

# شبیه‌سازی مکانیزم پخش گازهای آلوده در محیط شهری

ولی کلاتر چاهوکی\* و مجید عباسپور\*\*

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده - برای آشنایی با نحوه پخش گازهای سمی در اتمسفر یک برنامه جامع کامپیوتری تهیه شده است. مبنای این برنامه بر مدل توده استوار است که از مدل‌های تحلیلی پخش گوسی مشتق شده است. این برنامه در برابر شرایط لحظه‌ای و نادر اتمسفر کاملاً انعطاف پذیر بوده و قادر است کلیه پارامترهای دینامیکی و نایکنواخت اتمسفر را مدل کند. لذا در این برنامه آثار ناشی از تنش برشی باد، افزایش ارتفاع گازهای گرم در اثر نیروی شناوری، تأثیر حالت‌های مختلف پایداری اتمسفر، آثار زبری، تغییر ناگهانی زبری و وجود موانعی مانند ساختمان و تپه روی پدیده پخش در نظر گرفته شده است. این برنامه می‌تواند انتشار گازهای سبکتر و سنگینتر از هوا را مدل کرده و به صورت زمانی حقیقی نیز کار کند. در اینجا اثر کلیه عوامل ذکر شده در انتشار گازهای سبک مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از آن در هر حالت، شامل نمودار و تفسیر فیزیکی نتایج، ارائه شده است.

## Simulation of Dispersion of Polluted Gases in Atmosphere

V. Kalantar and M. Abbaspour

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University

Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology

**ABSTRACT** - A computer program was developed to predict the dispersion of gas pollutant in the atmosphere. This program relies on puff method, and in order to consider the wind shear effects, the program has the ability to consider the complete dynamic and unsteady atmospheric conditions. Plume rise of hot pollutants due to buoyancy effects was also considered. The program has the capacity to perform the realtime calculations and uses on-line data of atmospheric conditions that are measured by an anemometer and a thermometer. In order to consider the effects of presence of building and other obstacles or sudden change in surface roughness on dispersion of released materials, a model was added to evaluate the dispersion coefficients in the wake of obstacles. Using this relatively complete simulation, we analyzed the effects of above parameters on the dispersion of gas pollutants in atmosphere and the interpretation of the results is presented.

۱- مقدمه

تکنولوژی و ازدیاد جمعیت، آگاهی از نحوه انتشار این مواد در اتمسفر نیز روز به روز اهمیت بیشتری می‌یابد. ساده‌ترین روش مدل کردن انتشار رشته‌ای از مواد آلوده در اتمسفر استفاده از روش‌های تحلیلی گوسی است. اما این روش‌ها در شرایط

باتوجه به ازدیاد روزافزون منابع آلودگی هوا در اثر توسعه

\*\* دانشیار

\* دانشجوی مقطع دکترای مکانیک

فهرست علائم

ارتفاع بادسنج، m	$Z_0$	فاصله شعاعی از محور دنباله، m	r	نسبت منظر صفحه معادل	AR
ارتفاع زیری سطح در پایین دست و بالا دست جریان، m	$Z_{0.1}$ و $Z_{0.2}$	سررزشعاعی دنباله در اثر تغییرات سرعت و اغتشاش، m	$\bar{r}_b, r_b$	غلظت مواد آلوده، $g/m^3$	C
زمان هر مرحله، s	$\Delta t$	پارامتر پایداری	S	ضریب تصحیح سرعت	cor
شاخص تنش برشی، m	$\alpha, \beta$	زمان از آغاز انتشار، s	t	فاصله مجاز بین دو توده، m	d
نوسانهای عرضی و قائم باد (انحراف معیار)، m/s	$\sigma_w, \sigma_v$	دمای محیط، K	T	فلوی شناوری	F
ضرایب پخش در امتدادهای سه گانه، m	$\sigma_z, \sigma_y, \sigma_x$	دمای گاز در محل خروج، K	$T_e$	توابع مناسب لاگرانژی	$f_p, f_{p1}$
انحراف معیار تغییرات طولی سرعت، m/s	$\sigma_u$	سرعت متوسط طولی، m/s	u	شتاب جاذبه زمین، $m/s^2$	g
انحراف معیار تغییرات طولی باد قبل و بعد از مانع، m/s	$\sigma_{u1}$ و $\sigma_{u2}$	سرعت قبل از مانع، m/s	$u_1$	ارتفاع منبع، m	$H_s$
نرخ کاهش دمای آدیاباتیک خشک، K/km	$\Gamma$	سرعت بعد از مانع روی محور دنباله، m/s	$u_p$	بعد مشخصه صفحه، m	L
نسبت تغییرات سرعت متوسط یا نسبت افزایش اغتشاش	$\Delta$	سرعت باد در محل توده، m/s	V	طول محورهای بیضی گون، m	$L_p, L_{p1}, L_{p2}$
نرخ کاهش دما، s	$\lambda$	پارامتر شاخص	$V_n$ و $V_s$	تعداد توده‌ها در هر مرحله زمانی	N
مقیاس زمانی لاگرانژی، s	$\tau_L$	سرعت خروجی گاز از منبع، m/s	$V_e$	شاخص نوع پایداری اتمسفر	n
عدد ثابت در حدود ۱/۶۴ برابر $\tau_L$	$T_I$	سرعت قائم توده، m/s	$W_p$	وزبری سطح	
		تغییر مکان افقی، m	X	نقاط شاخص هر توده	$P_1, \dots, P_p$
		فاصله از مانع یا محل تغییر ارتفاع زیری سطح، m	x	دبی جرمی گاز خروجی از منبع، g/s	q
		تغییر مکان عرضی، m	Y	تابع خود همبسته لاگرانژی	$R_L$
		تغییر مکان عمودی، m	Z	توابع خود همبسته لاگرانژی در امتداد عرضی و قائم	$R_{Ly}, R_{Lz}$
				شعاع توده در محل خروج، m	$r_s$

روبرتز<sup>۲</sup> نسبت داد (نقل از [۱]). لودویگ برای محاسبه زمان حقیقی روی مدل اولیه، ساده سازیهایی انجام داد. وی همچنین معیاری برای فاصله مناسب بین دو توده متوالی به دست آورد. شی اثر تنش برشی ناشی از نیمرخ باد را نیز در نظر گرفت. با آنکه ریچاردز<sup>۲</sup> (نقل از [۱]) قبلاً به روش تحلیلی اثر تنش برشی باد را روی یک توده محاسبه کرده است، حل وی تنها برای یک توده مجزا و تنش برشی ثابت و شرایط یکنواخت و دائمی صادق است. در صورتی که روش ابتکاری شی امکان در نظر گرفتن شرایط کاملاً دینامیکی را فراهم نموده است.

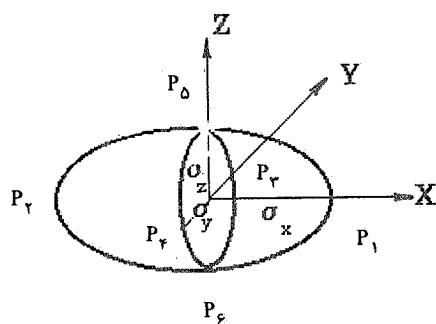
مالهوند مدل توده‌ای خاصی را ارائه داده که ترکیبی از روشهای توده متداول و روشهای تفاضل محدود است. در این مدل، انتشار هر توده نسبت به مختصات متصل به یک صفحه مرجع بیان می‌شود. این صفحه مرجع خود می‌تواند نسبت به مختصات ثابت اویلری حرکت کند. توزیع غلظت عمود بر صفحه مرجع گوسی فرض شده است و انتشار مواد به موازات صفحه مرجع از حل عددی

محدودی صادق‌اند. از طرف دیگر شاید دقیقترین مدل پدیده انتشار از حل عددی معادله نفوذ<sup>۱</sup> به دست آید. اما با توجه به محدودیت حافظه و سرعت کامپیوترها و مشکلات مربوط به مدل کردن عبارتهای نفوذ اغتشاش، استفاده از این روشها بیشتر جنبه تحقیقاتی داشته و کمتر می‌توان آنها را در کاربردهای عملی که با یک میدان جریان سه بعدی و شرایط نادررگ مراجعه‌اند مشاهده کرد.

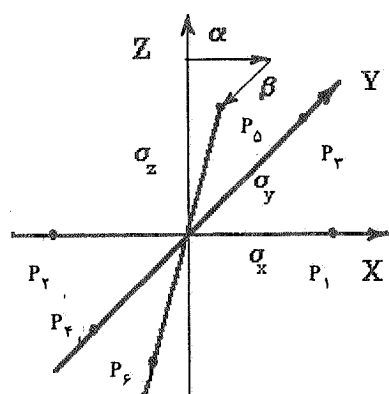
شی [۱]، زانتی [۲]، لودویگ [۳، ۴] و مالهوند [۵] به مشکلات اعمال روشهای عددی تفاضل محدود برای محاسبه انتشار مواد آلوده در اتمسفر اشاره کرده‌اند. روشی که می‌تواند برای مدل کردن انتشار مواد آلوده در شرایط کاملاً دینامیکی و در میدانی به وسعت کافی استفاده شود، روش توده‌است. تجربه نشان داده است [۱] که از این روش می‌توان برای محاسبه زمان حقیقی استفاده کرد. محدودیت عمده روشهای توده‌ای نسبت به روشهای عددی در حل معادله نفوذ، عدم توانایی آنها در مدل کردن واکنشهای شیمیایی است. اولین کارهای مربوط به روش توده‌ای را می‌توان به لمپ<sup>۲</sup> و

## ۲- معرفی مدل

در مدل توده، رشته پیوسته ای از مواد آلوده کننده با تعداد زیادی توده های متوالی تقریب زده می شود. توده ها در فواصل زمانی  $\Delta t$  آزاد شده و در اثر باد و آثار شناوری جا به جا و به واسطه اغتشاش هوا بزرگ می شوند. هر توده مطابق شکل (۱) به صورت یکی بیضیگون در نظر گرفته می شود که از شش نقطه شاخص می گذرد. مختصات این نقاط در هر لحظه از روی مختصات مرکز توده  $(x, y, z)$  و مقادیر ضرایب انتشار  $\sigma_x, \sigma_y$  و دو متغیر  $\alpha$  و  $\beta$  که بیانگر اثر تنش برشی بادند، محاسبه می شوند. توزیع غلظت مواد آلوده در درون هر توده به صورت گوسی در نظر گرفته می شود. در هر لحظه با توجه به سرعت و جهت باد، میزان خیزش توده ها به علت نیروی شناوری، اعمال تغییر شکل به علت تنش برشی باد، آثار موانع و اروگرافی سطح و کلاً آثار لحظه ای و دینامیکی اتمسفر، غلظت مواد آلوده در یک نقطه از جمع زدن غلظت کلیه توده ها در آن نقطه به دست می آید.



