

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و سوم، شماره هشت، آبان ماه ۱۴۰۰ (۱۸۴-۱۶۹)

## بررسی و مقایسه آزمایش‌ها و مدل‌های ریاضی انتشار گازهای سنگین

نرجس همتی علم<sup>۱</sup>

اسلام کاشی<sup>۲\*</sup>

[kashi@irost.ir](mailto:kashi@irost.ir)

راضیه حبیب پور قراچه<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۵/۸/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۸/۴/۵

### چکیده

**زمینه و هدف:** رهایش و پراکندگی ابر گازهای سمی و آتش گیر در جو یکی از حوادث حائز اهمیت در ایمنی فرآیندهاست. پیش بینی نحوه انتشار گازها پس از رهایش آن‌ها به عنوان یک حادثه خطر زا برای جمعیت‌های انسانی مجاور صنایع یا محیط زیست برای کاهش خسارات ناشی از آن دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. آنالیز ریسک معمولاً با نرم افزارهایی که بر پایه آزمایش‌های تجربی و روش‌های ریاضی استوارند، انجام می‌شوند.

**روش بررسی:** برای به دست آوردن مدل‌ها و ارزیابی مدل‌های ارائه شده چندین آزمایش در تحقیقات مختلف انجام گرفته است. آزمایش‌های انجام یافته در زمینه انتشار گاز را می‌توان به دو دسته اصلی آزمایش‌های میدانی و آزمایش‌های در تونل باد تقسیم بندی کرد. از جمله آزمایش‌های میدانی مهم می‌توان به آزمایش‌های Kit Fox، Thorney Island، Coyote اشاره کرد. آزمایش‌های گروه EMU، PREP از جمله آزمایش‌های صورت گرفته‌ی مهم در تونل باد می‌باشند. در بسیاری از موارد به دلیل آن‌که حادثه بیشتر در فضای باز رخ می‌دهد، بررسی انتشار گاز در فضای باز بدون حضور مانع و یا در حضور مانع به نمایندگی از ساختمان‌ها و تجهیزات فرآیندی انجام یافته است. در برخی از مطالعات نیز انتشار گاز در فضای بسته و ساختمان‌های بزرگ صورت گرفته است. در مدل سازی انتشار گاز، ابتدا مدل‌های ساده با عنوان مدل‌های جعبه ای، مدل‌های پلوم پایدار، مدل‌های انتگرالی و بعد مدل‌های پیشرفته‌تر مانند مدل‌های لاگرانژی و مدل‌های لاگرانژی گوسی ارائه شده است. در سال‌های اخیر نیز استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی مورد توجه است. مدل‌های RANS، LES و DNS از جمله مدل‌های بکار برده شده در روش CFD می‌باشند.

**یافته‌ها:** گازها و سناریوهای رهایش گوناگونی در کارهای یاد شده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. از دیگر موارد تاثیر گذار بر انتشار گاز می‌توان به توپوگرافی محل رهایش و بستر انتشار گاز اشاره کرد که در آزمایش‌ها و شبیه سازی‌های عددی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۱- دانشجوی دکتری، پژوهشکده فناوری های شیمیایی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران.

۲- استادیار مهندسی شیمی، پژوهشکده فناوری های شیمیایی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران. \* (مسئول مکاتبات)

۳- استادیار شیمی فیزیک، پژوهشکده فناوری های شیمیایی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران.

**بحث و نتیجه گیری:** در زمان استفاده و استناد به آزمایش‌ها و مدل‌های ارائه شده، تا حد ممکن بایستی شرایط سناریو با آزمایش و مدل نزدیک باشد. از این شرایط می‌توان به نوع گاز، بستر انتشار گاز، نحوه برون‌ریزی و نشت گاز (آنی یا پیوسته) و شرایط محیطی دیگر اشاره کرد.

**واژه‌های کلیدی:** انتشار گاز سنگین، مدل‌های انتشار گاز، آزمایش‌های انتشار گاز، مدل‌های اغتشاش، CFD.

# Investigation of Field Experiments and Mathematical Models for Heavy Gas Dispersion

Narjes Hematiam<sup>1</sup>

Eslam Kashi<sup>2\*</sup>

[kashi@irost.ir](mailto:kashi@irost.ir)

Razieh Habibpour<sup>3</sup>

Admission Date: June 26, 2019

Date Received: November 12, 2016

## Abstract

**Background and Objective:** Release and dispersion of toxic and flammable gases in atmosphere is one of the most important incident in safety of the processes. Risk analysis with the aim of prevention from harm and damage usually carries out by software packages, which are based on the field experiments and mathematical models.

**Material and Methodology:** In order to derive dispersion models and evaluate existing models, some different experiments are done. Experiments of the gas release and gas dispersion are in two categories, experiments which took place in wind tunnels and which are field experiments. Kit Fox, Thorney Island and coyote are some of the most famous field experiments. PERP group and EMU tests are major experiments in wind tunnels. In many of studies, gas dispersion was investigated in the open places in absence or presence of obstacles because most of the industrial accident happens in open places. Others are also taking place in indoors and large buildings. Early, simple models such as box models, steady state plume and integral models were proposed. Thereafter, group models like Lagrangian models and Lagrangian- Gaussian models were evinced. One of the other approach is using more complex and computational methods. Fluid dynamics methods are designed and developed for this purpose. The models of the heavy gas dispersion can be categorized to four major group. The first is simple and experimental models. intermediate and integral or shallow layer models include box models, steady state / general steady state plume models, one dimensional integral models is located in the next. The third group is advanced and lagrange models. The last and latest models are computational fluid dynamic models: RANS, LES and DNS

**Findings:** Different gases, distinct release scenarios are studied in researches. As another effective parameter on the path of gas dispersion, topology of release location can be mentioned which is investigated in field experiments and simulations.

**Discussion and conclusions:** in order to use and refer the field experiments and models as an evaluation, desired scenarios' condition should be as close as possible to the models or experiments'

---

1- Ph.D. Student, Iranian Research Organization for Science and Technology

2- Assistant Professor in Chemical Engineering, Iranian Research Organization for Science and Technology.

\*(Corresponding Author)

3- Assistant Professor in Physical Chemistry, Iranian Research Organization for Science and Technology

condition. These conditions could be such as type of gas, terrain and topology of release path, puff or plume release and other environment and physical conditions.

**Keywords:** Heavy gas dispersion, Dispersion models, Turbulence models, Field experiment, CFD.

#### مقدمه

در این مقاله به بررسی و مرور اجمالی آزمایش‌های میدانی و تونل باد که برای فراهم سازی داده‌های مناسب برای مدلسازی و ارزیابی مدل‌ها انجام یافته‌اند، پرداخته شده است. گازهایی که در آزمایش‌های و شبیه سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته اند، و نیز سناریوهای متفاوتی که لحاظ شده‌اند، ارائه گردیده و مدل‌های ریاضی و محاسباتی که برای انتشار گاز و پیش بینی رفتار گاز به کار برده می‌شوند نیز به صورت کلی توضیح داده شده است. در نهایت مقایسه ای بین آزمایش‌های مختلف و مدل‌های ریاضی ارائه شده صورت گرفته است.

