذ



که نتیجه چهار معادله (۲) تا (۵) معادله کلی (۱) می باشد. در این مدل رفتار گاز ایده‌ال برای گازها در نظر گرفته خواهد شد.

۳- مدل ریاضی

در این بخش، یک مدل ریاضی از جریان گاز، انتقال حرارت و انتقال جرم واکنش دهنده‌ها در داخل کوره ارائه می‌گردد. مدل ریاضی شامل معادلات ریاضی حاکم بر فرایند کربن دهی گازی و شرایط مرزی بوده و از طرف دیگر واکنش‌های پیچیده شیمیایی فرایند کربن دهی نیز باید در نظر گرفته شود. چون معادلات ریاضی حاکم بر فرایندهای انتقال در کوره کربن دهی به شکل مشتقات جزئی غیر خطی می‌باشند بنابراین درک صحیح از مدل ریاضی برای شناخت فرایند و حل معادلات بسیار مهم است. در این تحقیق انتخاب یک مدل ریاضی بر اساس فیزیک فرایندهای انتقال و بیان آنها توسط معادلات حاکم توضیح داده می‌شود.

معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان گاز در داخل کوره بصورت زیر می‌باشند [۶]:

$$\nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (6)$$

که در معادله بالا ρ چگالی گاز و v بردار سرعت گاز می‌باشند.

معادله بقای مومنتم:

$$\nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla P + \nabla \cdot \tau + \rho g \quad (7)$$

که در این معادله P فشار گاز، g شتاب نیروی جاذبه زمین و τ تنسور تنش برشی بصورت زیر است:

$$\tau = \mu \left[\nabla v + (\nabla v)^T \right] - \frac{2}{3} \mu (\nabla v) I \quad (8)$$

که در معادله بالا $(\partial v)^T$ ترانسپوز (∂v) ، μ ویسکوزیته گاز

و I تنسور یکه می‌باشند.

معادله بقای انرژی:

$$(\rho v) \cdot C_p \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (9)$$

که T درجه حرارت، k ضریب هدایت و C_p ظرفیت گرمای ویژه در فشار ثابت می‌باشند.

معادله بقای جرم:

$$(\rho v) \cdot \nabla w_i = \nabla \cdot [D_i \nabla w_i + D_i^T \nabla \ln T] \quad (10)$$

که D_i ضریب نفوذ، w_i جرم جزئی عنصر i در ترکیب گاز می‌باشند. دومین جمله در سمت راست معادله بالا، بیانگر اثر نفوذ حرارتی (Sort Effect) می‌باشد. این جمله نشانگر انتقال جرم در اثر اختلاف درجه حرارت است.

$$D_i^T = \rho D_i w_i w_c \alpha^T \quad (11)$$

که α و w_c به ترتیب فاکتور نفوذ حرارتی و جرم جزئی گاز حامل می‌باشند.

در این مدل، برای محاسبه تغییرات چگالی بدلیل تغییرات دما از معادله گاز کامل استفاده شده است.

$$\rho = \frac{MP}{RT} \quad (12)$$

که R ثابت گازها و M جرم مولکولی گاز می‌باشد. همچنین برای تعیین جرم مولکولی گاز از فرمول زیر استفاده می‌گردد:

$$M = \sum_{i=1}^n M_i x_i \quad (13)$$

که x_i مول جزئی و M_i جرم مولکولی عنصر i در ترکیب گاز می‌باشند.

برای حل معادلات ذکر شده با شرایط مرزی مناسب باید که خواص گاز شناخته شده باشند. در این تحقیق، از تغییرات دانسیته بر اثر تغییرات در تعداد مول واکنش دهنده‌ها و محصولات صرف نظر شده است زیرا درصد گاز طبیعی به هوا و گاز اندو بسیار کم است. مول جزئی واکنش دهنده‌ها بر روی خواص دیگر نظیر ویسکوزیته، ضریب هدایت و ضریب نفوذ گاز در کوره اثر دارد. ویسکوزیته گاز از تئوری چاپمن-انسکوگک بصورت زیر محاسبه می‌شود [۶]:

پدیده‌های انتقال را بدین صورت نوشت:

معادله پیوستگی:

$$\nabla^* \cdot (\rho^* v^*) = 0 \quad (17)$$

معادله بقای مومنتم:

$$\nabla^* \cdot (\rho^* v^* v^*) = -\nabla^* P^* + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^* \cdot \underline{\tau} + (1 + \chi T^*)^{-1} \frac{Gr}{\text{Re}^2} T^* \quad (18)$$

معادله بقای انرژی:

$$(\rho^* v^*) \nabla^* T^* = \frac{1}{\text{Pr} \cdot \text{Re}} \nabla^* \cdot (k^* \nabla^* T^*) \quad (19)$$

معادله بقای جرم:

$$(\rho^* v^*) \nabla^* w_i^* = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Sc}} \nabla^* \cdot \left[\rho^* D_i^* \nabla^* w_i^* + \rho^* D_i^* w_i^* \alpha^T \nabla^* \ln T^* \right] \quad (20)$$

