

بررسی پارامترهای احتراقی مدل کسر مخلوط در مدل سازی آتش سوزی در تونل با

استفاده از نرم افزار FDS

معصومه رئوفی^۱، کیومرث مظاهری^۲، مهدی تیماجی^۳

دانشکده مهندسی مکانیک، گروه تبدیل انرژی، دانشگاه تربیت مدرس

(* نویسنده مخاطب: kiumars@modares.ac.ir)

چکیده

در این مقاله به مطالعه و تحقیق درباره تأثیر پارامترهای احتراقی در مدل سازی آتش سوزی در تونل پرداخته شده است. به همین منظور مطالعه‌ای بر روی یک مدل آزمایشگاهی با استفاده از نرم افزار FDS صورت گرفته است. با انتخاب نرخ گرمای آزاد شده ۱۲/۹ کیلووات برای سوخت هپتان در یک تونل مدل شده، توزیع منوکسیدکربن و دما در طول تونل با استفاده از دو رویکرد واکنش یک و دو مرحله‌ای بدست آمد. مشاهده شد که دمای پیش بینی شده با استفاده از واکنش دو مرحله‌ای به نتایج تجربی نزدیکتر بوده و کمتر از واکنش یک مرحله‌ای می‌باشد. از طرفی کسر مولی منوکسیدکربن با استفاده از واکنش دو مرحله‌ای در محل آتش سوزی بیشتر از واکنش یک مرحله‌ای می‌باشد. در انتها نیز با انتخاب نرخ گرمای آزاد شده ۵۵/۹ کیلووات برای سوخت هپتان از همان سطح سوخت، تأثیر گرمای احتراق روی توزیع دما در تونل مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی مشاهده شد که با سنگین تر شدن سوخت و کاهش گرمای احتراق از مقداری مشخص، دما در تونل تغییر چندانی نمی‌کند.

واژه‌های کلیدی: آتش سوزی - کسر مخلوط - FDS - منوکسیدکربن - گرمای احتراق

۱- مقدمه

ایمنی تونل یکی از مسائل مهم و مطرح در شرایط عادی و اضطراری (آتش سوزی) است. همگام با ازدیاد تونل‌های جاده‌ای و افزایش تعداد وسایل نقلیه عبوری از این تونل‌ها مسئله افزایش خطرات و سوانح در داخل تونل‌ها نیز رو به افزایش است. بسته بودن محیط تونل‌ها، عواقب ناشی از تصادفات و سوانح را بسیار زیاد می‌کند. آتش سوزی در تونل‌ها، به دلیل تصادفات و یا جاری شدن سوخت و تحریک آن اتفاق می‌افتد. معمولاً نرخ تصادفات در داخل تونل‌ها کمتر از نرخ تصادفات جاده‌ای می‌باشد، ولی به علت محدود بودن فضای داخل تونل‌ها و احتمال بروز آتش سوزی می‌توان تونل‌ها را محیط خطرناکتری دانست. به عنوان نمونه‌هایی از آتش سوزی در تونل‌ها، می‌توان به آتش سوزی تونل جاده‌ای هلند در نیویورک^۴ در سال ۱۹۴۹، که از نوع آتش سوزی بزرگ بود و ۶۶ نفر زخمی داشت و همچنین آتش سوزی تونل جاده‌ای گوت هارد در سوئیس^۵ در سال ۲۰۰۱، که ۱۱ نفر کشته به همراه داشت و ۲ روز به طول انجامید، اشاره کرد [۱]. به دلیل تازه بودن مبحث تونل داخل شهری در ایران، مسئله آتش سوزی در آن پیشینه تاریخی ثبت شده ندارد. از طرفی با توجه به آسیب‌های جانی بالای آتش سوزی در تونل، مطالعه و تحقیق در این زمینه از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، گروه تبدیل انرژی، دانشگاه تربیت مدرس

- استاد دانشکده مهندسی مکانیک، گروه تبدیل انرژی، دانشگاه تربیت مدرس

- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، آدرس فعلی: بخش تحقیقات و توسعه، شرکت مهندسی و ساخت توربین مپنا (توگا)

^۴ Holland Tunnel, New York

^۵ Gotthard Tunnel, Switzerland

توماس^۱ در سال ۱۹۸۶ [۲] اولین فردی بود که از عدد فرود در شرایط آتش‌سوزی در تونل استفاده کرد. ایشان بیان داشت که در شرایط بحرانی (شرایطی که در تونل آتش‌سوزی رخ می‌دهد و در تونل نیاز به جریان هوا با سرعت بالاتر از حد معمول است)، نیروی شناوری و نیروی اینرسی برابر بوده و برگشت جریان رخ نمی‌دهد. بعدها اوکا و آتکینسون^۲ در سال ۱۹۹۵ [۲] با بهره‌گیری از مفهوم عدد فرود، تونلی در مقیاس ۱۰ به ۱ را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان با استفاده از این روش به مطالعه حرکت دود برای نرخ‌های گرمای آزاد شده مختلف در تونل آزمایشگاهی مورد نظر پرداختند. از این رو در این پژوهش با استفاده از این روش، ابعاد تونل واقعی به مقیاس ۲۰ به ۱ برده شده است. روح^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۳] در یک کار تجربی، با مدل هندسی ۲۰ به ۱ بر اساس تشابه عدد فرود اثر سرعت تهویه را بر نرخ سوختن سوخت بررسی کردند. ایشان به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت تهویه در تونل نرخ سوختن سوخت به علت افزایش در میزان دسترسی به اکسیژن، افزایش می‌یابد. البته نمی‌توان گفت این رفتار همیشه اتفاق می‌افتد، زیرا هم به زمان ماندگاری، هم به شرایط دمایی و نرخ گرمای آزاد شده از سطح سوخت بستگی دارد.

