

بررسی پخش ناگهانی گاز و انفجار آن در محیط های مانع دار به کمک آنالیز CFD

اسلام کاشیⁱ؛ فرهاد شهرکیⁱⁱ؛ داوود رشتچیانⁱⁱⁱ؛ سعیده محبی نیا^{iv}

چکیده

خروج و پخش ناگهانی گازهای سمی و آتش زا در صنایع فرایندی، همیشه از خطرات مهم برای سلامت عمومی کارکنان و ساکنین مناطق نزدیک آنها بوده و از نظر ایمنی، کارخانجات صنعتی باید مراقب این موضوع باشند. در شبیه سازی فرایند پخش و آنالیز پیامد، به منظور تجزیه و تحلیل ریسک، مواجهه با پدیده اغتشاش بوجود آمده در مناطقی که موانع و زبری زیادی دارند، یک بحث مهم و قابل توجه می باشد که مدل های فعلی پخش و انفجار، توانایی مدل کردن آن را ندارند. در این مقاله از دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان ابزاری قدرتمند در شبیه سازی پدیده های انتقال، استفاده شده است. تطابق نتایج شبیه سازی با داده های تجربی نشان می دهد که CFD قادر به تخمین های مناسب در زمینه پخش و انفجار گاز در محیط های مانع دار می باشد.

کلمات کلیدی

ایمنی، پخش گاز، انفجار، جریان های مغشوش، CFD

Gas Dispersion and Explosion Over a Built-up Area with CFD

E. Kashiⁱ; F. Shahrakiⁱ; D. Rashtchianⁱⁱ; S. Mohebiniaⁱⁱ

ABSTRACT

Accidental release and dispersion of toxic and flammable gases were always major hazards for public health and safety which process industries had to deal with. In real dispersion and explosion simulation, for safety assessment, turbulence is a common phenomenon that the present models cannot model it correctly. In this paper, gas dispersion and explosion in the complex region is simulated by the computational fluid dynamic (CFD), and compared with experimental data. Computational results showed good agreement with experimental measurements indicating that CFDs provide a reliable means of estimating gas dispersion and explosion in real terrains.

KEYWORDS

Safety – Gas dispersion – Gas explosion – turbulence flows – CFD

۱-مقدمه

جمعیت موجود در اطراف مناطق صنعتی و یا انبارهای ذخیره سازی اینگونه مواد می باشد. مطابق قوانین حفاظت محیط زیست، باید غلظت انواع گازهای سمی و آتش زا در نزدیکی کارخانجات صنعتی محاسبه شده و ارزیابی های مربوط به

پخش اتمسفری گازهای خطرناک (سمی و آتش زا) و همچنین بخارات مشابه و انفجارهای بعدی خطر بزرگی برای سلامت

ⁱ دانشجوی دکتری گروه مهندسی شیمی دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان Kashi_58@yahoo.com

ⁱⁱ عضو هیات علمی گروه مهندسی شیمی دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان fshahraki@hamoon.usb.ac.ir

ⁱⁱⁱ عضو هیات علمی دانشکده مهندسی شیمی و نفت دانشگاه صنعتی شریف، تهران rashtchian@sharif.edu

^{iv} دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی شیمی و نفت دانشگاه صنعتی شریف، تهران

ایمینی صورت گرفته و اتفاقات ممکن بررسی شوند. این مطالعات ممکن است در مرحله طراحی کارخانه صورت گیرد و یا برای بررسی عکس العمل‌های مورد نیاز در هنگام بروز خطر به کار رود. گاهی اوقات هم برای دریافت گواهینامه‌های زیست محیطی، باید این مطالعات به شکل کمی صورت گیرند.

امروزه مدلها و روشهای زیادی برای مدلسازی پخش و نفوذ مواد شیمیایی از یک نقطه، محیط یا لوله وجود دارد [۱]. برای مثال روش مدلسازی پخش و نفوذ گوسی اغلب برای تخمین نتایج رها سازی مواد خنثی تا سبک استفاده می‌شود. بعضی از روش‌های مدلسازی دیگر برای هندسه‌های پیچیده تر استفاده می‌شوند. به طور مشابه مدلها و روش‌هایی برای خروج ناگهانی مواد شیمیایی شامل گازهای سنگین و یا دوفازی که ممکن است خطرناک و مهلك باشند، وجود دارد [۲]. در این مدلها پیچیدگی محیط در نزدیکی نقطه آزاد سازی، بوسیله پارامتر زبری سطح ارائه می‌گردد که البته یک تقریب خام می‌باشد [۳]. به هر حال این مدلها نمی‌توانند به خوبی در محیط‌های صنعتی با هندسه پیچیده (دارای ساختمانها و موانع گوناگون) واقع در مناطق بادخیز، مورد بهره برداری قرار گیرد. با توجه به امکانات عمومی موجود در محیط‌های صنعتی، موانع زیادی وجود دارد که روی اغتشاش و در نتیجه رفتار نفوذی مواد آزاد شونده تأثیر گذار است. خواص یک گاز پخش شده در سه بعد تغییر می‌کند. ساختمانها و تجهیزات موجود سیستم جریان را عوض کرده و بر روی اغتشاش آن تأثیر می‌گذارند. در حالیکه مدل‌های تجربی قدیمی موسوم به مدل‌های Box (در این مدلها فرض می‌شود که ابر تشکیل شده به فرم یک مکعب مستطیل بوده و خصوصیات آن در تمام نقاط مکعب یکنواخت است)، از خصوصیات یک بعدی متوسط پخش گاز، در دو بعد عمود بر جهت نفوذ استفاده می‌کنند [۴] و به همین خاطر دارای خطا در پیش بینی غلظت‌های عمودی و افقی می‌باشند. به هر حال دلیل استفاده از این مدلها (Box models) سریع و آسان بودن تخمین نحوه پخش گاز می‌باشد که در آنالیزهای ریسک از آنها استفاده می‌شود.

