

مطالعه CFD علت عدم توزیع یکنواخت دما درون کوره‌های الفین

حسن بازآی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی،
دانشکده نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه
خلیج فارس، بوشهر
bazae.hassan@gmail.com

احمد آذری*

استادیار مهندسی شیمی، دانشکده نفت، گاز و
پتروشیمی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر
azari.ahmad@gmail.com

مصطفی مشتاق

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی،
دانشکده نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه
خلیج فارس، بوشهر
mostafa.moshtagh@gmail.com

فرهاد قدیانلو

دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشکده نفت،
گاز و پتروشیمی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر
ghadyanlou@gmail.com

روح اله فانجی

دانشیار مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی،
دانشگاه خلیج فارس، بوشهر
fatehi@pgu.ac.ir

چکیده

گرماگیر است. پس در هر واحد کراکینگ، بخش عمده کار توسط کوره انجام می‌شود و سایر قسمت‌ها برای جداسازی فرآورده‌های به دست آمده در سیستم به کار برده شده‌اند. کراکینگ حرارتی کاربرد وسیعی دارد و می‌توان برش‌های نفتی را به انواع فرآورده‌ها مثل اولفین‌ها، پلی اولفین‌ها، گازهای سبک اشباع نشده، نفت سوخت، گازوییل، آروماتیک‌ها و کک تبدیل کرد. الفین‌ها از مهم‌ترین مواد خام مورد استفاده در صنایع پتروشیمی به شمار می‌روند. از کاربردهای اصلی آن‌ها که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرند می‌توان به صنایع الیاف مصنوعی و پلاستیک، تولید دارو و لوازم آرایشی و بهداشتی، محصولات عایق و غیره اشاره کرد.

یکی از مشکلات عمده‌ای که در این کوره‌ها وجود دارد عدم توزیع یکنواخت دما در سراسر طول کوره می‌باشد. این عامل موجب می‌گردد که کیفیت محصول خروجی از کویل‌ها که همان اتیلن می‌باشد، کاهش یابد و همچنین کک گرفتگی روی سطح داخلی کویل‌ها، توزیع نامتقارنی داشته باشند که در نهایت عملکرد مناسب کوره را کاهش می‌دهد [۱، ۲].

در منابع، پژوهش‌های فراوانی وجود دارد که به بررسی پارامترهای مختلفی درون کوره پرداخته‌اند. به عنوان نمونه خدابنده و همکاران [۳] در کاری به بهینه‌سازی کوره‌های صنعتی جهت کاهش مصرف سوخت و در پی آن کاهش آلودگی پرداختند. برای این کار با استفاده از نرم‌افزار تجاری ANSYS FLUENT، کوره مورد مطالعه را مدل‌سازی نمودند و تأثیر هوای اضافه را در ورودی بر روی دمای محفظه فایر باکس کوره بررسی کردند. آن‌ها پس از بررسی‌های انجام شده به این نتیجه رسیدند که مقدار بهینه هوا ۱۸٪ می‌باشد و مقدار بالاتر از این باعث کاهش دمای شعله می‌گردد و بهره‌وری کوره به شدت می‌کاهد. در کار دیگری که توسط Hu و همکاران [۴] انجام شد به شبیه‌سازی همزمان کوره/راکتور برای یک کوره کراکینگ نفتا پرداختند. شبیه‌سازی آن‌ها اطلاعاتی در مورد غلظت اجزا مختلف،

واحدهای تولید الفین^۱ از مهم‌ترین واحدها در صنایع پتروشیمی به شمار می‌روند. در این واحدها، الفین‌هایی با پیوندهای اشباع نشده تولید می‌گردد که در زنجیره تولیدات صنایع پتروشیمی به عنوان ماده خام اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد. بخش اصلی در این واحدها که به عنوان قلب واحد شناخته می‌شود، کوره‌های کراکینگ^۲ هستند. یکی از مشکلات پیش رو در این کوره‌ها عدم تقارن توزیع دمایی در کل کوره می‌باشد که این مهم سبب کاهش کیفیت محصول مطلوب، ایجاد نقاط فوق گرم روی بدنه کویل‌ها و به تبع آن، آسیب رسیدن به کویل می‌شود. در این مطالعه، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، به بررسی علل نامتقارن شدن توزیع دما در کوره پرداخته شده است. نتایج این کار نشان می‌دهد که اگر میزان درصد هوای اضافه ورودی به کوره برای هر مشعل میزان اندکی با یکدیگر تفاوت داشته باشند می‌تواند توزیع دما را به صورت چشم‌گیری از حالت تقارن خارج کرده و پروفایل دمایی را نامتقارن کند.