در جریان واکنش‌پذیر، واکنش سوخت و هوا به صورت عمده موجب تولید اکسیدهای کربن، آب و انرژی می‌گردد. گرمای حاصل از احتراق یکی از پارامترهای مهم در جریان‌های واکنشی بوده که به نوع واکنش‌دهنده‌های شیمیایی، به عنوان مثال نوع سوخت، وابسته می‌باشد. علاوه بر این میزان اکسیدهای کربن حاصل از واکنش شیمیایی یکی از پارامترهای تأثیرگذار در مبحث ایمنی آتش‌سوزی در تونل می‌باشد. این متغیر نیز متأثر از نوع واکنش‌دهنده‌های شیمیایی می‌باشد. اپته^۴ در سال ۱۹۹۸ [۴] با مطالعه بر روی نوع سوخت در آتش‌سوزی درون تونل، به بررسی تأثیر نوع سوخت بر تولید اکسیدهای کربن و دوده پرداخته است. ایشان در مطالعات خود دریافت که با افزایش نسبت تعداد کربن‌های سوخت، مقدار معیار تولید اکسیدهای کربن^۵ افزایش می‌یابد. هوانگ و ادوارد^۶ در سال ۲۰۰۲ [۵] در مطالعه آزمایشگاهی و عددی با استفاده از نرم افزار FDS^۷ به بررسی سرعت تهویه بحرانی در شرایط آتش‌سوزی برای سوخت‌های مختلف در تونل پرداختند. ایشان دو تونل بزرگ و کوچک را مورد بررسی قرار دادند. در تونل کوچک دو سوخت متان و پروپان و در تونل بزرگ دو سوخت پروپان و هپتان مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج تحقیق ایشان نشان می‌دهد که در نرخ‌های پایین گرمای آزاد شده، سرعت بحرانی تابعی از نرخ گرمای آزاد شده و در نرخ‌های بالای گرمای آزاد شده، سرعت بحرانی مستقل از آن بوده و تقریباً بدون تغییر است. همچنین ایشان بیان داشتند سرعت بحرانی به نوع سوخت وابسته نبوده و برای سوخت‌های مختلف یکسان است و علت آن را مدل احتراقی کسر مخلوط بیان داشتند. فلویید و مک‌گراتان^۸ در سال ۲۰۰۹ [۶] با استفاده از نرم افزار FDS به بررسی یک نمونه آزمایشگاهی از یک مشعل در یک محفظه بسته پرداختند. ایشان در کار خود، دو رویکرد واکنشی به کار رفته در نرم افزار FDS را در شرایطی که منوکسیدکربن در محصولات احتراقی در نظر گرفته شده است را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان مشاهده کردند که واکنش دو مرحله‌ای توانایی بهتری برای پیش‌بینی کسر مولی گونه‌ها را دارا می‌باشد. در حالی که واکنش یک مرحله‌ای بعضی گونه‌ها را بیشتر و بعضی گونه‌ها را کمتر از نتایج تجربی پیش‌بینی می‌کرد. در پیش‌بینی دما نیز برای آتش در دو مقیاس کوچک و بزرگ، واکنش دو مرحله‌ای پیش‌بینی بهتری نسبت به واکنش یک مرحله‌ای داشت.

بزرگ عصاره و همکاران در سال ۱۳۹۱ [۷] به بررسی تأثیر شکل منبع آتش بر سرعت بحرانی با استفاده از نرم افزار FDS پرداختند. ایشان با مدل کردن تونل به مقیاس ۱۰ به ۱ تونل واقعی، مساحت طول سطح آتش را در راستای طول تونل

¹Thomas

²Oka and Atkinson

³Roh

⁴Apte

⁵ معیار تولید اکسیدهای کربن شاخصی از تولید اکسیدهای کربن در واکنش شیمیایی سوخت و هوا می‌باشد. توضیحات بیشتر در مورد این معیار در بخش مدل احتراقی کد FDS آورده شده است.

⁶Hwang and Edwards

⁷ Fire Dynamics Simulator

⁸ Floyd and McGrattan

تغییر دادند و سرعت بحرانی را برای آنها بدست آوردند. با افزایش طول سطح سوخت، ابتدا سرعت بحرانی افزایش یافت و بعد با افزایش بیشتر طول آن، سرعت بحرانی کاهش یافت. ایشان بیان داشتند که با کشیدگی سطح سوخت در راستای طولی تونل، سطح تصویر شده دود بر صفحه عرضی کاهش می‌یابد و چگالی دو بعدی دود زیاد شده و سرعت بحرانی افزایش می‌یابد و در قسمت بعدی به دلیل افزایش بیش از حد طول منبع آتش، تأثیر قسمت انتهایی کم‌رنگ شده و سرعت بحرانی کاهش می‌یابد. رئوفی و مظاهری در سال ۱۳۹۲ [۸] به بررسی تأثیر نرخ گرمای آزاد شده بر روی سرعت بحرانی در آتش‌سوزی در تونل با استفاده از نرم افزار FDS پرداختند. ایشان مشاهده کردند که با افزایش نرخ گرمای آزاد شده بدون بعد تا ۰/۳۵، سرعت بحرانی بدون بعد افزایش می‌یابد. برای نرخ گرمای آزاد شده بدون بعد بزرگتر از ۰/۳۵، سرعت بحرانی بدون بعد مستقل از نرخ گرمای آزاد شده بدون بعد می‌شود.

با بررسی مطالب فوق می‌توان نتیجه گرفت که عوامل مختلفی مثل هندسه تونل، نرخ گرمای آزاد شده از سطح سوخت، مقدار معیار تولید اکسیدهای کربن و نوع سوخت بر روی آتش‌سوزی در تونل تأثیرگذار هستند. بسیاری از مطالعات انجام شده در زمینه آتش‌سوزی در تونل بر روی عوامل هندسی بوده است که در مرجع [۹] بیشتر به آنها اشاره شده است. از طرفی پارامترهای احتراقی در شبیه‌سازی آتش‌سوزی در تونل حائز اهمیت بوده و کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو، در مقاله حاضر سعی شده است تا نقش پارامترهای احتراقی شامل نوع واکنش شیمیایی و گرمای احتراق در شبیه‌سازی آتش-سوزی در تونل با استفاده از نرم‌افزار FDS مورد بررسی قرار گیرد. نرم افزار FDS، به طور پیش فرض واکنش احتراقی یک مرحله‌ای بدون وجود منوکسیدکربن در محصولات احتراقی را در نظر می‌گیرد. به همین علت در کار حاضر به بررسی تأثیر وجود منوکسیدکربن در محصولات احتراقی واکنش یک و دو مرحله‌ای بکار رفته در نرم افزار FDS پرداخته شده است. علاوه بر این تأثیر گرمای احتراق روی آتش‌سوزی در تونل و چگونگی توزیع دما در تونل نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- مدل سازی میدان جریان

برای مدل سازی احتراق، معادلات ناویر استوکس به همراه معادله انرژی و گونه‌ها با فرض فرمول‌بندی عدد ماخ پایین^۱ در نظر گرفته می‌شوند. در جریان‌های با عدد ماخ پایین، تغییرات فشار از طریق معادله پیوستگی باعث تغییر در میدان جریان و باعث تغییر در دانسیته جریان می‌شود. در صورت وجود انتقال حرارت، تغییرات دما باعث تغییرات قابل توجهی در دانسیته جریان می‌شود. در این حالت نیاز است که معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی به صورت کوپل حل شوند. به همین دلیل از تقریب عدد ماخ پایین استفاده می‌شود [۱۰].

آتش‌سوزی در تونل مانند پدیده‌های جریان سیالات با استفاده از معادلات فیزیکی حاکم بر جریان سیال مدل می‌شود. در این مدل‌سازی معادلات حاکم شامل بقای جرم، بقای گونه‌ها، بقای مومنتوم، بقای انرژی و معادله حالت برای گاز کامل هستند [۱۱].