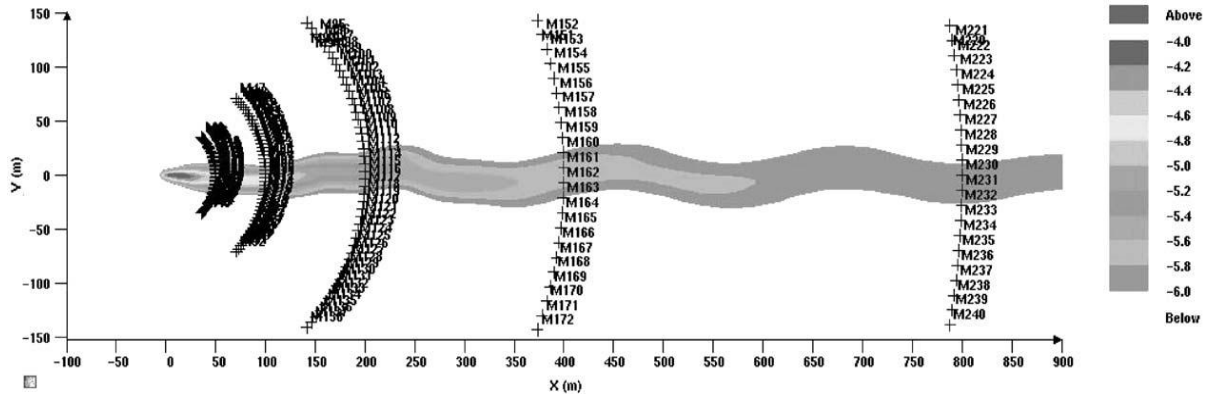
#### ۱- آزمایش‌های تجربی انجام یافته برای رهایش گاز

آزمایش‌های بسیاری برای بررسی معادلات و شرایط انتشار گازهای سنگین انجام گرفته است. بخشی از این آزمایش‌ها در تونل باد و فضای آزمایشگاهی (۱۱-۱۳) و برخی دیگر در فضای میدانی انجام یافته است. در کنار آزمایش‌های انجام شده در تونل‌های باد چند آزمایش دیگر در فضاهای میدانی به صورت طبیعی تر انجام گرفته است که می‌توان به آزمایش‌های Kit, Thorney Island, Coyote, Prairie Grass و EMU-L اشاره کرد (۱۴):

#### Prairie grass

آزمایش‌های میدانی<sup>۲</sup> Prairie grass، که توسط باراد<sup>۴</sup> در سال ۱۹۵۸ در سه جلد گزارش گردید (۱۵)، به عنوان پایگاه داده استاندارد برای ارزیابی مدل‌های رهایش پیوسته در نزدیکی سطح زمین و بر روی بستر مسطح شناخته می‌شود (۱۴). رهایش در این سری از آزمایش‌ها، تقریباً در سطح زمین انجام شده است (۱۵). در شکل ۱ نمایی از قرارگیری دستگاه‌های اندازه گیری نسبت به محل رهایش نشان داده شده است (۱۴).

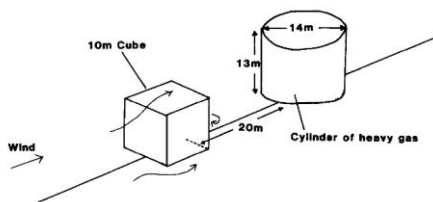
رهایش گازها و بخارات خطرناک می‌تواند برای جمعیتی که در مجاورت صنایع یا محل انبار مواد حضور دارند، تهدید سختی باشد (۱). پیامدهای ناشی از پخش مواد سمی، چه این امر ناشی از حوادث صنعتی باشد و چه در نتیجه یک حمله‌ی تروریستی، دارای اهمیت می‌باشند (۲). آنالیز ریسک با هدف جلوگیری از ضرر و زیان، نیازمند مدلسازی انتشار گازها و پیش بینی رفتار آنهاست. یکی از روش‌های مدلسازی نحوه پخش گازها استفاده از مدل‌های تجربی است. راه دیگر استفاده از روش‌های محاسبات عددی است که از ابزارهای طراحی شده برای دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> CFD برای این منظور می‌توان استفاده کرد. بدین منظور تا کنون در تحقیقات مختلف آزمایش‌هایی در تونل باد و نیز آزمایش‌های میدانی زیادی انجام یافته است. برای انتشار گاز ابتدا مدل‌های ساده تر با عنوان مدل‌های جعبه‌ای<sup>۲</sup> طراحی شده اند که در میان این روش‌ها می‌توان مدل SLAB و DEGADIS که در بحث آنالیز ریسک به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند اشاره کرد (۳). در بسیاری از موارد بررسی انتشار گاز به دلیل احتمال بیشتر رخ دادن حادثه در فضای باز، در فضای باز بدون حضور مانع و یا در حضور مانع (۴) به نمایندگی از ساختمان‌ها و تجهیزات فرآیندی انجام گرفته است (۱، ۵-۷)، در برخی از بررسی‌ها انتشار گاز در فضای بسته صورت گرفته است (۸). گاز سنگین، گازی است که به دلیل وزن مولکولی یا دما از هوای محیط سنگین تر باشد. در حقیقت یک گاز با وزن مولکولی سبک‌تر از هوا می‌تواند به عنوان گازی که از هوای اطراف سنگین تر است، رفتار کند که از آن سردتر باشد (۹) یا در فشاری بالا ذخیره شده باشد مانند گاز آمونیاک و یا بعد از رهایش در جو با بخارات و گازهای موجود در هوا واکنش داده و گازی سنگین تشکیل دهد مانند هیدرو فلورید (۱۰، ۱۱).



شکل ۱- محل قرار گیری دستگاه‌های اندازه گیری در آزمایش Prairie Grass در فاصله‌های ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ متری از محل رهایش (۱۴)

Figure 1. Locations of five arcs of measurement ( $x=50, 100, 200, 400,$  and  $800$  m) in the Prairie Grass experiment

مخلوط گازهای  $CCl_2F_2$  و نیتروژن با حجم  $2000 \text{ m}^3$  از یک مخزن سیلندر شکل (۱۲ وجهی) استفاده شد (۱۸). یکی دیگر از جنبه‌های این آزمایش‌ها تفاوت انتشار ابر گاز و بخارات ناشی از تبخیر از یک استخر بوده است. در آزمایش‌هایی که پیش از آن صورت گرفته بود، رهایش پیوسته شامل نشت گاز مایع شده، مورد بررسی قرار گرفته بود (۲۰). نمایی از فاز دوم این آزمایش در شکل ۲ آمده است. داده‌های این آزمایش‌ها برای اعتبار سنجی مدل‌های ریاضی و دینامیک سیالات محاسباتی و کالیبراسیون نتایج حاصل در تونل باد مورد استفاده قرار گرفته است (۱، ۴، ۶، ۲۱ - ۱۹).



