

مدلی عددی برای شبیه‌سازی فرایند پخش توده گازهای آلوده در محیط

ولی کلاتر چاهوکی* و مجید عباسپور**

*دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بزد.

**دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی شریف.

چکیده

به منظور مطالعه نحوه پخش گازهای سمی در جو، یک مدل جامع عددی تدوین شده است. مبنای این مدل، مدل توده است که خود از مدل‌های تحلیلی پخش گوسی مشتق شده است. این مدل در برابر شرایط لحظه‌ای و غیرمانای جو کاملاً انعطاف‌پذیر است و با استفاده از آن می‌توان کلیه پارامترهای دینامیک و غیر یکنواخت جو را مدل کرد. لذا در این مدل اثرهای تنش برشی باد، نیروی شناوری، تاثیر حالت‌های مختلف پایداری جو، اثرهای زبری، تغییر ناگهانی زبری، وجود موانعی نظیر ساختمان و تپه، روی پدیده پخش در نظر گرفته شده است. این مدل قادر است انتشار گازهای سبک‌تر و سنگین‌تر از هوا را مدل کند و به صورت زمان حقیقی نیز شبیه‌سازی نماید. در اینجا تاثیر کلیه عوامل ذکر شده بر روی انتشار گازهای سبک مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از آن در هر حالت شامل نمودار و تفسیر فیزیکی است.

کلیدواژه: پخش توده‌ها، ضرایب پخش، موانع و توپوگرافی سطح، حالت‌های مختلف پایداری جو

۱ مقدمه

شی، (۱۹۷۸)، لودوینگ و زانتی (۱۹۸۱)،

برگر، مالهند و دیگران (۱۹۷۷، ۱۹۸۷ و ۱۹۸۹)

به مشکلات اعمال روش‌های عددی تفاضل

محدود برای محاسبه انتشار مواد آلوده در جو

اشاره کرده‌اند. روشی که برای مدل کردن انتشار

مواد آلوده تحت شرایط کاملاً دینامیکی و در

میدانی به وسعت کافی می‌تواند مورد استفاده

قرار گیرد، روش توده است. تجربه نشان داده

است (Burger and Mulholland, 1987) که از

این روش می‌توان برای محاسبه زمان حقیقی

استفاده کرد. محدودیت عمده روش‌های توده‌ای

نسبت به روش‌های عددی حل معادله نفوذ عدم

توانایی این روش‌ها در مدل کردن واکنش‌های

شیمیایی است. اولین کارهای مربوط به روش

توده‌ای را می‌توان به رابرتز (۱۹۸۷) نسبت داد.

با توجه به ازدیاد روزافزون منابع آلودگی هوا در اثر توسعه فن‌آوری و ازدیاد جمعیت، آگاهی از نحوه انتشار این مواد در جو نیز روز به روز اهمیت بیشتری می‌یابد. ساده‌ترین روش مدل کردن انتشار رشته‌ای از مواد آلوده در جو، استفاده از روش‌های تحلیلی گوسی است. اما این روش‌ها تحت شرایط محدودی صدق می‌کنند. از طرف دیگر شاید روش دقیق‌تر مدل کردن پدیده انتشار از حل عددی معادله نفوذ به دست آید. اما با توجه به محدودیت حافظه و سرعت رایانه‌ها و مشکلات مربوط به مدل کردن عبارت‌های انتقال تلاطمی، استفاده از این روش‌ها بیشتر جنبه تحقیقاتی دارد و کمتر می‌توان آنها را در کاربردهای عملی که با یک میدان جریان سه

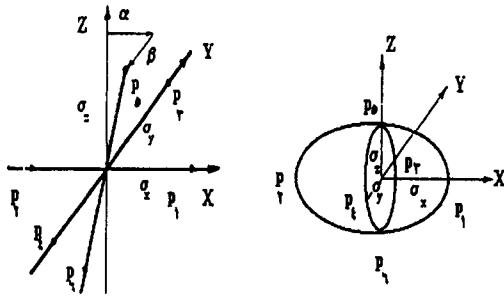
خاص بهتر می‌تواند اثر تغییرات سرعت باد را در جهت قائم مدل نماید، اما از آنجا که وجود موانع و ساختمان‌های مرتفع در میدان جریان می‌تواند باعث تغییرات مولفه افقی سرعت باد گردد و مدل حاضر این موانع را در نظر می‌گیرد، استفاده از مدل شی ارجحیت پیدا می‌کند. به عبارت دیگر این مدل در برابر اعمال شرایط غیر یکنواخت و غیر دائم متغیرهای موثر روی پدیده پخش ناشی از تحولات جوی و اثر سطح زمین انعطاف‌پذیرتر است.

تقریباً در تمام مدل‌های توده‌ای که تاکنون ارائه شده، میدان جریان بدون مانع مورد بررسی قرار گرفته است. در مدل حاضر برای منظور کردن اثر دنباله مربوط به ساختمان‌ها و موانع دیگر نظیر تپه‌ها، همچنین اثر تغییر ناگهانی ارتفاع زبری و توپوگرافی سطح، سعی شده تا تغییرات سرعت و شدت تلاطم این نواحی به نحوی وارد محاسبات شود. در این راستا به منظور کاهش زمان محاسبات، مدل کاهش توده‌ها اضافه شده است، بدون آنکه دقت محاسبات تغییر کند. همچنین از آنجا که این مدل به صورت زمان حقیقی قابل استفاده است، برای محاسبه نوسانات عرضی و قائم باد همزمان این امکان با استفاده از اطلاعات بادسنج فراهم شده است. لذا این مدل قادر خواهد بود تا همزمان با هر گونه تغییرات در شرایط جوی، اثرات آن را ابتدا در ضرایب پخش و سپس در خطوط هم‌غلظت در ناحیه مورد بررسی منعکس کند.

حقیقی روی مدل اولیه، ساده‌سازی‌هایی انجام دادند. وی همچنین معیاری برای فاصله مناسب بین دو توده متوالی به دست آورد. شی (۱۹۷۸) اثر تنش برشی ناشی از نیم‌رخ باد را نیز در نظر گرفت. اگرچه رابرتز (۱۹۸۷) قبلاً به‌طور تحلیلی اثر تنش برشی باد را روی یک توده محاسبه کرده است، اما حل وی تنها برای یک توده مجزا و تنش برشی ثابت و شرایط یکنواخت و دائمی صادق است. در صورتی که روش ابتکاری شی (۱۹۷۸) امکان در نظر گرفتن شرایط کاملاً دینامیکی را فراهم نموده است.

