نشریه علمی سازمان انرژی اتمی ایران
شماره ۱۱و۱۲، صفحات ۸۳-۷۵ (۱۳۷۲)
چاپ ایران

مدل ریاضی پخش یک گاز سنگین رادیواکتیو یا سمی در محیط

علی اکبر بیدختی
مرکز تحقیقات هسته‌ای
سازمان انرژی اتمی ایران

چکیده

در این مقاله یک مدل ریاضی پخش گاز سنگین در محیط مورد بررسی قرار گرفته است. این مدل از نوع جعبه‌ای (box model) می‌باشد. اساس پخش و رقیق شدن چنین گازی در محیط از طریق پدیده درون آمیختگی (entrainment) یا خاصیت هم زده شدن سیال توسط تغییرات سرعتی که در آن وجود دارد صورت می‌گیرد.

در این مدل ساده حرکت گاز توسط سنگینی خود و حرکت هوای محیط صورت می‌پذیرد. خواص مختلف آن، ارتفاع، تمرکز و پهنای آن در فاصله‌هائی از منشاء پیش‌بینی می‌شود و با نتایج آزمایشگاهی بدست آمده مقایسه و مورد بحث قرار می‌گیرد. چگونگی بسط این مدل نیز مطالعه شده و از نظر استفاده آن در محیط نیروگاههای اتمی آینده ایران مورد بحث قرار می‌گیرد. استفاده احتمالی آن در موارد دریائی و نظامی نیز قابل ذکر است.

مقدمه

در این مقاله یک مدل نسبتا" ساده ارائه می‌گردد که چگونگی حرکت یک سیال سنگین را در یک محیط نسبتا" آرام پیش‌بینی نماید. حرکت سیالات سنگین در محیط های طبیعی و صنعتی به وفور دیده می‌شود. مثلا" حرکت یک گاز سنگین که بر اثر حادثه‌ای آزاد شده و تحت نیروی جاذبه (بعلت اختلاف چگالی دو سیال) به حرکت در می‌آید را می‌توان نام برد. با وجود این حرکت و حرکت سیال میزبان (مثلا" حرکت باد) گازهای سنگین در سطح زمین پراکنده می‌شود. در بسیاری از موارد لازم است که حرکت این نوع ابرها از نظر سرعت پیش‌بینی شود. همینطور تمرکز درصد گاز آزاد شده را در فواصلی از نقطه آزاد شده تخمین زده می‌شود. این عمل در مواردی بسیار ضروری است (به علت سمی، آتش‌گیر و یا پرتوزا بودن گاز). مثال بارز آن حادثه بوپال هندوستان در سال ۱۹۸۵ است که منجر به کشته شدن تعداد زیادی از افراد نزدیک حادثه شد. یا حالت طبیعی منشاء شدن ناگهانی گاز کشنده طبیعی از زمین مثلا" نوعی که در کمرون در سال ۱۹۸۶ اتفاق افتاد. بنابراین، مسئله پراکنده شدن گازهای طبیعی و یا صنعتی در محیط امروزه از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد و مطالعه آن ضروری است. با توجه به اینکه صنعتی شدن روزافزون جهان انکار ناپذیر است، مدل کردن حادثه‌هائی در طبیعت و یا در محیط آزمایشگاه

همچنین از نظر اقتصادی و یا از نظر علل مخوف بودن آن اشکالاتی را بوجود می‌آورد که با استفاده از مدل کردن آنها توسط روش‌های عددی کامپیوتری (numerical method) آن را می‌توان حل کرد. البته مدلهای عددی این مطالعات امروزه ساده هستند ولی تا حدی همانطوریکه بعدا" مشخص خواهد شد نتایج آزمایشهائی که تاکنون انجام شده را بخوبی پیش‌بینی می‌کنند.