شکل ۲- نمایی از فاز دوم آزمایش در Thorney Island (۲۱)

Figure 2. Scheme of 2<sup>nd</sup> phase of the Thorney Island experiment

آزمایش‌های Kit Fox در سال ۱۹۹۵ در سایت آزمایشی نوادا به منظور ارزیابی و توسعه نسخه جدید HEGDAS3+ انجام گرفت (۱۹). به منظور شبیه سازی میزان زبری سطح مشابه شرایط تاسیسات کارخانجات شیمیایی، دو سری زبری سطح

Coyote سری آزمایش‌های Coyote توسط آزمایشگاه LLNL<sup>۱</sup> و NWC<sup>۲</sup> در منطقه NWC<sup>۳</sup> در ایالت کالیفرنیا آمریکا در سال ۱۹۸۲ انجام شد. هدف از انجام این آزمایش‌ها تعیین انتقال و انتشار بخارات LNG و نیز بررسی احتمال خسارت و خطر ابر آتش بوده است. این آزمایش‌ها شامل ریزش حجم بزرگی از میعانات گازی و انتشار ابر بخارات آن در جو بوده است. سری آزمایش‌های Coyote در ۱۰ آزمایش با حجم ریزش بین ۱۴/۶ تا ۲۸ مترمکعب انجام شده است. این ریزش در یک حوض با قطر ۵۸ m از جنس آسفالت با عمق کم برای محدود کردن حضور LNG در سطح آب بوده است. بعد از زمان مشخصی از آغاز رهایش بخارات، جرقه زده شد و شدت تشعشع، سرعت شعله و اطلاعات ازدیاد فشار از تعدادی سنسور که در مکان‌های مختلف میدان قرار داده شده اند، به دست آمده است (۱۶). از این آزمایش‌ها داده‌های کافی برای شبیه سازی و محاسبات ریاضی به دست آمده است (۱۷).

### Thorney Island

آزمایش‌های مربوط به Thorney Island از سال ۱۹۸۲ تا ۱۹۸۴ در دو فاز صورت گرفت در فاز اول این سری از آزمایش‌ها رهایش ناگهانی و انتشار گاز سنگین در محیطی یکنواخت و در فاز دوم رهایش و انتشار گاز سنگین در حضور موانع گوناگون مورد مطالعه قرار گرفت (۱۸). در این آزمایش‌ها از

1- Lawrence Livermore National Laboratory  
2- NavalWeapons Center  
3- NavalWeapons Center (NWC) at China Lake

مربوط به نحوه انتشار گازهای سنگین در بسترهای زیر در تونل باد ابتدا توسط پترسون و در دهه ۹۰ میلادی آغاز شد (۱۳).

#### EPA FMF

سنایدر<sup>۵</sup> تحقیقات خود را در تونل باد EPA FMF و در زمینه بررسی طول زبری موثر  $Z_0$  که توسط اشکال مختلف هندسی ایجاد می‌شوند، انجام داد (۲۳). نتیجه نهایی این آزمایش این بود که اگر عمق نفوذ پلوم گاز در مقایسه با ارتفاع المان‌های سازنده زبری بیشتر باشد، تاثیر زبری را می‌توان تنها با یک متغیر  $Z_0$  در نظر گرفت، اما اگر المان‌های زبری در منطقه ای بسیار متراکم باشند، مانند جنگل یا مکان‌هایی که در آن ساختمان‌ها زیاد و نزدیک به هم هستند، پارامتر دوم، ارتفاع جایگزین، مورد نیاز است (۲۲). از نتایج این آزمایش در طراحی موانع آزمایش Kit Fox و دیگر آزمایش‌های گروه PREP استفاده شد (۲۳).

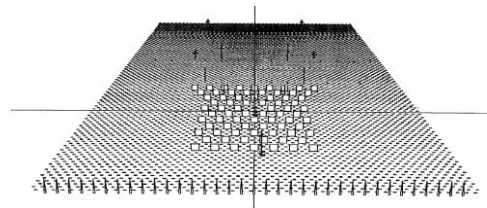
#### En Flo

در دانشگاه سوری<sup>۶</sup> گروه EnFlo آزمایش‌هایی را با توجه به بدترین شرایط آب و هوایی در تونل باد انجام دادند. آزمایش‌های این گروه شامل رهایش پیوسته در شرایط جوی پایدار یا خنثی و در حضور باد ملایم بود (۲۳). در طول زمان هر تست در حدود ۱۵ نمونه از هوا گرفته شده است. گازی که برای ردیابی مورد استفاده قرار گرفته مخلوطی از پروپان و دی اکسید کربن بوده است. رابطه و وابستگی پارامترهای گوناگون انتشار گاز سنگین مانند عدد ریچاردسون،  $Ri^*$ ، سرعت اصطکاکی  $u^*$ ، نسبت سرعت انتشار  $W_0/u^*$  در دوسری آزمایش در شرایط جوی پایدار و خنثی در بستر انتشار زیر، بررسی و با نتایج حاصل از روابط تجربی مقایسه شده است (۲۴).

#### CHRC

گروه دیگری که انتشار گاز سنگین در بستر زیر را در تونل باد بررسی کردند، گروه CHRC<sup>۷</sup> در دانشگاه کانزاس<sup>۸</sup> ایالت متحده امریکا بودند. تونل مورد استفاده توسط این گروه نسبت به تونل باد گروه‌های همکار دارای مشخصات منحصر به فرد، از

برای این آزمایش‌های طراحی شده بود. در سری اول صفوف یکنواخت زبری URA که منطقه ای به مساحت  $120\text{ m}$  در  $314\text{ m}$  را تحت پوشش قرار داده بود، که زبری سطحی با طول  $1$  تا  $2$  سانتیمتر ایجاد شده بود. سری دوم که مساحتی در حدود  $39\text{ m}$  در  $85\text{ m}$  را شامل می‌شدند به نام مدل هم ارز زبری ERP<sup>۱</sup> بود که دارای طول زبری معادل  $0.12$  تا  $0.24$  متر بود. منبع رهایش گاز سنگین  $\text{CO}_2$  در مرکز مساحت پوشش داده شده با ERP، قرار داده شد. در این سری آزمایش‌های رهایش برای بررسی مدل انتشار گاز در حالت آبی و پیوسته، با متغیر بودن زمان رهایش از  $20\text{ s}$  برای آبی و  $120$  -  $360$  برای حالت پیوسته و در حضور زبری URA و هر دو زبری URA و ERP انجام شد. گستره وسیعی از داده آزمایشی در شرایط آب و هوایی، شدت جرمی رهایش و طول زمان رهایش را مهیا ساخت. در شکل ۳ نمایی از چینش موانع در حالت URA+ERP آورده شده است (۲۲).



شکل ۳- نمایی از چینش موانع ERA+URA در

#### آزمایش Kit Fox (۲۲)

Figure 3. obstacle arrangement ERA +URA in Kit Fox experiment

#### PERF

آزمایش‌های PERF<sup>۲</sup> در چند تونل باد جداگانه در بین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۷ انجام شد. گروه‌های مختلفی در این طرح شرکت کردند، از جمله این گروه‌ها می‌توان به دپارتمان انرژی ایالات متحده DOE<sup>۳</sup> و آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده امریکا EPA<sup>۴</sup> اشاره کرد (۲۷). تفاوت اصلی این سری آزمایش با موارد مشابه در گذشته، سطح زیر آن بود، زیرا در دیگر آزمایش‌ها سطح بستر صاف بوده است (۲۳). بررسی‌های

5- William H. Snyder

6- University of Surrey

7- The Chemical Hazards Research Center (CHRC)

8- The University of Arkansas

1- Equivalent Roughness Pattern

2- The Petroleum Environmental Research Forum

3- The U.S. Department of Energy

4- The U.S. Environmental Protection Agency

چیدمان آرایه‌های موانع به صورت جفت عددی به شکل X-Y نشان داده می‌شود که X بیان‌کننده نسبت عرض موانع به ارتفاع موانع و Y نشان‌دهنده نسبت فاصله موانع به ارتفاع می‌باشد (۲۳).