واژگان کلیدی

واحد تولید الفین، کراکینگ حرارتی، کوره، دینامیک سیالات محاسباتی

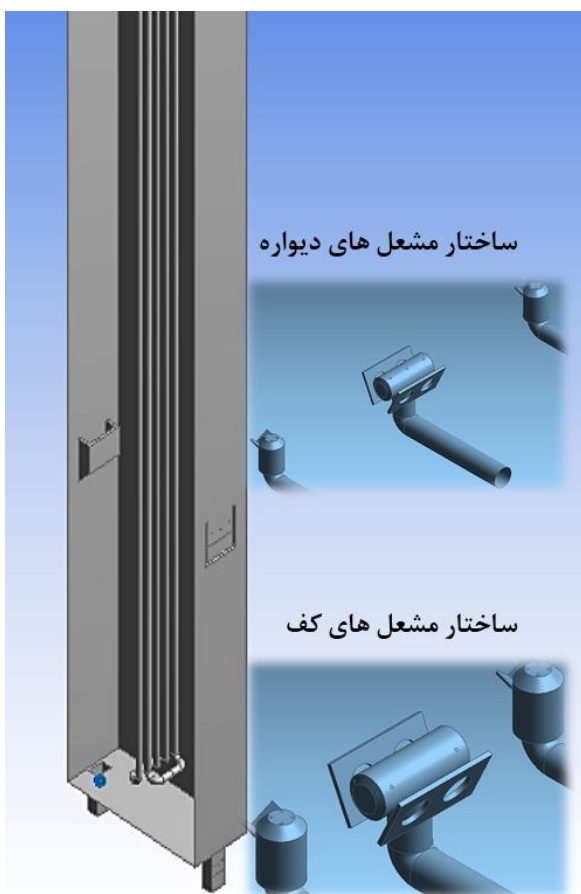
مقدمه

به‌تمامی واکنش‌های تجزیه هیدروکربن‌ها، کراکینگ گفته می‌شود و در صنعت نفت، معادل تجزیه یک گاز یا یک برش سبک مایع است که در دمای بالا به منظور تولید هیدروکربن‌های سبک پتروشیمی، در حضور بخار آب، حرارت و کاتالیزور انجام می‌شود. فرآیند کراکینگ حرارتی یکی از روش‌های تبدیل هیدروکربن‌هاست که طی آن مولکول هیدروکربن در اثر حرارت شکسته می‌شوند. این واکنش

^۱ Olefine

^۲ Cracking

پس از تولید هندسه کوره، با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Meshing کوره شبکه‌بندی شد. به‌منظور بررسی استقلال از شبکه، ۵ شبکه با تعداد سلول متفاوت از ۵۸۰۰۰ تا ۲۰۷۴۰۰۰ سلول ایجاد شد. در جدول ۱ مشخصات شبکه‌های تولیدی آورده شده است. به منظور بررسی استقلال از شبکه، سرعت و دمای میانگین جریان برحسب ارتفاع کوره و در ۱۴ مقطع نیم متری از کوره برای هر ۵ شبکه محاسبه و در شکل‌های ۲ و ۳ به‌صورت نمودار آورده شده است. از این نمودارها مشخص است که شبکه تولیدی با تعداد ۱۵۲۰۰۰۰ سلول، شبکه بهینه می‌باشد؛ چرا که دارای دقتی برابر با شبکه با ۲۰۷۴۰۰۰ سلول دارد و تعداد ۵۰۰۰۰۰ سلول کمتر از آن داراست که خود سرعت و هزینه محاسبات را به شدت کاهش می‌دهد.



شکل ۱. ساختار کوره مدل‌سازی شده شامل محفظه کوره، کویل‌ها و مشعل‌ها

سرعت جریان درون کوره و دما را برای کوره مورد مطالعه به دست می‌دهد.

با این حال، با بررسی این منابع مشاهده می‌شود که دلایل عدم توزیع یکنواخت دما در کوره که می‌تواند مشکلات متعددی را در پی داشته باشد تمرکز کمتری شده است.