برگر و ماله‌لند (۱۹۸۷) مدل توده خاصی را ارائه داده که ترکیبی است از روش‌های توده متداول و روش‌های تفاضل محدود. او یک مدل زمان حقیقی کامل برای انتشار مواد آلوده ارائه کرده که اطلاعات مربوط به جهت باد، سرعت و تلاطم باد را به طور لحظه‌ای دریافت می‌کند. وی برای افزایش سرعت محاسبات، رشته پیوسته‌ای از مواد آلوده را توسط لایه‌های مجزایی عمود بر جهت باد تقریب زد و فرض نمود که هر لایه در میدان جریان به همراه جریان باد منتقل می‌شود و مواد درون هر لایه به طور گوسی پراکنده می‌شوند. اگر چه دقت این روش کمتر از مدل توده است، اما دارای مزیت استفاده از سرعت بیشتر محاسبات و همچنین امکان محاسبه خطوط هم‌غلظت به طور تحلیلی است.

مقاله حاضر بر اساس مدلی تهیه شده است که ایده اصلی آن از روش شی (۱۹۷۸) اخذ شده، اگر چه مدل زانتم (۱۹۸۱) تحت شرایط



شکل ۱. الف) نمایش یک توده همراه با نقاط شاخص بدون در نظر گرفتن تنش برشی باد (ب) وضعیت نقاط شاخص یک توده با در نظر گرفتن تنش برشی باد.

از دو برابر متوسط شعاع توده‌ها بیشتر باشد. بنابراین اگر:

$$d = 2r_s \quad (2)$$

در تمام میدان، دقت محاسبات کافی خواهد بود. اما اگر هدف، بررسی غلظت در یک میدان وسیع باشد و دقت محاسبات در نقاط بسیار نزدیک منبع مهم نباشد، می‌توان مقدار d را بزرگ‌تر انتخاب نمود تا تعداد توده‌ها کاهش پیدا کرده و زمان محاسبات نیز کوتاه‌تر شود. واضح است که در این صورت در نقاط کاملاً نزدیک به منبع، محاسبه غلظت دقت کمتری دارد و پس از طی مقداری مسافت و رشد توده، شرایط تعیین شده توسط لودویگ تأمین می‌شود. تجربه نشان داده است که برای میدانی به وسعت ۱۵۰۰ در ۱۵۰۰ متر رابطه زیر جواب‌های مناسبی می‌دهد (Ludwig et al., 1977).

$$d = 10r_s \quad (3)$$

۲-۲ جابه‌جایی توده در اثر باد

۲ معرفی مدل

در مدل توده، رشته پیوسته‌ای از مواد آلوده توسط تعداد زیادی توده‌های متوالی تقریب زده می‌شود. توده‌ها در فواصل زمانی Δt آزاد می‌شوند، در اثر باد و اثرات شناوری جابه‌جا و به‌واسطه توربولانس هوا بزرگ می‌شوند.

هر توده مطابق شکل (۱) به صورت یک بیضی‌گون در نظر گرفته می‌شود که از شش نقطه شاخص عبور می‌کند. مختصات این نقاط در هر لحظه از روی مختصات مرکز توده X و Y و Z و مقادیر ضرایب انتشار σ_y و σ_z و دو متغیر α و β که نشان‌دهنده اثر تنش برشی باد است، محاسبه می‌شوند. توزیع غلظت مواد آلوده در درون هر توده به صورت گوسی در نظر گرفته می‌شود، در هر لحظه با در نظر گرفتن سرعت و جهت باد، میزان خیزش توده‌ها به علت نیروی شناوری، اعمال تغییر شکل به خاطر تنش برشی باد، اثرات موانع و توپوگرافی سطح و کلا اثرات لحظه‌ای و دینامیکی جو، غلظت مواد آلوده در یک نقطه از ناحیه از جمع زدن غلظت کلیه توده‌ها در آن نقطه به‌دست می‌آید. در زیر اجزا مختلف مدل به‌طور مفصل‌تر بیان می‌شود.

۱-۲ معیار آزاد شدن توده‌ها

توده‌ها در فواصل زمانی Δt آزاد می‌شوند. در هر مرحله زمانی N توده آزاد می‌شود.

$$N = V \cdot \Delta t / d \quad (1)$$

لودویگ (۱۹۷۷) نشان داد برای آنکه مجموعه‌ای از توده‌ها، رشته‌ای پیوسته را به

$$V_s = 0.14f^{1/4}S^{1/8} \quad (12)$$

و تحت شرایط ناپایدار که $S < 0.042V^2/Hs^2$ باشد سرعت قائم توده خواهد بود:

$$V_n = \frac{1.6f^{1/3}(10H_s)^{2/3}}{Z_{max}} \quad (13)$$

$$W_p = (1.6f^{1/3}/V\Delta t) [(x_t + V\Delta t)^{2/3} - x_t^{2/3}] \quad V > V_n \quad (14)$$

$$W_p = (1.6f^{1/3}/V_n\Delta t) [(x_t + V\Delta t)^{2/3} - x_t^{2/3}] \quad V \leq V_n \quad (15)$$