- بقای جرم

$$\frac{\partial \dots}{\partial t} + \nabla \cdot \dots \mathbf{u} = \dot{m}_b''' \quad (1)$$

- بقای گونه‌ها

$$\frac{\partial}{\partial t} (\dots Y_r) + \nabla \cdot \dots Y_r \mathbf{u} = \nabla \cdot \dots D_r \nabla Y_r + \dot{m}_b''' + \dot{m}_{b,r}''' \quad (2)$$

در معادلات بقای جرم و گونه‌ها، $\dot{m}_b''' = \sum_r \dot{m}_{b,r}'''$ که نرخ تولید گونه‌هایی که از تبخیر قطرات و ذرات سوخت حاصل می‌شود، هستند و به صورت جمله چشمه ظاهر شده‌اند.

- بقای مومنتوم

¹Low Mach Number

$$\frac{\partial}{\partial t} (\dots \mathbf{u}) + \nabla \cdot \dots \mathbf{u}\mathbf{u} + \nabla p = \dots \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \ddagger_{ij} \quad (3)$$

• بقای انرژی

$$\frac{\partial}{\partial t} (\dots h_s) + \nabla \cdot \dots h_s \mathbf{u} + \nabla p = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}'' - \dot{q}_b'' - \nabla \cdot \mathbf{q}'' + v \quad (4)$$

در معادله انرژی جمله \dot{q}'' نرخ انرژی آزاد شده بر واحد حجم توسط واکنش شیمیایی است.

$$\mathbf{q}'' = -k \nabla T - \sum_r h_{s,r} \dots D_r \nabla Y_r + \mathbf{q}_r'' \quad (5)$$

• معادله حالت

$$P = \frac{\dots RT}{W} \quad (6)$$

مدل سازی عددی فرآیند احتراقی مغشوش در کار حاضر با استفاده از روش متوسط گیری مکانی^۱ (LES)، صورت پذیرفته است. در این مدل عدد پرانتل^۲ و عدد اشمیت^۳، ۰/۵ و ثابت اسماکورینسکی^۴، ۰/۲ در نظر گرفته شده است [۱۱]. برای مدل سازی آتش سوزی در تونل از نرم افزار FDS استفاده شده است. این نرم افزار یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی از جریان سیال محیط آتش سوزی است. هسته الگوریتم این کد براساس تئوری صریح پیش بینی و تصحیح^۵ و روش رانگ کوتا مرتبه دوم با دقت از مرتبه دو روی زمان و مکان است. این کد معادلات بقا را با روش اختلاف محدود^۶ حل می کند. در نرم افزار FDS، عبارات جابه جایی در مرحله پیش بینی به روش بالادست گسسته شده و در مرحله تصحیح به روش پایین-دست گسسته شده اند. جملات دیورژانس یا نفوذ مواد و نفوذ گرمایی نیز در دو مرحله پیش بینی و تصحیح با استفاده از روش گسسته سازی مرکزی، گسسته می شوند [۱۱].

۳- مدل شیمی سریع با استفاده از روش کسر مخلوط

در بسیاری از سیستم های احتراقی، واکنش دهنده ها از مسیرهای مجزایی به صورت سوخت و اکسند ه وارد می شود. در بسیاری از شرایط مانند آتش سوزی در تونل، می توان فرض نمود که واکنش با نرخ بالایی رخ داده و از این رو می توان فرض نمود که به محض اختلاط سوخت و هوا، واکنش به صورت کامل رخ می دهد. در صورتی که مقیاس زمانی احتراق در مقایسه با مقیاس زمانی اختلاط بسیار کم باشد، می توان از فرض شیمی سریع بهره جست. می توان در این شرایط غلظت لحظه ای گونه ها و دما را براساس غلظت لحظه ای یک متغیر اسکالر پایا بیان نمود. یک روش عمومی بهره گیری از متغیری به نام کسر مخلوط^۷ به عنوان یک متغیر اسکالر پایا می باشد [۱۲].

در صورتی که در سیستم احتراقی تنها دو مسیر ورودی شامل ورودی سوخت و ورودی هوا وجود داشته و بر اثر واکنش تنها یک محصول تولید گردد، می توان اسکالر پایای کسر مخلوط را به صورت زیر تعریف نمود [۱۳]:

$$Z = \frac{\text{جرم عناصری که منشأ آنها از جریان سوخت می باشد}}{\text{جرم کل مخلوط}} \quad (7)$$

با در نظر گرفتن واکنش احتراق به صورت زیر و همگن نبودن مخلوط سوخت و هوا، متغیر کسر مخلوط به صورت رابطه (۸) تعریف می شود.

¹ Large Eddy Simulation

² Prandtl

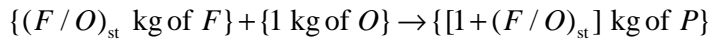
³ Schmidt

⁴ Smagorinsky

⁵ Explicit Predictor-Corrector Scheme

⁶ Finite Difference

⁷ Mixture Fraction



$$Z = \frac{[Y_F - (F/O)_{st} Y_O]_M - [Y_F - (F/O)_{st} Y_O]_A}{[Y_F - (F/O)_{st} Y_O]_F - [Y_F - (F/O)_{st} Y_O]_A} \quad (8)$$

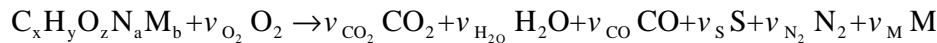
در رابطه (۸) اندیس M مربوط به مخلوط، F مربوط به سوخت و A مربوط به هواست [۱۲]. با فرض نفوذ یکسان گونه‌های مختلف، معادلات بقای گونه‌ها به یک معادله برای کسر مخلوط کاهش می‌یابد که به صورت رابطه (۹) بیان می‌شود [۱۱].

$$\frac{\partial \dots Z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\dots u_i Z) = \frac{\partial}{\partial x_i} (\dots D \frac{\partial Z}{\partial x_i}) \quad (9)$$

در این مدل شعله به سه قسمت ناحیه داخل شعله، ناحیه خارج شعله و سطح شعله تقسیم می‌شود. با توجه به ناحیه شعله و با استفاده از تعریف کسر مخلوط، می‌توان بیان کرد که در ناحیه داخل شعله فقط سوخت و در ناحیه خارج شعله فقط هوا وجود دارد [۱۳].

۳-۱- مدل احتراقی در کد FDS

در کد FDS مدل احتراقی کسر مخلوط، برای دو حالت واکنش تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای اعمال می‌شود. با در نظر گرفتن اینکه واکنش تک مرحله‌ای یا دو مرحله‌ای باشد، کسر مخلوط به دو یا سه جزء تقسیم می‌شود. واکنش یک مرحله‌ای در نرم افزار FDS به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [۱۱].