لان و همکاران [۵] در یک مطالعه عددی یک کوره اتیلن را شبیه‌سازی کردند و فرآیندهای انتقال حرارت و واکنشی که درون کوره اتفاق می‌افتد را مورد بررسی قرار دادند. از نتایج به دست آمده از این کار، اطلاعات جزئی‌تری در رابطه با جریان‌ها و محدوده‌های دمایی، توزیع حرارت در کوره و توزیع غلظت در آن را می‌توان استخراج کرد. این کار، همچنین درک کاملی از مشخصات پایه‌ای پدیده‌های هیدرودینامیک و رفتار واکنش در کوره‌های صنعتی اتیلن به دست می‌دهد. برای این منظور، تأثیر پارامترهای مختلف طبقه‌بندی مشعل‌ها، قطر لوله‌ها و فاصله‌های آن‌ها بر روی عملکرد کوره را ارزیابی کردند.

در همین زمینه کارها و مطالعات دیگری نیز انجام شده که هر کدام به بررسی بخش یا پارامتری خاص در کوره پرداخته است. برای مثال هو و همکاران [۶] در یک مطالعه عددی به بررسی قسمت جابه‌جایی یک کوره صنعتی کراکینگ اتیلن پرداختند. و یا در کار عددی دیگری، دانون و همکاران [۷] نیز به بررسی تأثیر چینش و موقعیت مختلف سه جفت مشعل پرداختند.

در این مقاله، به بررسی عدم یکنواختی دما درون کوره پرداخته شده است. این مسئله دلایل متعددی می‌تواند داشته باشد. یکی از اصلی‌ترین دلایل این امر، عدم ورود هوای اضافه به صورت یکسان به درون کوره می‌باشد که در اینجا، به مطالعه اثر این تغییرات ورودی پرداخته شده است.

شبیه‌سازی هندسه کوره

کوره مورد مطالعه، کوره کراکینگ یک واحد الفین می‌باشد. با توجه به تقارن موجود در جهت چیده شدن کویل‌ها، تنها یک بخش از کوره (یک هجدهم کل کوره) به ابعاد $1.12m \times 2.84m \times 14.15m$ شبیه‌سازی می‌شود. بخش مورد مطالعه شامل ۲ مجموعه^۳ مشعل در کف کوره و ۲ مجموعه مشعل در دیواره کوره است. برای شبیه‌سازی این بخش از کوره از نرم‌افزار ANSYS Design Modeler استفاده شد. شکل ۱ تصویری از کوره مدل شده در نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

مش بندی کوره و بررسی استقلال از مش

معادلات حاکم و شرایط مرزی

برای حل مسئله به صورت عددی از نرم افزار ANSYS FLUENT 16.2 استفاده شد. روش حل معادلات در این نرم افزار بر پایه حل عددی حجم محدود می باشد. معادلات حاکم بر مسئله شامل معادله پیوستگی (موازانه جرم)، معادله اندازه حرکت (موازانه مومنتم)، معادله انرژی (موازانه انرژی) می باشد و شرایط مرزی به ترتیب در زیر آمده است:

معادله پیوستگی

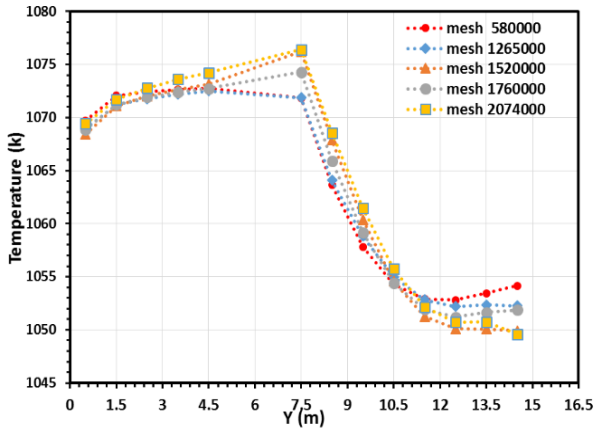
معادله پیوستگی در مختصات دکارتی به شکل زیر تعریف شده است:

معادله مومنتوم

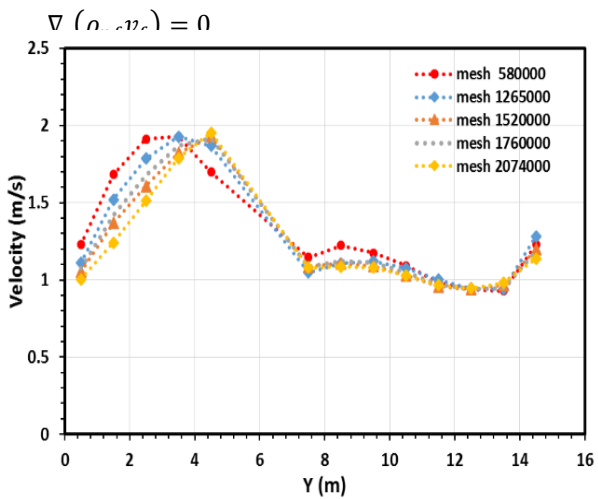
معادله انتقال حرارت

$$\rho_f C_p (v_f \cdot \nabla T) = k_{nf} (\nabla^2 T)$$

همچنین برای مدل سازی آشفتگی جریان درون کوره از مدل $Realizable\ k - \epsilon$ استفاده شد که معادلات انتقال این مدل به صورت زیر تعریف می شود [۸]:



شکل ۲. مقایسه میانگین دمای کوره در صفحات مختلف در ارتفاع های مشخص از کوره برای شبکه های مختلف



شکل ۳. مقایسه میانگین دمای کوره در صفحات مختلف در ارتفاع های مشخص از کوره برای شبکه های مختلف

جدول ۱. مشخصات شبکه های تولید شده

	579849	1265124	1520603	1764179	2072587
Nodes	579849	1265124	1520603	1764179	2072587
Elements	2941753	6820843	8154053	9523725	11248805
Min Size (m)	1.e-003	1.e-003	8.e-004	8.e-004	8.e-004
Proximity Min Size (m)	1.e-003	1.e-003	8.e-004	8.e-004	8.e-004
Max Face Size (m)	0/1550	0.1250	9.e-002	8.e-002	8.e-002
Max Size (m)	0.310	0.250	0.180	0.16	0.160

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{v} \epsilon} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon$$

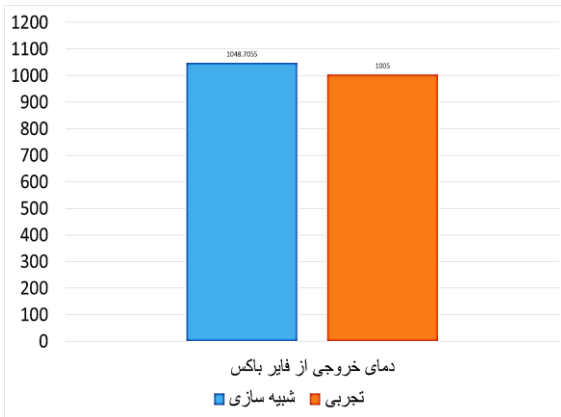
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k$$

که

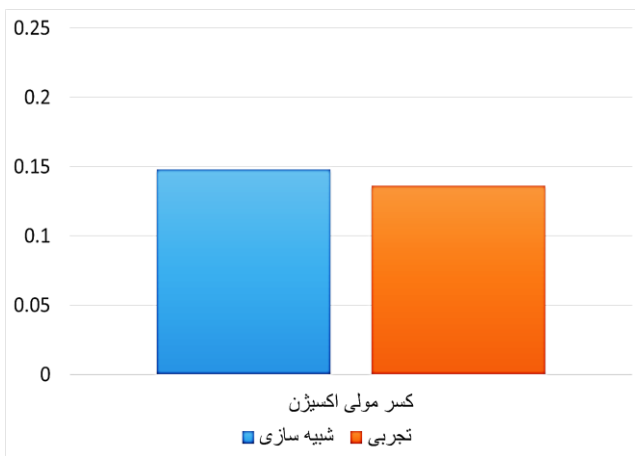
$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\epsilon}, S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

تجزیه و تحلیل نتایج

جهت صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی، نتایج به‌دست‌آمده با داده‌های تجربی موجود مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. در شکل‌های ۴ و ۵ مقادیر مربوط به دما و کسر مولی اکسیژن در خروجی را بر روی نمودار نشان می‌دهند. میزان خطا نسبی برای دما برابر ۴/۳ درصد و برای کسر مولی اکسیژن برابر ۸/۴ درصد محاسبه شد که نشان می‌دهد مقادیر حاصل از CFD قابل قبول می‌باشند.