(الف)



(ب)

شکل ۱ - الف - نمایش یک توده و نقاط شاخص بدون در نظر گرفتن تنش برشی باد ب - وضعیت نقاط شاخص یک توده با در نظر گرفتن تنش برشی باد

معادلات ممانهای اول و دوم پراکندگی مواد به روش تفاضل محدود به دست می آید. زانتی [۲] روشی برای بهبود مدل توده در شرایط دینامیکی ارائه داد. از آنجا که در مدل های توده خواص اتمسفر و مشخصات باد در هر مرحله زمانی ثابت فرض می شود، اگر در طی این مدت تغییر شدیدی (مثلاً در جهت باد) پدید آید، باعث ایجاد خطا در محاسبه خواهد شد. اگر بتوان مراحل زمانی محاسبه را کوتاهتر در نظر گرفت، این مشکل کمتر خود را نشان می دهد. زانتی برای حل این مشکل در مواردی که کوچک کردن مراحل زمانی امکانپذیر نباشد، پیشنهاد کرد که در محاسبه هر مرحله زمانی از خواص درونیابی شده ابتدا و انتهای آن مرحله استفاده شود. وی نشان داد که چگونه می توان از یک روش درونیابی مناسب نتایج قابل قبولی به دست آورد. لودویگ [۳] مدل وفق یابنده خود را برای بهبود مدل تنش برشی باد ارائه داد. ایده اصلی این مدل از روش شی اقتباس شده است. اما بر خلاف شی تمام نقاط شاخص در ابتدا در راستای قائم قرار داده می شود و بدین ترتیب امکان در نظر گرفتن تنشهای افقی باد وجود ندارد.

مالهوند [۵] یک مدل زمان حقیقی کامل برای انتشار مواد آلوده ارائه کرد که اطلاعات مربوط به جهت باد، سرعت و اغتشاش باد را به طور لحظه ای دریافت می کند. وی برای افزایش سرعت محاسبه، رشته پیوسته ای از مواد آلوده را با لایه های مجزایی عمود بر جهت باد تقریب زد و فرض کرد که هر لایه در میدان جریان به همراه جریان باد منتقل شده و درون هر لایه مواد به طور گوسی پراکنده می شوند. اگر چه دقت این روش کمتر از مدل توده است، اما مزیت استفاده از سرعت بیشتر محاسبه و همچنین امکان محاسبه خطوط هم غلظت به روش تحلیلی وجود دارد. مقاله حاضر بر اساس مدلی تهیه شده که ایده اصلی آن از روش شی اخذ شده است، اگر چه مدل زانتی تحت شرایط خاص بهتر می تواند اثر تغییرات سرعت باد را در جهت قائم مدل کند. لیکن به دلیل آنکه در این تحقیق اثر موانع و ساختمانها در میدان جریان در نظر گرفته می شود و از آنجا که وجود موانع و ساختمانهای مرتفع در میدان جریان می تواند باعث تغییرات مولفه افقی سرعت باد شود، استفاده از مدل شی بهتر است. به عبارت دیگر، این مدل در برابر اعمال شرایط نایکنواخت و نادائم متغیرهای مؤثر در پدیده پخش ناشی از تحولات جوی و اثر سطح زمین انعطاف پذیرتر است.

$$P_1 \begin{vmatrix} X + \sigma_x \\ Y \\ Z \end{vmatrix} \quad P_2 \begin{vmatrix} X - \sigma_x \\ Y \\ Z \end{vmatrix} \quad P_3 \begin{vmatrix} X \\ Y + \sigma_y \\ Z \end{vmatrix} \quad P_4 \begin{vmatrix} X \\ Y - \sigma_y \\ Z \end{vmatrix} \quad P_5 \begin{vmatrix} X + \alpha \\ Y - \beta \\ Z + \sigma_z \end{vmatrix} \quad P_6 \begin{vmatrix} X - \alpha \\ Y + \beta \\ Z - \sigma_z \end{vmatrix}$$

در زیر اجزای مختلف مدل تشریح می شود.

## ۱-۲ معیار آزاد شدن توده ها

توده ها در فواصل زمانی  $\Delta t$  آزاد می شوند. در هر مرحله زمانی

$N$  توده آزاد می شود.

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

لودویگ [۳] نشان داد برای آنکه مجموعه ای از توده ها یک رشته پیوسته را به خوبی مدل کنند، فاصله بین دو توده متوالی نباید از دو برابر شعاع متوسط توده ها بیشتر باشد. بنابراین

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

در تمام میدان، دقت محاسبه کافی خواهد بود. اما اگر هدف بررسی غلظت در یک میدان وسیع باشد و دقت محاسبه در نقاط بسیار نزدیک به منبع مهم نباشد، می توان مقدار  $d$  را بزرگتر انتخاب کرد تا تعداد توده ها کاهش یابد و زمان محاسبه نیز کوتاه تر شود. بدیهی است که در این صورت در نقاط کاملاً نزدیک به منبع، محاسبه غلظت دقت کمتری دارد و پس از طی مسافتی و رشد توده، شرایط تعیین شده لودویگ ارضا می شود. تجربه نشان داده است که برای میدانی به وسعت ۱۵۰۰ متر در ۱۵۰۰ متر رابطه زیر جوابهای مناسبی می دهد [۳].

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

## ۲-۲ جابه جایی توده در اثر باد

مختصات مرکز هر توده با توجه به مشخصات باد موضعی

محاسبه می شود.

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

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

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

برای محاسبه بردار سرعت باد از اطلاعات بادسنجی که در ارتفاع  $z$  نصب شده استفاده می شود. برای محاسبه سرعت باد در ارتفاعهای دیگر، از قانون توانی استفاده شده است.

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

مقدار  $n$  با توجه به زبری سطح و پایداری اتمسفر تعیین می شود [۱۰].

## ۳-۲ افزایش ارتفاع توده در اثر شناوری

برای در نظر گرفتن این اثر، لودویگ نتایج بریگز<sup>۶</sup> (نقل از [۱۴]) را به گونه ای اصلاح کرد که بتوان سرعت قائم توده ناشی از نیروی شناوری را مستقیماً به دست آورد. متغیر  $F$  تعیین کننده فلوی شناوری است که به صورت زیر تعیین می شود [۴]:

$$F = g V_e r_s (T_e - T) / T_e \quad (8)$$

همچنین پارامتر پایداری را می توان به شکل زیر تعریف کرد:

$$S = g(\Gamma - \lambda) / (T_0 - \lambda Z) \quad (9)$$

سرعت قائم توده برای حالتی که  $S > 0.042V^2/H_s^2$  باشد (اتمسفر پایدار) چنین است:

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

$$W_p = (5/3\Delta t) (10H_s/V_s) (f/s^2)^{1/3} [(t + \Delta t)^{2/3} - t^{2/3}] \quad v \leq v_s \quad (11)$$

$$\alpha(t + \Delta t) = \alpha(t) + \omega \cdot [V_x(p_\Delta) - V_x(p_\epsilon)] \Delta t \quad (17)$$

$$\beta(t + \Delta t) = \beta(t) + \omega \cdot [V_y(p_\Delta) - V_y(p_\epsilon)] \Delta t \quad (18)$$

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 می شود. برای محاسبه محورهای اصلی هر توده یک بیضی گون روی نقاط شاخص آن منطبق می کنیم و محورهای اصلی بیضی گون را به عنوان محورهای اصلی توده در نظر می گیریم. اگر  $X, Y, Z$  مختصات نسبت به مرکز بیضی گون باشد، معادله بیضی گون چنین خواهد بود:

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

$$C = \frac{q \Delta t / N}{(\gamma \pi)^{1/2} L_1 L_2 L_3} \exp \left\{ -\omega \left[ \left( \frac{X - (\alpha/\sigma_z)Z}{\sigma_x} \right)^2 + \left( \frac{Y - (\beta/\sigma_z)Z}{\sigma_y} \right)^2 + \left( \frac{Z}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \quad (20)$$

که در این معادله

$$L_1 = (A \cos^2 \alpha_\gamma + B \sin \alpha_\gamma \cos \alpha_\gamma + D \sin^2 \alpha_\gamma)^{-1/2} \quad (21)$$

$$L_2 = (\sin^2 \alpha_\gamma / \sigma_x^2 + \cos^2 \alpha_\gamma / \sigma_y^2)^{-1/2} \quad (22)$$