از معادلات بالا به خوبی دیده می‌شود که پدیده‌های انتقال

در کوره کربن‌دهی گازی توسط پنج گروه بدون بعد مشخص می‌گردند: عدد رینولد ($\text{Re} = \rho_0 u_0 D_h / \mu_0$)، عدد پرانتل ($\text{Pr} = C_p \rho_0 / k$)، عدد اشمیت ($\text{Sc} = \rho_0 \mu_0 / D_{i0}$)، عدد گراشف ($\chi = (T_s - T_0) / T_0$)، فاکتور بی بعد دما ($\text{Gr} = \rho_0^2 \Delta T_g D_h^3 / \mu_0^2 T_0$) که هر کدام از اعداد بالا نشان دهنده مفهوم وضعیت فیزیکی پدیده‌های انتقال در فرایند می‌باشند. به هر حال برای حل معادلات بالا به شرایط مرزی نیاز می‌باشد که در زیر، شرایط مرزی توضیح داده می‌شوند.

۴- شرایط مرزی

یک شرط مرزی به صورت یک متغیر یا مشتق آن بر روی فضای محاسباتی تعریف می‌گردد. برای ارائه یک مدل صحیح از کوره کربن‌دهی گازی باید که فضای محاسباتی به درستی تعریف شود. در مدل ارائه شده در این تحقیق، کوره مطابق با شکل (۱) از قسمت‌های پیشگرم، منطقه کربن‌دهی (واکنشهای شیمیایی) و منطقه یکنواختی تشکیل شده است. در کوره قسمت‌های دمای ثابت ورودی و خروجی تنها برای این منظور در نظر گرفته می‌شوند تا اطمینان حاصل گردد که گاز در ابتدای منطقه واکنش و در قسمت خروج در منطقه پیشرفته قرار دارد بنابراین طول قسمت خروجی طوری در نظر گرفته می‌شود که

$$\mu = \frac{\sum_1^n \mu_i x_i}{\sum_j \phi_{ij} x_i} \quad (14)$$

که در معادله بالا Φ_{ij} از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} + \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2 \quad (15)$$

گرمای ویژه در فشار ثابت (C_p) برای گاز کوره ثابت و مستقل از درجه حرارت در نظر گرفته شده زیرا تغییرات آن در شرایط کار کوره بسیار ناچیز است (کمتر از ۳ درصد).

حال که معادلات حاکم بر پدیده‌های انتقال در داخل کوره مشخص گردید، می‌توان با آنالیز ابعادی تعداد متغیرهای سیستم را کاهش داد. در حقیقت آنالیز ابعادی مواقعی بکار می‌روند که روابط ریاضی بسیار پیچیده و یا ناشناخته است. این روش در حقیقت، روابط منطقی میان متغیرهای یک گروه بی بعد را نشان می‌دهد. در اینجا، هدف اصلی از بکارگیری آنالیز ابعادی، کاهش پیچیدگی مسئله و کاهش تعداد متغیرهای سیستم است. همچنین بکارگیری متغیرهای بدون بعد راندمان و دقت محاسبات را افزایش می‌دهد. گروه‌های بی بعد از روشهای گوناگونی بدست می‌آیند، که در اینجا از روش بدون بعد ساختن معادلات انتقال استفاده شده است. متغیرهای مرجعی که استفاده شده‌اند عبارتند از: قطر معادل D_h ، سرعت میانگین گاز ورودی u_0 ، چگالی ρ_0 ، ضریب هدایت k_0 ، ضریب نفوذ D_i و مول جرمی واکنش دهنده w_{i0} در شرایط ورودی گاز. با استفاده از مشخصه‌های نامبرده متغیرهای بدون بعد بصورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\begin{aligned} \mu^* &= \frac{\mu}{\mu_0} & \rho^* &= \frac{\rho}{\rho_0} & \nabla^* &= \frac{\nabla}{1/D_h} \\ k^* &= \frac{k}{k_0} & T^* &= \frac{T - T_w}{T_0 - T_w} & v^* &= \frac{v}{u_0} \\ D_i^* &= \frac{D_i}{D_{i0}} & w_i^* &= \frac{w_i}{w_{i0}} \\ P^* &= \frac{P}{\rho_0 \mu_0^2} = \frac{P - \rho_0 g y}{\rho_0 \mu_0^2} \end{aligned} \quad (16)$$

با جایگذاری متغیرهای بی بعد بالا در معادلات (۷، ۹، ۱۰)، می‌توان معادلات بدون بعد حاکم بر

هدایت، جابجایی و تشعشع در انتقال حرارت در جداره‌های کوره وجود دارد. در هر نقطه بر روی جداره یک موازنه حرارتی برای هر سه شیوه باید در نظر گرفته شود. به این دلیل در ارائه یک مدل صحیح ملاحظات خاصی برای شرایط مرزی معادله حرارت باید رعایت شود. در این مدل برای برداشتن قدم اول انتقال حرارت توسط هدایت و همچنین انتقال حرارت توسط جابجایی از جداره کوره در نظر گرفته نمی‌شود زیرا در این صورت فضای محاسباتی باید گسترش پیدا کرده و مدل بیش از حد انتظار پیچیده می‌گردد. به هر حال در جداره کوره موازنه انرژی توسط فرمول زیر انجام می‌گیرد:

$$q_{\text{radiation}} = -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{wall}} \quad (21)$$

در بعضی از کوره‌های کربن دهی مخصوصاً کوره‌های آزمایشگاهی به علت نوع پوشش نسوز کوره می‌توان از انتقال حرارت بر روی جداره کوره توسط تشعشع صرف نظر نمود. برای پرهیز از گسیختگی درجه حرارت در دلبه منطقه واکنش می‌توان دو منطقه گذرا در نظر گرفت که درجه حرارت در این دو منطقه به صورت خطی تغییر می‌کند. طول هر منطقه گذرا را میتوان حدود ۵ درصد طول منطقه واکنش در نظر گرفت.