شکل ۴. مقایسه داده‌های تجربی و داده‌های به‌دست‌آمده از CFD برای دما در خروجی فایر باکس



شکل ۵. مقایسه داده‌های تجربی و داده‌های به‌دست‌آمده شبیه‌سازی عددی برای دما در خروجی فایر باکس

شکل ۶ مقایسه‌ی کانتورهای دما برای سه حالت، زمانی که تمام ورودی‌ها ۰ (شکل ۶-الف)، تمام ورودی‌ها ۱۵ (شکل ۶-ب)، تمام ورودی‌ها ۳۳ (شکل ۶-ج) و زمانی که چهار ورودی متفاوت از یکدیگر و برابر با ۲۰، ۳۳، ۲۰، ۱۵ و صفر درصد (شکل ۶-د) را داشته باشند نشان می‌دهد. این کانتورها بر روی صفحه‌ای در وسط کوره و عمود

همچنین در این کار برای حل معادلات مربوط به احتراق سوخت‌ها در محفظه فایر باکس از مدل پیش مخلوط نشده استفاده شد. به‌منظور تعریف مدل تشعشعی مدل DO^۴ استفاده شد. این مدل به‌عنوان یک معادله انتقال تابشی (RTE) در نظر گرفته می‌شود که رابطه آن برای یک جسم خاکستری به صورت [۸]:

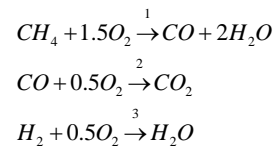
$$\nabla \cdot (I(r, s) \hat{s}) + (\alpha + \sigma_s) I(r, s) = \alpha n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r, s') \Phi(s, s') d\Omega'$$

و برای یک جسم غیر خاکستری به صورت:

$$\nabla \cdot (I_\lambda(r, s) \hat{s}) + (\alpha_\lambda + \sigma_s) I_\lambda(r, s) = \alpha_\lambda n^2 I_{b,\lambda} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(r, s') \Phi(s, s') d\Omega'$$

که در رابطه‌های فوق r, s جهت محور مختصات؛ I شدت تشعشع و α, σ به ترتیب نشان‌دهنده ثابت استفان-بولتزمن و ضریب نفوذ حرارتی و λ طول موج می‌باشند.

همچنین برای سوختن متان، مدل‌های سینتیکی متفاوتی در نظر گرفته می‌شود. در مدلی که استفانیدیس و همکاران [۹] ارائه کردند، یک مکانیسم سه مرحله‌ای به شکل زیر برای آن در نظر گرفتند.

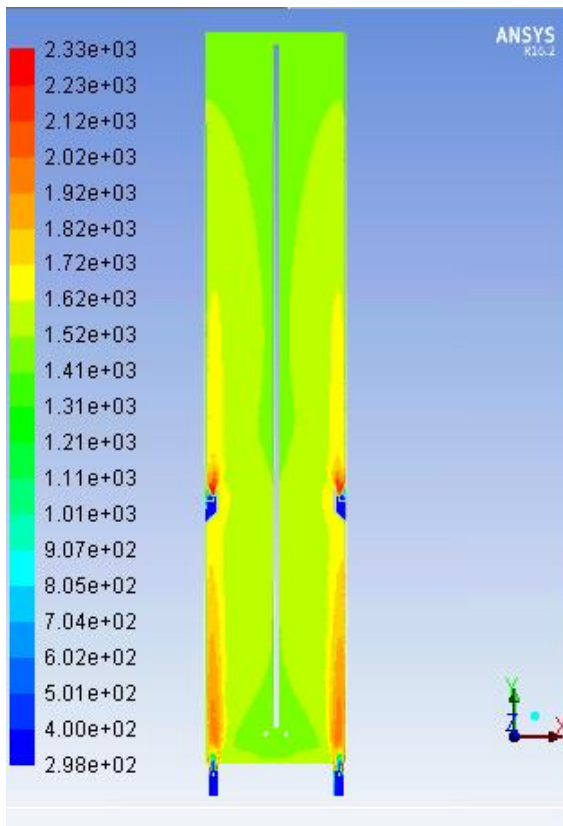


در این مکانیسم، فرآیند اکسیداسیون متان و هیدروژن ارائه شده است. معادلات سرعت‌های واکنش روابط فوق نیز به صورت زیر تعریف می‌گردد:

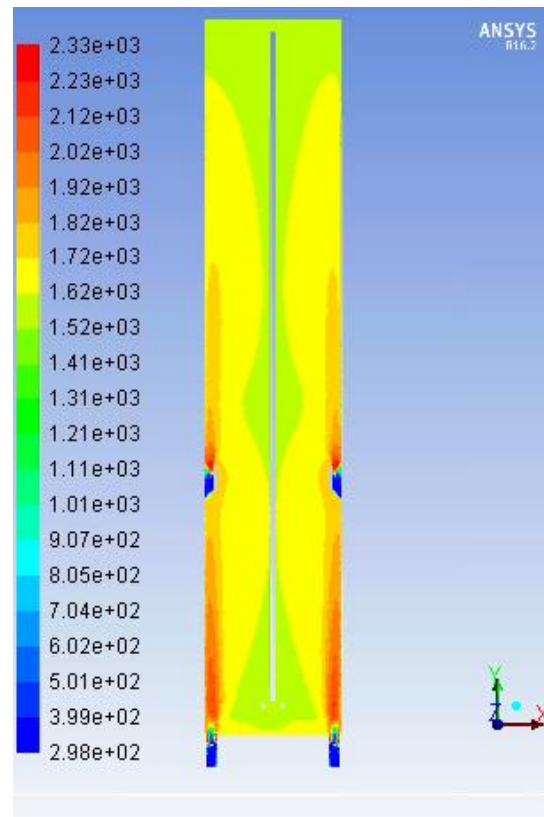
$$\begin{aligned} r_1 &= 1.5 * 10^{13} e^{-125604/RT} C_{CH_4}^{-0.3} C_{O_2}^{1.3} \\ r_2 &= 3.98 * 10^{20} e^{-167472/RT} C_{CO}^{0.5} C_{H_2O}^{0.25} \\ r_3 &= 10^{13} C_{O_2}^{0.5} C_{H_2}^{1.3} \end{aligned}$$

جهت حل تمامی این معادلات روش بالا دست مرتبه دوم^۵ به کار گرفته شد و مسئله در شرایط دایمی حل شد.

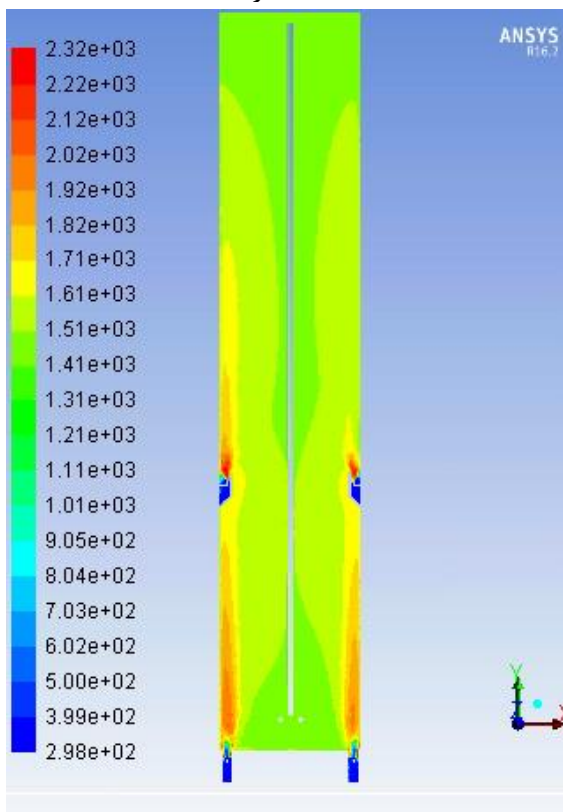
Discrete Ordinate^۴
Second Order upwind^۵