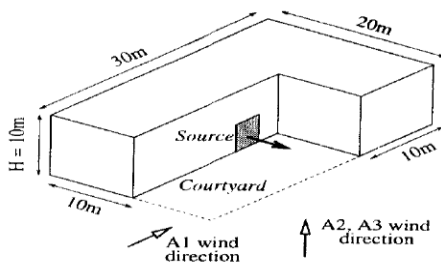
جمله امکان فراهم کردن سرعت پایین باد در حد  $0.2 \text{ m/s}$  و عرض بسیار وسیع و جریان از طریق فشار مثبت بر هوای ورودی، بوده است (۱۳). در جدول ۱، مشخصات کلی سه گروه آزمایشی CHRC، FMF و En Flo آورده شده است. مدل

جدول ۱- مشخصات کلی سه گروه CHRC، FMF و En Flo (۱۳)

Table 1. Characteristics of CHRC, FMF and En Flo

EnFlo	FMF	CHRC	
۲۰/۳,۵/۱,۵	۱۸/۳,۷/۲,۱	۲۴و۶,۱و۲,۱	ابعاد (ارتفاع/عرض/طول برحسب متر)
از طریق مکش	از طریق مکش	از طریق فشار	روش ایجاد جریان
۱۲-۴/۲ cm	۱۲-۴/۰/۸۵cm	۸-۱/۳/۸ cm	طول زبری/ مدل آرایه موانع

ارزیابی اعتبار مدل‌سازی‌های رایانه‌ای در اتحادیه اروپا<sup>۴</sup> مطرح شد (۲۵). این پروژه شامل آزمایش‌هایی در تونل باد، اجرای مدل‌ها و ارزیابی آن‌ها بوده است. یکی از مشهورترین آزمایش‌های این پروژه، EMU L-shaped است. در سناریوهای این آزمایش گاز سنگین کلر در یک ساختار به شکل L از محل تعریف شده به عنوان درب (شکل ۵) رها شده است (۲۶). شرایط پایداری جوی خنثی و سرعت باد متوسط  $5 \text{ m/s}$  در ارتفاع  $10 \text{ m}$  برای این آزمایش‌های در نظر گرفته شده است و برای اعتبار سنجی شبیه‌سازی‌های انتشار گازهای سنگین و نیز انتشار آلودگی‌ها در فضاهای شهری مورد استفاده قرار گرفته است (۱۴، ۲۷).



شکل ۵- نمایی از هندسه مورد مطالعه در EMU L-shaped

(۲۶) shaped

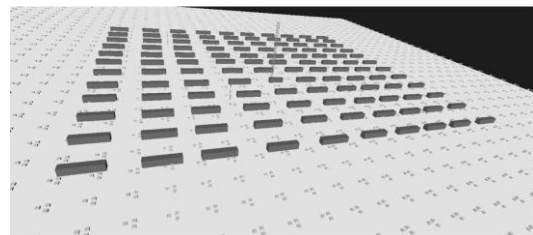
Figure 5. Building scheme as a case study in EMU L-shaped

در جدول ۲ لیستی از آزمایش‌های میدانی و تونل باد، و نیز لیستی از کارها و مقالات انجام شده بر اساس آزمایش‌های

4- European Union

### MUST

آزمایش<sup>۱</sup> MUST یک آزمایش میدانی بود که در صحرای داگوی<sup>۲</sup> انجام شد. در آن آزمایش ۳۷ بار رهایش گاز پروپیلن بر روی ۱۲۰ موانع صورت گرفت. اندازه موانع مانند ماشین‌های تریلر (با عرض  $2/42 \text{ m}$  و طول  $12/2 \text{ m}$  و ارتفاع  $2/54 \text{ m}$ ) بود و به صورتی که در شکل ۴ نشان داده شده است، چیده شده بودند. داده‌های مربوط به اندازه سرعت باد به صورت میانگین چهار دستگاه اندازه‌گیری در ارتفاع ۶ متری از زمین در نزدیکی گوشه ردیف موانع و برابر با  $3 \text{ m/s}$  گزارش شده است. داده‌های مربوط به میزان گاز رها شده، در فاصله‌های ۲۵، ۶۰، ۹۵ و ۱۲۰ متری جمع‌آوری شده است (۱۴).



شکل ۴- فرمت چینش ۱۲۰ مانع در آزمایش MUST

(۱۴)

Figure 4. Locations of 120 obstacles in MUST EMU L-shaped

مطالعات ارزیابی عدم قطعیت مدل (EMU<sup>۳</sup>) به عنوان پروژه-ای برای طراحی یک دستورالعمل برای یکسان‌سازی روند

- 1- The mock urban setting test
- 2- The Dugway Proving Ground desert site
- 3- The evaluation of model uncertainty

Island برای مدل سازی و اعتبار بخشی به شبیه سازی انتشار ناگهانی حجم زیادی از گاز، مرجع مناسبی است. آزمایش Kit Fox با ارائه داده های لازم در مورد انتشار گاز در هندسه ای مشابه با محیط های صنعتی و همچنین رهایش آبی و پیوسته، برای شبیه سازی و اعتبار سنجی مدل ها در زمینه انتشار در محیط هایی با وجود موانعی نظیر ساختمان ها و تجهیزات صنعتی پایگاه داده قابل اعتماد و اتکایی است.

انتشار گازهای سنگین آورده شده است. تعداد داده های کافی و معتبر و نزدیکی شرایط آزمایش با مدل برای اعتبارسنجی دارای اهمیت می باشد. با توجه به مطالعه و بررسی انجام شده در مورد آزمایش های میدانی و تونل باد در زمینه انتشار گازهای سنگین که در بالا به آن پرداخته شد، آزمایش های متاخر گروه PERP و آزمایش های EMU در تونل باد و آزمایش های میدانی Kit Fox و Thorney Island قادر به فراهم کردن پایگاه داده گسترده و مناسبی هستند. آزمایش Thorney

### جدول ۲ - آزمایش های انجام شده و مورد استناد

Table 2. Cited experiments and citations

مورد استفاده برای ارزیابی در منابع	منبع	سال انجام		
(۲۸, ۱۹, ۱)	(۱۸)	۱۹۸۴-۱۹۸۲	TI	تجربیات میدانی
(۲۹, ۱۷)	(۱۶)	۱۹۸۱	coyote	
(۷, ۲۸, ۱۴)	(۳۰)	۱۹۹۵	kit fox	
(۳۳, ۳۲)	(۳۱)	۱۹۸۳	Desert Tortoise	
	(۳۴)	۱۹۹۵-۱۹۹۳	FLADIS	
(۱۴)	(۱۵)	۱۹۵۸	PRAIRIE GRASS	
	(۳۵)	۱۹۸۳	Eagle	تجربیات آزمایشگاهی - تونل باد
(۲۷, ۱۴)	(۲۵)	۱۹۹۷	EMU	
	(۳۶)	۲۰۰۵	CHRC	
(۳۸)	(۳۷)	۱۹۹۱	BA-Hamburg	
	(۳۹)	۱۹۹۱-۱۹۸۸	WSL	
	(۲۴)	۱۹۹۵	EnFlo	
	(۲۳)	۱۹۹۵	EPA FMF	

### گازهای به کار رفته در شبیه سازی ها

فرآیند و جوشش استخری، تغییر فاز ناگهانی و انفجار در مورد این ترکیب گازی به صورت شبیه سازی و یا آزمایش تجربی مطالعه شده است (۴۱، ۴۲). به این دلیل که به دلایل اقتصادی، آسانی نقل و انتقال پایانه های توزیع LNG در حال توسعه هستند، اهمیت ایمنی در طی فرآیند تولید، ذخیره سازی، انتقال و پایانه های توزیع آن بسیار بالا است. بدین جهت LNG نیز بخش قابل توجهی از مطالعات انتشار گاز سنگین را به خود اختصاص داده است (۴۳، ۴۴).