در شرایط خشتی از روابط مربوط به شرایط ناپایدار استفاده می‌شود. Z_{max} بیشترین ارتفاعی است که توده تحت شرایط باد آرام و شرایط ناپایدار و خشتی می‌تواند به آن برسد. در این مدل مطابق آنچه لودویگ و دیگران (۱۹۸۹) پیشنهاد کرده‌اند مقدار آن ۳۰۰۰ متر انتخاب شده است. لذا در هر لحظه موقعیت قائم توده خواهد بود:

$$Z(t + \Delta t) = Z(t) + W_p \cdot \Delta t \quad (16)$$

۴-۲ تنش برشی باد

وجود تنش برشی باد باعث تغییر شکل توده می‌شود این اثر به صورت دو متغیر α و β که در تعیین موقعیت نقاط شاخص دخیل‌اند، خود را نشان می‌دهد. مقادیر α و β را می‌توان مطابق شکل (۲) به صورت زیر تعیین نمود (Sheih, 1978):

$$\alpha(t + \Delta t) = \alpha(t) + 0.5 [V_x(p_s) - V_x(p_e)]\Delta t \quad (17)$$

$$\beta(t + \Delta t) = \beta(t) + 0.5 [V_y(p_s) - V_y(p_e)]\Delta t \quad (18)$$

$$X(t + \Delta t) = X(t) + V_x\Delta t \quad (4)$$

$$Y(t + \Delta t) = Y(t) + V_y\Delta t \quad (5)$$

$$Z(t + \Delta t) = Z(t) + V_z\Delta t \quad (6)$$

برای محاسبه بردار سرعت باد از اطلاعات بادسنج که در ارتفاع Z_0 نصب شده است استفاده می‌شود و برای محاسبه سرعت باد در ارتفاعات دیگر قانون توانی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\frac{V(z)}{V(z_0)} = \left(\frac{z}{z_0}\right)^n \quad (7)$$

مقدار n با توجه به زبری سطح و پایداری جو تعیین می‌شود (Ludwig et al., 1989).

۳-۲ افزایش ارتفاع توده ناشی از اثر شناوری برای در نظر گرفتن این اثر، لودویگ نتایج بریگز را طوری اصلاح نمود تا بتوان مستقیماً سرعت قائم توده ناشی از نیروی شناوری را به دست آورد. پارامتر تعیین‌کننده شار شناوری f است که به ترتیب زیر تعیین می‌شود (Ludwig et al., 1989):

$$f = gV_e r_s (T_e - T)/T_e \quad (8)$$

همچنین می‌توان پارامتر پایداری را به شکل زیر تعریف نمود:

$$S = g(\Gamma - \lambda)/(T - \lambda Z) \quad (9)$$

تحت شرایط پایدار که $S > 0.042V^2/Hs^2$ سرعت قائم توده خواهد بود (Ludwig et al., 1989):

$$W_p = \left(\frac{2.6}{\Delta t}\right) \left(\frac{f}{100SH_s^2 V}\right)^{1/3} [(x_t + V\Delta t)^{2/3} - x_t^{2/3}] \quad v > v_s \quad (10)$$

$$W_n = (5.3/\Delta t)(10H_s/V_s)^{-2/3} (f/s^{3/2})^{1/4}$$

۵-۲ رشد توده

میزان تلاطم جو متغیر مهمی در میزان رشد توده‌ها و رقیق نمودن آنها است. برنامه رایانه‌ای قابلیت آن را دارد که مشخصات تلاطم جو را به صورت از پیش تعیین شده دریافت کند و یا آنکه نتایج اخذ شده از بادسنج را تحلیل کند و میزان تلاطم را محاسبه نماید. برای یک رشته گوسی در حالت دائم ضرایب نفوذ توربولانت عمودی و افقی تابع مکان‌اند. ضرایب پخش توسط اختلاط یا انتشار جریان توربولانت داخل لایه مرزی جو تعیین می‌شود که به حالت‌های مختلف پایداری جو بر می‌گردد. در حالت غیر دائم روش جامع و کامل‌تر برای محاسبه ضرایب پخش توسط تیلور بیان شده است. تیلور (۱۹۲۱) بیان می‌کند که تحت شرایط ایده‌آل تلاطم ساکن و همگن، می‌توان ضریب انتشار را به صورت زیر به دست آورد (Draxle, 1976):

$$\sigma_y^2 = 2\sigma_v^2 \int_0^z \int_0^{\eta} R_{ly}(\zeta) d\zeta d\eta \quad (21)$$

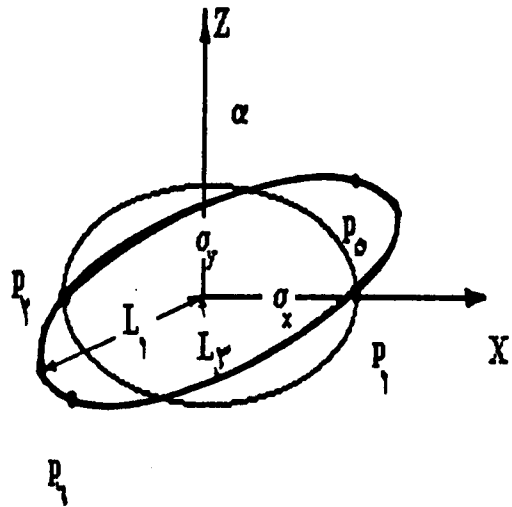
$$\sigma_z^2 = 2\sigma_w^2 \int_0^z \int_0^{\eta} R_{lz}(\zeta) d\zeta d\eta \quad (22)$$

از آنجا که تعیین شکل تابع‌های خود همبسته لاگرائژی R_{ly} و R_{lz} معمولاً امکان‌پذیر نیست، برای محاسبه σ_y و σ_z شکل تابعی مطابق زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\sigma_y = \sigma_v t f_1 (t/\tau_{ly}) \quad (23)$$

$$\sigma_z = \sigma_w t f_2 (t/\tau_{lz}) \quad (24)$$

با توجه به آزمایش‌های انجام شده، شکل‌های مختلفی برای توابع f_1 و f_2 توسط محققان ارائه شده است. آروین (۱۹۸۷) این روش‌ها را مورد



شکل ۲. مختصات توده در حالت تغییر شکل یافته.