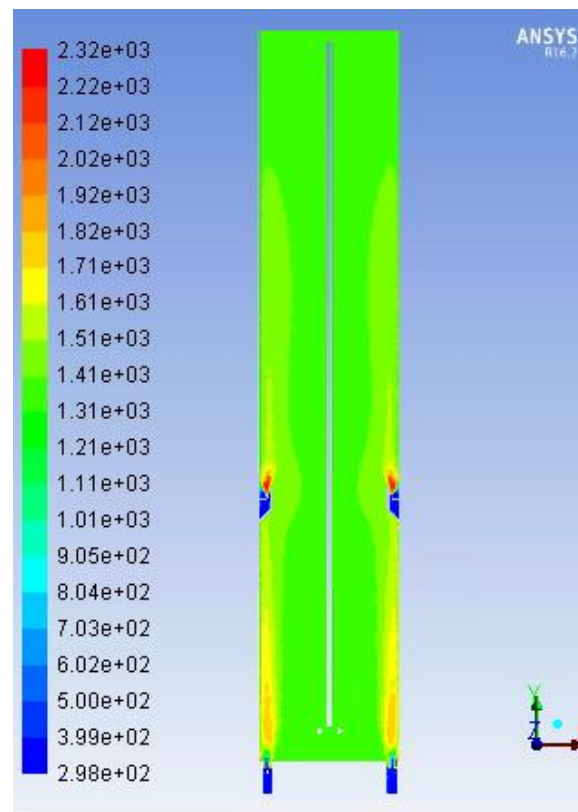
(ب) ۱۵ درصد



(الف) ۰ درصد



(د) ۰, ۱۵, ۲۰, ۳۰ درصد



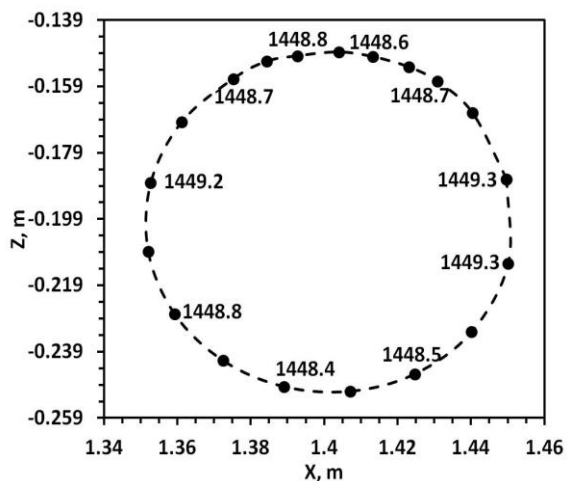
(ج) ۳۳ درصد

شکل ۶. کانتور تغییرات دما در صفحه $Z=0$ متر

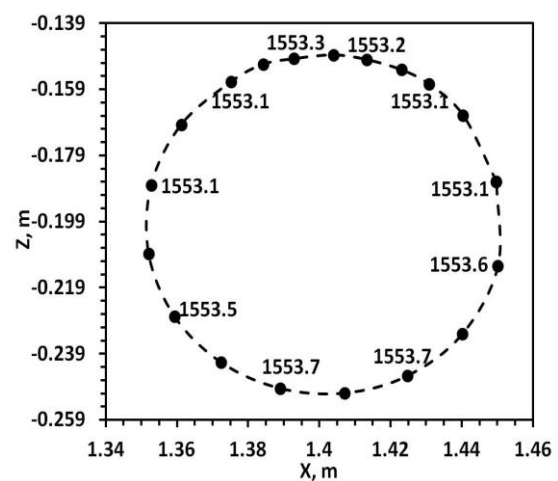
ها در مقطعی در ارتفاع ۷ متری از سطح زمین، محاسبه شد. شکل ۷ این مورد را نشان می دهد. از این شکل مشخص است که زمانی که دبی هوای ورودی برای همه مشعل ها یکسان هستند، دمای سطح کویل ها نیز مقادیر یکسانی دارند. اما زمانی که دبی هوا یکسان نمی باشد، مشاهده می شود که دمای سمتی از سطح کویل ها با دمای سطح دیگر تفاوت زیادی دارد.

صفحه‌ی موازی بر کویل‌ها می‌باشد. در این شکل مشخص است که اولاً، هر چه میزان درصد هوای اضافه در ورودی کاهش یابد، دما در کل کوره افزایش پیدا می‌کند؛ ثانیاً اگر میزان ورودی‌های هوای اضافه به مقدار برابری نباشد، دماها در اطراف مشعل‌ها متغیر بوده و همین امر موجب نامتقارن شدن توزیع دمایی در کل کوره می‌گردد.

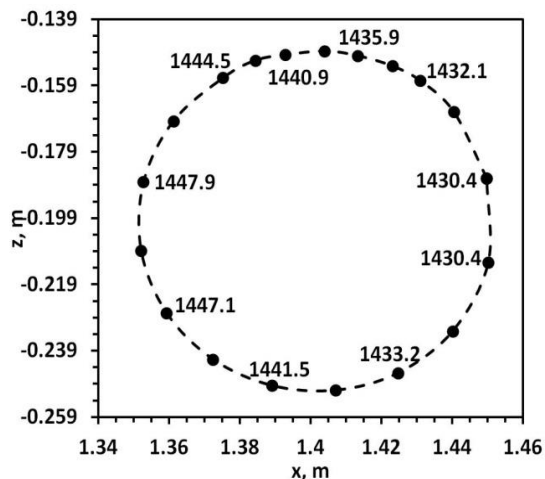
به منظور ارزیابی بهتر تغییرات پروفایل دمایی درون کوره، دمای سطح کویل‌ها را در نقاط مختلف، در اطراف کویل