گازهای دارای اهمیت در شبیه سازی رهایش گازها و بررسی پیامدهای ناشی از پخش گاز را می توان به سه دسته اصلی تقسیم نمود: گازهای قابل اشتعال و آتش گیر، گازهای سمی، دی اکسید کربن. تعدادی از مقالات به بررسی انتشار گازهای آتش گیر و پس از آن مطالعه سوختن و یا انفجار آن پرداخته اند (۹). پیش بینی و تجزیه تحلیل خطر در ارتباط با بخار LNG در تعدادی از مقالات بررسی شده است، مخاطرات و پیامدهای ممکن در زمان انتقال (۴۰)، رهایش در زمان



مورد بررسی قرار گرفته در شبیه‌سازی‌ها و منابع آورده شده است. در جدول (۴) سناریوها و حوادث مورد مطالعه لیست شده است.

#### جدول ۴- تنوع حوادث و سناریوهای بررسی شده

Table 4. Different investigated scenarios and accident

منبع	حادثه
(۹, ۱)	رهایش ناگهانی گاز
(۵۳, ۵۴)	نفوذ از زیر زمین
(۵۲, ۴۸, ۳۳)	پارگی لوله
(۵۶)	سرریز از تانک ذخیره
(۵۴, ۵۰, ۳۶, ۷)	نشت از تانک

#### مدل‌های انتشار گاز

مدل‌های ریاضی متناسب به انتشار گازهای سنگین، در روش‌های توصیف پدیده فیزیکی و شیمیایی - که در طول زمان انتشار ابر گاز رخ می‌دهد- متفاوت بوده و با توجه به نوع رهایش (ناگهانی یا پیوسته)، داده‌ها، منابع محاسباتی و قدرت محاسباتی کامپیوتری نمایش متفاوتی برای کاربران دارند (۱۰). توانایی و محدودیت مدل‌ها بر روی کاربرد آن‌ها اثرگذار است. مدل‌های انتشار گاز را می‌توان با توجه به مدل ریاضی آن‌ها به چهار دسته اصلی تقسیم کرد:

- مدل‌های ساده و تجربی
- مدل‌های میانه یا مدل‌های انتگرالی و مدل‌های لایه کم عمق: مدل‌های جعبه‌ای، مدل‌های پلوم پایدار<sup>۲</sup>، مدل‌های عمومی پلوم پایدار<sup>۳</sup>، مدل‌های انتگرالی تک بعدی
- مدل‌های پیشرفته و مدل‌های لاگرانژی و مدل‌های لاگرانژی گوسی
- مدل‌های پیچیده و دینامیک سیالات محاسباتی: مدل<sup>۴</sup> RANS، مدل<sup>۵</sup> LES، مدل<sup>۶</sup> DNS

- 2- Steady State plume models
- 3- generalized steady state plume models
- 4- Reynolds-averaged Navier-Stokes
- 5- Large Eddy Simulation
- 6- Direct Numerical Simulation

دی اکسید کربن یک گاز نسبتاً بی‌خطر، به عنوان عامل اصلی پدیده گلخانه‌ای و گرم شدن جو شناخته می‌شود. یکی از روش‌های حذف این گاز از جو استخراج و ذخیره‌سازی آن در مخازن ویژه یا فرآیند<sup>۱</sup> CCS می‌باشد، که به صورت روزافزون مورد توجه قرار گرفته است (۴۵). رها شدن مقادیر بالایی از CO<sub>2</sub> بر محیط و افراد تاثیر گذار است. این گاز می‌تواند با جایگزین هوا شدن در نزدیکی سطح زمین باعث خفگی گردد (۴۶). به همین علت شناخت چگونگی انتشار گاز دی اکسید کربن در رهایش تصادفی یا عمدی در زمان جمع‌آوری، انتقال یا ذخیره این گاز و پیامدهای آن دارای اهمیت می‌باشد (۴۷) از سناریوهای متفاوت بررسی شده می‌توان به نشت از تانک ذخیره‌سازی، نشت از لوله، پارگی لوله در فضای آزاد، زیر خاک و در محیط دریایی اشاره کرد (۴۸). گاز دیگری که بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته است، کلر می‌باشد. انتشار گاز کلر که در صنایع شیمیایی امری ممکن است، می‌تواند باعث ایجاد ترکیبات سمی شده و سلامت افراد را به خطر بیندازد (۲).

#### جدول ۳- تنوع گازهای مورد مطالعه

Table 3. studied gas variety

منابع	نوع گاز
(۱۸, ۴, ۱)	فرئون + نیتروژن
(۵۱, ۵۰, ۸, ۷)	کلر
(۵۴-۵۲, ۴۸, ۳۳)	دی اکسید کربن
(۵۷-۵۵, ۴۴, ۴۱, ۳۶, ۱۷, ۹)	LNG
(۳۴)	آمونیاک
(۳۵)	NOX
(۷)	H <sub>2</sub> S
(۱۵)	SO <sub>2</sub>

دیگر گازی که مورد توجه است، آمونیاک می‌باشد. مطالعه این گاز به دو دلیل اصلی دارای اهمیت است. دلیل اول معمول بودن استفاده از این گاز در صنایع شیمیایی است. دلیل دیگر بسیار سمی بودن، خورنده بودن و قابلیت اشتعال و انفجار آن در شرایط خاص است (۴۹). در جدول (۳) لیستی از گازهای

- 1- The Carbon Capture and Storage

آید(۴۵). زمانی که ابر به اندازه کافی رقیق بشود، نیروی شناوری تقریباً خنثی می‌شود و یک مسیر انتشار هموار مشابه با مدل مسیر ذرات لاگرانژی بدون اثر گرانش به دست می‌آید(۶۰). این مدل‌ها را علاوه بر رهایش گازهای سنگین، برای رهایش‌های حاوی ذرات معلق نیز می‌توان استفاده کرد. این مدل‌ها را می‌توان برای بسترهای پیچیده به کار برد (۴۵).

در گروه مدل‌های پیچیده و مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی، مجموعه کاملی از معادلات دیفرانسیل پاره‌ای وابسته به زمان و سه بعد با در نظر گرفتن قوانین بقای جرم، انرژی و مومنتوم حل می‌شود. این مدل‌ها را می‌توان برای هر سناریوی رهایشی، هر بستر انتشاری و هر شرایط پایداری جوی توسعه داد. مدل‌های این گروه به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند: مدل‌های LES، RANS و DNS (۶۱).