روابط فوق با توجه به ثابت بودن تنش برشی در عرض هر توده نوشته شده است. توزیع غلظت نسبت به محورهای اصلی آن گوسی فرض می‌شود. برای محاسبه محورهای اصلی هر توده یک بیضی‌گون روی نقاط شاخص آن منطبق می‌کنیم و محورهای اصلی بیضی‌گون را به عنوان محورهای اصلی توده در نظر می‌گیریم. اگر X, Y, Z مختصات نسبت به مرکز بیضی‌گون باشد معادله بیضی‌گون چنین خواهد بود:

$$\left[\frac{X - (\alpha/\sigma_z)Z}{\sigma_x} \right]^2 + \left[\frac{Y - (\beta/\sigma_z)Z}{\sigma_y} \right]^2 + \left(\frac{Z}{\sigma_z} \right)^2 = 1 \quad (19)$$

می‌توان نشان داد که غلظت مربوط به هر توده از رابطه زیر به دست می‌آید (Sheih, 1978).

$$C = \frac{q\Delta t/N}{(2\pi)^{3/2} L_1 L_2 L_3} \exp \left\{ -0.5 \left[\frac{X - (\alpha/\sigma_z)Z}{\sigma_x} \right]^2 + \left[\frac{Y - (\beta/\sigma_z)Z}{\sigma_y} \right]^2 + \left(\frac{Z}{\sigma_z} \right)^2 \right\}$$

می‌توانند رشته پیوسته را به خوبی مدل کنند. بنابراین می‌توان پس از مدتی، توده‌های بزرگ شده را در هم ادغام نمود. شرط ادغام دو توده متوالی آن است که فاصله بین آنها کمتر از شعاع متوسط دو توده باشد. در این صورت توده ناشی از ادغام دارای خواص و موقعیت متوسط دو توده اولیه است. با استفاده از این روش می‌توان تعداد توده‌ها را که به علت افزایش دقت در نزدیکی منبع به تعداد زیاد تولید شده بودند به طور قابل توجهی در نقاط دورتر کاهش داد و در نتیجه سرعت محاسبات را بالا برد. به عنوان مثال در میدانی به وسعت ۱۵۰۰ متر در ۱۵۰۰ متر و سرعت باد ۵ متر بر ثانیه بدون وجود الگوریتم کاهش توده، مجموع توده‌های موجود در میدان به ۵۰ عدد رسیده و زمان محاسباتی لازم برای ۵ مرحله زمانی ۲۲۲ ثانیه شده است. با استفاده از الگوریتم کاهش توده تحت همین شرایط، تعداد توده‌ها به ۲۰ عدد تقلیل یافت و زمان محاسبات به ۱۱۹ ثانیه رسید.

رایانه مورد استفاده در زمان اجرای برنامه از نوع ۴۸۶ با سرعت ۶۶ مگاهرتز بوده است. بدیهی است هر چه سرعت رایانه افزایش یابد، زمان محاسبات کاهش پیدا می‌کند. برنامه به زبان پاسکال نوشته شده است و کلیه کارهای گرافیکی در خود برنامه صورت می‌گیرد.

۷-۲ اثر وجود ساختمان‌ها، موانع و تغییر

ناگهانی زبری

تقریباً در تمام مدل‌های توده‌ای که تاکنون

پیشنهاد شده توسط دراکسلر (۱۹۷۶) بهترین شکل تابعی است که در بیشتر موارد می‌توان از آنها با دقت خوبی به شکل زیر استفاده کرد.

$$f_1 = f_2 = 1/(1+0.9(t/\tau_1)^{1/2}) \quad (25)$$

$$\tau_1 = 1.64\tau_L \quad (26)$$

$$\tau_L = \int_0^{\infty} R_L(\xi) d\xi \quad (27)$$

اگر شرایط تلاطم جو نسبت به زمان تغییرات قابل توجهی داشته باشد، مستقیماً نمی‌توان از روابط (۲۳) و (۲۴) برای محاسبه σ_y و σ_z استفاده کرد. زیرا این مقادیر علاوه بر شرایط تلاطم در حال حاضر و مدت سپری شده t ، به شرایط تلاطم در لحظات قبل نیز بستگی دارند. برای در نظر گرفتن این مسئله روابط (۲۳) و (۲۴) به صورت زیر اصلاح شده‌اند.

$$\sigma_y(t + \Delta t) = \sigma_y(t) + (d\sigma_y/dt)\Delta t \quad (28)$$

$$\sigma_z(t + \Delta t) = \sigma_z(t) + (d\sigma_z/dt)\Delta t \quad (29)$$

به عنوان نمونه $d\sigma_y/dt$ خواهد بود:

$$d\sigma_y/dt = \sigma_v [f(t) + tdf(t)/dt] \quad (30)$$

با توجه به رابطه (۲۵) نتیجه می‌شود:

$$\sigma_y(t + \Delta t) = \sigma_y(t) + \sigma_v \left[\frac{2 + 0.9(t/\tau_1)^{1/2}}{2(1 + 0.9(t/\tau_1)^{1/2})^2} \right] \quad (31)$$

به صورت مشابه σ_z نیز محاسبه می‌شود.

۶-۲ کاهش تعداد توده‌ها

از آنجا که توده‌ها در حین حرکت رشد می‌کنند، پس از مدتی مرکز یک توده در داخل توده‌های دیگر قرار می‌گیرد. پیش‌تر گفتیم که اگر فاصله بین دو توده متوالی بیشتر از دو برابر شعاع متوسط دو توده ناشی از ادغام آنها باشد،

حل تحلیلی دارد مشاهده می‌شود. اکنون با توجه به اینکه در مدل توده، یک منبع پیوسته در هر لحظه به تعداد زیادی منبع لحظه‌ای تبدیل می‌شود (توده‌های به هم پیوسته) به طوری که رفتار مجموع توده‌ها همان رفتار واقعی منبع پیوسته را دنبال نمایند، قادر خواهیم بود در هر لحظه (مرحله زمانی) اثرات غیر مانا و غیر یکنواخت جو و سطح را در پدیده انتشار، دخالت دهیم. در شکل (۳-ج) که نسبت به حالت (۳-الف) تنها جهت باد به اندازه ۴۵ درجه تغییر کرده و سایر شرایط ثابت باقی مانده است، ملاحظه می‌شود که همراه با تغییر جهت باد، خطوط هم‌غلظت نیز انحراف پیدا کرده است. این آزمایش اهمیت در نظر گرفتن شرایط دینامیکی و غیر مانای جو را نشان می‌دهد.