از سوی دیگر بررسی‌های انجام شده نشان داده است که حدود ۴۲٪ از انفجارهای روی داده در صنایع فرآیندی به خاطر انفجارهای گازها و بخارات در محیط‌های باز یا بسته می‌باشد. تخمین پیامدها و بار خسارت حاصل از انفجار گاز، معمولاً یکی از قسمت‌های اصلی آنالیز ریسک می‌باشد. لذا شبیه سازی انفجار یکی از مهمترین اجزای آنالیز ریسک خواهد بود [۵].

انفجار گاز می‌تواند بصورت یک فرایند رشد شعله در یک مخلوط اشتعال‌پذیر در نظر گرفته شود که در اثر جریان انبساط خودالقائی تا شدت انفجار شتاب می‌گیرد. موج صادره از انفجار

یک شوک ناگهانی است که مقدار آن معلوم و قابل اندازه‌گیری است. در حین انفجار انتشار ناگهانی و شدید انرژی باعث افزایش بسیار سریع فشار هوا می‌شود و یک ناحیه با فشار مثبت ایجاد می‌کند که این فشار مثبت را فشار متجاوز (Overpressure) می‌نامند. در حین موج ایجاد شده که از منبعش با سرعت بسیار زیاد حرکت می‌کند، مقدار فشار سریعاً به بیشترین مقدار خود افزایش می‌یابد که به آن قله فشار متجاوز می‌گویند و سپس این مقدار کاهش می‌یابد. پتانسیل انفجار برای ایجاد خسارت بستگی به مقدار این قله دارد. تخمین فشار ایجاد شده در انفجار قدم اول در آنالیز سلسله مراتب اتفاقات است [۶].

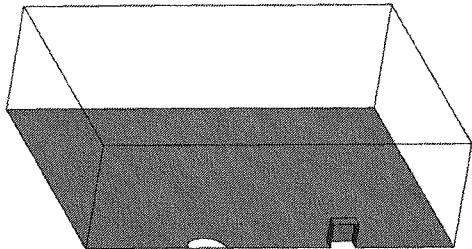
فشار نهایی در انفجار به فاکتورهای زیادی بستگی دارد از جمله: نوع سوخت، نسبت سوخت-هوا، فشار اولیه، دمای اولیه، منبع اشتعال و اغتشاش. فرایند اختلاط متلاطم بین مخلوط اشتعال‌پذیر و محصولات حاصل از احتراق یک فاکتور کلیدی در تعیین سرعت سوختن و مقدار فشار متجاوز می‌باشد [۷]. اغتشاش علاوه بر افزایش سرعت فرایندهای انتقال حرارت و انتقال جرم، سطح جبهه شعله را نیز افزایش می‌دهد. سطح جبهه شعله همان حد فاصل بین مخلوط اشتعال‌پذیر و محصولات احتراق است که در آن واکنش سوختن اتفاق می‌افتد. در ابتدا هنگامی که شدت اغتشاش کم است، گردابه‌های متلاطم تنها جبهه شعله را چروکیده می‌کنند و باعث افزایش سطح مؤثر آن و در نتیجه افزایش سرعت سوختن می‌شوند. پیامد این فرایند، انبساط شدیدتر و همانا افزایش سرعت جریان می‌باشد. افزایش سرعت نیز خود باعث افزایش شدت تلاطم می‌گردد.

بررسی شتاب گرفتن شعله بدلیل وجود موانع در محیط‌های صنعتی در مطالعه مخاطرات انفجار بسیار مهم است. درجه انسداد بالا به علت تراکم موانع، معمولاً یکی از مشخصه‌های واحدهای شیمیایی است که با مواد اشتعال‌پذیر سرو کار دارند. برخورد شعله با موانع باعث ایجاد اختلاط شدید و در نتیجه احتراق متلاطم در ناحیه شعله می‌شود.

به کمک فناوری پیشرفته کامپیوتری و با افزایش قدرت کامپیوترها، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) ابزاری مناسب و قابل دسترس برای محدوده وسیعی از مسائل گشته است. دینامیک سیالات محاسباتی کمک می‌نماید تا یک شبیه سازی از یک پدیده پیچیده فیزیکی داشته و بتوان پدیده‌های انتقال را بوسیله مدل‌های پیشرفته ریاضی شرح داد. مدل‌های ویژه ای در کدهای CFD ضمیمه شده‌اند که اغتشاش بوجود آمده در دامنه کاری را پیش بینی نموده و مناطق نزدیک دیواره را به دقت مورد بررسی قرار می‌دهند.

مطالعات قابل توجهی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی،

متری سیلندر گاز و در جهت باد استقرار داده شد. گاز آزاد شده از سطح سیلندر (شکل ۳)، گاز R-12 (Refrigerant-12) رقیق سازی شده بوسیله نیتروژن بود. مخلوط گاز حاوی (w/w) ۳۱/۶٪ نیتروژن و (w/w) ۶۸/۴٪ فرئون ۱۲ بود. در طی انجام آزمایش، سرعت باد تقریباً برابر با ۱/۹ m/s بود. با توجه به جهت باد، غلظت گاز در جلو و عقب مانع اندازه گیری شد.



شکل ۱- نصف هندسه (همراه با سطح تقارن) مورد استفاده در آزمایش شماره ۲۶ Thorney Island، باد از سمت چپ می وزد.