شرایط مرزی معادله جرم واکنش دهنده‌ها

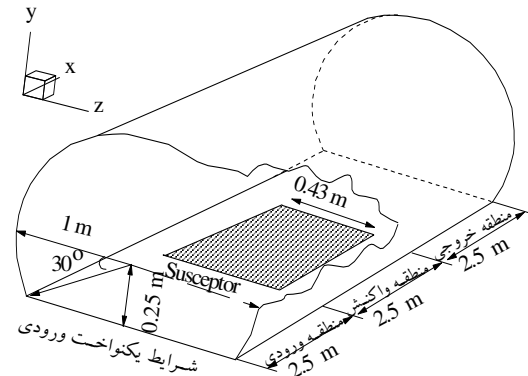
مول جزئی واکنش دهنده متان برای معادله انتقال جرم در ورودی یکنواخت و ثابت فرض شده است زیرا گاز قبل از ورودی به کوره به خوبی مخلوط می‌گردد. در خروجی فرض بر این است که پروفیل مول جزئی کاملاً پیشرفته می‌باشد. جداره‌های کوره در مقابل جرم نفوذ ناپذیر می‌باشند در نتیجه:

$$n \cdot [D_i \rho \nabla w_i + D_i^T \nabla \ln T] = 0 \quad (22)$$

همچنین نرخ انتقال کربن بر روی سطح قطعه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$n \cdot [D_i \rho \nabla w_i + D_i^T \nabla \ln T] = R \quad (23)$$

که در رابطه بالا R سرعت واکنش شیمیایی می‌باشد. معادلات ریاضی حاکم بر فرایندهای انتقال به همراه شرایط مرزی تشریح شده می‌باید در فضای پیچیده کوره حل گردند. از



شکل (۱): شکل هندسه کوره و شرایط کاری

تغییرات تمام متغیرها در آنجا بصورت توزیع کاملاً پیشرفته باشد. شرایط مرزی برای معادلات مومنتم، حرارت و جرم واکنش دهنده‌ها به صورت زیر می‌باشند.

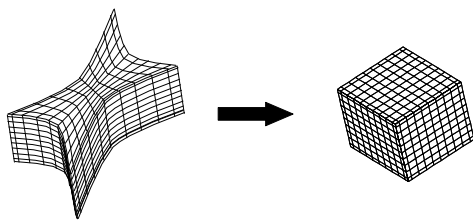
شرایط مرزی معادلات مومنتم

شرایط مرزی برای معادلات مومنتم عبارتند از: عدم هیچگونه لغزش گاز بر روی جداره‌های جامد کوره به عبارت دیگر $u=0, v=0, w=0$ ، پروفیل یکنواخت و پارابولیک در قسمت ورودی و نهایتاً پروفیل توزیع پیشرفته در قسمت خروجی گاز.

شرایط مرزی معادله حرارت

در یک کوره کربن دهی گازی انتقال حرارت توسط سه شیوه هدایت، جابجایی و تشعشع صورت گرفته و هر سه شیوه باید در نظر گرفته شود. به هر حال فرموله کردن کامل انتقال حرارت و همچنین حل معادله کامل به نظر بسیار پیچیده و در حال حاضر غیر ممکن و خارج از موضوع تحقیق است. در معادلات ریاضی ارائه شده فرض بر این است که گاز داخل کوره به طور ایده‌آل ترانسپرنس است که با توجه به غلظت کم واکنش دهنده‌ها این فرض صحیح به نظر می‌رسد، چون گازهای نیتروژن و هیدروژن کاملاً ترانسپرنس می‌باشند. این فرضیات برای اعمال شرایط مرزی برای معادله حرارت بسیار مهم بوده و توجه به دو نکته مقابل هم یعنی دقت و سرعت در امر محاسبات باید در نظر گرفته شود.

در یک فرایند کربن دهی گازی اثرات ترکیبی از شیوه‌های



فضای محاسباتی فضای فیزیکی

شکل (۲): شماتیک انتقال از فضای فیزیکی به فضای محاسباتی

در روش BFC از یک سیستم محورهای منحنی الخط (ξ, η, ζ) که خطوط محورهای مختصات آن منطبق بر مرز فضای محاسباتی است استفاده می‌شود. این تکنیک قادر است که یک شکل هندسه پیچیده را در فضای فیزیکی (x, y, z) به یک شکل ساده در فضای محاسباتی (ξ, η, ζ) انتقال دهد. در فضای فیزیکی ξ و η و ζ متغیرهای وابسته هستند که البته این متغیرها در فضای محاسباتی متغیرهای مستقل می‌باشند. یکی از مهمترین مزایای این روش این است که تمام مرزهای فیزیکی منطبق با محورهای مختصات منحنی الخط می‌باشد و بنابراین شرایط مرزی را می‌توان با دقت صحیحی اعمال نمود. این دقت، عملاً بسیار مهم می‌باشد زیرا در ناحیه مرزها گرادیان بزرگی از متغیرها وجود دارند و دقت در اعمال شرایط مرزی اثر مهمی بر روی دقت و صحت در نتایج محاسبه شده دارد.