اصطلاحاتی که در این مقاله استفاده می‌شود اغلب در جاهای دیگر تعریف شده‌اند (۱). نحوه آزاد شدن یک گاز سنگین در محیط دارای فازهای مختلفی است (۲). در فاز اولیه آن، نیروهای حرکت متوسط اتمسفر و حرکت خود گاز آزاد شده در تعیین کل حرکت سیستم سیالی موثر می‌باشند. معمولا" حرکت فاز اولیه پیچیده می‌باشد و اغلب در مدلهای مطالعاتی حذف می‌شوند. البته نحوه آزاد شدن گاز (بطور سریع مثل انفجار، یا بطور آهسته در پشت یک مانع) در مشخص کردن فازهای بعدی حرکت گاز مهم می‌باشد. در فاز دوم نیروی حرکت هوا و نیروی شناوری (buoyancy force)، به علت تفاوت چگالی دو سیال، مهم می‌باشند. به علت اهمیت پارامترهای حرکت گاز آزاد شده در این فاز (از نظر اندازه، زمان و تمرکز)، این مرحله در اینجا بصورت مدل در خواهد آمد. فاز سوم مرحله‌ای از حرکت گاز آزاد شده است که در آن حرکت متوسط اتمسفر همراه با حرکت تلاطمی آن در رفتار ابر تشکیل شده از گاز موثر می‌باشد (passive phase). مرحله‌های انتقالی میان فازهای مختلف در مقاله (۲) بطور مفصل بحث شده است.

مدل ریاضی

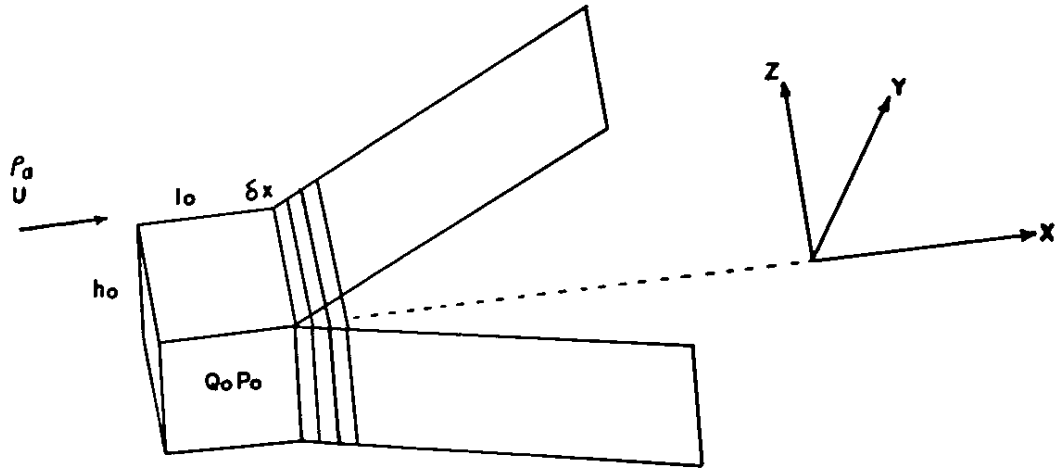
در این مقاله مدلی طراحی شده است که حرکت یک گاز سنگین با دبی مشخص را در محیطی که هوا جریان دارد پیش‌بینی می‌کند (۳). فرض می‌شود که محیط دارای چگالی یکنواختی است و فرم مدل به صورت جعبه‌ای (box model) می‌باشد، همینطور ابر در هر برش عمودی بر x دارای غلظت یکنواختی است (بکلی مخلوط شده) شکل ۱.

میزان دبی اولیه گاز آزاد شده $Q_o = h_o . w_o . l_o$ در واحد زمان می‌باشد. برای سادگی شکل مخزن به صورت یک مکعب مستطیل و حرکت سیال محیط (هوا) به صورت متغیر با عمق می‌باشد ($U = f(z)$). همینطور فرض می‌کنیم که گاز آزاد شده شکل خود را بصورت مکعب مستطیل حفظ می‌کند در حالی که به دو طرف $(y, -y)$ توسط نیروی شناوری و جلو با حرکت هوا حرکت می‌کند. حرکت جانبی آن شبیه یک جریان جاذبه‌ای (gravity current) است و سرعت آن توسط این رابطه داده می‌شود:

$$\frac{dw}{dt} = 2c\,(g'.h)^{\frac{1}{2}} \qquad (۱)$$

w عرض ابر و $g' = g(\rho - \rho_a)/\rho_a$ که در آن ρ_a و ρ به ترتیب چگالی هوا و ابر بوده و h ارتفاع ابر می‌باشد. C عدد ثابتی در حدود ۱/۱ می‌باشد. شرائط اولیه‌ای (initial conditions) که انتخاب شده‌اند بسیار ساده‌اند. در مرحله دوم تکامل مدل، شرائط اولیه را توسط شرائطی که از روشهای آزمایش بدست آمده‌اند مشخص خواهیم کرد. حجم اولیه ابر توسط عمل مخلوط شدن با هوای محیط زیاد می‌شود. این در حالی است که وزن مخصوص ابر نسبت به محیط کمتر می‌گردد. بنابر این حجم ابر تابعی از سرعت درون آمیختگی U_e می‌باشد یعنی:

$$V = f(U_e, w, t) \qquad (۲)$$



شکل ۱ــ پارامترهای مدل آزاد شدن گاز سنگین

که در اینجا w پهنای ابر و t زمان است. ارتفاع ابر نیز از حجم و پهنا بدست می‌آید. U_e سرعت درون آمیختگی (entrainment speed) خود تابعی از عدد ریچاردسون (Richardson number) می‌باشد:

$$U_e = f(R_i) \qquad (۳)$$

که در آن R_i برابر با

$$R_i = gh/U_*^2 \qquad (۴)$$

و U_* برابر با $U_* = 0.0412\,U$

که به سرعت اصطکاک در سطح زمین معروف است. R_i نسبت نیروی شناوری به نیروی اینرسی (inertial) می‌باشد که در واقع معکوس عدد فرود است. R_i در واقع نشان دهنده این است که حرکت سیستم مورد مطالعه چقدر ثبات یا پایداری دارد. پرو فایل سرعت لایه مرزی که در آن سیال سنگین حرکت می‌کند، از نوع آشفته یا تلاطمی (turbulence) می‌باشد که بصورت لگاریتمی است:

$$U = (U_*/k)\{\log(z/z_o)\} \qquad (۵)$$

که در آن k عدد ثابت وان کارمن (Van Karman) می‌باشد که در حدود ۰/۴ است و z_o اندازه ناهمواری سطح زمین است. معادلات ۱ و ۲ همراه با ۳ و ۴ و ۵ را با روش رانجه کوتا (Runge Kutta) توسط کامپیوتر حل می‌گردد. مشخصات ابر از قبیل عمق، عرض، مکان مرز جلو و تمرکز آن را بر حسب مسافت طی شده حاصل می‌شود. حل معادلات ۱ و ۲ بطور آنالوگ در صورتی که U_e ثابت یا صفر فرض شود نیز امکان ــ پذیر می‌باشد. مثلا" اگر U_e=1 باشد پهنا و حجم ابر آزاد شده بر حسب مسافت طی شده به این صورت نشان داده می‌شود (۴):

$$w = (3c)^{2/3}X^{2/3}L^{1/3} + w_o \qquad (۶)$$

$$V = (3/5)\,\frac{U_e}{U}\,(3C)^{-2/3}X^{5/3}L^{1/3} + V_o \qquad (۷)$$

که در آن $L^{1/3}=(Qg'/U^3)^{1/3}$ و Q مقدار دبی گاز آزاد شده می‌باشد. L به مقیاس شناوری معروف است. w_o و V_o به ترتیب پهنا و حجم اولیه ابر در واحد طول در جهت x آزاد شده هستند. تمرکز ابر بر حسب درصد وجود گاز اولیه $C=\frac{V_o}{V}\times 100$ است.

تغییرات پارامترهای منشاء گاز آزاد شده (مرحله ۲ مدل)

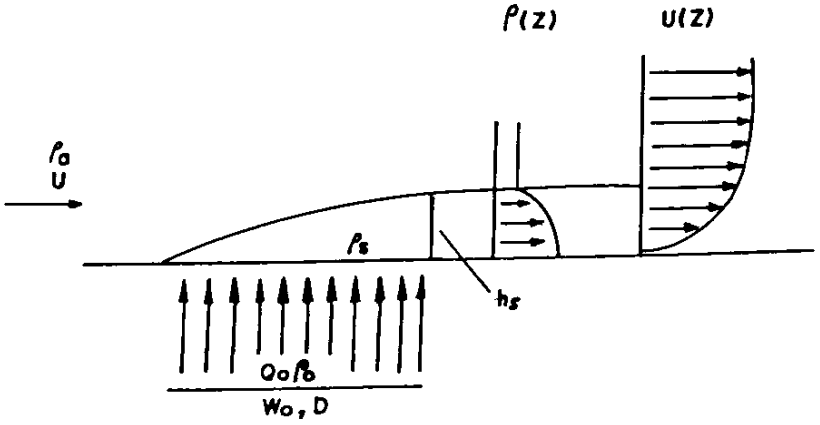
همانطورکه قبلا" اشاره شد پارامترهای منشاء گاز آزاد شده جهت بهتر پیش‌بینی کردن رفتار ابر توسط روابطی که تجربی می‌باشد مشخص می‌شود. معمولا" قبل از اینکه ابر ایجاد شده از منشاءهای طبیعی یا صنعتی شروع به حرکت کند، ممکن است از یک سطح محدود منشاء شود. در این حالت حرکت هوای محیط موجب رقیق شدن گاز بطور موضعی می‌گردد. این عمل معمولا" توسط درون آمیختگی صورت می‌گیرد. در مرز میان ابر و هوای محیط پدیده ناپایداری کلوین هلموتز (Kelvine Helmholtz) بوجود می‌آید (شکل ۲).