۲-۲- شرایط مرزی

شرایط مرزی در واقع ویژگیها یا خواص مربوط به هر یک از سطوح دامنه کاری می باشد و برای شبیه سازی باید به دقت تعریف شوند. با توجه به دامنه کاری نشان داده شده در شکل ۱، شرایط مرزی مربوط به پروفیل سرعت و همچنین گاز ورودی، به شکل تابع ریاضی وارد مسأله شد که در اینجا به بررسی آنها پرداخته می شود.

۲-۲-۱- ورودی گاز (چشمه)

در آزمایش شماره ۲۶، در بخش پخش ناگهانی گاز، حدود 2000 m^3 مخلوط گاز فرئون ۱۲ و نیتروژن در کمتر از ۱ ثانیه آزاد شد [۱۵]. به منظور وارد کردن شرایط مرزی گاز ورودی در حالت گذرا، دبی جرمی مخلوط گاز (Q_i) بوسیله یک تابع پله ای تعریف شد:

$$Q_i = m_i \times (\text{step}[t] - \text{step}[t - 1.5]) \quad (1)$$

که مقدار m_i برابر با 3178 kg/s می باشد. گاز در یک لحظه از چشمه خارج شده و به سمت بالا فرستاده شد تا یک ابر استوانه ای شکل را تشکیل داده و تا حد امکان، شرایط مشابه شرایط آزمایش شود.

جدول (۱): داده های مربوط به جرم رهاسازی شده در آزمایش

شماره ۲۶

| Mass inflow rate, m_i (kg s^{-1}) | Total released mass (kg) | Total released volume (m^3) | Released gaseous mixture density relative to air | Trial Number |
|--|--------------------------|--|--|--------------|
| 3178 | 4767 | 1970 | 2.00 | 26 |

مدلسازی جریانهای اتمسفریک و همچنین مدلسازی انفجار توده های ابر گاز صورت گرفته است [۷] - [۱۴]. در این مقاله پخش یک گاز سنگین بوسیله کمک گرفتن از مدل اغتشاش $k-\epsilon$ شبیه سازی شده و نتایج حاصله با داده های تجربی حاصل از آزمایشات میدانی Thorney Island مقایسه شده است. آزمایشات Thorney Island به خوبی در گذشته شرح داده شده و داده های مربوطه آنالیز گشته است [۱۵] - [۱۷] که اطلاعات مفیدی را برای انجام آزمایشات پخش گازهای سنگین ارائه کرده است [۱۸]. همچنین به منظور شبیه سازی فرایند انفجار ابر بخار، از اطلاعات مربوط به یک لوله که دارای مواعی در داخل خود می باشد، استفاده شده است [۵].

شبیه سازی عددی این آزمایشات بوسیله کد CFX 10 صورت گرفته که از معادلات ناویر استوکس با رینولدز متوسط استفاده می نماید و با استفاده از روش حجم محدود، معادلات را به حالت گسسته تبدیل می نماید. به عبارت دیگر با تبدیل معادلات دیفرانسیل با شرایط مرزی و اولیه مربوطه به مقادیر گسسته، آنها را با روشهای جبری حل می نماید [۱۹].

۲- بررسی انتشار گاز در محیطهای مانع دار

۲-۱-۱- شرح آزمایشات میدانی Thorney Island

فاز یک آزمایشات میدانی پخش گازهای سنگین Thorney Island، مربوط به رهاسازی گاز در یک محیط صاف و بدون مانع بود. در حالیکه هدف فاز دوم آزمایشات، بررسی پخش گازهای سنگین تر از هوا در اطراف موانع بود. از آزمایشات فاز دو باید نتایج استخراج می شد که بتوان در یک مدل تونل باد شبیه سازی شده، نتایج حاصله آنها را مقایسه نمود. همچنین پدیده های دینامیک سیالات از قبیل رابطه بین لایه شدن دانسیته جریان و اینکه جریان گاز در اطراف ساختمانها چگونه پخش می گردد و یا رابطه بین ویکهای اطراف ساختمانها و جریان ابر، باید مورد مطالعه قرار می گرفت [۲۰]. در آزمایشات مربوط به یک ساختمان تکی (آزمایشات شماره ۲۶ - ۲۹)، مانع، یک مکعب $9\text{m} \times 9\text{m} \times 9\text{m}$ بود که از چوب ساخته شده و ورقه های پلاستیکی روی آنها چسبانده شده بود. کل این بنا، روی یک تریلر نصب شده بود و قبل از رهاسازی گاز در موقعیت مورد نظر استقرار می یافت. منبع گاز یک خیمه به قطر 14m ، ارتفاع 13m و کل حجم برابر با 2000 m^3 بود که در لحظه شروع پخش گاز این خیمه یکباره به زمین می افتاد و یک ابر استوانه ای شکل در آسمان باقی می ماند [۲۰].