روش BFC، نشان داده شده در شکل (۲)، سه مرحله دارد. ابتدا یک شکل هندسه پیچیده در فضای فیزیکی به یک شکل ساده در فضای محاسباتی منتقل می‌شود. سپس تمام معادلات ریاضی حاکم بر پدیده‌های انتقال به همراه شرایط مرزی از فضای فیزیکی به فضای محاسباتی منتقل شده و در نهایت معادلات منتقل شده در فضای محاسباتی با استفاده از تکنیک حجم کنترل بر مبنای تفاضل محدود حل می‌گردند.

انتقال از فضای فیزیکی به فضای محاسباتی با ایجاد یک دسته نقاط مش همراه است که اصطلاحاً آن را تولید مش نیز می‌نامند. در واقع تولید مش اولین و مهمترین مرحله در حل معادلات ریاضی (که بصورت مشتقات جزئی هستند) می‌باشد

آنجایی که حل جبری برای معادلات مشتق جزئی غیر خطی وجود ندارد باید حتماً از روش‌های عددی استفاده نمود. بکار گیری یک روش عددی برای حل این معادلات در بخش بعدی توضیح داده می‌شود.

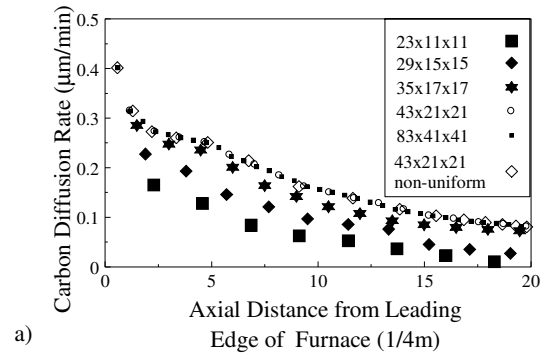
۵- روش حل عددی

در بخش‌های قبل، معادلات حاکم بر فرایندهای انتقال به همراه شرایط مرزی در کوره‌های کربن دهی گازی تشریح شد. در اینجا نحوه حل این معادلات در فضای پیچیده کوره تشریح می‌شود. از آنجایی که حل جبری برای معادلات مشتق جزئی غیر خطی وجود ندارد حتماً باید از روش‌های عددی استفاده نمود و در نتیجه یک روش عددی برای حل این معادلات در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، پدیده‌های انتقال در کوره‌های کربن‌دهی توسط روش انطباق محورهای مختصات BFC (Body or Boundary Fitted Coordinate) با استفاده از حجم کنترل بر مبنای تفاضل محدود CVFD (Control Volume Based Finite Difference) و غیر استگردهای مطالعه می‌شود. تعدادی از محققین [۷-۱۲] از روش BFC برای تحقیق و حل مسائل مختلف استفاده کرده‌اند. از اجزاء مختلف می‌توان از نحوه تولید مش نظیر مش‌های عمودی و غیر عمود، استگردهای (Staggered) و غیر استگردهای استفاده از ترکیب‌های مختلف سرعت به‌عنوان مثال متغیرهای سرعت کارترین، کوواریانت (Covariant) و کانتروارینت (Contravariant) و بلاخره استفاده از روش‌های هم‌خانواده SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations) نام برد. انتخاب مناسب هر یک از اجزاء ذکر شده به طبیعت جریان و پیچیدگی فضای محاسباتی بستگی دارد. بخاطر تعداد زیاد فرایندها و همچنین محدودیت نوشتاری در این قسمت تنها از آن دسته از روش‌های حل عددی که به این تحقیق بستگی دارد بررسی می‌شود. همچنین ترکیب اجزاء بکار رفته در این تحقیق یعنی به کارگیری BFC با استفاده از CVFD در فضای سه بعدی پیچیده کوره کربن‌دهی با توجه به دانش نویسنده روش بررسی نوینی می‌باشد.