در واکنش یک مرحله‌ای، S دوده و M مربوط به ترکیبات غیر از کربن، هیدروژن، اکسیژن موجود در سوخت است. در این واکنش، کسر مخلوط از دو جزء تشکیل شده است و به صورت $Z = Z_1 + Z_2$ که از روابط (۱۰) و (۱۱) بدست می‌آیند، تعریف می‌شود [۱۱].

$$Z_1 = \frac{Y_F}{Y_F^I} \quad (10)$$

$$Z_2 = \frac{W_F}{[X - \nu_{CO} - (1 - X_H) \nu_S] W_{CO_2}} \frac{Y_{CO_2}}{Y_F^I} \quad (11)$$

در روابط بالا، I مربوط به جایی است که فقط سوخت وجود دارد. در رابطه (۱۱)، دوده به صورت ترکیبی از کربن و هیدروژن در نظر گرفته می‌شود و ضریب آن در واکنش با استفاده از کسر اتمی هیدروژن به صورت رابطه (۱۲) معرفی می‌شود [۱۱].

$$\nu_S = \frac{W_F}{W_S} y_S \quad ; \quad W_S = X_H W_H + (1 - X_H) W_C \quad (12)$$

ضریب منوکسیدکربن نیز به صورت رابطه (۱۳) تعریف می‌شود [۱۱].

$$\nu_{CO} = \frac{W_F}{W_{CO}} y_{CO} \quad (13)$$

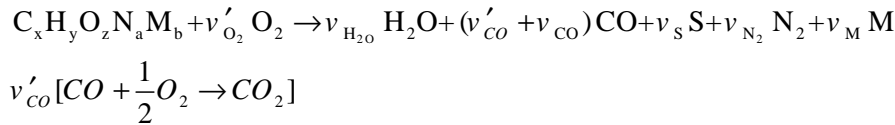
دو متغیر y_S و y_{CO} در معادلات بالا معیار تولید منوکسیدکربن^۱ و دوده^۲ می‌باشند. در واقع y_S و y_{CO} مقداری از سوخت هستند که به منوکسیدکربن و دوده تبدیل می‌شوند. مقادیر آنها از طریق نتایج تجربی و با استفاده از نتایج بعد از شعله^۳ در نظر گرفته می‌شود [۱۱]. در صورت در نظر گرفتن دوده و منوکسیدکربن در محصولات واکنش، با در اختیار داشتن مقادیر معیار تولید دوده و منوکسیدکربن، کسر مخلوط و ضرایب واکنش محاسبه می‌شوند.

¹CO Yield

²Soot Yield

³Post Flame

واکنش دو مرحله‌ای در نرم افزار FDS به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود. در این رویکرد، دی‌اکسیدکربن در محصولات احتراقی واکنش اول وجود ندارد و مقداری از منوکسیدکربن تولید شده در واکنش اول با اکسیژن واکنش داده و به دی-اکسیدکربن تبدیل می‌شود [۱۱]:



در این رویکرد کسر مخلوط به سه جزء که از روابط (۱۴) و (۱۵) و (۱۶) بدست می‌آیند، تقسیم می‌شود [۱۱].

$$Z_1 = \frac{Y_F}{Y_I} \quad (14)$$

$$Z_2 = \frac{W_F}{[x - (1 - X_H)v_s]} \frac{Y_{CO}}{Y_I} \quad (15)$$

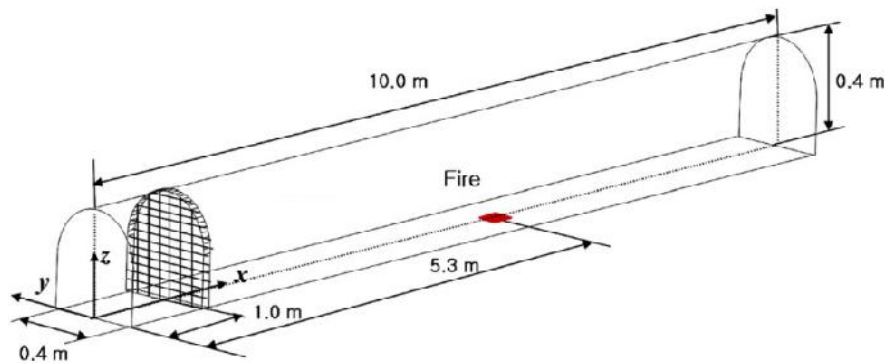
$$Z_3 = \frac{W_F}{[x - (1 - X_H)v_s]} \frac{Y_{CO_2}}{Y_I} \quad (16)$$

برای واکنش دو مرحله‌ای نیز مانند واکنش یک مرحله‌ای، با پیش بینی y_{CO} و y_S ضرایب واکنش اصلی بدست می‌آیند.

۴- شبیه‌سازی عددی

جهت مطالعه آتش‌سوزی در تونل، هندسه مورد مطالعه توسط روح و همکارانش [۳] که یک تونل یک طرفه است، مبنای مطالعه در کار حاضر قرار گرفت. آزمایش انجام شده توسط روح و همکاران در تونلی به طول ۱۰ متر و عرض و ارتفاع ۰/۴ متر انجام گرفت. در واقع با استفاده از رابطه تشابهی عدد فرود، ابعاد یک تونل واقعی با طول ۲۰۰ متر و عرض و ارتفاع ۸ متر به مقیاس طولی ۲۰ به ۱ برده شده است.

ورودی تونل به یک تونل باد متصل است و خروجی تونل با محیط در ارتباط است. منبع آتش‌سوزی در فاصله ۵/۳ متری از ورودی تونل قرار دارد. برای اندازه‌گیری دما و دود، از ۳۱ عدد ترموکوپل در عرض ۰/۲ متر و در فاصله ۲ سانتی‌متری از سقف تونل استفاده شده است. آزمایش برای آتش‌سوزی استخری سوخت هپتان با گرمای احتراق ۴۴۶۰۰ کیلوژول بر کیلوگرم، انجام شده است. سطح سوخت در ابعاد (۸/۵ در ۸/۵) سانتی‌مترمربع و در ارتفاع ۲ سانتی‌متری از کف تونل قرار دارد. هندسه مورد بررسی، در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- شکل و ابعاد تونل مدل [۱۴]

شبیه‌سازی آتش‌سوزی برای هندسه مورد نظر با استفاده از نرم افزار FDS و بصورت موازی صورت گرفته است. پردازش موازی کار حاضر با استفاده از روش MPI^۱ و بر روی سیستمی با حافظه اشتراک گذاشته شده با استفاده از سیستم عامل لینوکس، نسخه ۱۰.۱۰ ubuntu صورت گرفته است. این شبیه‌سازی با استفاده از یک سامانه ۸ هسته‌ای با قدرت پردازش ۳/۴ گیگا هرتز و ۱۶ گیگا بایت حافظه جانبی انجام شده است.