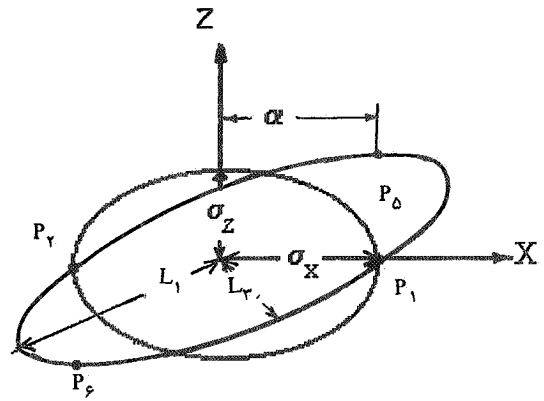
$$L_3 = (A \sin^2 \alpha_\gamma - B \sin \alpha_\gamma \cos \alpha_\gamma + D \cos^2 \alpha_\gamma)^{-1/2} \quad (23)$$

$$\alpha_\gamma = \tan^{-1}(\beta/\alpha) \quad (24)$$

$$A = \cos^2 \alpha_\gamma / \sigma_x^2 + \sin^2 \alpha_\gamma / \sigma_y^2 \quad (25)$$

$$B = 2(\alpha \cos \alpha_\gamma / \sigma_x^2 + \beta \sin \alpha_\gamma / \sigma_y^2) / \sigma_z \quad (26)$$

$$D = [(\alpha/\sigma_x)^2 + (\beta/\sigma_y)^2 + 1] / \sigma_z^2 \quad (27)$$



شکل ۲ - مختصات توده در حالت تغییر شکل یافته

$$V_s = \omega / 1.4 f^{1/2} S^{1/8} \quad (12)$$

برای حالتی که  $S < \omega / 0.42 \sqrt{V} / H_s^2$  باشد (اتم سفر ناپایدار) سرعت قائم توده چنین است:

$$V_n = \frac{1/\omega f^{1/2} (1.0 H_s)^{1/2}}{Z_{max}} \quad (13)$$

$$W_p = \left( \frac{1/\omega f^{1/2}}{V \Delta t} \right) [(X_t + V \Delta t)^{1/2} - X_t^{1/2}] \quad V > V_n \quad (14)$$

$$W_p = \left( \frac{1/\omega f^{1/2}}{V_n \Delta t} \right) [(X_t + V \Delta t)^{1/2} - X_t^{1/2}] \quad V \leq V_n \quad (15)$$

در شرایط خنثی از معادلات مربوط به شرایط ناپایدار استفاده می شود.  $Z_{max}$  بیشترین ارتفاعی است که توده در شرایط باد آرام و شرایط ناپایدار و خنثی می تواند به آن برسد. در این مدل، بر طبق پیشنهاد لودویگ [۴]، مقدار آن ۳۰۰۰ متر انتخاب شده است. لذا در هر لحظه موقعیت قائم توده چنین است:

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

#### ۴-۲ تنش برشی باد

وجود تنش برشی باد باعث تغییر شکل توده می شود. این اثر به صورت دو متغیر  $\alpha$  و  $\beta$  که در تعیین موقعیت نقاط شاخص دخیل اند، خود را نشان می دهد. مقادیر  $\alpha$  و  $\beta$  را می توان مطابق شکل (۲) به صورت زیر تعیین کرد [۱]:

$$\alpha_2 = \frac{1}{\Delta t} \tan^{-1} [B/(A - D)] \quad (28)$$

$$f_1 = f_2 = \frac{1}{(1 + 0.9(t/\tau_1)^2)^{1/2}} \quad (23)$$

$$\tau_1 = 1/64 \tau_L \quad (24)$$

$$\tau_L = \int_0^\infty R_L(\xi) d\xi \quad (25)$$

اگر شرایط اغتشاش اتمسفر نسبت به زمان زیاد تغییر کند، مستقیماً نمی‌توان از معادلات (۳۱) و (۳۲) برای محاسبه  $\sigma_x$  و  $\sigma_y$  استفاده کرد. زیرا این مقادیر علاوه بر شرایط اغتشاش در حال حاضر و زمان سپری شده  $t$ ، به شرایط اغتشاش در لحظه‌های قبل نیز بستگی دارند. برای در نظر گرفتن این مسئله معادلات (۳۱) و (۳۲) به شکل زیر اصلاح شده‌اند.

$$\sigma_y(t + \Delta t) = \sigma_y(t) + (d\sigma_y/dt) \Delta t \quad (26)$$

$$\sigma_z(t + \Delta t) = \sigma_z(t) + (d\sigma_z/dt) \Delta t \quad (27)$$

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

$$d\sigma_y/dt = \sigma_v [f(t) + t df(t)/dt] \quad (28)$$

با توجه به معادله (۳۳)، نتیجه می‌شود:

$$\sigma_y(t + \Delta t) = \sigma_y(t) + \sigma_v \left[ \frac{2 + 0.9(t/\tau_1)^2}{2(1 + 0.9(t/\tau_1)^2)^{3/2}} \right] \Delta t \quad (29)$$

#### ۲-۶ کاهش تعداد توده‌ها

از آنجا که توده‌ها در حین حرکت رشد می‌کنند، پس از مدتی مرکز یک توده در داخل توده‌های دیگر قرار می‌گیرد. قبلاً گفتیم که اگر فاصله بین دو توده متوالی بیشتر از دو برابر شعاع متوسط دو توده نباشد، آنگاه توده‌های متوالی می‌توانند رشته پیوسته را به خوبی مدل کنند. بنابراین می‌توان پس از مدتی توده‌های بزرگ شده را در هم ادغام کرد. شرط ادغام دو توده متوالی آن است که فاصله بین آنها

دربه‌دست آوردن معادله (۲۰) از فرضهای زیر استفاده شده است [۱۰]:

- الف - سطح زمین یک سطح نفوذ ناپذیر است.
- ب - ذرات مواد آلوده ته نشین نمی‌شوند و وقتی از منابع متفاوت وارد ناحیه می‌شوند، خنثی هستند.
- ج - جرم حجمی مواد آلوده در حد جرم حجمی هواست.
- د - هر گاه سرعت باد از یک متر بر ثانیه تجاوز کند، از نفوذ مولکولی در برابر انتقال به وسیله جابه جایی صرف‌نظر می‌شود.

#### ۲-۵ رشد توده

متغیر مهم در میزان رشد توده‌ها و رقیق کردن آنها میزان اغتشاش اتمسفر است. برنامه کامپیوتری حاضر می‌تواند مشخصات اغتشاش اتمسفر را به صورت از پیش تعیین شده دریافت کند. یا نتایج اخذ شده از باد سنج را تحلیل و میزان اغتشاش را محاسبه کند. تیلور<sup>۷</sup> (نقل از [۶]) می‌گوید که در شرایط ایده‌آل و اغتشاش ساکن و همگن می‌توان ضرایب انتشار را به صورت زیر به دست آورد [۶]:

$$\sigma_y^2 = \sigma_v^2 \int_0^t \int_0^\eta R_{1y}(\xi) d\xi d\eta \quad (29)$$

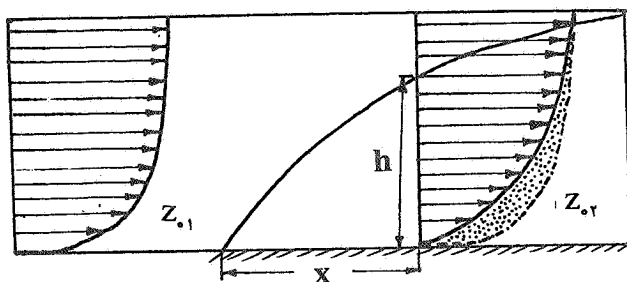
$$\sigma_z^2 = \sigma_w^2 \int_0^t \int_0^\eta R_{1z}(\xi) d\xi d\eta \quad (30)$$

از آنجا که تعیین شکل تابعهای خودهمبسته لاگرانژی<sup>۸</sup> معمولاً امکانپذیر نیست، برای محاسبه  $\sigma_x$  و  $\sigma_y$  تابعی به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\sigma_y = \sigma_v t f_1(t/\tau_{1y}) \quad (31)$$

$$\sigma_z = \sigma_w t f_2(t/\tau_{1z}) \quad (32)$$

با توجه به آزمایشهای انجام شده، محققان شکل‌های مختلفی برای توابع  $f_1$  و  $f_2$  ارائه کرده‌اند. ایروین<sup>۹</sup> (نقل از [۵]) این روشها را بررسی کرده و نتیجه گرفته است که نتایج پیشنهادی دراکسلر [۶] بهترین شکل تابعی هستند که در بیشتر موارد با دقت خوبی از آنها به شکل زیر می‌توان استفاده کرد.



شکل ۳- الف - اثر تغییر ناگهانی ارتفاع زبری سطح روی نیمرخ سرعت باد [۹]

جواب واقعیت می‌دهد و در این پروژه دنبال شده‌است بر اساس نتایج آزمایشهای پانوفسکی<sup>۱۰</sup> (نقل از [۹]) در تونل باد می‌باشد که به منظور دیگری انجام شده‌است. برای محاسبه ارتفاع لایه مرزی جدید  $h$  بر حسب فاصله در راستای جریان نسبت به محل تغییر زبری  $x$  در ناحیه پایین دست خواهیم داشت [۹]:

$$\frac{h}{z'_0} \left( \ln \frac{h}{z'_0} - 1 \right) = C \left( \frac{x}{z'_0} \right) \quad (40)$$

$$z'_0 \in \max(z_{0.1}, z_{0.2}) \quad (41)$$

$C$  یک عدد ثابت و مقدار آن تقریباً  $0.09$  است. پس از آنکه  $h$  در یک فرایند سعی و خطا در یک  $x$  معین محاسبه شد، برای محاسبه سرعت در داخل لایه مرزی جدید داریم:

$$u(z_{0.2}) = u(z_{0.1}) (\text{cor}) \quad (42)$$

$$\text{cor} = \frac{\ln(Z/z_{0.2}) \cdot \ln(h/z_{0.1})}{\ln(Z/z_{0.1}) \cdot \ln(h/z_{0.2})} \quad (43)$$

در این پروژه چنانچه توده گاز با تغییر ارتفاع زبری روبرو شود، نخست ارتفاع لایه مرزی جدید محاسبه می‌شود. سپس، چنانچه توده در داخل لایه مرزی جدید قرار گیرد، سرعت تصحیح می‌شود. در غیر این صورت، سرعت از نیمرخ جریان بالا دست پیروی می‌کند و به تصحیح آن نیاز نیست.