بسیاری از کدهای CFD که تاکنون برای انتشار گازهای سنگین به کار رفته‌اند، از مدل‌های RANS استفاده می‌کنند، که معادلات ناویر-استوکس را برای خواص اصلی جریان سیالات هم زمان با معادلات بقای جرم، انرژی و با فرض یک مدل آشفتگی حل می‌کنند(۱۰). در مدل LES یا شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، معادلات ناویر-استوکس برای جریان‌های متوسط و گردابه‌ها با مقیاس‌های بزرگ که حاوی انرژی هستند حل می‌شوند و اثر مقیاس‌های کوچک بر مقیاس‌های بزرگ مدل سازی می‌شود. شبیه‌سازی رهایش و انتشار ابر گاز سنگین با استفاده از مدل LES توسط موراکامی<sup>۲</sup> و همکارانش تشریح شده است (۶۲). مدل‌های DNS معادلات را با مش ریز و گام زمانی کوچک و بدون فرض مدل آشفتگی k معادلات را حل می‌کنند. DNS مورد استفاده برای انتشار گاز سنگین، در مطالعه‌ای که توسط Hortel و همکاران انجام شده، تشریح شده است (۱۰). از معروف‌ترین مدل‌هایی که خاص شبیه‌سازی رهایش و انتشار گازهای سنگین طراحی شده‌اند می‌توان به مدل‌های HEGADAS<sup>۳</sup> (۶۳)، DEGADIS<sup>۴</sup> (۶۴)، SLAB (۶۵)، FEM3<sup>۵</sup> (۶۷)،

در مدل‌های تجربی و مدل‌های ساده، انتشار ابر گازهای سنگین در جو به صورت روابط ساده یا نمودار بیان شده است (۵۸). این روابط که عموماً بر اساس مطالعات آزمایشگاهی یا میدانی محدود به بسترهای صاف و شرایط پایداری جوی خنثی و یا ناپایداری‌های ملایم می‌شدند. برای به دست آوردن این روابط از شرایط جوی و زبری و سختی سطح صرف‌نظر شده است و تنها رهایش پیوسته با رهایش ناگهانی مورد بررسی و دقت نظر قرار گرفته است (۱۰). اولین مثال از این مدل‌ها را می‌توان در کار Britter و McQuaid (۵۸) مطالعه کرد، اولین برنامه که بر اساس این معادلات منتشر شد<sup>۱</sup> TSCREEN بود. این مدل‌ها را نمی‌توان برای سناریوهایی که شرایط آن‌ها به شرایط فرض شده در استخراج معادلات نزدیک نیست مورد استفاده قرار داد (۱۰).

دومین گروه از دسته معادلات انتشار گازهای سنگین، مدل‌های میانه می‌باشند. این مدل‌های شامل مدل‌های جعبه‌ای، مدل‌های های پلوم پایدار، مدل‌های عمومی پلوم پایدار، مدل‌های انتگرالی یک بعدی و مدل‌های لایه کم عمق می‌باشد. پیشگام این مدل‌سازی‌ها van Ulden بوده است (۵۹). معادلات پایه در این مدل‌ها بر اساس پخش افقی ابر، نفوذ آهسته هوا در ابر و گرم شدن ابر می‌باشد. مدل‌های جعبه‌ای برای سرعت‌های مختلف باد، زبری سطح و شرایط پایداری جوی متفاوت کاربرد دارند. هزینه‌های محاسباتی در این مدل‌ها کم است. این مدل‌ها ابزارهای مناسبی برای مصارف مهندسی، آنالیز خطر، ارزیابی ریسک، ارزیابی صدمات محیط زیستی، برنامه ریزی برای واکنش در شرایط اضطراری می‌باشند (۵۰).

مدل‌های پیشرفته لاگرانژی برای انتشار گازهای سنگین از مدل‌های انتشار آلاینده‌های شناور الگو گرفته‌اند. این مدل‌ها می‌توانند انتشار گاز در رهایش بالاتر و در سطح زمین را مورد بررسی قرار دهند. در این مدل‌ها جرم رها شده از گاز سنگین به عنوان شبه ذره شبیه‌سازی می‌شوند و انتقال و انتشار برای این ذرات به دست می‌آید. جابه‌جایی این ذرات در بازه زمانی با توجه به جریان اصلی (باد)، اغتشاش و چگالی به دست می‌-

2- Murakami

3- Heavy Gas Dispersion from Area Source

4- Dense Gas Dispersion

5- Finite Element Model

1- SCREENing Toxic air pollutant concentration

## نتیجه‌گیری

برای پیش بینی و شناخت رفتار گازهای سنگین در حوادث به مدل‌های انتشار نیاز است. برای به دست آوردن مدل‌های تجربی و نیز ارزیابی و اعتبارسنجی مدل‌های محاسباتی و عددی باید آزمایش‌هایی در این خصوص صورت گیرد. آزمایش‌های بسیاری به صورت میدانی و نیز در تونل‌های باد انجام شده است. این آزمایش‌ها که با هزینه‌های هنگفت انجام گرفته‌اند، پایگاه داده‌ی مناسبی را برای ارائه مدل‌ها و ارزیابی آن‌ها فراهم می‌نمایند. با توجه به این امر که باید شرایط آزمایشی که برای اعتبارسنجی مورد استفاده مدل قرار می‌گیرد به شرایط مدل نزدیک باشد، آزمایش‌های گروه PERP و آزمایش‌های EMU در تونل و آزمایش‌های میدانی Kit Fox و Thorney Island نسبت به دیگر آزمایش‌های دارای اهمیت بیشتری می‌باشند. مدل‌های انتشار گاز سنگین را می‌توان به مدل‌های ساده و تجربی، مدل‌های میانه یا مدل‌های انتگرالی و مدل‌های لایه کم عمق شامل: مدل‌های جعبه‌ای، مدل‌های پلوم پایدار، مدل‌های عمومی پلوم پایدار، مدل‌های انتگرالی تک بعدی، مدل‌های پیشرفته و مدل‌های لاگرانژی و مدل‌های لاگرانژی گوسی، مدل‌های پیچیده و دینامیک سیالات محاسباتی شامل: مدل RANS، مدل LES، مدل DNS طبقه بندی کرد. انتخاب مدل محاسباتی بسته به دقت مورد نیاز پیش‌بینی، نیاز کاربردی (تحقیقاتی یا مهندسی)، امکانات و هزینه محاسباتی انجام می‌گیرد. علاوه بر آن با پیشرفت قدرت محاسباتی در سال‌های اخیر می‌توان در شبیه‌سازی با ابزارهای CFD محیط‌های پیچیده‌تر را به صورت سه بعدی بررسی کرد. نیاز به بررسی و مدل‌سازی شرایط آب و هوایی پیچیده‌تر نیز احساس می‌شود. پیشنهاد می‌شود که در آینده با استفاده از شبیه‌سازی‌های سه بعدی و در نظر گرفتن توپوگرافی دقیق‌تر مسایل نحوه انتشار گاز و در نتیجه پیامدهای آن بهتر و دقیق‌تر تخمین زده شود. برای ارزیابی این شبیه‌سازی‌ها می‌توان از داده‌های آزمایش‌های میدانی در دسترس بهره برد.

GERAS-CO<sub>2</sub>GS (۵۳)، OpenFOAM (۶۶) اشاره کرد.