۲-۱-۱- آزمایش شماره ۲۶ Thorney Island

در این آزمایش، سازه مکعبی شکل متحرک، در فاصله ۵۰

سرعت باد یکی از مهمترین عوامل مؤثر در پخش و رقیق گردیدن گاز می‌باشد و گاز را به نقاط مختلف دامنه کاری انتقال می‌دهد. برای داشتن یک تعریف درست از سرعت باد، باید توجه داشت که سرعت باد در نزدیکی سطوح، به علت تأثیرات اصطکاک، بسیار کم می‌گردد. اگر سرعت باد در یک ارتفاع مشخص، معین باشد (میزان متعارف ارتفاع مرجع، ۱۰ متر از سطح زمین می‌باشد)، آنگاه پروفیل سرعت را می‌توان به کمک رابطه نمائی (۲) بیان نمود:

$$u_z = u_0 \times \left(\frac{z}{z_0} \right)^{\lambda} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، λ یک مقدار بدون بعد بوده و مقدار آن به میزان پایداری اتمسفر و همچنین زبری سطح وابسته می‌باشد [۲۱]. با توجه به شرایط آزمایش شماره ۲۶، مقادیر پارامترهای مختلف در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول (۲): داده‌های مورد استفاده در معادله (۱۸)

| Parameter λ (unitless) | Surface roughness (m) | Atmospheric stability | Wind speed at 10m altitude (m s ⁻¹) | Trial number |
|--------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|--|-----------------|
| 0.07 | 0.005 | B | 1.9 | 26 |

علاوه بر موارد یاد شده، سطوح مربوط به ساختمان و زمین به عنوان دیواره‌های ثابتی تعریف شد که سرعت سیال در روی آنها بر اساس شرط عدم لغزش، برابر صفر می‌باشد. صفحات کناری، سطح بالا و جلویی با شرط دیواره باز (Opening) و با فشار نسبی صفر نسبت به دامنه کاری تعریف شدند. همچنین جهت کاهش زمان محاسبات، از نصف دامنه استفاده گردید و دیواره وسط با شرط سطح تقارن تعریف شد.

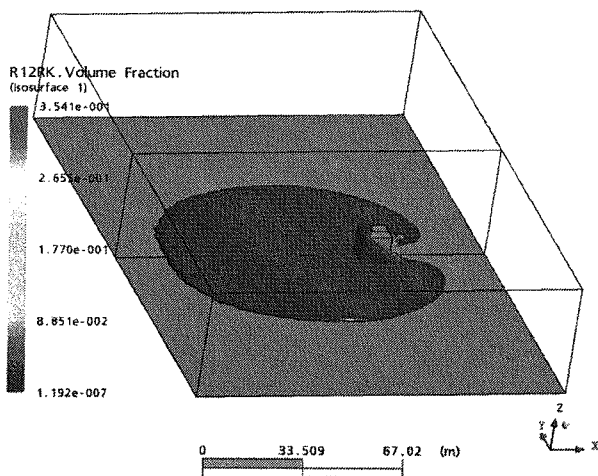
۳-۲-۳- نتایج شبیه سازی

با شرایط مرزی اشاره شده در قسمت قبل، معادلات بقای جرم، انرژی و مومنتم در فضای سه بعدی مربوط به دامنه کاری نمایش داده شده، حل شدند. دامنه کاری حاوی ۳۳۱۱۷۹ المان حجمی از نوع چهار وجهی بوده و تعداد المانهای منشوری بوجود آمده ۳۴۰۲۸ عدد بود. از آنجا که هدف محاسبه مقادیر غلظت در زمانهای مختلف بود، مسئله به شکل حالت گذرا حل شد. از المانهای چهار وجهی استفاده شد تا بتوان حجمهای کوچکتری درست کرده و سطوح نزدیک دیواره‌ها را ساده تر پوشش داد. به منظور دقیق تر شدن جوابها در نزدیکی دیواره مکعب المانهای اطراف این جسم کوچکتر انتخاب شد. مدت زمان شبیه سازی (زمان پس از شروع پخش) ۲۰۴

ثانیه بوده و در کل ۲۰۸ پله زمانی (۸×۰/۲۵ و ۲۰×۰۱) در نظر گرفته شد. ابتدا مسئله با همان شرایط مرزی مورد استفاده در حالت گذرا، به شکل پایا حل شد تا میدان جریان مغشوش بدست آمده و بتوان از نتایج آن به عنوان نقاط اولیه در حالت گذرا استفاده کرد. معیار همگرایی RMS مانده (Residual of Root Mean Square) مقداری کمتر از ۱۰^{-۴} در نظر گرفته شد. حل حالت گذرا نیاز به ۸ تا ۲۳ تکرار برای هر پله زمانی داشت. با کامپیوتری که دارای یک پردازشگر از نوع Intel(R)Core(TM) 2 cpu 6400@2.13 GHZ و حافظه جانبی برابر با 980 MB، زمان شبیه سازی به مدت ۷ ساعت و ۳۹ دقیقه به طول انجامید. بررسی زمان اختصاص یافته به هر یک از قسمت‌های مربوط به بخش حل، نشان داد که حدود ۵۰/۳٪ زمان کل حل مربوط به گسسته سازی معادلات جرم و مومنتم، ۵/۷٪ زمان کل حل مربوط به گسسته سازی معادلات جزء حجمی و ۱۵٪ زمان کل حل صرف گسسته سازی معادلات مدل اغتشاش $k - \epsilon$ شده است. ۹/۵٪ وقت کل صرف بروز رسانی متغیرها شده، ۲/۳٪ زمان کل صرف حل معادلات خطی مربوط به انتقال جرم و مومنتم، ۳/۲٪ وقت کل صرف حل معادلات خطی مربوط به مدل اغتشاش $k - \epsilon$ و ۲/۹٪ وقت کل صرف حل معادلات جزء حجمی گردیده است. ۱۰/۱٪ زمان کل نیز صرف مسائل ریز و جانبی گشته است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد بیشتر زمان حل صرف گسسته سازی معادلات شده است. بنابراین احتمالاً با بهبود روشهای گسسته سازی می‌توان زمان مورد نیاز برای حل را به شدت کاهش داد. شکل ۲ نتایج کامپیوتری را با داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده در صفحه جلویی ساختمان و در ارتفاع ۶/۴ متری مقایسه می‌نماید.