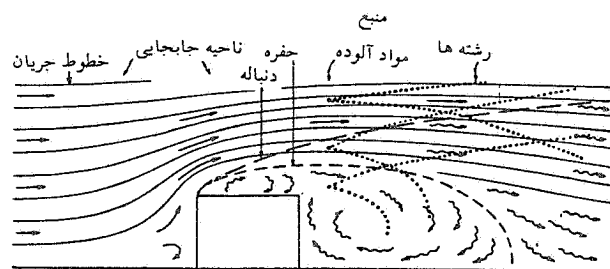
کمتر از شعاع متوسط دو توده باشد. در این صورت توده ناشی از ادغام دارای خواص و موقعیت متوسط دو توده اولیه است. با استفاده از این روش می‌توان تعداد توده‌ها را که به علت افزایش دقت در نزدیکی منبع به تعداد زیاد تولید شده بودند به طور قابل توجهی در نقاط دورتر کاهش داد و در نتیجه سرعت محاسبه را بالا برد. به عنوان مثال، در میدانی به وسعت  $1500$  متر در  $1500$  متر و سرعت باد  $5$  متر بر ثانیه بدون وجود الگوریتم کاهش توده مجموع توده‌های موجود در میدان به  $50$  عدد رسیده و زمان محاسبه برای  $5$  مرحله زمانی  $222$  ثانیه شده‌است. با استفاده از الگوریتم کاهش توده در همین شرایط تعداد توده‌ها به  $20$  عدد تقلیل یافت و زمان محاسبه به  $119$  ثانیه رسید.

## ۲-۷ اثر وجود ساختمانها، موانع و تغییر ناگهانی زبری

تقریباً در تمام مدل‌های توده‌ای ارائه شده، میدان جریان بدون موانع بررسی شده‌است. در مدل حاضر برای منظور کردن اثر دنباله مربوط به ساختمانها و موانع دیگر مانند تپه‌ها، و همچنین اثر تغییر ناگهانی ارتفاع زبری سطح سعی شده تا تغییرات سرعت و شدت اغتشاش این نواحی به نحوی در محاسبه وارد شود که جزئیات آن به اختصار چنین است [۱۱، ۱۲]:

## ۲-۷-۱ تغییر ناگهانی ارتفاع زبری

هرگاه ارتفاع زبری سطح زمین یکنواخت باشد، تنها یک لایه مرزی در اثر وزش باد به وجود می‌آید. اما هنگامی که هوا روی یک سطح ناهمگن می‌وزد، مثلاً وقتی که هوا از روی آب به سوی ساحل می‌وزد و یا وقتی که باد از درون جنگل به چمن زار وارد می‌شود، مطابق شکل (۳- الف) در محل تغییر زبری سطح یک لایه مرزی جدید نیز رشد می‌کند [۹]. در این راستا دو حالت وجود دارد، یکی زیاد شدن ناگهانی ارتفاع زبری سطح و دیگری کم شدن آن. در هر حالت، سرعت در داخل لایه مرزی جدید باید تصحیح شود. در خارج لایه مرزی جدید همان توزیع سرعت بالا دست حاکم است. برای محاسبه سرعت در لایه مرزی داخلی در حالت کلی باید معادلات حاکم بر میدان جریان با شرایط مرزی جدید حل و ارتفاع لایه مرزی محاسبه شود. سپس در داخل آن توزیع سرعت به دست آید. اما این کار دشوار است و به سادگی میسر نمی‌شود. روشی که



شکل ۳-ب - الگوی جریان، دنباله و حفره ایجاد شده و نحوه پخش مواد آلوده در اطراف یک ساختمان

محور دنباله تا نقطه ای است که در آن تغییر سرعت متوسط کمتر از ده درصد بیشترین تغییر در آن مقطع باشد.  $r_b$  مختصات مرز دنباله تعریف می شود و فاصله در جهت شعاعی از محور دنباله تا نقطه ای است که در آن افزایش شدت اغتشاش کمتر از ده درصد بیشترین افزایش در آن مقطع باشد. معادله (۴۴) تغییرات طولی سرعت و معادله (۴۵) تغییرات شدت اغتشاش را محاسبه می کند. برای محاسبه تغییرات عرضی سرعت مطابق با معادلات زیر خواهیم داشت:

$$\Delta = 1/167 + 0/167 \sin [7/121] (r/r_b - 0/221) \quad (48)$$

$$\Delta = 0/733 + 0/600 [-5/622 (r/r_b - 0/162)] \quad (49)$$

$$\Delta = \frac{u_1 - u}{u_2 - u_1} \text{ or } \Delta = \frac{\sigma_u - \sigma_{u1}}{\sigma_{u2} - \sigma_{u1}} \quad (50)$$

اساس این روش آن است که ساختمان یا هر مانع دیگر را با یک صفحه صاف در جهت عمود بر جریان تقریب بزنیم. این صفحه دارای پهنای  $W$  و ارتفاع  $2H$  است (فرض می شود که صفحه را طوری در زمین قرار داده ایم که فقط نیمی از آن روی سطح زمین است). آنگاه می توان طول مشخصه و نسبت منظر<sup>۱۱</sup> را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$L = (2HW)^{\frac{1}{3}} \quad (51)$$

$$AR = W/2H \quad (52)$$

در مدل حاضر، نخست قرار گرفتن هر توده در داخل مرز دنباله<sup>۱۲</sup> را بررسی می کنیم. در صورتی که مرکز توده در داخل دنباله باشد، با یک تغییر مختصات موقعیت توده نسبت به مختصات آن مانع پیدا شده و سپس تغییر سرعت و افزایش اغتشاش محاسبه می شود. این مدل هنگامی جواب مناسب می دهد که ابعاد توده از ابعاد مانع کوچکتر نباشد.

### ۳-۷-۳ اثر وجود تپه

یک تپه دو بعدی را که راستای آن عمود بر مسیر باد و طول آن

### ۲-۷-۲ اثر وجود ساختمانها و موانع

یکی از مسائلی که اغلب در محاسبه پدیده پخش با آن روبرو می شویم، اثر موانع و دنباله ایجاد شده مطابق شکل (۳-ب) در اطراف آنهاست. چنانچه ساختمان نزدیک به منبع صدور مواد آلوده باشد. ناحیه مغشوش ممکن است منبع صدور را نیز در بر بگیرد. از این رو هرگاه میدان جریان با مانعی مانند ساختمان در نظر گرفته شود، باید اثر دنباله مربوط به آنها را در فرایند پخش مواد آلوده در نظر گرفت. در مدل حاضر برای منظور کردن آثار ذکر شده، سعی شده است تا تغییرات سرعت و شدت اغتشاش این نواحی به گونه ای در محاسبه وارد شود. برای این منظور از نتایج هالییتسکی [۷] استفاده شده است. وی نتایج مربوط به دنباله پشت صفحات صاف را که از آزمایشهای تونل باد به دست آمده اند، با توجه به آزمایشهای خود وی به گونه ای اصلاح کرد تا برای مجموعه ای از ساختمانها در لایه مرزی اتمسفری قابل استفاده باشد. خلاصه آن به این شرح است:

$$\frac{(u_2 - u_1)}{u_1} = 0/32(x/L)^{-\frac{2}{3}} (AR)^{\frac{1}{5}} \quad (44)$$

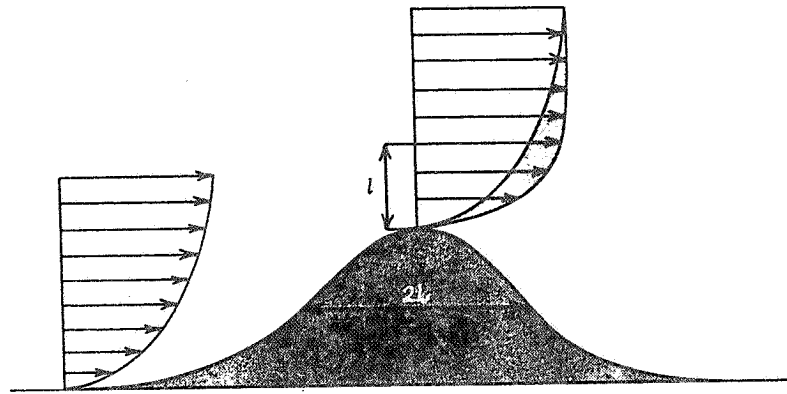
$$\frac{(\sigma_{u2} - \sigma_{u1})}{\sigma_{u1}} = 0/25(x/L)^{-\frac{2}{3}} (AR)^{-\frac{1}{5}} \quad (45)$$

$$\frac{r_b}{L} = 1/35(x/L)^{\frac{1}{3}} (AR)^{-\frac{1}{5}} \quad (46)$$

$$\frac{r_b'}{L} = 1/8(x/L)^{\frac{1}{3}} (AR)^{-\frac{1}{5}} \quad (47)$$

$r_b$  مختصات مرز دنباله تعریف می شود و فاصله در جهت شعاعی از





شکل ۳- ج- اثر یک تپه متقارن در جریان باد (تپه دوبعدی، عمود بر باد)  $L$  یک طول مشخصه است،  $I$  ارتفاعی است که در آن بیشترین افزایش نسبی سرعت حاصل می‌شود.