برای شبیه‌سازی عددی با در نظر گرفتن هندسه تونل مورد بررسی، نرخ گرمای آزاد شده ۱۲/۹ کیلووات و دمای اولیه محیط نیز مطابق مرجع [۳] ۲۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است.

در پژوهش حاضر شرط مرزی در ورودی تونل در حالت بدون تهویه، شرایط جوی و در حالت با تهویه، از شرط مرزی سرعت ورودی^۲ استفاده شده است. این شرط مرزی زمانی به کار می‌رود که میزان سرعت جریان ورودی به تونل مشخص باشد و در واقع به صورت سرعت یکنواخت، در کل سطح مقطع ورودی، در نظر گرفته شده است. در خروجی تونل از شرط مرزی محیط باز^۳ استفاده شده است. در این نوع شرط مرزی، با توجه به جهت جریان، مقدار فشار هیدرودینامیکی تعیین می‌شود. نحوه محاسبه فشار هیدرودینامیکی به صورت زیر می‌باشد:

$$P = \frac{\tilde{p}}{\dots_{\infty}} + \frac{|\mathbf{u}|^2}{2} \quad (\text{outgoing}) \quad (17)$$

$$P = \frac{\tilde{p}}{\dots_{\infty}} \quad (\text{incoming}) \quad (18)$$

که در آن \mathbf{u} ، بیشترین مقدار سرعت در مرز خروجی است.

۱-۴- شبکه محاسباتی

برای شبیه‌سازی مناسب آتش‌سوزی که جریان آشفته آن با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ شبیه‌سازی می‌شود، نیاز به تخمینی از ابعاد سلول‌های شبکه محاسباتی است تا پدیده‌های غالب نیز مدل‌سازی شوند.

برای شبیه‌سازی آتش‌سوزی در تونل از شبکه‌ای شش وجهی مستطیلی با ساختار منظم استفاده شده است. شکل (۲)، نمودار تغییرات سرعت محوری^۴ حاصل از آتش‌سوزی هپتان با هوا در فاصله طولی ۲/۷ متری از محل آتش‌سوزی (به سمت خروجی) و روی خط مرکزی، در چهار شبکه‌بندی مختلف را نشان می‌دهد. در این شکل محور عمودی ارتفاع تونل و محور افقی سرعت محوری را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، اختلاف نمودارهای تغییرات سرعت با افزایش تعداد سلول‌های شبکه محاسباتی، کاهش یافته است. در این شکل نمودار تغییرات سرعت شبکه‌های ۲، ۳ و ۴ بسیار مشابه هستند. از سوی دیگر روند کاهش اختلاف نمودارهای تغییرات سرعت، نشان از استقلال شبکه ۳ از شبکه‌ی محاسباتی دارد. از این‌رو مطالعات انجام شده در کار حاضر، با بهره‌گیری از شبکه ۳ انجام شده است.

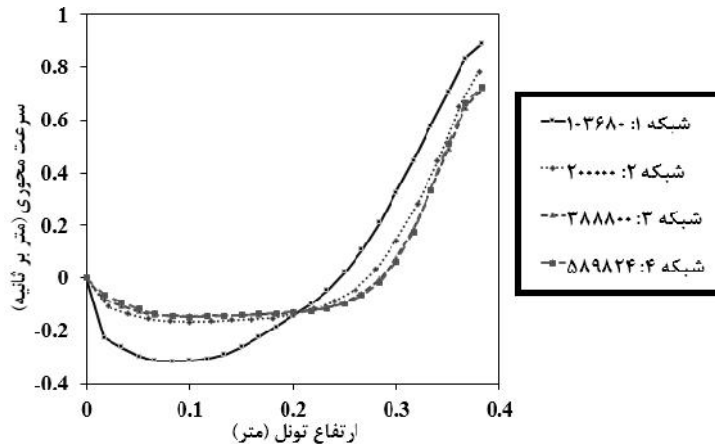
به ترتیب تعداد سلول‌های محاسباتی در جهت طول، عرض و ارتفاع تونل، ۶۷۵، ۲۴ و ۲۴ در نظر گرفته شده‌اند. انتخاب شبکه محاسباتی به این صورت بوده است که ۴ متر وسط تونل که ناحیه آتش‌سوزی در آن واقع شده است به دلیل اینکه اغلب پدیده‌های غالب و تغییرات شدید در این ناحیه رخ می‌دهد، ریزتر و بقیه نواحی درشت‌تر می‌باشند.

¹Message Passing Interface

²Velocity Inlet

³Open Boundary Condition

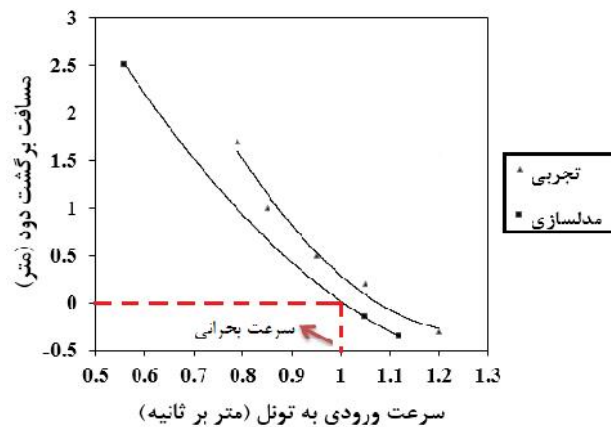
^۴ منظور از سرعت محوری، سرعت در راستای طول تونل می‌باشد.



شکل ۲ - تغییرات سرعت در فاصله ۲/۷ متری از محل آتش سوزی با ارتفاع در شبکه های مختلف محاسباتی برای نرخ گرمای آزاد شده ۱۲/۹ کیلووات

۵- نتایج

به منظور اعتباربخشی شبیه‌سازی‌های انجام شده در پژوهش حاضر، نتایج عددی با نتایج تجربی مرجع [۳] مقایسه شده‌اند. نتایج این مقایسه در شکل (۳) آورده شده است. در شکل (۳) طول برگشت دود پیش‌بینی شده با استفاده از شبیه‌سازی عددی برای سرعت‌های مختلف جریان هوای ورودی برای نرخ گرمای آزاد شده ۱۲/۹ کیلووات، نشان داده شده است. در این شکل محور افقی سرعت جریان ورودی هوا و محور عمودی مسافت برگشت دود را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۳) برای نرخ گرمای آزاد شده ۱۲/۹ کیلووات، در کار تجربی سرعت ۱/۱۲ متر بر ثانیه که محل برخورد نمودار با محور افقی است به عنوان سرعت بحرانی در نظر گرفته شده است. در کار حاضر به ازای سرعت ۰/۵۶ متر بر ثانیه، ۲/۵ متر برگشت دود در جهت خلاف سرعت جریان هوا و به سمت ورودی تونل مشاهده می‌شود و به ازای سرعت‌های ۱/۱۲ و ۱/۰۵ متر بر ثانیه برگشت دود وجود ندارد و دود از محل آتش‌سوزی به ترتیب ۰/۳۵ و ۰/۱۵ متر به سمت خروجی منحرف می‌شود. در نهایت می‌توان با توجه به شکل (۳)، محل برخورد نمودار با محور افقی برای نرخ گرمای آزاد شده ۱۲/۹ کیلووات، که سرعت ۱ متر بر ثانیه است را با ۱۰/۷ درصد خطا به عنوان سرعت بحرانی در نظر گرفت. در واقع به ازای سرعت ۱ متر بر ثانیه برگشت دود از محل آتش‌سوزی وجود ندارد.