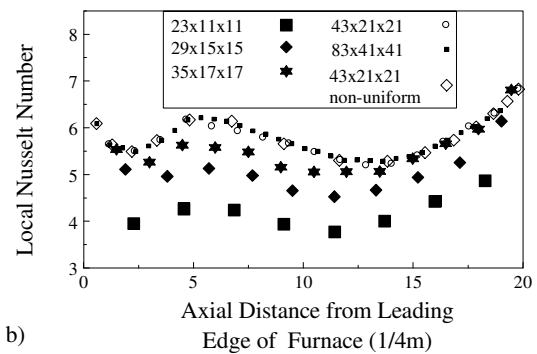
همکاران [۵۰] و محاسبات انجام شده توسط مدل ریاضی استیکل [۲] مقایسه خواهد شد. تشریح کوره جهت پیش‌بینی جریان گاز داخل کوره مداوم از اهمیت خاصی برخوردار است. شکل هندسی کوره کربن‌دهی و شرایط مرزی کوره در شکل (۱) آورده شده است. در این شکل محور x ها و محور z ها برتیب موازی و عمود بر جریان گاز بوده و محور y ها موازی با نیروی جاذبه زمین و در جهت خلاف آن می‌باشد. کوره از سه قسمت منطقه ورودی، منطقه واکنش و منطقه خروجی به طول ۷٫۵ متر تشکیل شده است. در داخل کوره، برای هر منطقه مقدار کربن لازم توسط مدل قابل محاسبه بوده و گاز طبیعی و یا هوای اضافه لازم برای هر قسمت محاسبه می‌گردد.

صحت مدل

برای بررسی حساسیت نتایج بدست آمده نسبت به تعداد مشها و محاسبه خطای آنها، سیستمهای مختلف مش‌بندی و وابستگی نتایج به تعداد مش آزمایش شد. در این آزمایشات، کمترین و بیشترین تعداد مش در جهت محور x ها ب به ترتیب برابر با $\Delta x=0.77$ و $\Delta x=0.22$ انتخاب شد. دقت محاسبات برای هر سیستم مش با مقایسه با نتایج محاسبات بدست آمده برای سیستم قبلی با تعداد مش کمتر ارزیابی شد. نتایج این آزمایشات در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شکل بخوبی دیده میشود که سرعت انتقال کربن و عدد نسلت محاسبه شده در سیستم $17 \times 17 \times 35$ بشدت به تعداد مش وابسته بوده و همچنین اختلاف نتایج محاسبه شده در سیستمهای $21 \times 21 \times 43$ با توزیع مش یکنواخت و $21 \times 21 \times 43$ با توزیع مش غیر یکنواخت با سیستم $43 \times 43 \times 83$ مش بسیار کم و در حدود کمتر از ۳ درصد می‌باشد. این اختلاف را می‌توان به مقدار خطای تفاضل میان مش‌ها نسبت داد. سیستم مش مورد قبول به گونه‌ای انتخاب شد که تغییرات عدد نوسلت محاسبه شده برای مشهای کوچکتر نسبت به مشهای بزرگتر کمتر از ۳ درصد بود. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، سیستم توزیع یکنواخت انتخاب شد و زمان لازم برای محاسبه یک سری از نتایج به‌دست آمده با استفاده از این سیستم بر روی پنتیوم پنچ ۲۶۰۰ مگا هرترهفت

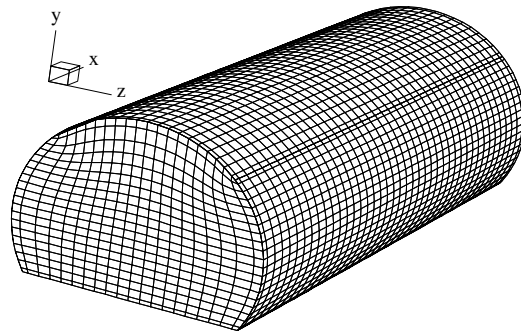


a)



b)

شکل (۴): نتایج بدست آمده در سیستمهای مختلف مش بندی فضای کوره برای (a) سرعت نفوذ کربن و (b) عدد نسلت محاسبه شده



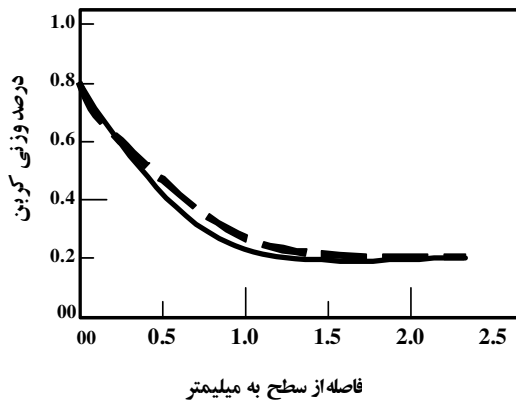
شکل (۵): سیستم توزیع یکنواخت مش در فضای کوره کربن دهی گازی

زیرا انتخاب مش بندی مناسب اثر مهمی در صحت و راندمان حل عددی معادلات ریاضی حاکم بر پدیده‌های انتقال در کوره کربن دهی گازی دارد.