$$\sigma_z = c\sigma_z(\text{نخت}) + d \quad (54)$$

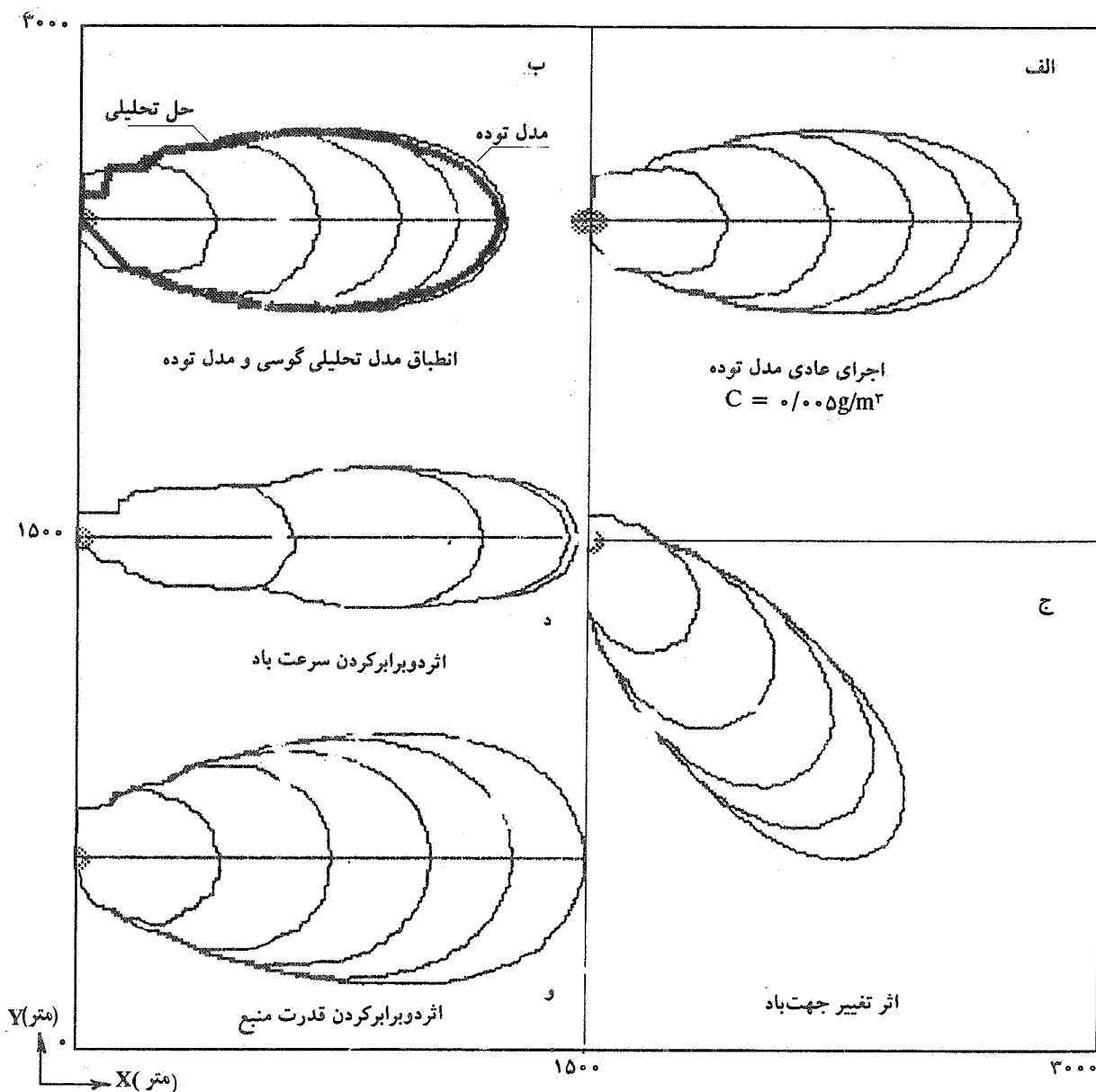
در این معادلات  $a, b, c, d$  ضرایب ثابتی هستند که صرفاً از شکل هندسی مانع و موقعیت آن نسبت به منبع به دست می‌آیند. جزئیات نحوه محاسبه آنها را مولفان در مرجع [۸] آورده‌اند.

### ۳- نتایج

بر اساس مطالبی که بیان شد، برنامه کامپیوتری برای حالت‌های مختلف داده‌ها اجرا شد که جزئیات آن به این شرح است. مطابق با شکل (۴) در هر حالت یک منبع نقطه‌ای پیوسته که در ارتفاع پنج متری از سطح زمین قرار دارد در نظر گرفته شده‌است. از لحظه فعال شدن منبع (آغاز انتشار) تا زمانی که به حالت دائم می‌رسد (آخرین کانطور غلظت مرتب روی خودش رسم می‌شود) خطوط هم غلظت (غلظت کلیه خطوط  $0.05$  گرم بر متر مکعب) در روی سطح زمین رسم شده‌است. ناحیه در نظر گرفته شده به ابعاد  $3 \times 3$  کیلومتر است. شکل (۴- الف) نحوه پخش مواد آلوده را در پایین دست منبع نشان می‌دهد که به روش توده مدل شده‌است. برای بررسی صحت عملکرد مدل تهیه شده نتایج برنامه با حل تحلیلی رشته گوسی [۱۰] در شرایطی که این حل صادق باشد مقایسه شده‌است. در شکل (۴- ب) این مقایسه که در شرایط دائم انطباق بسیار خوبی با 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

به قدر کافی زیاد است مطابق شکل (۳- ج) در نظر می‌گیریم. در این پروژه برای محاسبه تغییرات سرعت و تعیین یک توزیع مناسب سرعت پیرامون تپه از روش پانل<sup>۱۳</sup> که برای محاسبه توزیع سرعت و فشار پیرامون یک مقطع از بال هواپیما به کار می‌رود، الهام گرفته شده‌است. در روش پانل با فرض جریان پتانسیل، سطح جسم به تعداد زیادی قطعه تقسیم شده و روی هر قطعه ورقه‌های چشمه با قدرت ثابت اما مجهول توزیع می‌شود. اکنون پتانسیلی که کلیه قطعات بر روی یک قطعه القا می‌کنند قابل محاسبه است [۱۱]. با اعمال شرط مرزی صفر بودن مؤلفه عمودی سرعت روی هر قطعه یک دستگاه  $n$  معادله و  $n$  مجهول  $n$  معادل تعداد قطعات) خواهیم داشت که از حل آن قدرت هر قطعه به دست می‌آید. سپس با محاسبه تابع پتانسیل روی هر قطعه در نتیجه اثر قطعات دیگر، از آن در امتداد طول هر قطعه مشتق می‌گیریم تا سرعت مماس بر هر قطعه به دست آید. حالتی که تپه دو بعدی و متقارن باشد برنامه اجرا و نتیجه آن همراه با نتیجه کار بلجارز<sup>۱۴</sup> (نقل از [۹]) به دنبال نشان داده شده‌است. ملاحظه می‌شود که فرض جریان پتانسیل خطای چندانی را در این حالت ایجاد نمی‌کند. همچنین با شتاب گرفتن سیال هنگام عبور از روی تپه برای تصحیح ضرایب پخش گاز در مقایسه با زمین تخت از نتایج کارهای اهبای<sup>۱۵</sup> [۹] به صورت زیر استفاده شده‌است:

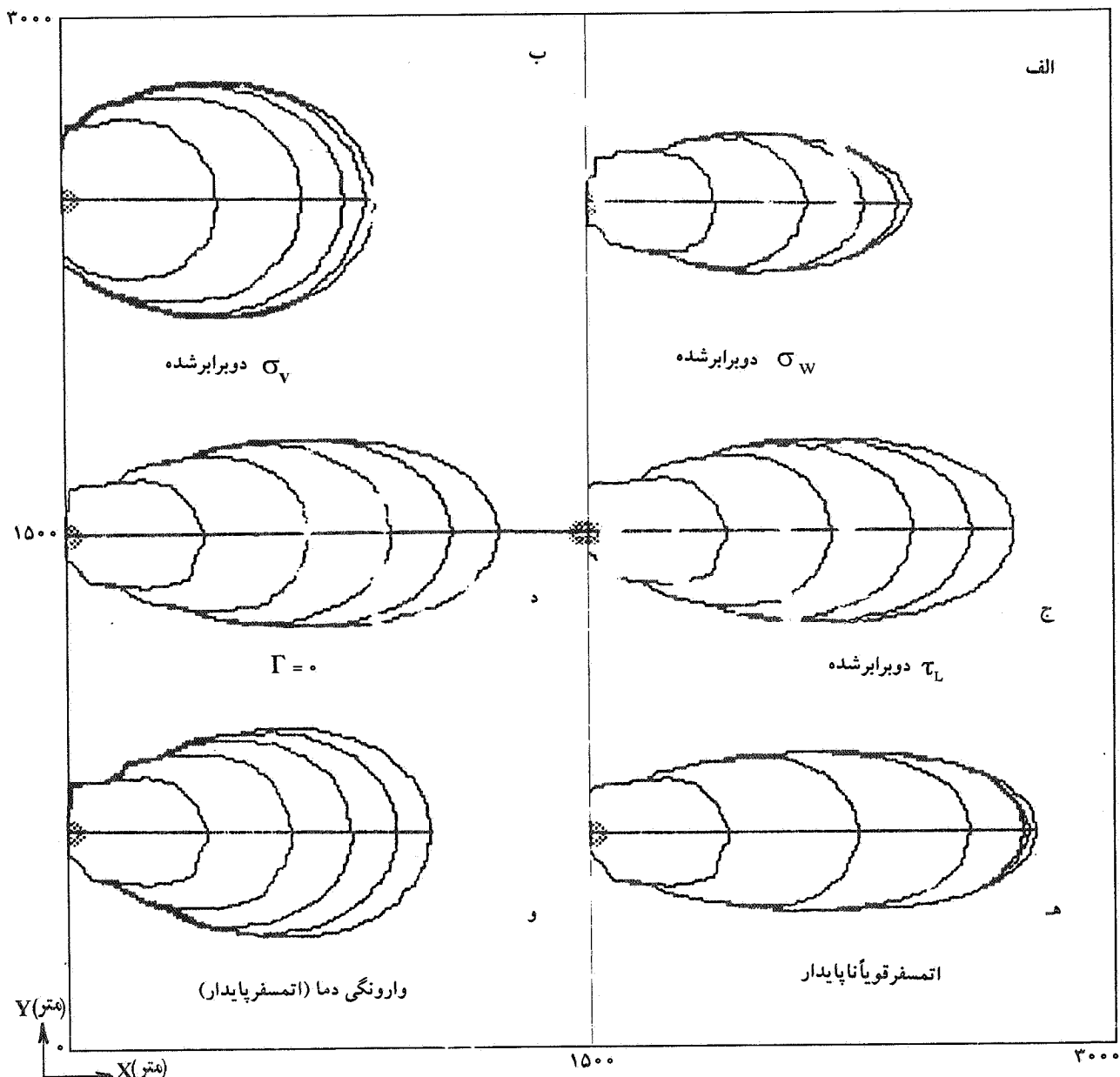
$$\sigma_y = a\sigma_y(\text{نخت}) + b \quad (53)$$



شکل ۴ - الف - رسم خطوط هم غلظت بر روی زمین 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، شکل (د) سرعت باد دو برابر شده است، شکل (و) دبی جرمی گاز خروجی از منبع دو برابر شده است.