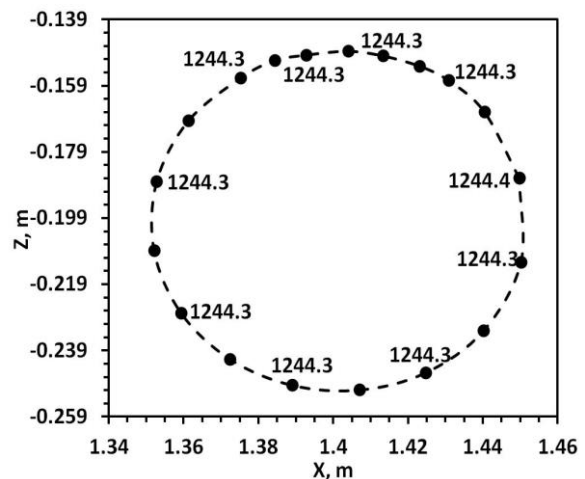
شکل ۷-ب- درصد مازاد اکسیژن=۱۵٪



شکل ۷-الف- درصد مازاد اکسیژن = صفر



شکل ۷-د- درصد مازاد اکسیژن = ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۳٪



شکل ۷-ج- درصد مازاد اکسیژن = ۳۳٪

شکل ۷: توزیع دمای زاویه‌ای روی کویل خروجی (کلوین) در ارتفاع $y=7$ m از کف کوره در شرایط درصدهای مختلف هوای مازاد

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، به بررسی اثر ورود متفاوت درصد هوای اضافه به یک کوره کرکینگ الفین در ورودی‌های مختلف بر روی توزیع دما در کل کوره پرداخته شد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که اگر میزان درصد هوای اضافه در ورودی هر مشعل، میزان متفاوتی داشته باشد، می‌تواند توزیع دمایی درون کوره را به هم ریخته و توزیع دمای نامتقارنی را در کوره به وجود بیاورد. این عدم توزیع یکنواخت دما بر روی دمای سطح کویل‌ها نیز تاثیر می‌گذارد.

تقدیر و تشکر

در پایان لازم می‌دانیم که از واحد تحقیق و توسعه شرکت پتروشیمی مروارید و همچنین مرکز تحقیقات پردازش‌های فوق سریع دانشگاه صنعتی امیرکبیر که ما را در این پژوهش یاری رساندند، تشکر و قدردانی نماییم.

منابع و مأخذ

۴. Hu, G., et al., *Coupled simulation of an industrial naphtha cracking furnace equipped with long-flame and radiation burners*. Computers & Chemical Engineering, ۲۰۱۲. ۳۸: p. ۲۴-۳۴
۵. Lan, X., et al., *Numerical simulation of transfer and reaction processes in ethylene furnaces*. Chemical Engineering Research and Design : (۱۲)۸۵. ۲۰۰۷, p. ۱۵۷۹-۱۵۶۵
۶. Hu, G., et al., *Coupled simulation of convection section with dual stage steam feed mixing of an industrial ethylene cracking furnace*. Chemical Engineering Journal, ۲۰۱۶. ۲۸۶: p. ۴۴۶-۴۳۶
۷. Danon, B., et al., *Numerical investigation of burner positioning effects in a multi-burner flameless combustion furnace*. Applied thermal engineering, ۲۰۱۱. ۳۱(۱۷): p. ۳۸۸۵-۳۸۹۶
۸. Ansys fluent ۱۴.۵ user guide, Ansys Incorporation.
۹. Stefanidis, G.D., et al., *CFD simulations of steam cracking furnaces using detailed combustion mechanisms*. Computers & chemical engineering, ۲۰۰۶. ۳۰(۴): p. ۶۴۹-۶۳۵
۱. ابوالحمد، گیتی. مبانی پالایش نفت ۱۳۹۳. تهران: موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران .
۲. چاول، آلین؛ لفیور، گیلِس. (۲۰۰۶). فرآیندهای پتروشیمی (جلد اول). (ترجمه محمد حقیقی-سیروس شفیع). تیریز: انتشارات دانشگاه صنعتی سهند تیریز.
۳. Khodabandeh, E. M. Pourramezan, and M.H. Pakravan, *Effects of excess air and preheating on the flow pattern and efficiency of the radiative section of a fired heater*. Applied Thermal Engineering, ۲۰۱۶.