در شکل (۳-د) نسبت به حالت (۳-الف) تنها سرعت باد دو برابر شده است ($u=2 \times 5m/s$) ملاحظه می‌شود که تغییر سرعت و جهت باد اثر بسیار قابل توجهی روی نحوه انتشار مواد آلوده می‌گذارد با افزایش سرعت باد، غلظت در جهت عرضی کاهش پیدا می‌کند، اما در جهت باد مواد آلوده تا فواصل دورتری برده می‌شوند. علت این امر را می‌توان چنین توجیه نمود که با افزایش سرعت باد، مواد آلوده کننده فرصت کمتری پیدا می‌کنند تا در اثر تلاطم جو در جهات عرضی منتشر شوند. با افزایش سرعت باد، تعداد توده‌های بیشتری برای مدل کردن رشته دود لازم است. لذا زمان محاسبه افزایش پیدا می‌کند. اما زمان لازم برای رسیدن به حالت مانا کاهش

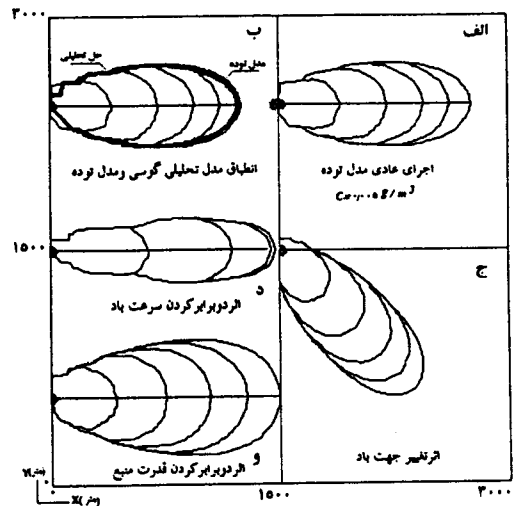
بررسی قرار گرفته است. در مدل حاضر برای منظور کردن اثر دنباله به ساختمان‌ها و موانع دیگر نظیر تپه‌ها، همچنین اثر تغییر ناگهانی ارتفاع زبری سطح سعی شده تا تغییرات سرعت و شدت تلاطم جو پیرامون این نواحی به نحوی وارد محاسبات شود (کلانتر و عباسپور، ۱۳۷۳).

۳ نتایج

بر اساس مطالبی که بیان شد و معادلاتی که در قسمت‌های ۱-۲ الی ۷-۲ ارائه شده است، یک برنامه عددی تدوین شده است. برنامه برای حالت‌های مختلف داده‌ها اجرا شده که جزئیات آن به شرح زیر است:

مطابق شکل (۳) در هر حالت یک منبع نقطه‌ای پیوسته با اختلاف چگالی ناچیز با محیط که در ارتفاع پنج متری سطح زمین قرار دارد، در نظر گرفته شده است. از لحظه فعال شدن منبع (آغاز انتشار) تا زمانی که به حالت مانا می‌رسد (آخرین کانتور غلظت مرتب روی خودش رسم می‌شود) خطوط هم غلظت (غلظت کلیه خطوط ۰/۱۰۰۵ گرم بر متر مکعب) در روی سطح زمین رسم شده است. فاصله ناحیه‌ای که در نظر گرفته شده 3×3 کیلومتر مربع است. شکل (۳-الف) نحوه پخش مواد آلوده را در پایین دست منبع نشان می‌دهد که به روش توده مدل شده است. برای بررسی صحت عملکرد مدل تهیه شده نتایج برنامه با حل تحلیلی رشته گوسی (شی، ۱۹۷۸) تحت شرایطی که این حل صادق باشد مقایسه شده است. در شکل (۳-ب) این

راستای قائم پراکنده می‌شوند و غلظت آنها روی سطح کاهش می‌یابد (خطوط هم غلظت جمع‌تر می‌شود). با افزایش σ_v در شکل (۴-ب) یعنی افزایش میزان تلاطم افقی، بیشتر مواد در سطح افق پراکنده می‌شوند و لذا غلظت افزایش پیدا می‌کند. اما همچنان‌که در شکل (۴-ج) در مقایسه با شکل (۳-الف) ملاحظه می‌شود، اثر مقیاس زمانی تلاطم روی غلظت مواد آلوده ناچیز است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که وجود خطا در روند مربوط به محاسبه این پارامتر، از روی افت و خیزهای سرعت باد، اثر ناچیزی بر روی نتایج نهایی می‌گذارد. شکل‌های (۴-د، ه، و) اثرات تغییر دما در راستای قائم را روی پدیده پخش نشان می‌دهند. بسته به نحوه توزیع دما در لایه‌های مجاور سطح زمین، جو یکی از حالت‌های ناپایدار، خشی یا پایدار را خواهد داشت. در حالت ناپایدار با دور شدن از سطح زمین، دما کاهش پیدا می‌کند (سریع‌تر از نرخ کاهش دمای آدیاباتیک خشک، که یک درجه به ازای هر ۱۰۰ متر است). در این حالت قدرت جو در پراکنده کردن آلودگی و رقیق نمودن آنها زیاد است. به همین دلیل، مطابق با شکل (۴-ه) غلظت مواد آلوده روی سطح زمین کاهش یافته است. در حالتی که با دور شدن از سطح زمین، دما افزایش یابد (حالت وارونگی دما) مواد آلوده تمایلی به بالا رفتن ندارند و غلظت آنها مطابق شکل (۴-و) روی سطح زمین افزایش می‌یابد (این حالت معمولاً صبح زود روزهای زمستان پیش می‌آید).

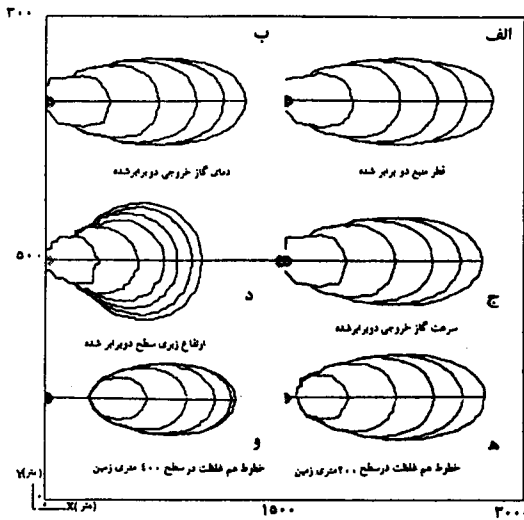


شکل ۳. رسم خطوط هم‌غلظت در روی سطح زمین و در پایین دست یک منبع پیوسته با استفاده از روش توده، در مقایسه با شکل (الف) در: شکل (ج) جهت باد ۴۵ درجه تغییر کرده است. شکل (د) سرعت باد دو برابر شده است. شکل (و) دبی جرمی گاز خروجی از منبع دو برابر شده است.