شکل ۳ - مسافت برگشت دود به ازای سرعت‌های مختلف جریان ورودی هوا برای نرخ گرمای آزاد شده ۱۲/۹ کیلووات از سطح سوخت

لازم به ذکر است روح و همکاران کار عددی خود را با شرایط اعمالی در کار تجربی، در تونلی به طول ۹ متر انجام دادند. آنها محل آتش‌سوزی را در ۴/۳ متری از ورودی تونل در نظر گرفتند و در این شرایط سرعت بحرانی را ۱/۱۲ متر بر ثانیه محاسبه نمودند. در واقع با در نظر گرفتن این شرایط محل آتش‌سوزی را در قبل از مرکز تونل در نظر گرفتند. در حالی که در شرایط آزمایشگاهی، محل آتش‌سوزی در فاصله‌ی بعد از مرکز تونل در نظر گرفته شده است. این تغییر در شرایط هندسی می‌تواند نتایج را تغییر دهد.

۵-۱- تأثیر نوع واکنش شیمیایی

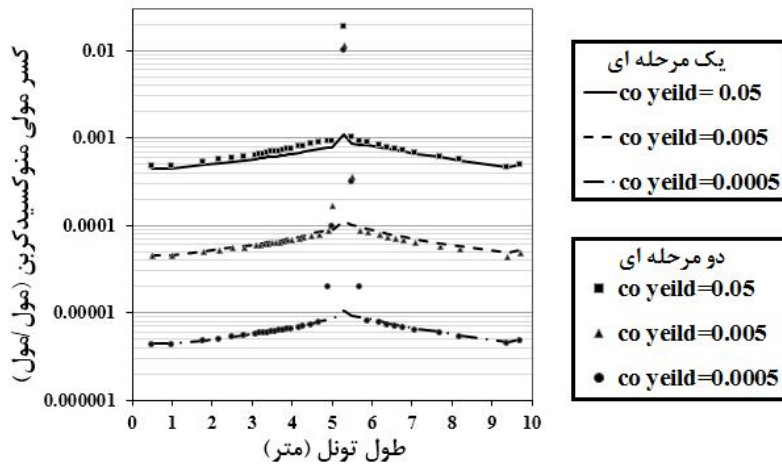
یکی از پارامترهای مهم در احتراق سوخت‌های هیدروکربنی، اکسید شدن منوکسیدکربن می‌باشد. یکی از راه‌های ساده‌سازی احتراق سوخت‌های هیدروکربنی، بیان آن به صورت یک واکنش دو مرحله‌ای می‌باشد. مرحله اول واکنش شامل شکستن سوخت هیدروکربنی به منوکسیدکربن بوده و مرحله دوم، اکسید شدن منوکسیدکربن به دی‌اکسیدکربن می‌باشد [۱۶ و ۱۵]. راه دیگر در نظر گرفتن منوکسیدکربن در محصولات احتراقی واکنش یک مرحله‌ای می‌باشد. با توجه به اهمیت واکنش‌های احتراقی برای مدل‌سازی احتراق، در این قسمت به بررسی تأثیر وجود منوکسیدکربن در محصولات احتراق در واکنش یک و دو مرحله‌ای بکار رفته در نرم افزار FDS پرداخته شده است.

همانطور که در بخش مدل احتراقی نرم افزار FDS بیان شد، برای در نظر گرفتن منوکسیدکربن در محصولات احتراق، متغیری به نام معیار تولید منوکسیدکربن تعریف می‌گردد. مقدار معیار تولید منوکسیدکربن از طریق نتایج تجربی و با استفاده از نتایج بعد از شعله بدست می‌آید. مقدار معیار تولید منوکسیدکربن برای سوخت هپتان در مرجع [۱۷]، کمتر از ۰/۰۰۸ پیشنهاد شده است. با توجه به اینکه در مرجع [۵] بیان شده است که مقدار معیار منوکسیدکربن به نوع سوخت و اندازه استخر آتش وابسته است، نمی‌توان مقدار ذکر شده در مرجع [۱۷] را در همه حالات تعمیم داد. به همین علت مقادیر معیار منوکسیدکربن در محدوده‌ای گسترده (۰/۰۵ تا ۰/۰۰۵) در نظر گرفته شده و بررسی بر روی توزیع منوکسیدکربن در طول تونل صورت گرفته است.

شکل (۴) تغییرات کسر مولی منوکسیدکربن را در طول تونل برای ۳ مقدار مختلف معیار منوکسیدکربن با استفاده از واکنش یک و دو مرحله‌ای نشان می‌دهد. همانگونه که در بخش مدل احتراقی کد FDS، رابطه بین معیار منوکسیدکربن و ضریب استوکیومتری آن (در رابطه ۱۳) ارائه شد، این دو متغیر ارتباط مستقیمی با یکدیگر دارند. از این رو با افزایش مقدار معیار منوکسیدکربن، کسر مولی منوکسیدکربن افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که برای هر مقدار از این معیار، کسر مولی منوکسیدکربن در محل آتش‌سوزی بیشتر از بقیه مکان‌ها در تونل بوده و در ورودی و خروجی تونل به دلیل اختلاط محصولات احتراق با هوا، کسر مولی منوکسیدکربن کمتر است. تفاوت بارز بین شکل واکنش یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای این است که در مکان آتش‌سوزی، کسر مولی منوکسیدکربن برای مقادیر مختلف معیار منوکسیدکربن در واکنش دو مرحله‌ای بیشتر از واکنش یک مرحله‌ای می‌باشد.