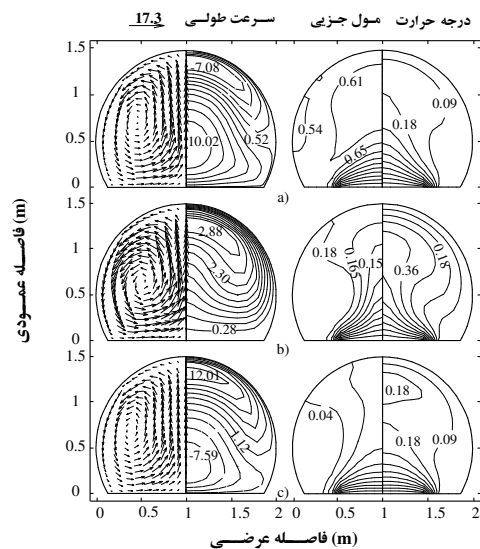
۶- نتایج و مباحث

شرایط کوره

در این تحقیق برای صحت مدل ریاضی نتایج به‌دست آمده از این مدل با نتایج به‌دست آمده از آزمایشات کولین و



شکل (۵): مقایسه نتایج محاسبه شده از مدل ریاضی (خط توپر) با نتایج به دست آمده از آزمایش (خط چین)



شکل (۶): نتایج محاسبه شده از مدل عددی برای بردارهای سرعت ثانویه و کنتورهای سرعت‌های طولی، کنتورهای توزیع مول جزئی و درجه حرارت برای عدد رینولد ۱۰۰

درصد در سطح حدود ۳۸ دقیقه زمان لازم بود تا قطعه طول کوره را طی کند. با این شرایط مقدار کربن سطحی برای رسیدن قطعه به عمق سختی یک میلیمتر برابر ۰٫۸ درصد بود.

در این مطالعه اگر چه بیشتر تمرکز بر روی عمق نفوذ کربن و عدد نوسلت بر روی سطح قطعه کار می‌باشد، اما بررسی توزیع سرعت گاز، درجه حرارت و غلظت مواد واکنش دهنده در کوره جذابیت داشته و در تحلیل مکانیسم‌های انتقال حرارت

ساعت بود. شکل (۵) چگونگی توزیع مش‌ها را در این سیستم نشان می‌دهد.

در این تحقیق، صحت و دقت مدل ارائه شده با مقایسه بین نتایج محاسبه شده از مدل و اندازه‌گیری‌های به دست آمده از مقدار عمق نفوذ کربن در کوره ارزیابی شد. اگر چه این عقیده وجود داشت که مدل‌های عددی راندمان و دقت بیشتری نسبت به روش‌های آزمایشگاهی دارند. به هر حال این احساس نیز وجود داشت که یک مقایسه دقیق و کامل بین محاسبات انجام شده از این مدل و اندازه‌گیری‌های انجام شده در آزمایش، استفاده از مدل ارائه شده را حمایت می‌کند. برای این منظور، مقدار کربن نفوذی محاسبه شده از سطح قطعه توسط مدل ریاضی با داده‌های آزمایشگاهی در شکل (۶) نشان داده شده است. در این شکل خط توپر مقدار نتایج محاسبه شده و خط منقطع نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهند. در این شکل دیده می‌شود، که تطابق بین نتایج آزمایشگاه با نتایج محاسبه شده از مدل خوب بوده و میانگین خطای محاسبه شده بین این دو حدود ۱۱ درصد است که این اختلاف ممکن است به خاطر استفاده از شرایط مرزی ایده‌آل برای معادلات حاکم بر پدیده‌های انتقال باشد. بطور کلی مطابقت نتایج به دست آمده از آزمایش با نتایج محاسبه شده از مدل ریاضی قابل قبول بوده و این نشان می‌دهد که از مدل ریاضی ارائه شده در این تحقیق می‌توان برای بررسی اثر پارامترهای کنترل کننده کوره نظیر سرعت ورودی گاز حامل و مقدار درصد جزئی گاز احیایی، دمای کوره، و حتی درصد ترکیب گاز محافظ استفاده نمود.

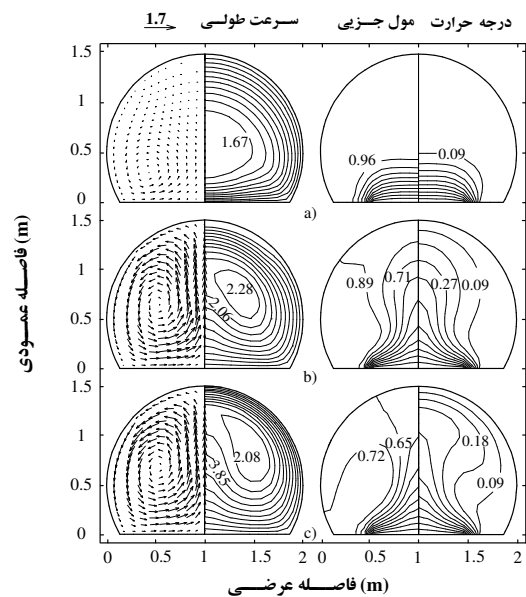
در مثال بررسی شده فولاد مورد استفاده برای سخت‌گردانی سطحی، فولاد ساده کربنی مطابق با استاندارد امریکایی AISI ۱۰۲۲ بوده که عمق نفوذ مورد نظر یک میلیمتر در نظر گرفته شده بود که مقدار کربن نهایی در سطح فولاد بعد از عملیات حرارتی حدود ۰٫۸ درصد و مقدار کربن در عمق یک میلیمتری حدود ۰٫۴ درصد کربن می‌باشد. درجه حرارت کربن‌دهی ۹۲۷ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده بود و در آزمایش برای رسیدن درصد کربن اولیه از ۰٫۲۲ درصد به ۰٫۸

می‌باشد. در این شکل، کنتورها در منطقه مرکزی بالای کوره مخصوصاً در ابتدای منطقه واکنش خم شده‌اند. این بدان معنی است که گرادیان زیادتری در این منطقه به دلیل سرعت بالای جریان وجود دارد.