جدول (۳): زمان اختصاص یافته به بخشهای مختلف حل

| بخشهای مختلف حل | درصد زمان اختصاص یافته به هر بخش |
|------------------------------------|----------------------------------|
| گسسته سازی معادلات جرم و مومنتم | ۵۰/۳ |
| گسسته سازی معادلات جزء حجمی | ۵/۷ |
| گسسته سازی معادلات مدل اغتشاش | ۱۵ |
| بروز رسانی متغیرها | ۹/۵ |
| حل معادلات انتقال جرم و مومنتم | ۲/۳ |
| حل معادلات خطی مربوط به مدل اغتشاش | ۲/۲ |
| حل معادلات جزء حجمی | ۲/۹ |
| مسائل ریز و جانبی | ۱۰/۱ |

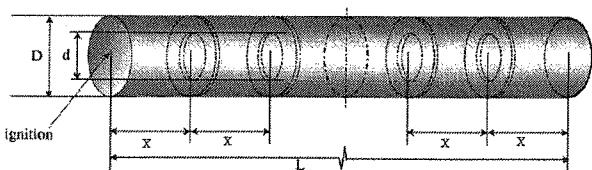


شکل (۴): سطح هم مقدار مربوط به غلظت ۰/۱ درصد گاز R12 پس از گذشت ۱۵ ثانیه از زمان شروع پخش گاز

۳- بررسی انفجار گاز در محیطهای مانع دار

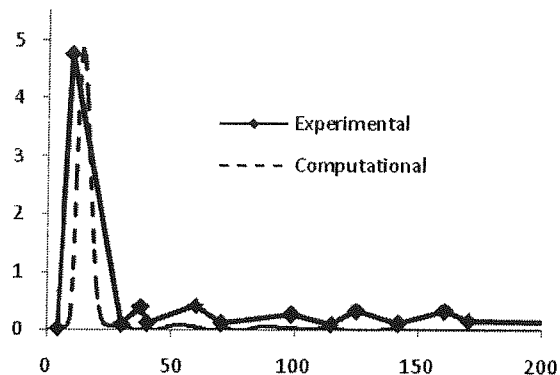
۱-۳- ساختار نمونه مدل سازی شده

شمای کلی لوله انفجار در شکل ۵ نشان داده شده است. این لوله ۵۰ مترمکعبی ۱۰m طول و ۲/۵m قطر دارد. در داخل لوله رینگهایی نصب شده است که تعداد و همچنین قطر داخلی آنها به عنوان متغیرهای آزمایش به حساب می آیند. اشتعال بوسیله یک ماتریس از منابع اشتعال که بصورت الکتریکی شعله ور می شوند (منبع اشتعال صفحه ای) و یا یک منبع اشتعال واحد (منبع اشتعال نقطه ای) شروع می شود. داخل لوله از مخلوط همگن سوخت- هوا پر می شود. این لوله ابتدا در سایت آزمایشگاه رافوس (Raufoss) در قسمت شرقی نروژ قرار داشت که در سال ۱۹۸۳ به سایت آزمایشگاه CMR's Sotra در خارج از برگن منتقل شد [۵].



شکل (۵): شمای کلی لوله انفجار

در بخش مدلسازی انفجار، سه آزمایش انجام شد که در آنها قطر داخلی رینگ، متغیر آزمایشات بود. کاهش قطر رینگها به معنای افزایش درجه انسداد است. برای لوله مذکور شامل ۵ رینگ، سه هندسه با قطر داخلی رینگها به میزان $d/0.6$ ، $d/0.74$ و $d/0.6$ متر، ایجاد شد. در شکل ۶، هندسه یک لوله به قطر داخلی رینگها به میزان $d/0.74$ m مشاهده می شود.

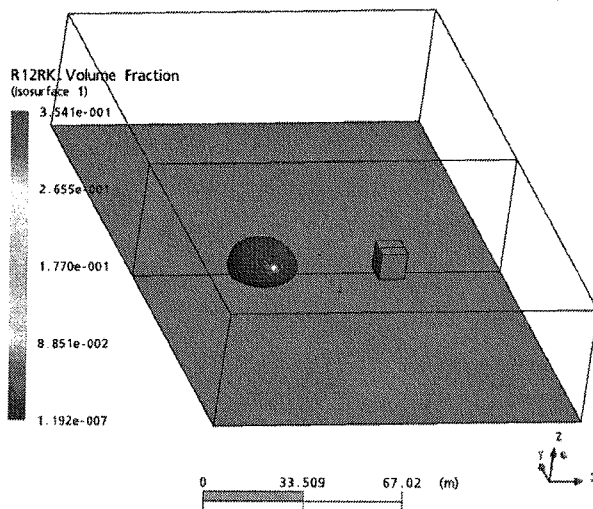


شکل (۲): مقایسه داده های تجربی و محاسبه شده در ارتفاع ۶/۴ متری ضلع جلویی مکعب

با دقت در شکل ۲ مشاهده می گردد که داده های محاسبه شده با مشاهدات تجربی تطابق بسیار خوبی دارند و با یک شبیه سازی موفق عملاً می توان از نتایج CFD بجای آزمایشات عملی بهره جست.

شکل های ۳ و ۴ به ترتیب، سطوح هم مقدار را برای غلظتهای مختلف و در زمانهای مختلف نشان می دهند. در واقع این سطوح نشانگر منطقه خطرناک (از نظر سمیت و از نظر اشتعال پذیری) بوده که در محاسبات آنالیز ریسک و پیامدهای حاصله ارزش بسیار زیادی دارند.