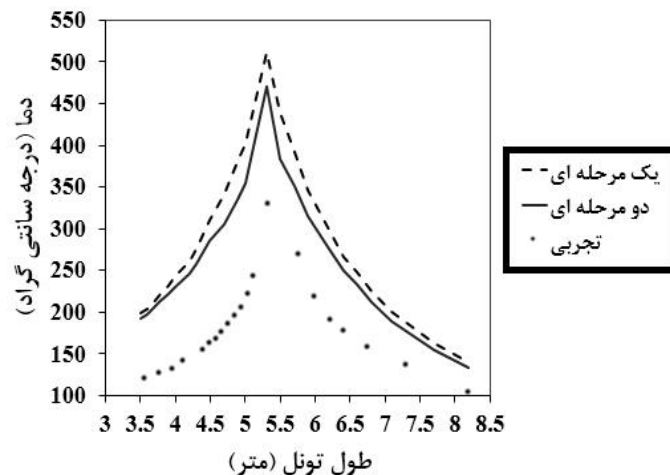
همانطور که اشاره شد در مرجع [۱۷] مقدار معیار تولید منوکسیدکربن برای سوخت هپتان کمتر از ۰/۰۰۸ ذکر شده، به همین علت با در نظر گرفتن مقدار ۰/۰۰۵ برای معیار تولید منوکسیدکربن که نزدیکتر به مقدار ذکر شده در مرجع مذکور است، تغییرات دما برای دو رویکرد واکنش یک و دو مرحله‌ای در شکل (۵) با نتایج تجربی مقایسه شده است. شکل (۵) تغییرات دما را در ۲ سانتی‌متری زیر سقف تونل در حالتی که نرخ گرمای آزاد شده از سطح سوخت (هپتان) ۱۲/۹ کیلووات است، نشان می‌دهد. محور عمودی نمودار، دما و محور افقی آن، مختصات طولی تونل را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که برای مسئله مورد نظر با مقدار معیار منوکسیدکربن ۰/۰۰۵، نتایج واکنش دو مرحله‌ای به نتایج تجربی نزدیکتر است.

توضیحات بیشتر در مرجع [۹] آمده است.



شکل ۴ - تغییرات کسر مولی منوکسیدکربن در طول تونل برای احتراق یک و دو مرحله ای در مقادیر مختلف معیار تولید منوکسیدکربن برای نرخ گرمای آزاد شده ۱۲/۹ کیلووات

با توجه به بیان فلوید و مک گراتان [۶] می‌توان تغییرات دما در واکنش یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای (منظور واکنش‌های یک و دو مرحله‌ای بکار رفته در نرم افزار FDS می‌باشد) را مورد ارزیابی قرار داد. طبق بیان ایشان در واکنش دو مرحله‌ای، در صورتی که شرایط حاکم بر سلول محاسباتی شامل غلظت سوخت و اکسنده و نیز دما مطلوب باشد، ابتدا واکنش اول رخ می‌دهد. در ادامه در صورتی که غلظت اکسنده به میزان کافی باشد، واکنش دوم که اکسید شدن منوکسیدکربن می‌باشد، سریعاً رخ می‌دهد. ولی در صورت کمبود اکسیژن، واکنش دوم انجام نشده و دما فقط با واکنش اول که در آن تنها منوکسیدکربن تولید می‌شود، بدست می‌آید. این در حالی است که در واکنش یک مرحله‌ای منوکسیدکربن و دی‌اکسیدکربن به صورت همزمان تولید می‌گردد. بنابراین در واکنش یک مرحله‌ای به دلیل حضور دی‌اکسید کربن، سطح انرژی محصولات کمتر از حالتی است که تنها منوکسیدکربن تولید گردد. از این رو در واکنش یک مرحله‌ای انرژی بیشتری تولید شده و دما بیشتر از واکنش دو مرحله‌ای پیش‌بینی می‌شود.

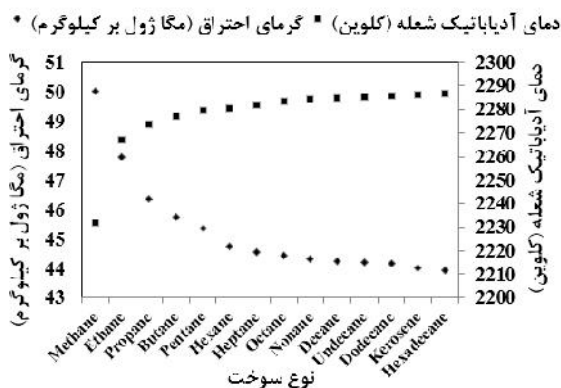


شکل ۵- تغییرات دمای ۲ سانتی متری زیر سقف تونل در طول تونل برای نرخ گرمای آزاد شده ۱۲/۹ کیلووات از سطح سوخت با مقدار معیار منوکسیدکربن ۰/۰۰۵

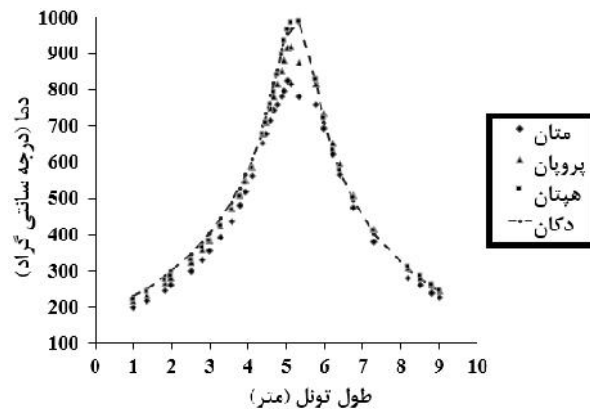
۲-۵- تأثیر گرمای احتراق

در جریان واکنش پذیر، واکنش سوخت و هوا به صورت عمده موجب تولید اکسیدهای کربن، آب و انرژی می‌گردد. گرمای حاصل از احتراق یکی از پارامترهای مهم در جریان‌های واکنشی بوده که به نوع سوخت، وابسته می‌باشد. در این بخش تأثیر گرمای احتراق روی توزیع دما در تونل و سرعت بحرانی با انتخاب ۴ نوع سوخت متان، پروپان، هپتان و دکان مورد بررسی قرار گرفته است. گرمای احتراق سوخت‌های مذکور به ترتیب برابر ۵۰۰۰۰ کیلوژول بر کیلوگرم برای متان، ۴۶۴۶۰ کیلوژول بر کیلوگرم برای پروپان، ۴۴۶۰۰ کیلوژول بر کیلوگرم برای هپتان و ۴۴۲۰۰ کیلوژول بر کیلوگرم برای دکان می‌باشد. در این بخش تأثیر گرمای احتراق سوخت‌های مذکور با بررسی آتش‌سوزی در تونل مطلوب با نرخ حرارت آزاد شده ۵۵/۹ کیلووات و سطح سوخت ثابت مانند شرایط قبلی و در فاصله ۵/۳ متر از ورودی تونل انجام پذیرفته است.