بلند شدن گاز آزاد شده به پهنای D دارای g_s است که با g'_o مربوط به گاز مدل شده فرق می‌کند. در ابتدا فرض می‌شود $g'_s = g'_o$. در رابطه زیر داریم: (۶)

$$g'_o \cdot h_s/U_*^2 = 50$$

این نتیجه از آزمایشهائی که در محیط در جزایر تورنی انجام شده بدست آمده است (۶). h_s را در ابتدا از رابطه بالا بدست آورده و در رابطه پائین قرار می‌دهیم تا پهنای منشاء w_s بدست آید.

$$w_s = Q_o/Uh_s$$



شکل ۲– تعیین پارامترهای منشاء از شرائط آزاد شده گاز سنگین

در این رابطه دو شرط زیر مطرح می‌گردد :

۱ـ اگر $w_s < D$ (D اندازه فیزیکی محل صدور گاز اولیه) باشد شکل ۲ ، $w_s = D$ انتخاب می‌شود و داریم :

$$g'_s = g'_o \qquad w_s = D \qquad h_s = Q_o/UD$$

هر چه اندازه g_o کوچکتر می‌شود h_s بزرگتر می‌گردد . بنابر این باید شرط زیر را ملاحظه کرد .

۲ـ اگر $h_s < 0.1\ D$ باشد ، در این حالت روابط بالا صادق می‌باشد . در غیر این صورت اگر $h_s > 0.1\ D$ باشد باید فرض شود $h_s = 0.1\ D$ است و داریم :

$$g'_s = g'_o \qquad w_s = Q_o/Uh_s$$

اگر $w_s > D$ این حالت صادق فرض می‌شود ولی اگر $w_s < D$ فرض شود $h_s = 0.1\ D$ است و

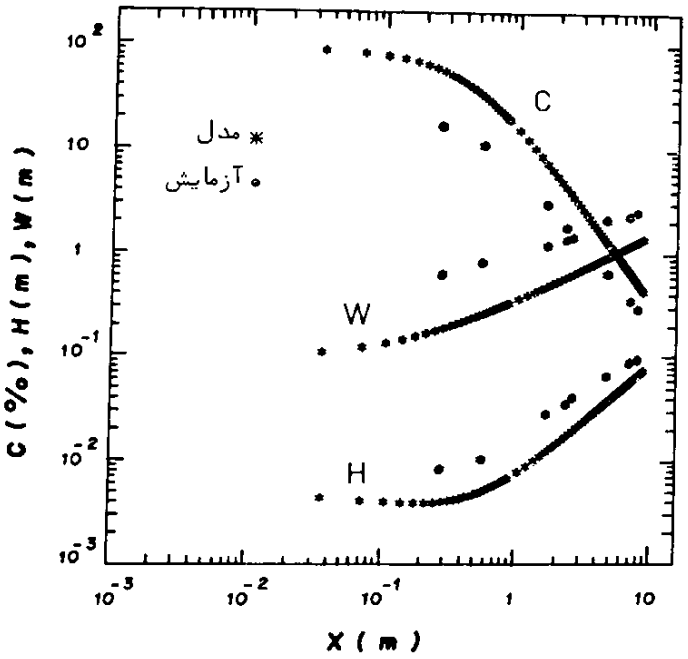
$$w_s = D \qquad g'_s = g'_o\ Q_o/UDh_s$$