همانطور که در اشکال ۳ و ۴ ملاحظه می شود به دلیل سنگین بودن گاز فرئون از هوا، بلافاصله پس از رها سازی گاز، توده ابر در پایین دست جریان و در سطح نزدیک به زمین تشکیل می گردد. با دقت در شکل ۴، مشاهده می شود که مقداری از گاز به علت عدم حرکت جریان هوا در نزدیکی دیواره پشتی مکعب جمع شده و به صورت ساکن باقیمانده است.



شکل (۳): سطح هم مقدار مربوط به غلظت ۰/۱ درصد گاز R12 پس از گذشت ۱۰ ثانیه از زمان شروع پخش گاز

$$\begin{aligned}
 u &= 0.0 \text{ m/s} & Y_{C_2H_8} &= 0.0602 \\
 P &= 1.10^5 \text{ Pa} & v &= 0.0 \text{ m/s} \\
 Y_{CO_2} = Y_{H_2O} &= 0.001 & T &= 298 \text{ K} \\
 w &= 0.0 \text{ m/s} & Y_{O_2} &= 0.2191
 \end{aligned}$$

۳-۳- مدل کردن جرقه

برای مدل کردن جرقه، یک نقطه منبع به مختصات (۰،۰،۰) در برنامه تعریف و یک بار حرارتی با تابع پالسی به آن وارد شد. در این نقطه برای شروع واکنش مقدار اولیه بزرگتر از صفر به نرخ اضمحلال ادی داده شد. در واقع جرقه به صورت یک بار حرارتی و ایجاد اغتشاش مدل شده است. قله تابع پالسی برای حرارت می‌بایستی از مینیمم انرژی اشتعال بیشتر باشد تا احتراق اتفاق بیفتد. شرایط اعمال شده به صورت رابطه ۳ می‌باشد. در این رابطه H_{ig} باید از مینیمم انرژی برای شروع اشتعال بیشتر باشد. برای بیشتر هیدروکربن‌ها این پارامتر در حدود $0.3-0.1 \text{ MJ}$ است.

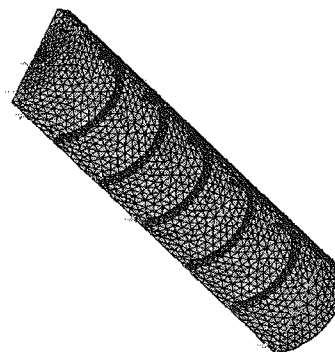
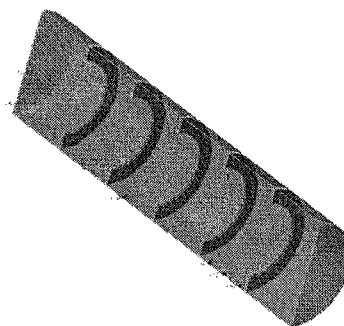
$$Q_{ig} = H_{ig} (step(t) - step(t - 0.01)) \quad (3)$$

۳-۴- بحث و تفسیر نتایج

با کاهش قطر داخلی رینگها درجه انسداد در لوله بیشتر می‌شود. نسبت انسداد بصورت رابطه ۴ تعریف می‌شود:

$$BR = 1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2 \quad (4)$$

که در آن d قطر داخلی اریفیس و D قطر داخلی لوله است. هنگامی که قطر داخلی اریفیسها، $1/74 \text{ m}$ باشد، صفحات اریفیس ۵۰٪ از سطح آزاد لوله را مسدود می‌کنند و اگر قطر داخلی d برابر با $2/25 \text{ m}$ باشد، نسبت انسداد برابر 0.16 و یا ۱۶٪ می‌شود. از نتایج آزمایشات بر می‌آید که نسبت انسداد، پارامتری است که تأثیر قابل توجهی روی فشار انفجار دارد. با افزایش این نسبت، سطح تهویه کاهش یافته و سرعت جریان در قسمت باز اریفیسها افزایش خواهد یافت. افزایش سرعت باعث ایجاد اغتشاش در لایه‌های برشی پشت صفحات اریفیس می‌شود. تعداد رینگها نیز پارامتر مهم دیگری است که روی اغتشاش و در نتیجه فشار نهایی تأثیر می‌گذارد. هر اریفیس یک لایه برشی متلاطم ایجاد خواهد کرد که سرعت شعله را افزایش می‌دهد. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود در لبه اریفیسها به علت تلاطم ایجاد شده شعله سریعتر ایجاد می‌شود.



شکل (۶): هندسه ایجاد شده برای لوله همراه با ۵ رینگ به شعاع داخلی $1/74 \text{ m}$