در شکل (۷) شماتیک جریان مخلوط (جابجایی آزاد و جابجایی اجباری) (Mixed Convection) نشان داده شده است. در بررسی اثر جریان گاز در داخل کوره، این موضوع که جریان مخلوط نقش بسیار مهمی را بر روی نشست کربن در سطح قطعه بازی می‌کند باید در نظر گرفته شود. نکته مهم در یکنواختی مقدار کربن رسوب داده شده بر روی سطح، پرهیز از هر گونه جریان ثانویه گاز بوده که جریان ثانویه نیز خود تحت تاثیر اختلاف درجه حرارت و وجود نیروی شناوری آزاد جریان گاز می‌باشد.

به هر حال با مقایسه پروفیل سرعت برای دو حالت ($Re=100$ و $Re=735$)، در شکل‌های (۷ و ۸)، نشان می‌دهد که برای سرعت‌های کم ورودی گاز نیروی جابه‌جایی شناوری نسبت به نیروی جابه‌جایی اجباری گاز قویتر و سرعت‌های ثانویه بزرگتر می‌باشند. به عبارت دیگر با افزایش سرعت جریان گاز در کوره، به علت کاهش سرعت‌های ثانویه تغییر شکل می‌دهد زیرا افزایش سرعت سبب افزایش نیروی جابجایی اجباری و در نتیجه کاهش جریان جابه‌جایی آزاد می‌گردد.

در نتیجه وجود جریان آزاد، گاز از خط قرینه در مرکز کوره به سمت جداره‌های جانبی حرکت کرده و سپس به علت وجود اختلاف درجه حرارت و تغییرات دانسیته در نزدیک جداره به سمت بالا حرکت کرده و نهایتاً در مرکز کوره از سمت بالا به پایین حرکت می‌کند. از طرف دیگر جریان اجباری سبب حرکت گاز در جهت طولی کوره می‌شود. ترکیب این دو نهایتاً، سبب تشکیل دو جریان چرخشی به صورت مارپیچ در منطقه واکنش می‌گردد، که اصطلاحاً آنها را سلول‌های مارپیچ می‌نامند. با افزایش بیشتر سرعت جریان گاز، قدرت این سلول‌ها کاهش یافته و مراکز سلول‌ها از خط قرینه کوره دورتر می‌شوند.



شکل (۸): نتایج محاسبه شده از مدل عددی برای بردارهای سرعت ثانویه و کنتورهای سرعت‌های طولی، کنتورهای توزیع مول جزئی و درجه حرارت برای عدد رینولد ۷۳۵

و جرم بسیار مفید می‌باشند. شکل‌های (۷ و ۸) چگونگی توزیع سرعت گاز، (بردارهای سرعت‌های ثانویه و کنتورهای سرعت طولی) و نحوه توزیع کنتورهای مول جزئی CH_4 و درجه حرارت در داخل کوره را برای دو حالت بررسی شده ($Re=100$ و $Re=735$)، در فواصل طولی متفاوت نشان می‌دهند. همانگونه که در این شکل‌ها مشخص است برای حالت $Re=100$ دو جریان گردشی مارپیچ در قسمت بالای سطح قطعه تشکیل می‌گردند. همچنین دو جریان برگشتی در ابتدای لبه منطقه واکنش و در بالای آن نزدیک گوشه‌ها در شکل (۷) به صورت خط‌چین به خوبی مشخص است. چون نتایج به دست آمده از مدل برای هر دو حالت نسبت به خط مرکزی کوره قرینه می‌باشند، در اینجا فقط نتایج محاسبه شده در نصف کوره آورده شده‌اند.

در شکل (۷)، کنتورهای درجه حرارت و مول جزئی CH_4 در سمت راست آورده شده‌اند. بدین صورت که، تفاوت بین دو کنتور همسایه نشان‌دهنده گرادیان درجه حرارت یا مول جزئی

۷- نتیجه گیری

بی‌دریغ، و اعطای امکانات مالی طبق قرارداد انجام پروژه به شماره ۲۰۸۱ مورخ ۸۳/۹/۷ قدر دانی می‌گردد.

۹- فهرست علائم

- C_p : ظرفیت گرمای ویژه
 D_{ij} : ضریب نفوذ دو تایی
 D^T : ضریب نفوذ حرارتی
 G : سرعت رشد لایه
 g : شتاب جاذبه زمین
 Gr : عدد گراشف
 k : ضریب هدایت
 M : وزن مولکولی
 M_i : وزن مولکولی عنصر i
 P : فشار
 Pr : عدد پرائنتل
 R : ثابت گازها
 Re : عدد رینولد
 Sc : عدد اشمیت
 T : درجه حرارت
 v : سرعت گاز
 w_c : جرم جزیی گاز
 w_i : مول جزیی از عنصر i
 x_i : مول جزیی از عنصر i در فاز گازی
 μ : ویسکوزیته
 τ : تنش برشی
 χ : اسکیل فاکتور درجه حرارت
 Φ_{ij} : تابع معادله چاپمن-انسکوگ
 p : دانسیته
 α^T : فاکتور نفوذ حرارتی