شرایط دینامیکی و نا دائم اتمسفر را نشان می دهد. در شکل (۴ - د) که نسبت به حالت (۴ - الف) تنها سرعت باد دو برابر شده است  $(u = 2 \times 5 \text{ m/s})$ ، تغییر سرعت و جهت باد اثر بسیار زیادی در چگونگی انتشار مواد آلوده گذاشته است. با افزایش سرعت باد غلظت در جهت عرضی کاهش یافته، اما در جهت باد آلوده تا فواصل بیشتری برده می شوند. علت این امر را می توان چنین توجیه

توده ها همان رفتار واقعی منبع پیوسته را دنبال نمایند، می توانیم در هر لحظه آثار نادائم و نایکنواخت اتمسفر و سطح را در پدیده انتشار دخالت دهیم. در شکل (۴ - ج) که نسبت به حالت (۴ - الف) تنها جهت باد به اندازه ۴۵ درجه تغییر کرده و سایر شرایط ثابت باقی مانده است، ملاحظه می شود که همراه با تغییر جهت باد خطوط هم غلظت نیز انحراف پیدا کرده است. این موضوع اهمیت در نظر گرفتن



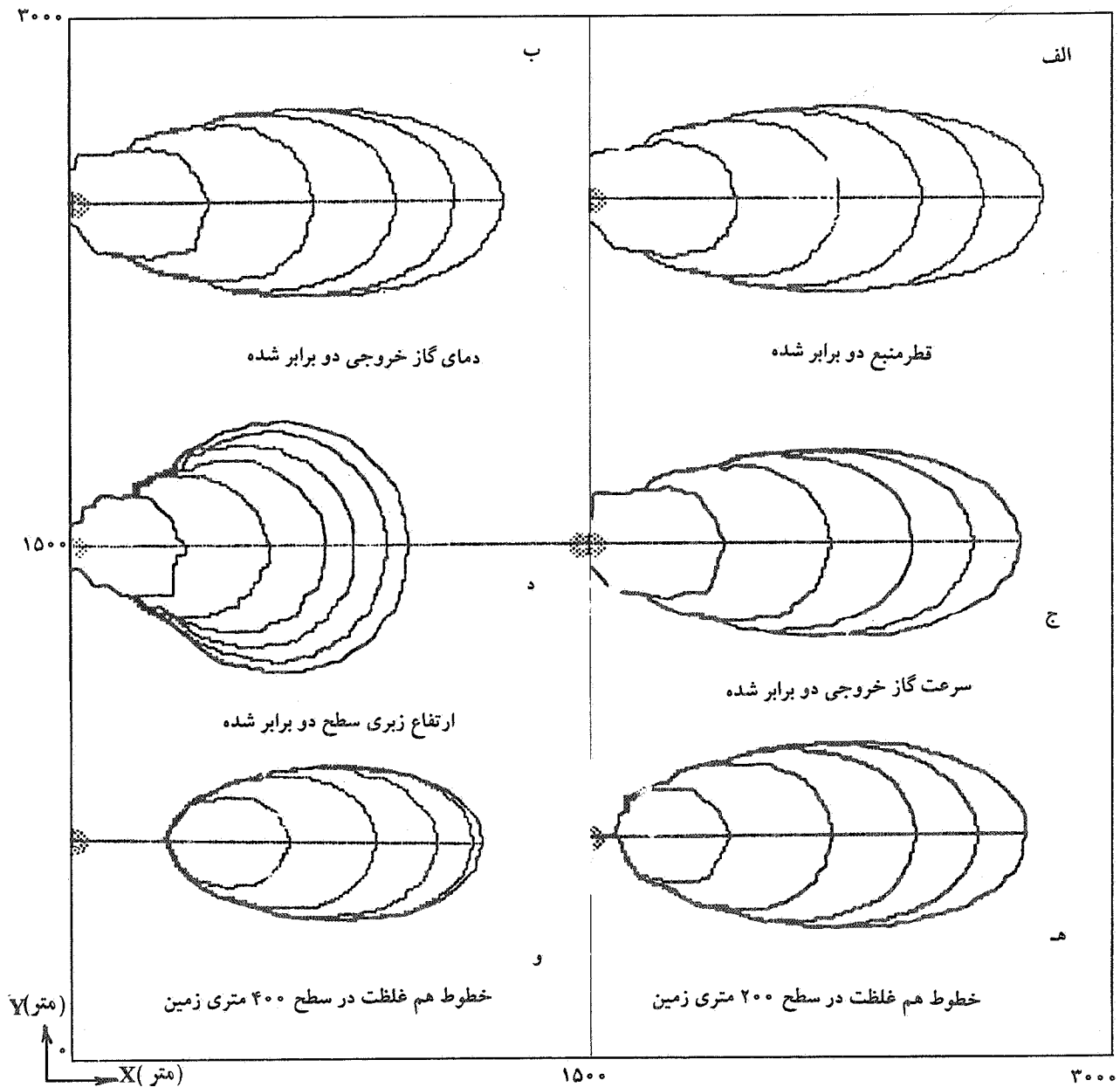
شکل ۵ - اثر ضرایب پخش و تغییرات دما روی پدیده انتشار مواد آلوده

در مقایسه با شکل (۴ - الف) ضریب نفوذ مغشوش در شکل (الف) در راستای قائم و در شکل (ب) در راستای افق دو برابر شده است. در شکل (ج) مقیاس زمانی مغشوش دو برابر شده و در شکل (د) دمای کلیه نقاط در راستای قائم یکسان در نظر گرفته شده است.

می شود که با افزایش سرعت باد، مواد آلوده کننده فرصت کمتری پیدا می کنند تا در اثر اغتشاش اتمسفر در جهات عرضی منتشر شوند. با افزایش سرعت باد تعداد توده های بیشتری برای مدل کردن رشته دود لازم است. از این رو زمان محاسبه افزایش و زمان لازم برای رسیدن به حالت دائم کاهش می یابد. در شکل (۴ - و) دبی جرمی خروجی از منبع نسبت به حالت (۴ - الف) دو برابر شده است. دیده

می شود که با افزایش دبی جرمی خروجی از منبع غلظت مواد آلوده نیز به همان نسبت مطابق معادله (۲۰) افزایش می یابد. شکل های (۵ - الف و ب) اثر تغییر انحراف معیار نوسان های باد در جهت های قائم و افقی را نشان می دهد. در مقایسه با شکل (۴ - الف) ملاحظه می شود پدیده انتشار شدیداً نسبت به تغییرات پارامترهای اغتشاش نظیر  $\sigma_w$ ،  $\sigma_v$  حساس است. در شکل (۵ - الف)

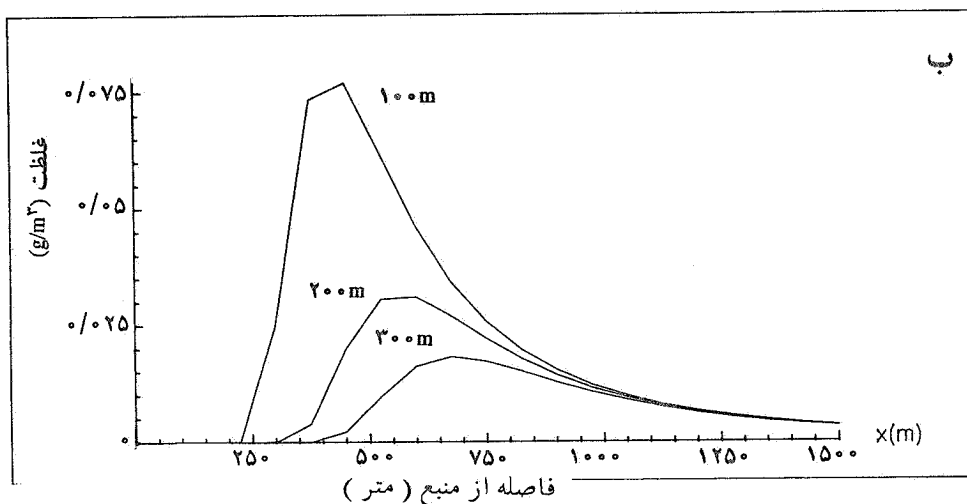
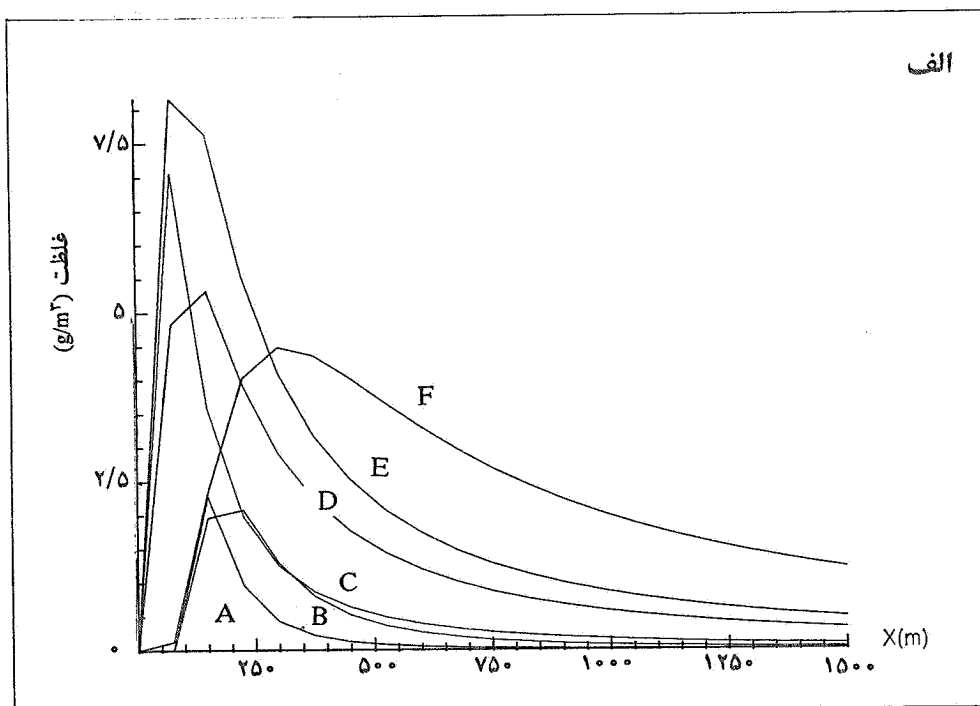
نمود که با افزایش سرعت باد، مواد آلوده کننده فرصت کمتری پیدا می کنند تا در اثر اغتشاش اتمسفر در جهات عرضی منتشر شوند. با افزایش سرعت باد تعداد توده های بیشتری برای مدل کردن رشته دود لازم است. از این رو زمان محاسبه افزایش و زمان لازم برای رسیدن به حالت دائم کاهش می یابد. در شکل (۴ - و) دبی جرمی خروجی از منبع نسبت به حالت (۴ - الف) دو برابر شده است. دیده