## مکان‌نگاری و هندسه بستر انتشار گاز

یکی از نکات قابل بحث در زمینه انتشار گاز، زمینه و بستر انتشار آن است. در مطالعات و تجربیات اولیه بستر انتشار صاف و بدون حضور مانع در نظر گرفته می‌شد (۱۵). آزمایش‌های بعدی مانند Thorney Island (۲۰، ۲۱) و Kit Fox (۲۲) انتشار در فضای باز در حضور مانع انجام گرفتند. آزمایش‌ها در تونل باد با پیچیده‌تر کردن موانع مانند EMU-L shaped (۵۱) برای نزدیک کردن شرایط به شرایط واقع در واحدهای صنعتی یا فضاهای شهری همراه بودند. در شبیه‌سازی عددی، در مطالعات ابتدایی نیز بستر انتشار بدون حضور مانع یا مانعی ساده فرض می‌شده است. با کمک CFD می‌توان بسترهای پیچیده را شبیه‌سازی کرد، کاری که پیش‌ترها با مدل‌های انتگرالی سخت و پرهزینه (۴۵) به نظر می‌رسید. با پیشرفت کامپیوترها، کاهش هزینه و زمان محاسبات استفاده از این روش در بسترهای گوناگون رو به فزونی داشته است. انتشار ناشی از رهائش آبی گاز سنگین بر روی بسترهای ساده مانند، بستر تخت همگن، بستر شیب دار، بستر با وجود یک خندق گوه‌ای شبیه‌سازی شده و با یکدیگر مقایسه شدند (۵). به نظر می‌رسد در سرعت‌های بالای باد، زمانی که رهائش آبی یا نیمه پیوسته باشد، توپوگرافی بستر انتشار دارای حداقل اثر است. اما زمانی که سرعت باد در حدود ۳ m/s پایین باشد، توپوگرافی بستر در مسیر باد اهمیت می‌یابد (۳۳). یکی دیگر از مواردی که در آن هندسه بستر انتشار دارای اهمیت می‌باشد، استفاده از موانع فیزیکی به عنوان بازدارنده انتشار و یا کاهش دهنده شدت انتشار گاز می‌باشد (۴۳). محیط‌های شهری و کارخانجات شیمیایی از دسته توپوگرافی‌های پیچیده محسوب می‌شوند (۲۷) که به دلیل اهمیت انتشار گازها به عنوان آلاینده یا ماده سمی، توجه روز افزونی به شبیه‌سازی سه بعدی آن‌ها می‌گردد (۶۷، ۶۸، ۶۸).

9. Cocchi G. Modeling instantaneous heavy gas releases with FDS5. *Fire Safety Journal*. 2014;69:89-98.
10. Markiewicz M. A Review of Mathematical Models for the Atmospheric Dispersion of Heavy Gases. Part I. A Classification of Models. *Ecological Chemistry and Engineering S*. 2012;19(3):297-314.
11. Hanna S, Drivas P, Chang J. Guidelines for use of vapour cloud dispersion models. CCPS, AI Ch. E., New York; 1996.
12. Havens J. Review of dense gas dispersion field experiments. *Journal of loss prevention in the process industries*. 1992;5(1):28-41.
13. Briggs G, Britter R, Hanna S, Havens J, Robins A, Snyder W. Dense gas vertical diffusion over rough surfaces: results of wind-tunnel studies. *Atmospheric Environment*. 2001;35(13):2265-84.
14. Hanna SR, Hansen OR, Dharmavaram S. FLACS CFD air quality model performance evaluation with Kit Fox, MUST, Prairie Grass, and EMU observations. *Atmospheric Environment*. 2004;38(28):4675-87.
15. Barad ML. Project PRAIRIE GRASS, a field program in diffusion. Volume II. DTIC Document, 1958.
16. Goldwire Jr H, Rodean H, Cederwall R, Kansa E, Koopman R, McClure J, et al. Coyote series data report LLNL/NWC 1981 LNG spill tests dispersion, vapor burn, and rapid-phase-transition. Volume 1.[7 experiments with liquefied natural gas, 2 with liquid methane, and one with liquid nitrogen]. Lawrence Livermore National Lab., CA (USA), 1983.
17. Sklavounos S, Rigas F. Simulation of Coyote series trials—Part I:: CFD

## References

1. S. Sklavounos and F. Rigas, "Validation of turbulence models in heavy gas dispersion over obstacles," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 108, pp. 9-20, 2004.
2. Assael MJ, Kakosimos KE. Fires, explosions, and toxic gas dispersions: effects calculation and risk analysis: CRC Press; 2010.
3. Rigas F, Konstantinidou M, Centola P, Reggio G. Safety analysis and risk assessment in a new pesticide production line. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2003;16(2):103-9.
4. Tauseef S, Rashtchian D, Abbasi S. CFD-based simulation of dense gas dispersion in presence of obstacles. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2011;24(4):371-6.
5. Meroney RN. CFD modeling of dense gas cloud dispersion over irregular terrain. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2012;104:500-8.
6. Kashi E., Shahraki F., Rashtchian D, Mohebinia S., Investigation of gas dispersion and explosion in obstacle area with CFD analysis, *Amirkabir* 19(68)7. (In Persian)
7. Kashi E, Mirzaei F, Mirzaei F. Analysis of Chlorine Gas Incident Simulation and Dispersion Within a Complex and Populated Urban Area Via Computation Fluid Dynamics. *Advances in Environmental Science and Technology*. 2015;1(1):49-58.
8. Siddiqui M, Jayanti S, Swaminathan T. CFD analysis of dense gas dispersion in indoor environment for risk assessment and risk mitigation. *Journal of hazardous materials*. 2012;209:177-85.

- Commission Directorate-General XII Science. Research and Development Contract EV5V-CT94-0531, WS Atkins Consultants Ltd, Surrey. 1997.
26. Cowan IR, Castro IP, Robins AG. Numerical considerations for simulations of flow and dispersion around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1997;67:535-45.
  27. Pramod Kumara A-AF. Performance Analysis of an Air Quality CFD Model in Complex Environments: Numerical Simulation and Experimental Validation with EMU Observations. *Building and Environment*. 2016.
  28. Kashi E, Shahraki F, Rashtchian D, Behzadmehr A. Effects of vertical temperature gradient on heavy gas dispersion in build up area. *Iranian Journal of Chemical Engineering*. 2009;6(3):27.
  29. Rigas F, Sklavounos S. Simulation of Coyote series trials—Part II: A computational approach to ignition and combustion of flammable vapor clouds. *Chemical Engineering Science*. 2006;61(5):1444-52.
  30. Hanna SR, Chang JC. Use of the Kit Fox field data to analyze dense gas dispersion modeling issues. *Atmospheric Environment*. 2001;35(13):2231-42.
  31. Koopman R, McRae T, Goldwire H. Results of recent large-scale NH<sub>3</sub> and N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> dispersion experiments. 1984.
  32. Ichard M, Hansen OR, Melheim J, GexCon A. 6.2 Release of pressurized liquefied gases: simulations of the desert tortoise test series with the CFD model FLACS 2010.
  33. Mack A, Spruijt M. CFD Dispersion Investigation of CO<sub>2</sub> Worst Case estimation of non-isothermal LNG releases and comparison with box-model predictions. *Chemical Engineering Science*. 2006-61(5):1434-43.
  18. McQuaid J. Objectives and design of the phase I heavy gas dispersion trials. *Journal of Hazardous Materials*. 1985;11:1-33.
  19. Crabol B, Roux A, Lhomme V. Interpretation of the Thorney Island Phase I trials with the box model CIGALE2. *Journal of hazardous materials*. 1987;16:201-14.
  20. Puttock J, Colenbrander G. Thorney Island data and dispersion modelling. *Journal of Hazardous Materials*. 1985;11:381-97.
  21. Deaves D. 3-dimensional model predictions for the upwind building trial of Thorney Island Phase II. *Journal of Hazardous Materials*. 1985;11:341-6.
  22. Hanna S, Chang J, Briggs G. Dense gas dispersion model modifications and evaluations using the Kit Fox Field Observations. Report P011F by Hanna Consultants. 1999;3911.
  23. Hanna S, Steinberg K. Overview of Petroleum Environmental Research Forum (PERF) dense gas dispersion modeling project. *Atmospheric Environment*. 2001;35(13):2223-9.
  24. Robins A, Castro I, Hayden P, Steggel N, Contini D, Heist D, et al. A wind tunnel study of dense gas dispersion in a stable boundary layer over a rough surface. *Atmospheric Environment*. 2001;35(13):2253-63.
  25. Hall R. Evaluation of modelling uncertainty. CFD modelling of near-field atmospheric dispersion. Project EMU final report, European