در این تحقیق یک مدل عددی از فرایند کربن‌دهی گازی در کوره پیوسته ارائه شد. مدل ارائه شده نشان داد که قابلیت پیشگویی نتایج خروجی از کوره را داشته و میتواند عملاً در تنظیم پارامترهای کنترلی کوره موثر باشد. با استفاده از این مدل میتوان زمان تنظیم کوره را به حداقل ممکن رساند. همچنین این مدل در طراحی کوره و نیز پارامتر شکل هندسه کوره می‌تواند بسیار مفید باشد. از طرف دیگر مدل ارائه شده در دانش و فهم پدیده‌های انتقال بسیار مفید بوده و می‌تواند ابزار بسیار مفیدی در این امر تلقی گردد.

در کل مقدار گرادیان کربن محاسبه شده از مدل با مقدار کربن بدست آمده از کوره کربن‌دهی تطابق قابل قبولی دارد. مدل عددی توانایی خوبی در پیش‌گویی اثر درصد گاز طبیعی افزودنی داشته و چنانچه تغییراتی در آن روی دهد مدل بخوبی قادر به انجام محاسبه بوده و نتایج آن می‌تواند اثرات را نشان دهد.

هنگام مقایسه نتایج محاسبه شده از مدل ریاضی با نتایج بدست آمده از آزمایش باید به این نکته توجه داشت که در تنظیم و به‌کارگیری کوره کربن‌دهی گاز تترانس‌هایی وجود دارد که در هنگام تحلیل نتایج باید در نظر گرفته شوند. به‌عنوان مثال تترانس ۰٫۹ تا ۱٫۱۵ میلی‌متر برای عمق نفوذ سختی برای ۰٫۴ درصد کربن در صورتی که هدف واقعی عدد یک میلی‌متر است نشان از آن دارد که میزان اختلاف مدل عددی با نتایج واقعی که کمتر از ۱۵ درصد است قابل قبول می‌باشد. از طرف دیگر میزان کربن موجود در سطح نیز در حدود ۰٫۷ الی ۰٫۹ درصد میباشد که عدد واقعی باید ۰٫۸ درصد باشد این امر نیز نشان از آن دارد که درصد کربن موجود در سطح محاسبه شده از مدل عددی کاملاً در محدوده باریک و قابل قبول تترانس قرار دارد.

۸- تشکر و قدر دانی

بدین وسیله از ریاست محترم دانشگاه آزاد مجلسی جناب آقای قیصریان و معاونت پژوهشی محترم به دلیل حمایت‌های

- ۱۰-مراجع
- [۸] Faghri, M., Sparrow, E. M., and Prata, S. T. "Finite Difference Solution of Convection Diffusion Problems in Irregular Domain Using Nonorthogonal Coordinate Transformation" *Numerical Heat Transfer*, Vol. 7, pp. 183-209, 1984.
- [۹] Lawal, A. "Laminar Flow and Heat Transfer to Variable Property Power-Law Fluids in Arbitrary Cross-Sectional Ducts" Ph. D. Thesis, McGill University, Montreal, Quebec, Canada, 1985.
- [۱۰] Shyy, W., Tong, S. S., and Correa, S. M. "Numerical Recirculating Flow Calculation Using a Body-Fitted Coordinate System" *Numerical Heat Transfer*, Vol. 8, pp. 99-113, 1985.
- [۱۱] Raithby, G. D., Galpin, P. F., and Van Doormal, G. P. "Prediction of Heat and Fluid Flow in Complex Geometries Using General Orthogonal Coordinates" *Numerical Heat Transfer*, Vol. 9, pp. 125-142, 1986.
- [۱۲] Karki, K. C., and Patankar, S. V. "Calculation Procedure for Viscous Incompressible Flow in Complex Geometry" *Numerical Heat Transfer*, Vol. 14, pp. 297-307, 1986.
- [۱] Colin, R., Gunnarson, S. and Thulin, D. "measuring the amount of carbon diffused in the gas carburizing process" *J. Iron Steel Inst.* vol. 210 pp. 777-84, 1972.
- [۲] Stickels, C.A. "Analytical models for gas carburizing process", *Metallurgical Transaction B*, Vol. 20B pp. 535-546, 1989.
- [۳] Parrish, G. and Harper, G. S. "Production Gas Carburizing" Pergamon Press, Oxford, United Kingdom, 1985.
- [۴] "Handbook of Chemistry and Physics" 72th edition, CRC press, Boca Raton, FL, 2003.
- [۵] Colin, R., Gunnarson, S. and Thulin, D. "carbon potential measurements in the gas carburizing process" *J. Iron Steel Inst.*, vol. 210 pp. 785-89, 1972.
- [۶] Bird, R.B., Steward, W.E. and Lightfoot, E.N. "Transport Phenomena" John Willy, New York, 2003
- [۷] Vanka, S. P., Chen, B. C. J. and Shah, W. D. "A Semi-Implicit Calculation Procedure for Flows Described in Boundary-Fitted Coordinate Systems" *Numerical Heat Transfer*, Vol. 3, pp. 1-19, 1980.