تغییرات دما برای این سوخت‌ها در شکل (۶) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که دما از متان تا هپتان با سنگین‌تر شدن سوخت، افزایش می‌یابد ولی دمای سوخت دکان نسبت به هپتان تغییر چندانی نکرده است. علت این موضوع به انرژی بین پیوند هیدروژن و کربن مربوط می‌شود. در شکل (۷) گرمای حاصل از احتراق و دمای آدیباتیک شعله در نسبت هم‌ارزی واحد برای سوخت‌های هیدروکربنی مختلف (آلکان) با افزایش تعداد کربن‌ها رسم شده است. همانگونه که در شکل (۷) مشاهده می‌گردد، با افزایش تعداد کربن‌های سوخت، انرژی حاصل از احتراق کاهش و دمای آدیباتیک شعله افزایش یافته، ولی از هپتان به بعد تقریباً ثابت مانده است. این مسئله همانگونه که بیان شد به انرژی نهفته در پیوندهای C-H و C-C در سوخت‌های هیدروکربنی باز می‌گردد. در حالت ایده‌آل تمام پیوندهای موجود شکسته شده و گونه‌های دی‌اکسید کربن و آب تولید می‌گردد. شکستن پیوندهای C-H و C-C، نیاز به صرف انرژی داشته و با اکسید شدن رادیکال‌های کربن و هیدروژن انرژی تولید می‌شود. با افزایش طول زنجیره هیدروکربنی نسبت پیوندهای C-C به C-H از هپتان به بعد تقریباً ثابت مانده که موجب ثابت ماندن گرمای حاصل از احتراق از هپتان به بعد می‌گردد [۱۸].



شکل ۷ - گرمای احتراق و دمای آدیباتیک شعله سوخت‌های مختلف بر حسب مگاژول بر کیلوگرم در دمای هوای ۱۵ درجه سانتیگراد و فشار ۱ اتمسفر



شکل ۶ - تغییرات دما در طول تونل برای چهار سوخت با گرمای احتراق مختلف برای نرخ گرمای آزاد شده ۵۵/۹ کیلووات

۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی دو پارامتر احتراقی مؤثر در شبیه‌سازی آتش‌سوزی در تونل پرداخته شد. شبیه‌سازی با در نظر گرفتن سوخت هپتان در یک سطح ثابت و در فاصله ۵/۳ متری از ورودی تونل صورت پذیرفت. شبیه‌سازی به صورت سه بعدی و با استفاده از نرم افزار FDS به صورت موازی انجام شد. از جمله پارامترهای احتراقی مورد بررسی در کار حاضر وجود

منوکسیدکربن در محصولات احتراق برای دو رویکرد واکنش یک و دو مرحله‌ای و تأثیر گرمای احتراق می‌باشد. با در نظر گرفتن منوکسیدکربن در محصولات احتراق برای واکنش یک و دو مرحله‌ای مشاهده شد که واکنش دو مرحله‌ای، منوکسیدکربن در محل آتش‌سوزی را بیشتر از واکنش یک مرحله‌ای پیش‌بینی می‌کند. همچنین دمای پیش‌بینی شده در طول تونل توسط واکنش دو مرحله‌ای نسبت به واکنش یک مرحله‌ای به نتایج تجربی نزدیکتر است.

با بررسی تأثیر گرمای احتراق برای یک نرخ گرمای آزاد شده ثابت مشاهده شد که برای سوخت هپتان و دکان که گرمای احتراقشان به هم نزدیک است، دما در تونل تفاوت چندانی نمی‌کند. در واقع با سنگین‌تر شدن سوخت، اختلاف گرمای احتراق در سوخت‌ها کاهش یافته و دما تقریباً یکسان می‌باشد.

مراجع

- 1- Lonnermark, A., "On the characteristics of fires in tunnels", PhD. Thesis, Lund University, Scandinavia, 2005.
- 2- Wu, Y., and Bakar, M.Z.A., "Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems-a study of the critical velocity", Fire Safety Journal, Vol. 35, pp. 363-390, 2000.
- 3- Roh, J.S., Yang, S.S., Ryou, H.S., Yoon, M.O., and Jeong, Y.T., "An experimental study on the effect of ventilation velocity on burning rate in tunnel fires-heptane pool fire case", Building and Environment, Vol. 43, pp. 1225-1231, 2008.
- 4- Apte, V.B., "Effect of scale and fuel type on the characteristics of pool fires for fire fighting training", Fire Safety Journal, Vol. 31, pp. 283-298, 1998.
- 5- Hwang, C.C., and Edwards, J.C., "The critical ventilation velocity in tunnel fires-a Computer simulation", Fire safety J, Vol. 37, 2002.
- 6- Floyd, J.E., and McGrattan, K.B., "Extending the mixture fraction concept to address under-ventilated fires", Fire Safety Journal, Vol. 44, pp. 291-300, 2009.
- بزرگ عصاره، ح، سجودی، ع، افشین، ح، فرهانی، ب، "بررسی تأثیر شکل منبع آتش بر سرعت بحرانی در مواقع آتش‌سوزی در یک تونل همراه با تهویه طولی"، سومین همایش ملی تهویه و بهداشت صنعتی، ۱۳۹۱.
- رئوفی، م، مظاهری، ک، "بررسی تأثیر نرخ گرمای آزاد شده روی سرعت بحرانی در آتش‌سوزی استخری در تونل‌ها"، پانزدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، ۲۷-۲۹ آذر، ۱۳۹۲.
- رئوفی، م، "بررسی تأثیر تهویه طولی روی آتش‌سوزی‌های بزرگ در تونل‌های بین شهری"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی)، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۲.
- 10- Piccinini, R.B., "Eulerian-lagrangian simulation of a turbulent evaporating sprays", M.S Thesis, Sao Jase dos Campos, Brazil, 2011.
- 11- McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., Baum, H., Rehm, R., Mell, W., and McDermott, R., *Fire dynamics simulator (version 5) technical reference guide*, National Institute of Standards and Technology, 2010.
- 12- Kuo, K.K-y., *Principles of Combustion*, Department of Mechanical Engineering The Pennsylvania State, University Park, Pennsylvania, 1986.
- 13- Turns, S.R., *An Introduction to Combustion*, McGraw-Hill Higher Education, Second Edition, 2000.
- 14- Roh, J.S., Ryou, H.S., Kim, D.H., Jung, W.S., and Jang, Y.J., "Critical velocity and burning rate in pool fire during longitudinal ventilation", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 22, pp. 262-271, 2007.
- 15- Poinso, T., and Veynante, D., *Theoretical and Numerical Combustion*, R.T.Edwards, Inc., Second Edition, 2005.
- 16- Gao, P.Z., Liu, S.L., Chow, W.K., and Fong, N.K., "Large eddy simulations for studying tunnel smoke ventilation", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 19, pp. 577-586, 2004.
- 17- Hamins, A., Maranghides, A., and Mulholland, G., "The global combustion behavior of 1 MW to 3 MW hydrocarbon spray fires burning in an open environment", National Institute of Standards and Technology, 2003.
- 18- Morrison, R.T., and Boyd, R.N., *Organic Chemistry*, Prentice-Hall, Inc., Sixth Edition, 1992.