42. Qi R. Liquefied Natural Gas (LNG) Vapor Dispersion Modeling with Computational Fluid Dynamics Codes: Texas A&M University; 2011.
43. Sun B, Utikar RP, Pareek VK, Guo K. Computational fluid dynamics analysis of liquefied natural gas dispersion for risk assessment strategies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2013;26(1):117-28.
44. Zhang X, Li J, Zhu J, Qiu L. Computational fluid dynamics study on liquefied natural gas dispersion with phase change of water. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015;91:347-54.
45. Lisbona D, McGillivray A, Saw JL, Gant S, Bilio M, Wardman M. Risk assessment methodology for high-pressure CO<sub>2</sub> pipelines incorporating topography. *Process Safety and Environmental Protection*. 2014; 92(1): 27-35.
46. Xing J, Liu Z, Huang P, Feng C, Zhou Y, Sun R, et al. CFD validation of scaling rules for reduced-scale field releases of carbon dioxide. *Applied Energy*. 2014;115:525-30.
47. Liu B, Liu X, Lu C, Godbole A, Michal G, Tieu AK. Computational fluid dynamics simulation of carbon dioxide dispersion in a complex environment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016;40:419-32.
48. Liu X, Godbole A, Lu C, Michal G, Venton P. Source strength and dispersion of CO<sub>2</sub> releases from high-pressure pipelines: CFD model using real gas equation of state. *Applied Energy*. 2014;126:56-68.
49. Bouet R, Duplantier S, Salvi O. Ammonia large scale atmospheric dispersion experiments in industrial Scenarios Including Terrain and Release Effects. *Energy Procedia*. 2014;51:363-72.
34. Nielsen M, Ott S, Jørgensen HE, Bengtsson R, Nyrén K, Winter S, et al. Field experiments with dispersion of pressure liquefied ammonia. *Journal of hazardous materials*. 1997;56(1):59-105.
35. McRae T, Cederwall R, Goldwire Jr H, Hipple D, Johnson G, Koopman R, et al. Eagle series data report: 1983 nitrogen tetroxide spills. Lawrence Livermore National Lab., CA (USA), 1984.
36. Havens J, Spicer T. LNG vapor cloud exclusion zones for spills into impoundments. *Process safety progress*. 2005;24(3):181-6.
37. König-Langlo G, Schatzmann M. Wind tunnel modeling of heavy gas dispersion. *Atmospheric Environment Part A General Topics*. 1991; 25(7):1189-98.
38. Meroney RN, Leitl BM, Rafailidis S, Schatzmann M. Wind-tunnel and numerical modeling of flow and dispersion about several building shapes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1999; 81(1):333-45.
39. Hall D, Waters R, Marsland G. Repeat variability in instantaneously released heavy gas clouds-some wind tunnel model experiments 1991.
40. Pitblado R, Baik J, Hughes G, Ferro C, Shaw S. Consequences of liquefied natural gas marine incidents. *Process safety progress*. 2005;24(2):108-14.
41. Luketa-Hanlin A. A review of large-scale LNG spills: experiments and modeling. *Journal of Hazardous Materials*. 2006;132(2):119-40.

57. Gavelli F, Chernovsky MK, Bullister E, Kytomaa HK. Modeling of LNG spills into trenches. *Journal of hazardous materials*. 2010;180(1):332-9.
58. Britter RE, McQuaid J. Workbook on the dispersion of dense gases. 1988.
59. Van Ulden A, editor On the spreading of a heavy gas released near the ground. *Proceedings Int Loss Prevention Symp*; 1974.
60. Ermak DL, editor Dense-gas dispersion advection-diffusion model. Proc of the JANNAF Safety and environmental protection subcommittee meeting in Monterey, UCRL-JC-109697 Livermore, California: Lawrence Livermore National Laboratory; 1992.
61. Britter R. A researchers/consultants view on advances in source and dispersion modeling. *American Inst. of Chemical Engineers*, New York, NY (United States), 1995.
62. Murakami S, Mochida A, Tominaga Y. Numerical simulation of turbulent diffusion in cities. *Wind Climate in Cities*: Springer; 1995. p. 681-701.
63. Witlox H. The HEGADAS model for ground-level heavy-gas dispersion—I. Steady-state model. *Atmospheric Environment*. 1994; 28(18):2917-32.
64. Spicer T, Havens J, Guinnup D. User's guide for the DEGADIS 2.1 dense gas dispersion model: US Environmental Protection Agency; 1989.
65. Ermak DL. User's manual for SLAB: An atmospheric dispersion model for denser-than-air-releases. Lawrence Livermore National Lab., CA (USA), 1990.
66. Fiates J, Santos R, Neto F, Simoes V, Francesconi A, Vianna SS. An configurations. *Journal of loss prevention in the process industries*. 2005;18(4):512-9.
50. Scenna NJ, Santa Cruz AS. Road risk analysis due to the transportation of chlorine in Rosario city. *Reliability Engineering & System Safety*. 2005;90(1):83-90.
51. Robins A, Hall R, Cowan I, Bartzis J, Albergel A. Evaluating modelling uncertainty in CFD predictions of building affected dispersion. *International Journal of Environment and Pollution*. 2000;14(1-6):52-64.
52. Allason D, Armstrong K, Barnett J, Cleaver P, Halford A, editors. Behaviour of Releases of Carbon Dioxide From Pipelines and Vents. 2014 10th International Pipeline Conference; 2014: American Society of Mechanical Engineers.
53. Tanaka A, Sakamoto Y, Higashino H, Suzumura M, Komai T. Development of a Risk Assessment Tool for CO<sub>2</sub> Geological Storage: 'GERAS-CO<sub>2</sub> GS'. *Energy Procedia*. 2013;37:2828-39.
54. Chow FK, Granvold PW, Oldenburg CM. Modeling the effects of topography and wind on atmospheric dispersion of CO<sub>2</sub> surface leakage at geologic carbon sequestration sites. *Energy Procedia*. 2009;1(1):1925-32.
55. Coldrick S, Lea C, Ivings M. Validation database for evaluating vapor dispersion models for safety analysis of LNG facilities: Fire Protection Research Foundation; 2009.
56. Gant S, Atkinson G. Dispersion of the vapour cloud in the Buncefield Incident. *Process Safety and Environmental Protection*. 2011; 89(6): 391-403.

the use of numerical modelling for near-field pollutant dispersion in urban environments— A review. *Environmental Pollution*. 2016; 208: 271-83.

- Alternative CFD Tool for Gas Dispersion Modelling of Heavy Gas.
67. Labovský J, Jelemenský E. CFD-based atmospheric dispersion modeling in real urban environments. *Chemical Papers*. 2013;67(12):1495-503.
68. Lateb M, Meroney R, Yataghene M, Fellouah H, Saleh F, Boufadel M. On