منبع نسبت به حالت (۳-الف) دو برابر شده است، دیده می‌شود که با افزایش دبی جرمی خروجی از منبع، غلظت مواد آلوده نیز به همان نسبت مطابق با رابطه (۲۰) افزایش می‌یابد.

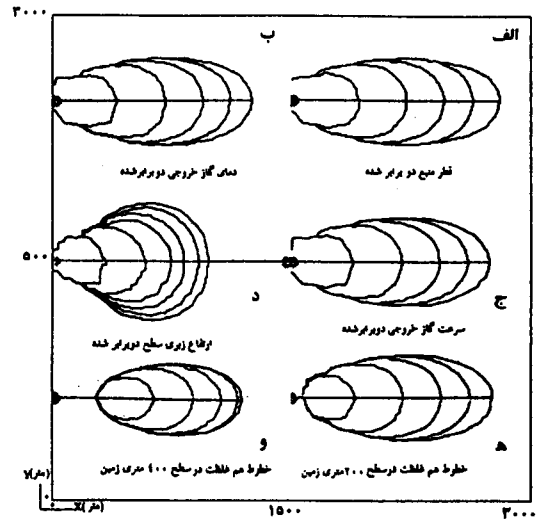
شکل‌های (۴-الف و ب) اثر تغییر شدت تلاطم باد در جهات قائم و افقی را نشان می‌دهد. در مقایسه با شکل (۳-الف) ملاحظه می‌شود که پدیده انتشار، شدیداً نسبت به تغییرات پارامترهای تلاطم نظیر σ_w و σ_v حساس است. در شکل (۴-الف) با افزایش σ_w که مربوط به نوسانات قائم باد می‌شود، تلاطم در

غلظت فقط در نزدیکی منبع دیده می‌شود و در نقاط دورتر اثر آن ناچیز است. زیرا در فواصل دورتر، ابعاد توده‌ها به اندازه‌ای رشد می‌کنند که تغییر ارتفاع مرکز آنها تاثیر قابل توجهی در روی غلظت‌ها نمی‌گذارد. شکل (۵-۵) اثر افزایش ارتفاع زبری سطح را نسبت به حالت (۳-الف) نشان می‌دهد. ارتفاع زبری مستقیماً روی نیمرخ



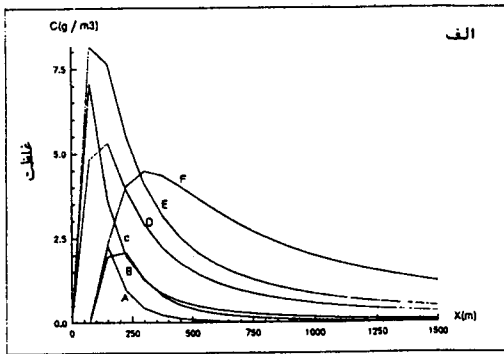
شکل ۵. اثر پارامترهای منبع صدور گاز و سطح زمین روی پدیده پخش مواد آلوده در مقایسه با شکل (۳-الف) نشان داده شده است.

سرعت باد و تنش برشی ایجاد شده بین لایه‌های هوا اثر می‌گذارد و رفتاری متضاد با رفتار سرعت باد دارد. این برنامه به صورت سه‌بعدی تنظیم شده است، لذا قادر خواهد بود غلظت مواد آلوده را در هر نقطه از فضا محاسبه کند. مطابق شکل‌های (۵-۵، و) با دور شدن از سطح زمین، خطوط هم‌غلظت از منبع فاصله گرفته و از وسعت آنها کاسته می‌شود. این بدان دلیل است که توده‌ها از لحظه رها شدن در جو (در پنج

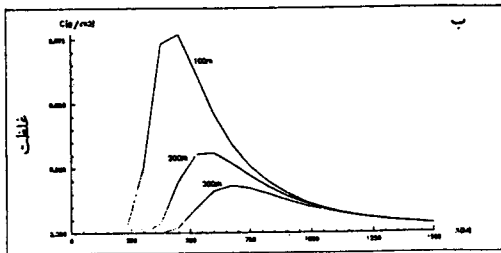


شکل ۶. اثر ضرایب پخش و تغییرات دما روی پدیده انتشار مواد آلوده در مقایسه با شکل (۳-الف) در: شکل (الف) در راستای قائم و در شکل (ب) در راستای افق ضرایب انتقال تلاطم دو برابر شده است. شکل (ج) مقیاس زمانی تلاطم دو برابر شده است. شکل (د) دمای کلیه نقاط در راستای قائم یکسان در نظر گرفته شده است.

مطابق شکل‌های (۵-الف، ب، ج) متغیرهای اندازه منبع، افزایش دما و سرعت گازهای خروجی، هر کدام اثر ناچیزی روی خطوط هم‌غلظت می‌گذارند. زیرا میزان رشد توده‌ها آنقدر بالاست که با اندکی تغییر در مقدار موارد فوق تفاوتی احساس نمی‌شود. برای آنکه اثر این متغیرها دیده شود، باید تغییرات آنها خیلی زیاد باشد. بدیهی است که هر چه اختلاف دمای بین مواد آزاد شده و هوای محیط بیشتر باشد، مواد آلوده بیشتر به سمت بالا رانده شده، غلظت روی



فاصله از منبع (متر)



فاصله از منبع (متر)

شکل ۶. الف) اثر انواع مختلف پایداری جو روی پدیده پخش گازهای آلوده از حالت کاملاً ناپایدار جو تا حالت پایدار.