شرطهای قید شده در بحثی که بر مبنای آزمایشهائی که در محیط طبیعی و یا آزمایشگاهی انجام شده پایه‌گذاری گردیده است (۶) . این شرطها در این مدل گنجانده می‌شود و نشان می‌دهد که جهت هر چه دقیق‌تر پیش‌بینی کردن رفتار ابر گاز آزاد شده ضروری می‌باشد . لازم به یادآوری است که در این مدل فرض می‌شود در هر مقطعی از حرکت ابر، محتوی ابر به کلی مخلوط می‌باشد. درشرائط طبیعی و یا آزمایشگاهی معمولا " مقطع عمودی تمرکز گاز اولیه بصورت $C = C_{max}\, e^{-Az}$ که در آن A یک ثابت مربوط به پخش (diffusion) می‌باشد . مقدار n برای ابری خنثی (passive) برابر ۱/۵ می‌باشد ولی مقدار مشاهده شده برای n در ابری که تحت تاثیر بویانسی باشد 1 است. مقطع تمرکز در جهت پهنای ابر در ابتدا بصورت بالای کلاه شاپو (top hat) می‌باشد ولی در فاصله بیشتری از منشاء این مقطع بصورت گوسی (Gaussian) می‌باشد . در فاصله زیادی از منشاء ابر هنگامی که اثر تغییر چگالی روی دینامیک آن تاثیری ندارد یعنی سرعت جانبی ابر نسبت به سرعت پخش آشفته آن (حدودا " U_*) خیلی کمتر است حد مرز آن توسط این رابطه تعیین می‌شود (۵) .

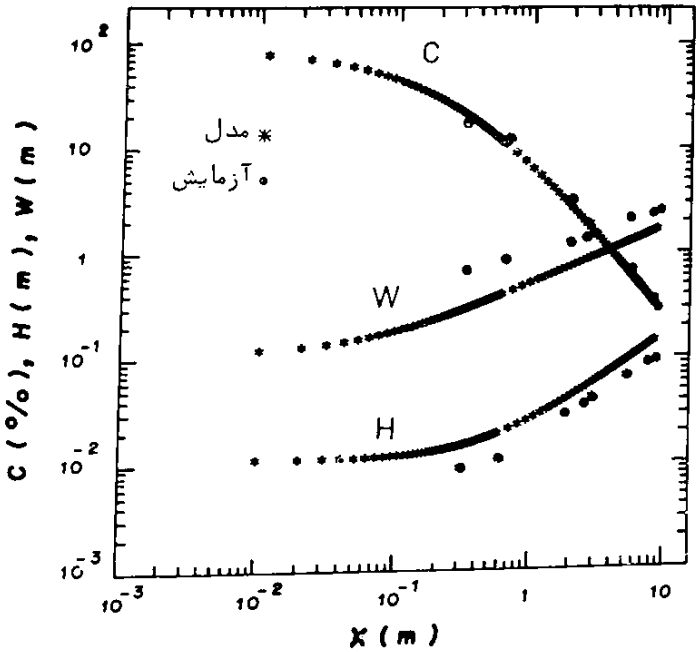
$$1/2\ \frac{dw}{dx} << U_*/U$$

برای آزمایش این مطابق است با $X/w >> 1.3 \times 10^4$ بعد از این مرز ازدیاد ابعاد ابر توسط رابطه‌ای شبیه $w = 2CU_*X/U$ بدست می‌آید .