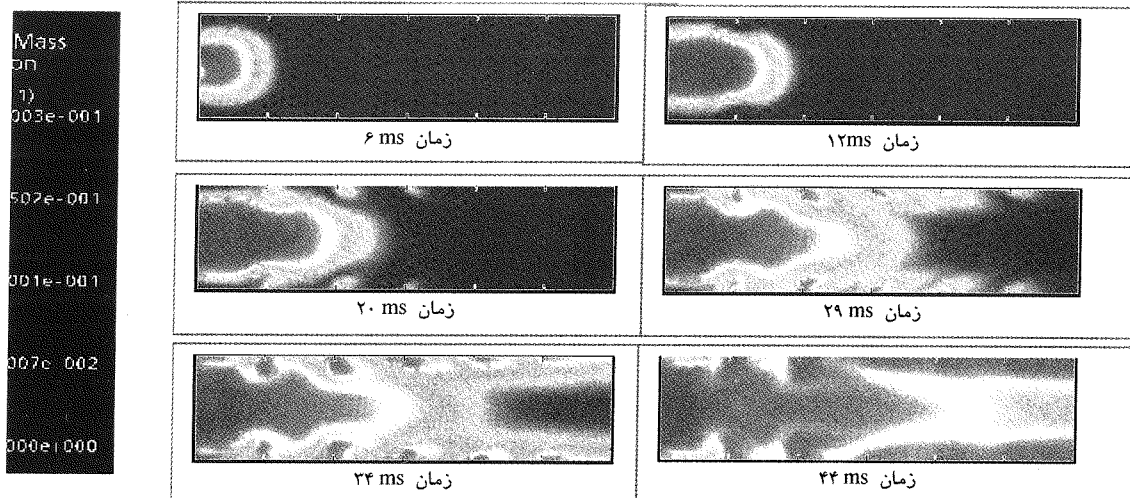
فضای هندسی ایجاد شده بصورت غیر ساخت یافته (Unstructured) شبکه‌بندی شد. تعداد المانهای چهاروجهی برای هر هندسه و همچنین زمان تمام محاسبات برای هر هندسه در جدول ۴ آورده شده است. در این تحقیق از یک کامپیوتر با CPU 2.80GHz و RAM 512 MB استفاده شد که برای هر آزمایش تقریباً ۴-۵ ساعت زمان لازم بود. گام زمانی داده شده در هر اجرا 1 ms بود.

جدول (۴): تعداد المانهای چهاروجهی و زمان محاسباتی برای سه هندسه ایجاد شده

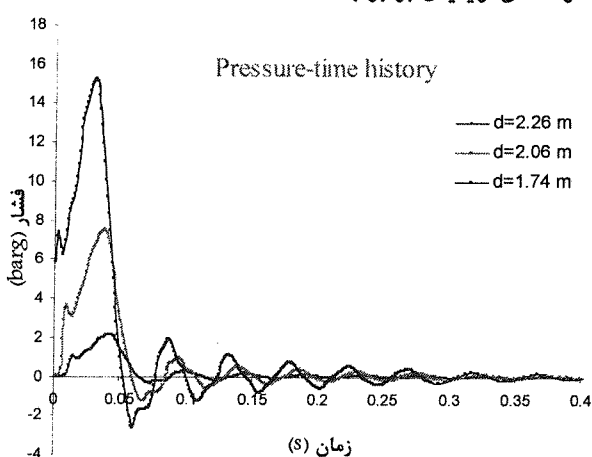
| قطر داخلی اریفیس (m) | تعداد المانهای چهار وجهی | CPU-Time(s) |
|----------------------|--------------------------|-------------|
| ۲/۲۶ | ۲۴۷۲۴ | ۱/۵۱×۱۰۴ |
| ۲/۰۶ | ۲۸۴۱۲ | ۱/۷۴×۱۰۴ |
| ۱/۷۴ | ۲۶۱۶۴ | ۱/۶۱×۱۰۴ |

۳-۲- شرایط اولیه و شرایط مرزی

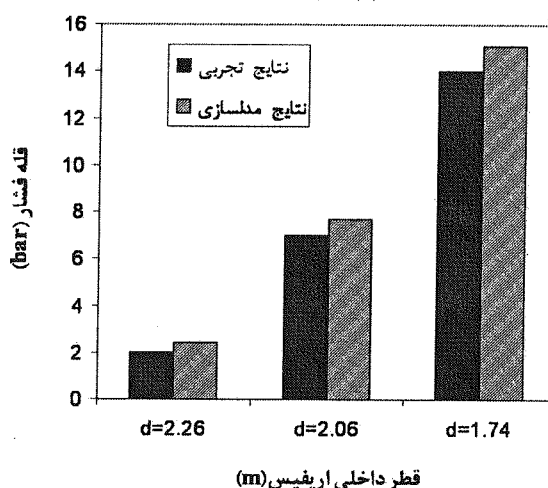
به علت تقارن هندسی لوله، آن را یک نیمه استوانه در نظر گرفته و سطح تخت آن با شرایط مرزی متقارن معرفی گردید. یک طرف لوله به عنوان شرایط مرزی دهانه باز (Opening) با فشار اتمسفری و طرف دیگر یک دیواره آدیاباتیک فرض شد. شرایط اولیه در فضای محاسباتی برای مخلوط استوکیومتری پروپان به صورت زیر لحاظ گردید:



شکل (۷): حرکت شعله در طول لوله انفجار در موردی که قطر داخلی اریفیس برابر با ۲/۲۶ m است.



شکل (۹): تغییرات فشار در لوله انفجار بدست آمده توسط CFD



شکل (۸): داده‌های تجربی و نتایج مدلسازی برای قله فشار بر

حسب قطر داخلی اریفیسها در لوله حاوی مخلوط پروپان-هوا در شکل ۸، نتایج آزمایشات تجربی انجام شده به همراه نتایج شبیه‌سازی ارائه و مقایسه شده است. از این نتایج معلوم می‌شود که قله فشار انفجار می‌تواند بسیار بیشتر از فشار نهایی در انفجار حجم ثابت (۸-۹) باشد. علت این امر از پیش فشردگی گاز سوخته است. گاز سوخته می‌تواند بخاطر انبساط گازهای سوخته فشرده شود و در نتیجه فشار اولیه‌ای بیشتر از فشار محیط خواهد داشت که این باعث ایجاد فشارهای محلی بزرگتر از ۸-۹ bar خواهد شد. در شکل ۹ تغییرات فشار نسبت به زمان در هر سه هندسه نشان داده شده است.