A: کاملاً ناپایدار
B: ناپایدار
C: کمی ناپایدار
D: خشی
E: کمی پایدار
F: پایدار

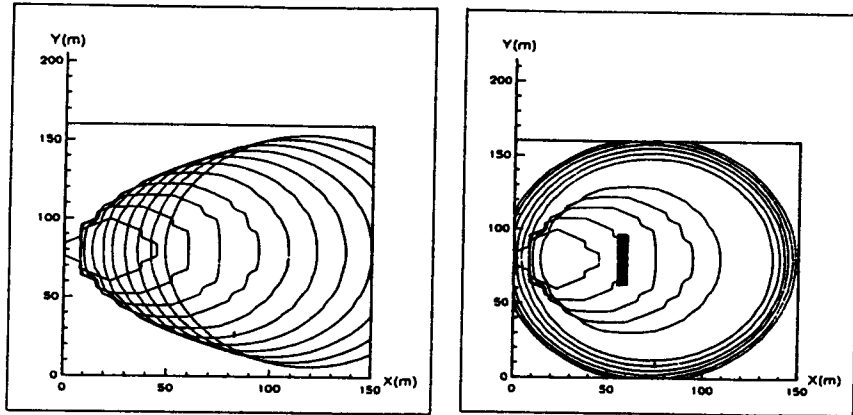
ب) اثر ارتفاع منبع صدور گاز روی پدیده پخش.

ناحیه منابع متعددی به طور همزمان یا با تاخیر فعال شوند، هرگاه گازهای خروجی از این منابع خشی باشند یا اینکه با هم واکنش شیمیایی نمایند، مدل توده مطابق با شکل (۸) قادر است پخش آنها را مدل کند. از این رو این مدل منابع خطی و صفحه‌ای را نیز در بر می‌گیرد. اما به علت بالا رفتن تعداد توده‌ها در ناحیه، زمان محاسبه افزایش می‌یابد که با اجرای الگوریتم کاهش تعداد توده‌ها می‌تواند به کاهش زمان محاسبه

۴۰۰ متری زمین می‌رسند، مقداری در جهت باد منتقل می‌شوند و ضمن بالا آمدن به دلیل نفوذ هوا به درون توده‌ها مرتب از غلظت آنها کاسته می‌شود.

شکل (۶-الف) چگونگی پخش مواد آلوده از حالت کاملاً ناپایدار جو (A) تا حالت پایدار جو (F) را نشان می‌دهد. زمانی که جو ناپایدار است قدرت اختلاط و پراکندگی آن زیاد و نفوذ هوا به درون توده‌ها شدید است. لذا مواد آلوده سریع رقیق شده غلظت آنها روی سطح زمین کاهش می‌یابد. اما هر چقدر جو به طرف پایدار شدن سوق پیدا می‌کند، عکس حالت (A) صادق است. شکل (۶-ب) اثر ارتفاع دودکش را روی پدیده پخش نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با زیاد شدن ارتفاع دودکش، اولاً غلظت مواد آلوده در پایین دست منبع کاهش می‌کند، ثانیاً غلظت بیشینه در فاصله دورتری از منبع اتفاق می‌افتد. بدین ترتیب می‌توان ارتفاع منبع را طوری تنظیم کرد که هنگام تماس مواد آلوده با سطح زمین، مردم یا محیط شهری در معرض آلودگی قرار نگیرند.

شکل (۷) تاثیر یک ساختمان را که در فاصله نزدیک (۵۰ متری) منبع لحظه‌ای (توده‌ای از مواد آلوده) قرار گرفته است، نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با رسیدن توده به ساختمان، بر اثر افزایش ضرایب تلاطم، توده به سرعت رشد کرده و کانتورهای غلظت بعد از ساختمان، منطقه وسیع‌تری را در بر گرفته است. حتی اثر آن به خود منبع نیز سرایت کرده است. لذا فاصله مانع



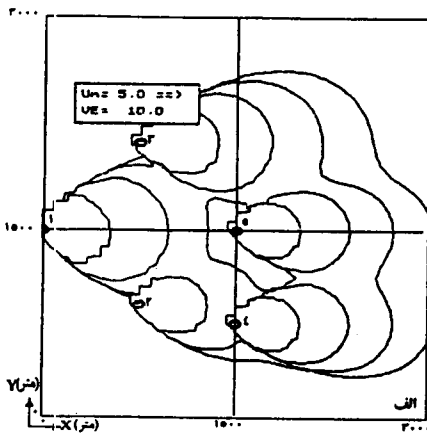
الف) بدون ساختمان در مسیر ب) با وجود ساختمان در مسیر

شکل ۷. نحوه پخش یک توده در ناحیه‌ای به ابعاد 160×150 متر مربع. توده در نقطه

(۸۰، ۰) ناگهان آزاد می‌شود، سرعت متوسط باد ۵ متر بر ثانیه است. در ۵۰

متری منبع یک ساختمان به ارتفاع ۵۰ متر و پهنای ۴۰ متر قرار دارد، غلظت کلیه

کانتورها 0.005 گرم بر متر مکعب است.



الف) ناحیه بدون مانع

Cal. dt=864.9 C. Time=1349.0

R. dt= 60.0 R. Time= 240

Cm= 2.7613 Max 8

Zm= 0.000 Vm= 1500

Puff No.=166

SOURCES				
No.	X	Y	Time	
1	0	1500	0	
2	750	900	0	
3	750	2200	0	
4	1500	750	0	
5	1500	1500	0	

R. Time: زمان واقعی از شروع انتشار

R. dt: زمان یک مرحله از انتشار

Cm: مقدار غلظت بیشینه در ناحیه

X_m, Y_m : مختصات نقطه‌ای که غلظت آن بیشینه است.

Z_m : ارتفاع صفحه از سطح زمین برای رسم کانتور

Puff No: تعداد کل توده‌های موجود در ناحیه محاسباتی

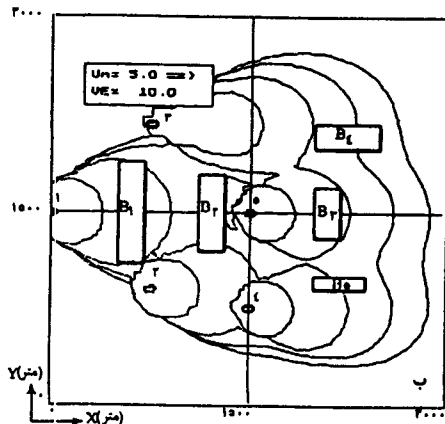
در اثر فعال شدن پنج منبع

C. Time: زمان محاسبات کل

Cal. dt: زمان محاسبات یک مرحله زمانی

V_e : سرعت خروجی گاز از منابع (متر بر ثانیه)

U_m : سرعت متوسط باد (متر بر ثانیه)



شکل ۸. نحوه پخش مواد آلوده از تعدادی منبع پیوسته که همزمان

فعال شده‌اند (از لحظه شروع تا رسیدن به حالت دائم)