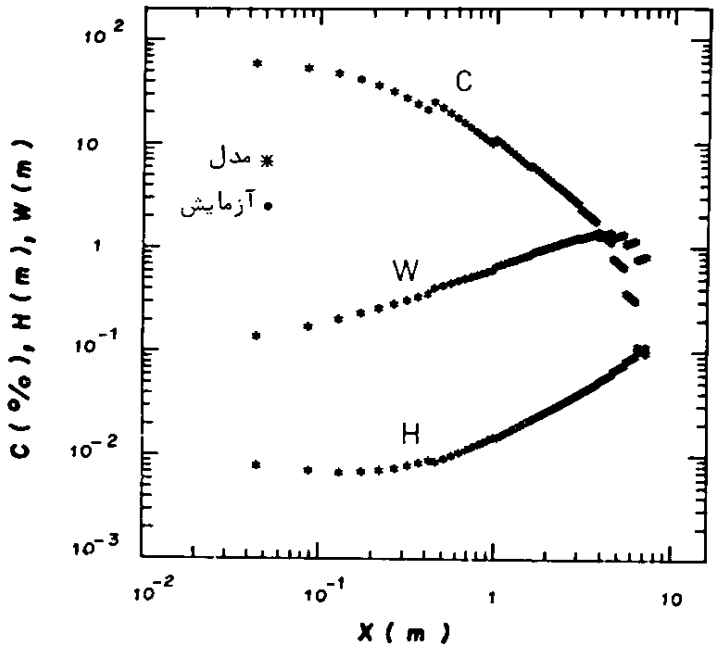
شکل ۳ پارامترهای ابر تشکیل شده از آزاد شدن دائمی گاز سنگین CO_2 (بطور یکنواخت) که توسط مدل اولیه (بدون معرفی کردن شرائط اصلاحات پارامترهای اولیه منشاء) پیش‌بینی شده است را نشان می‌دهد . در اینجا ، C درصد تمرکز گاز آزاد شده (بر حسب درصد گاز منشاء) $w(m)$ ، پهنای ابر برحسب مترو $H(m)$ ارتفاع ابر بر حسب متر می‌باشد که بر حسب $X(m)$ مسافت طی شده به متر رسم شده است . شکل ۴ شبیه شکل ۳ می‌باشد ولی در آن شرائط اصلاحات منشاء اولیه گاز معرفی شده است و در ضمن نتایج آزمایشگاهی مربوط به (۷) در آن آمده است . شباهت دو نتایج قابل ملاحظه میباشد ، نسبت به شکل ۳ که دو نتیجه با هم از نظر کمی اختلاف اساسی دارند. قابل ذکر است که نتایج تمرکز گاز در شکل ۴ و آن آزمایش (۷) تقریبا " یکی می‌باشد . پهنا و ارتفاع گاز مربوط به آزمایش (گاز CO_2 که در تونل هوائی آزاد شده است) از مقدار اندازه‌گیری δh ، δw مربوط به ابر که انحراف استاندارد مقطع تمرکز گاز می‌باشند ، محاسبه شده است . شرائط اولیه مدل و



شکل ۳ـ غلظت (C%)، ارتفاع (H) و پنهای (W) ابر برحسب مسافت طی شده(X). نتایج مدل بدون معرفی اصلاحات منشاء.



شکل ۴ـ غلظت (C%)، ارتفاع (H) و پنهای (W) ابر برحسب مسافت حرکت کرده(X). نتایج مدل با معرفی اصلاحات منشاء.



شکل ۵ــ غلظت (C%)، ارتفاع (H) و پهنای (W) ابر برحسب مسافت طی شده(X) . میزان گاز آزاد شده از چشمه متغیر می‌باشد.

آزمایش عبارتند از :

(Q_0) میزان گاز آزاد شده برابر
0.0005 m^3/sec

(w_0) پهنای اولیه برابر
0.104 m

(Z_0) ناهمواری سطح کف تونل هوائی برابر
0.0003 m

(U) سرعت هوا برابر
0.95 m/sec

(ρ_0) چگالی گاز کربنیک برابر
1.8 kg/m3

(ρ_a) چگالی هوا برابر
1.2 kg/m^3

آزاد شدن گاز در شرائط طبیعی و صنعتی به ندرت به طور یکنواخت صورت می‌گیرد (Q_0 تغییر می‌کند) بنابر این Q_0 را باید طوری مدل کرد که تغییرات آن با زمان وجود داشته باشد . در شکل ۵ یک نتیجه مقدماتی چنین حالتی را نشان می‌دهد . در حال حاضر سعی می‌شود که این مدل را با اضافه کردن شرائط محیط که اغلب دارای سطح ناهموار (برعکس حالات بالا) می‌باشد ، بهبود داد .

نتیجه‌گیری و بحث

در این بررسی مدلی ارائه شده است که چگونگی کمی پخش یک گاز سنگین آزاد شده در محیط هموار را پیش‌بینی می‌کند . مدل نوع ساده از نوع جعبه‌ای می‌باشد و در عین حال از نظر کمی به طور قابل ــ ملاحظه‌ای نتایج آزمایش مربوط به (۷) را دوباره بوجود می‌آورد . استفاده از اصلاحات پارامترهای