شکل ۶ - اثر پارامترهای منبع صدور گاز و سطح زمین روی پدیده پخش مواد آلوده در مقایسه با شکل (۴ - الف)

در محاسبه این پارامتر از روی نوسانهای قائم باد اثر ناچیزی در نتایج نهایی می‌گذارد. شکل‌های (۵ - د، ه، و) اثر تغییر دما را در پدیده پخش در راستای قائم نشان می‌دهند. اتمسفر، بسته به چگونگی توزیع دما در لایه‌های مجاور سطح زمین، یکی از حالت‌های ناپایدار، خنثی یا پایدار را خواهد داشت. در حالت ناپایدار با دور شدن از سطح زمین دما کاهش می‌یابد (سریعتر از نرخ کاهش دمای آدیاباتیک خشک<sup>۱۶</sup> [۱۰] که یک درجه به ازای هر ۱۰۰ متر است). در این حالت قدرت اتمسفر در پراکنده ساختن ذرات و رقیق نمودن

با افزایش  $\sigma_w$  که مربوط به نوسانهای قائم باد می‌شود، اغتشاش در جهت قائم افزایش یافته است. از این رو مواد در راستای قائم پراکنده شده، غلظت آنها روی سطح کاهش می‌یابد (خطوط هم‌غلظت جمعتر می‌شود). با افزایش  $\sigma_v$  در شکل (۵ - ب) یعنی، افزایش میزان اغتشاش افقی، بیشتر مواد در سطح افق پراکنده می‌شوند و غلظت افزایش می‌یابد. اما همچنان‌که در شکل (۵ - ج) در مقایسه با شکل (۴ - الف) می‌بینید، اثر مقیاس زمانی اغتشاش در غلظت مواد آلوده ناچیز است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که وجود خطا



شکل ۷ - الف - اثر انواع پایداری اتمسفر روی پدیده پخش گازهای آلوده

از حالت کاملاً ناپایدار اتمسفر تا حالت پایدار.

A: قویاً ناپایدار B: ناپایدار C: کمی ناپایدار

D: خنثی E: کمی پایدار F: پایدار

ب - اثر ارتفاع منبع صدور گاز روی پدیده پخش

سطح زمین افزایش می‌یابد. (این حالت معمولاً صبح زود روزهای

زمستان پیش می‌آید).

مطابق شکلهای (۶ - الف، ب و ج) متغیرهای اندازه منبع،

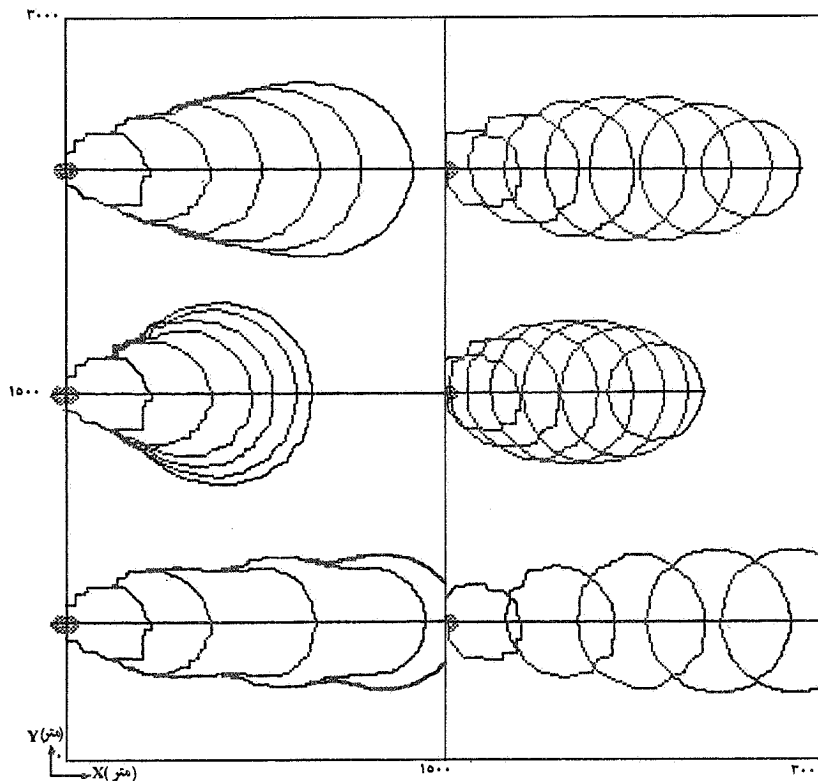
افزایش دما و سرعت گازهای خروجی هر کدام اثر ناچیزی روی

آنها زیاد بوده به همین دلیل مطابق با شکل (۵ - 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<sup>۱۷</sup>) مواد آلوده

تمایلی به بالا رفتن ندارند، مطابق شکل (۵ - و) غلظت آنها روی



شکل ۸ - اثر تغییر ناگهانی ارتفاع زبری در پدیده پخش

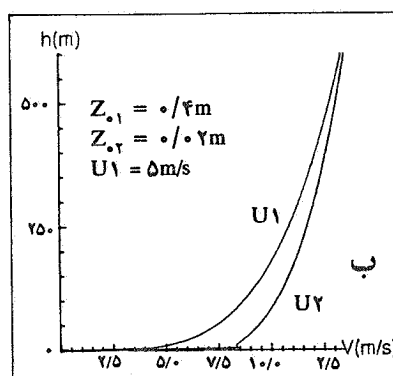
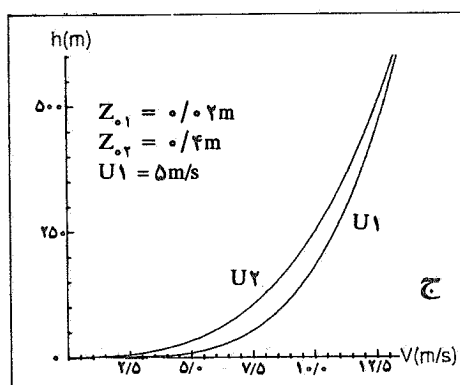
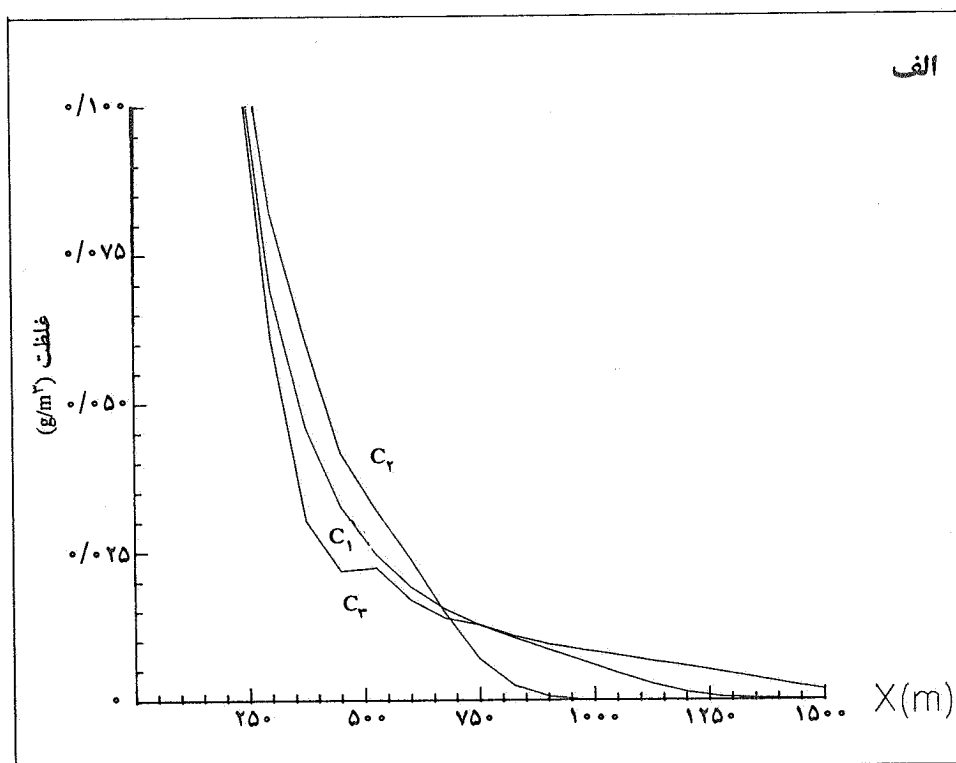
سمت راست: منابع نقطه ای لحظه ای سمت چپ: منابع نقطه ای پیوسته

شکل بالا: اجرای عادی (برای ارتفاع زبری یکنواخت) شکل وسط: تغییر ناگهانی زبری از ۰/۲ به ۰/۴ متر در ۲۵۰ متری منبع