کانتورهای غلظت با دقت 0.005 در روی سطح زمین

برای دو حالت زیر رسم شده‌اند:

نتایج به دست آمده با کار دیگران مقایسه شود. از آنجا که در این تحقیق، پارامترهای زیادی وارد محاسبات شده‌اند، کار انجام شده شیوه خاصی داشته که با بررسی مجلات امکان مقایسه وجود ندارد. اما در هر مورد کار انجام شده با کار دیگران یا روش‌های دیگر عددی مقایسه شده است، جواب‌های به دست آمده همخوانی لازم را نشان می‌دهد. از طرفی برای حالت‌های خاص مثلا حالت خنثی و کنار گذاشتن موانع، جواب‌های به دست آمده دقیقا با حل عددی معادلات نفوذ به روش اختلاف محدود هماهنگی داشته است. بهترین روش مقایسه آن است که به کمک تونل باد، یکی دو مورد از حالت‌های بررسی شده در تونل باد مستقیما تجربه شود. متاسفانه در زمان انجام تحقیق با وجود مراجعه به مراکز مختلف، دسترسی به تونل بادی که نیاز محقق را برآورده سازد میسر نگردید. از این رو محقق به ناچار برای اعتبار بخشیدن به نتایج کار خود، با توسل به انواع روش‌های عددی، نتایج را با هم مقایسه کرده است (کلاتر، ۱۳۷۴).

منابع

- Burger, L.W., and Mulholand, M., 1987, Real-Time Prediction of Point source Distribution Using An Anemometer-Bivane and a microprocessor: J. Atmospheric Environment, 22, 1309-1317.
- Dobbins, R.A., 1979, Atmospheric motion and air pollution: John Wily & Sons.
- Draxler, R.R., 1976, Determination of atmospheric diffusion parameters: J. Atmospheric environment, 10, 99-105.

برای اجرای یک برنامه زمان حقیقی (زنده) احتیاج به رایانه‌ای با سرعت و حافظه زیاد است.

۴ نتیجه‌گیری

در مدت ۳۰ ماه مطالعه و جمع‌آوری منابع، سعی شده است مدلی تهیه شود که معادلات آن دقت لازم و کارایی کافی را داشته باشند. اما با توجه به ماهیت جریان تلاطم و پیچیدگی‌هایی که در مدل کردن جزئیات آن وجود دارد، انجام چنین تحقیقاتی، تنها با ایجاد آزمایشگاه‌های مجهز عملی می‌شود. از این رو لازم به ذکر است که در بعضی از قسمت‌ها (اثر موانع و توپوگرافی سطح) مدل تهیه شده در این زمینه گام نخستین بوده و به نظر می‌رسد که برای اخذ نتایج بهتر می‌بایست کارهای بیشتری انجام شود. این پروژه از مطالعه یک رشته ساده گوسی شروع شده است و با افزودن مرتب قسمت‌هایی به آن، اکنون قادر است دیدگاه کلی را در این زمینه ترسیم کند. بعضی از قسمت‌ها از جمله "اثر تغییر ناگهانی زبری، اثر موانع و توپوگرافی سطح، روش پانل به‌ویژه حالت سه‌بعدی و روش کاهش توده‌ها" نوآوری‌هایی هستند که تقریبا در تمام مدل‌هایی که تا کنون ارائه شده است به چشم نمی‌خورد. همچنین تنظیم برنامه‌ای که در یک چارچوب معین اثر تمام پارامترها را مدل نماید، با توجه به نبود هر گونه زیر برنامه در این مورد حائز اهمیت است. برنامه تهیه شده قادر است نحوه پخش گازهای سنگین‌تر از هوا (با شناوری منفی) را نیز مدل نماید. برای اطمینان از

- a comparison of several sigma schemes: *J. climate appli. Met.*, **22**, 92-114.
- Ludwig, F.L., Gasiorek, L.S., and Ruff, R.E., 1977, Simplification of Gaussian puff model for Real-Time minicomputer use: *J. Atmospheric environment*, **11**, 431-436.
- Ludwig, F.L., Salvador, R., and Bornstein, R., 1989, An adaptive volume plume model: *J. Atmospheric environment*, **23**, 127-138.
- Richards, H., 1987, Dispersion modeling using personal computers: *J. Atmospheric environment*, **24**, 2051-2057.
- Roberts, O.F.T., 1987, The theoretical scattering of smoke in a turbulent atmosphere: *in Proc. Royal Soc. London, ser. A*, **104**, 640-654.
- Shieh, C.M., 1978, A puff pollutant dispersion model with shear and dynamics plume rise: *J. Atmospheric environment*, **12**, 1933-1938
- Taylor, G.I., 1921, Diffusion by continuous movement: *Proc. London, Math. Soc., Ser. 2.*, **20**, 196-212.
- Zanetti, P., 1981, An improved puff algorithm for plume dispersion simulation: *J. Applied Meteorology*, **4**, 56-74.
- کلاتر، و.، ۱۳۷۴، شبیه‌سازی رایانه‌ای مکانیزم پخش گازهای آلوده در اتمسفر شهری به صورت سه‌بعدی و زمان حقیقی: پایان‌نامه دکترا، دانشگاه تربیت مدرس تهران.
- کلاتر، و.، عباسپور، م.، ۱۳۷۴، اثرات تغییر ناگهانی زبری، موانع و توپوگرافی سطح روی پخش گازهای سنگین در محیط: مجموعه مقالات سومین کنفرانس سالانه انجمن مهندسين مکانیک.
- کلاتر، و.، و عباسپور، م.، ۱۳۷۳، اثرات تغییر ناگهانی زبری، موانع و توپوگرافی سطح روی پخش گازهای سبک در محیط: مجموعه مقالات سومین کنفرانس سالانه دینامیک شاره‌ها.
- کلاتر، و.، ۱۳۷۵، ارائه یک مدل عددی برای تعیین غلظت مواد آلوده در یک میدان جریان آرام همراه با موانع: مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها.
- کلاتر، و.، ۱۳۷۷، شبیه‌سازی مکانیزم پخش گازهای آلوده و سمی در اتمسفر شهری: مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انجمن مهندسين مکانیک.