۴- نتیجه گیری

پخش اتمسفری گاز و انفجار آن، نیاز به شناخت پدیده‌های پیچیده مربوط به جریان‌های واقعی (با حضور مانع و ایجاد اغتشاش) دارد. شبیه‌سازی انجام شده نشان می‌دهد که می‌توان از نتایج CFD بجای انجام آزمایشات با هزینه بالا بهره جست. به کمک آنالیز CFD می‌توان سطوح هم مقدار گاز را تعیین نموده و محدوده خطر برای گازهای سمی و یا محدوده انفجار برای گازهای آتش‌زا را تعیین نمود.

نسبت انسداد پارامتر مهمی است که تأثیر قابل توجهی روی فشار انفجار دارد. درجه انسداد بالا به علت تراکم موانع، معمولاً یکی از مشخصه‌های واحدهای شیمیایی است که با مواد اشتعال پذیر سروکار دارند. با افزایش این نسبت، سطح تهویه کاهش و سرعت جریان افزایش خواهد یافت. افزایش سرعت سوختن باعث بالا رفتن فشار انفجار خواهد شد. برخورد شعله با موانع باعث ایجاد اختلاط شدید و در نتیجه احتراق متلاطم در ناحیه شعله می‌شود.

Leung, M. K. H., Liu, C., Chan, A. H. S., Leung, D. Y. C., Yam, W. C., Ng, S. P. and Vrijmoed, L. L. P., "Prediction of transient turbulent dispersion by CFD-statistical hybrid modeling method", Atmospheric Environment 39 6345-6351 2005.

Dharmavaram, S. R. and Hanna, O. R., "Consequence analysis - Using a CFD model for industrial sites", American Institute of Chemical Engineers Process Safety Progress, 2005

SDavies, M. E. and Singh, S., "The phase II trials: a data set on the effect of obstructions", J. Hazard. Mater. 11, 301-323, 1985

Rottman, J. W., Simpson, J. E., Hunt, J. C. R. and Britter, R. E., "Unsteady gravity current flows over obstacles: some observations and analysis related to the phase II trials", J. Hazard. Mater. 11, 325-340, 1985

Brighton, P. W. M., "A user's critique of the Thorney Island dataset", J. Hazard. Mater. 16, 457-500, 1987

Nielsen, M., "Dense gas field experiments with obstacles", J. Loss Prevent. Process Ind. 4, 29 34 1991.

ANSYS Company, CFX-10 Solver Theory Manual CFX Ltd., Oxfordshire, pp. 57 96 2005

McQuaid, J. and Roebuck, B., "Large scale field trials on dense vapor dispersion", Report No. EUR 10029 (EN) pp. 200-204 and 262-267, 1985.

CCPS, "Consequence Analysis of Chemical Releases", AIChE, New York, pp. 80 83 1999.

در پایان خاطر نشان می‌گردد که کدهای CFD ابزار قدرتمندی در شبیه سازی فرایندهای فیزیکی پیچیده بوده و با ارائه نتایج دقیق و همه جانبه، می‌تواند به عنوان یک روش مؤثر در کاربردهای آنالیز کمی ریسک به کار گرفته شود.

۵- علائم و نشانه ها

| | | | |
|-----------|--|-----------|--------------------------------------|
| U | بردار سرعت | BR | نسبت انسداد |
| Z | جهت قائم | m_i | شدت جریان جرم ورودی |
| Z_0 | ارتفاع مرجع | P | فشار استاتیک |
| λ | پارامتر بدون بعد مورد استفاده در پروفیل سرعت | Q_i | شدت جریان متغیر جرم ورودی |
| ρ | دانشیته | Q_{req} | بار حرارتی مورد نیاز برای تولید جرقه |
| t | | | زمان |
| u_z | | | سرعت باد در ارتفاع Z |
| u_0 | | | سرعت باد در ارتفاع مرجع |

۶- مراجع

- Turner, D. B., "Workbook of atmospheric dispersion estimates: An introduction to dispersion modeling", 2nd ed., Lewis Publishers, Raleigh, NC, 1994 [۱]
- Hanna, S. R., Drivas, P. J. and Chang, J. C., "Guidelines for use of vapor cloud dispersion models", 2nd ed., AIChE Center for Chemical Process Safety, New York, NY, 1996. [۲]
- Hanna, S. R. and Britter, R. E., "Wind flow and vapor cloud dispersion at industrial and urban sites", AIChE Center for Chemical Process Safety, New York, NY, 2002. [۳]
- Lees, F. P., "Loss Prevention in the Process Industry", 2nd ed., Butterworths/ Heinemann, Oxford, pp 15 and 167, 1996 [۴]
- Global Explosion Consultants
<http://www.gexcon.com/index.php/> [۵]
- Faisal I. Khan, S.A. Abbasi, "DOMIFECT (DOMIno eFFECT): user-friendly software for domino effect analysis", Environmental Modelling & Software 13 (1998) 163-177. [۶]
- E. Salzano, F.S. Marra, G. Russo, J.H.S. Lee, "Numerical simulation of turbulent gas flames in tubes", J. Hazard. Mater. A95 (2002) 233-247. [۷]
- ساوین، محمد رضا؛ مدلسازی عددی انفجار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی مکانیک، زمستان ۷۹. [۸]
- "Tracking and predicting the atmospheric dispersion of hazardous material releases Implications for homeland security", The National Academies Press, Washington, DC, 2003 [۹]
- Proc 8th Ann George Mason University Conf on Transport and Dispersion Modeling, Meeting Agenda, Fairfax, VA, July 13-14 2004 [۱۰]
- Sklavounos, S. and Rigas, F., "Validation of turbulence models in heavy gas dispersion over obstacles", Journal of Hazardous Materials A108, 9-20, 2004 [۱۱]
- Xiaomin, X. H., Zhen, W. Jiasong, "The impact of urban street layout on local atmospheric environment", [۱۲]