منشاء گاز آزاد شده که از مطالعه تجربی و فیزیکی این نوع حرکت سیال بدست آمده (۶) نشان می‌دهد که (شکل ۴) بکار بردن آنها احتمالا" در نحوه استفاده از این نوع مدل در پیش‌بینی حادثه‌های صنعتی و یا طبیعی ضروری می‌باشد. البته در موارد عملی وجود مانع و ناهمواری در سطح زمین زیاد بوده که اغلب حرکت گاز سنگین را پیچیده می‌کنند. اثر دادن این‌گونه حالات در مدل نیز مشکل می‌باشد (۸). درآینده سعی خواهد شد که این‌گونه شرائط را در مدل کردن ریاضی این‌گونه حوادث اثر داد. گرچه مدل ریاضی نتایج مربوط به آزمایش را به طرز خوبی بوجود می‌آورد ولی در استفاده از نتایج آزمایشگاهی در موارد عملی باید دید که تشابه سایر اعداد بدون بعد مثل Re، Pr و Pe (به ترتیب عدد رینولدز، پرانتل و پکله) در هر دو مورد زیاد می‌باشد. اغلب در آزمایشگاه تشابه‌سازی دینامیکی با سیستم سیال در محیط تقریبا" اجرا می‌شود (۷). بنابر این مدل کردن عددی (ریاضی) حرکت اینگونه سیستم سیالی با بهتر شدن دستگاههای کامپیوتری از آینده بهتری برخوردارند.

استفاده از این مدل‌های ریاضی در پیش‌بینی چگونگی پخش احتمالی آزاد شدن گازهای سمی در محیط های دریائی و نظامی هم‌اکنون از توجه خاصی برخوردار می‌باشد (۳).

در محیط های صنعتی انرژی اتمی که همواره خطر آزاد شدن گازهای آلوده رادیواکتیو مثل NH_3، CO_2 یا بخارآب وجود دارد، پیش‌بینی پخش این گونه گازها مورد توجه است.

با استفاده از این‌گونه مدلهای ریاضی می‌توان اطلاعات قابل استفاده خوبی را در اختیار مسئولانی که در اینگونه محیط ها فعالیت دارند گذاشت و یا جهت انتخاب محل استقرار تاسیسات صنعتی مربوطه نسبت به نقاط تمرکز جمعیت از آنها استفاده نمود.

References

1. J.S. Turner, "Buoyancy Effects in Fluid", Cambridge University Press (1979).
2. J.C.R. Hunt and J.W. Rottman, "Some Physical Processes Involved in the Dispersion of Dense Gases", IUTAM Symp. on Atmospheric Dispersion of Heavy Gases and Small Particles, Delft, the Netherlands, Aug. (1983).
3. J. Havers and T.O. Spicer, "Development of an Atomspheric Dispersion Model for Heavierr-than-Air Mixtures", Report to US Coast Guard, No. CG-D-23-85 (1985).
4. R.E. Britter, "The Ground Level Extent of a Negatively Buoyant Plume in Turbulent Boundry Layer", Atmospheric Environment, Vol. 14, 779 (1980).

5. R.E. Britter, "Atomspheric Dispersion of Dense Gases", Annual Reveiw Fluid Mechanics, 21, 317 (1989).
6. J. McQuid and B. Roebuck, "Large Scale Field Trials on Dense Vapour Dispersion", Health and Safety Executive, Safety Eng. Lab., Sheffield, UK (1985).
7. R.E. Britter and W.H. Snyder, "Fluid Modelling of Dense Gas Dispersion over Ramp", J. Hazardous Materials 18, 37 (1988).
8. W.H. Snyder, "Fluid Modelling of Polutant Transport and Diffusion in Stably Stratified Flows over Complex Terrain", Ann. Rev. Fluid Mech., 17, 23 (1985).

A NUMERICAL MODEL OF HEAVY GAS DISPERSION

A. A. Bidokhtti

Nuclear Materials Group
Atomic Energy Organization of Iran

Abstract

In this paper, a simple mathematical model describing the motion of a dense gas released continuously into and environment is presented. The model correctly predicts the laboratory experiments which were carried out by Britter and Snyder (1987). It is an entrainment model better known as box model. In this model, the effects of temperature change and phase change are not considered and it is for a steady-state case. Further work in required for including these effects which are often associated with the mechanisms involved in accidental or natural releases of heavy gases in the environment. The results of such a model will be extended to the practical situations which are and will be common to the nuclear industry at the Atomic Energy Organization of Iran. The applicability of such studies to these stiuations will be discussed.