شکل پایین: تغییر ناگهانی زبری از ۰/۴ به ۰/۲ متر در ۲۵۰ متر منبع

محاسبه کند. مطابق شکل‌های (۶ - ه، و) با دور شدن از سطح زمین خطوط هم غلظت از منبع فاصله گرفته و از وسعت آنها کاسته می شود. این بدان دلیل است که توده‌ها از لحظه رها شدن در اتمسفر (در پنج متر سطح زمین) تا زمانی که به سطح ۲۰۰ یا ۴۰۰ متری زمین می‌رسند مقداری در جهت باد منتقل شده و حین بالا آمدن به دلیل نفوذ هوا به درون توده‌ها مرتب از غلظت آنها کاسته می‌شود. شکل (۷ - الف) چگونگی پخش مواد آلوده از حالت قویاً ناپایدار اتمسفر (A) تا حالت کاملاً پایدار اتمسفر (F) را نشان می‌دهد [۱۰]. زمانی که اتمسفر ناپایدار است قدرت اختلاط و پراکنندگی آن بالا بوده و نفوذ هوا به درون توده‌ها زیاد است. لذا مواد آلوده به سرعت رقیق شده و غلظت آنها روی سطح زمین کاهش می‌یابد. اما هر چقدر اتمسفر به طرف پایدار شدن سوق پیدا می‌کند عکس حالت (A) صادق است. شکل (۷ - ب) اثر ارتفاع دودکش را روی پدیده پخش نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود با زیاد شدن

خطوط هم غلظت می‌گذارند. زیرا میزان رشد توده‌ها آن قدر 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 می‌شوند و غلظت روی سطح زمین کاهش می‌یابد. اما این تغییرات 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 تأثیر زیادی در غلظتها نمی‌گذارد. شکل (۶ - د) اثر افزایش ارتفاع زبری سطح را نسبت به حالت (۴ - الف) نشان می‌دهد. ارتفاع زبری مستقیماً روی نیمرخ سرعت باد و تنش برشی ایجاد شده بین لایه‌های هوا اثر می‌گذارد و رفتاری متضاد با رفتار سرعت باد دارد. این برنامه به صورت سه بعدی تنظیم شده، لذا قادر است غلظت مواد آلوده را در هر نقطه از فضا



شکل ۹ - الف - اثر تغییر ارتفاع زبری سطح روی پدیدهٔ پخش

$C_1$ : توزیع غلظت بر حسب فاصله در پایین دست منبع بدون هر گونه تغییر زبری  $C_2$ : در ۲۵۰ متری منبع زبری سطح کم شده است.

$C_3$ : در ۲۵۰ متری منبع زبری سطح زیاد شده است.

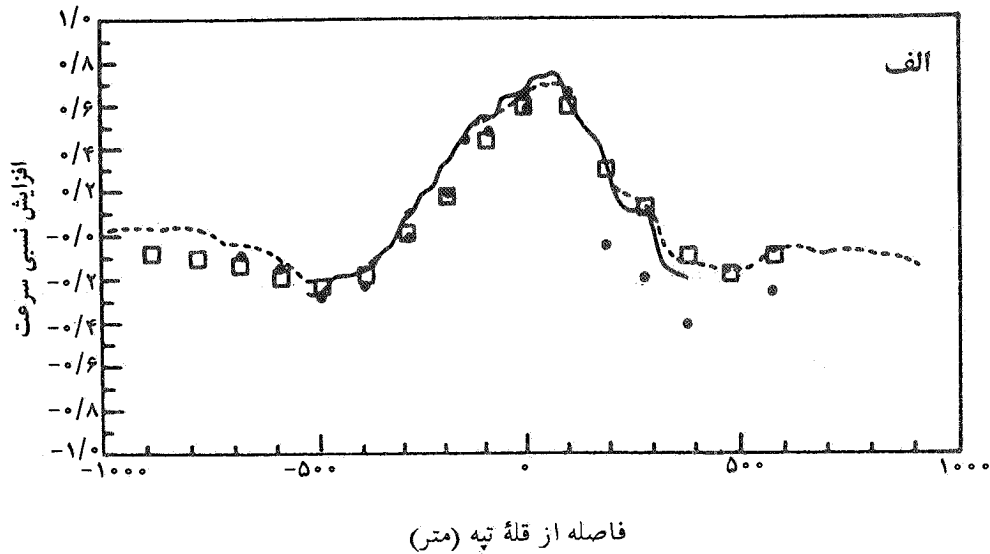
ب - اثر تغییر ارتفاع زبری روی نیمرخ سرعت با عبور باد از سطح زیر به سطح صاف

ج - اثر تغییر ارتفاع زبری روی نیمرخ سرعت با عبور باد از سطح صاف به سطح زیر

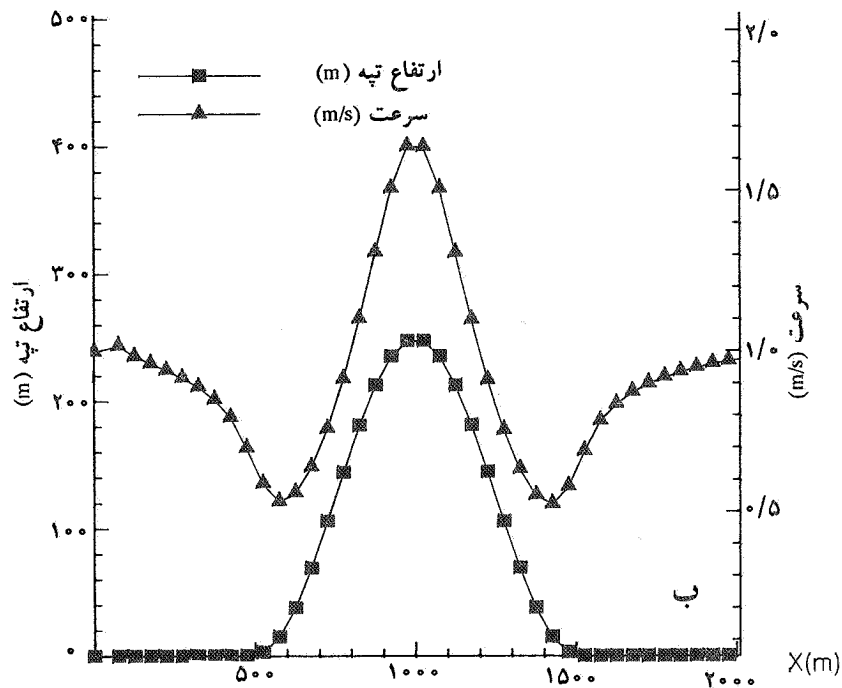
$U_1$ : نیمرخ سرعت بالا دست  $U_2$ : نیمرخ سرعت بعد از تغییر زبری

هنگام تماس مواد آلوده با سطح زمین، مردم یا محیط شهری در معرض آلودگی قرار نگیرد. برنامه برای حالتی که ارتفاع زبری سطح ناگهان تغییر کند اجرا شده است. مطابق با شکل‌های (۸ و ۹) ملاحظه

ارتفاع دودکش اولاً غلظت مواد آلوده در پایین دست منبع کاهش می‌یابد. ثانیاً غلظت ماکزیمم در فاصله دورتری از منبع اتفاق می‌افتد. بدین ترتیب می‌توان ارتفاع منبع را به گونه ای تنظیم کرد که



فاصله از قله تپه (متر)

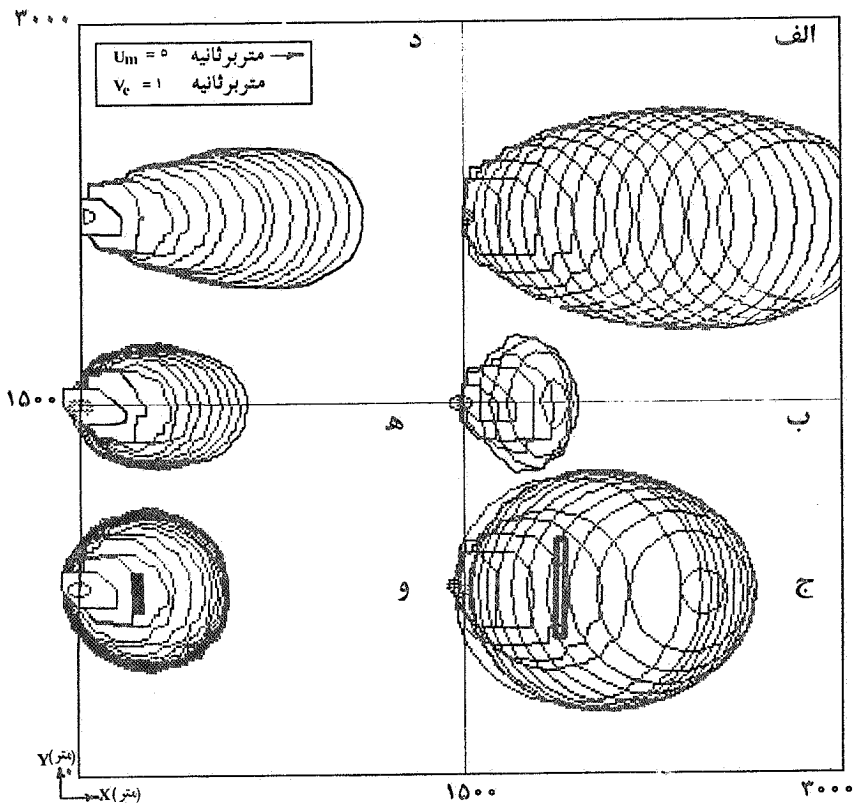


شکل ۱۰ - الف - توزیع سرعت پیرامون یک تپه، خط ممتد و خط چین مربوط به روش عددی و مربع و دایره‌های توپر مربوط به آزمایش است (نتیجه کار بلجارز [۹] برای جریان واقعی) ب - توزیع سرعت پیرامون یک تپه با فرض جریان پتانسیل با روش پانل (از اجرای برنامه)

با زیاد شدن زبری سطح سرعت باد در نزدیکی سطح کاهش یافته و غلظت مواد آلوده در پایین دست نسبت به حالت عادی کاهش ولی در جهت عرضی افزایش می‌یابد. شکل (۱۰) عملکرد روش پانل را نشان می‌دهد که در قسمت (۲-۷-۳) مورد بررسی قرار گرفت.

می‌شود در مقایسه با حالتی که ارتفاع زبری سطح یکنواخت باشد (شکل ۸) ردیف بالا) این پدیده در برابر تغییر زبری نیز حساس است. با کم شدن زبری سطح سرعت هوا در نزدیکی سطح افزایش یافته و لذا مواد آلوده تا مسافت بیشتری از منبع دور می‌شوند. لیکن

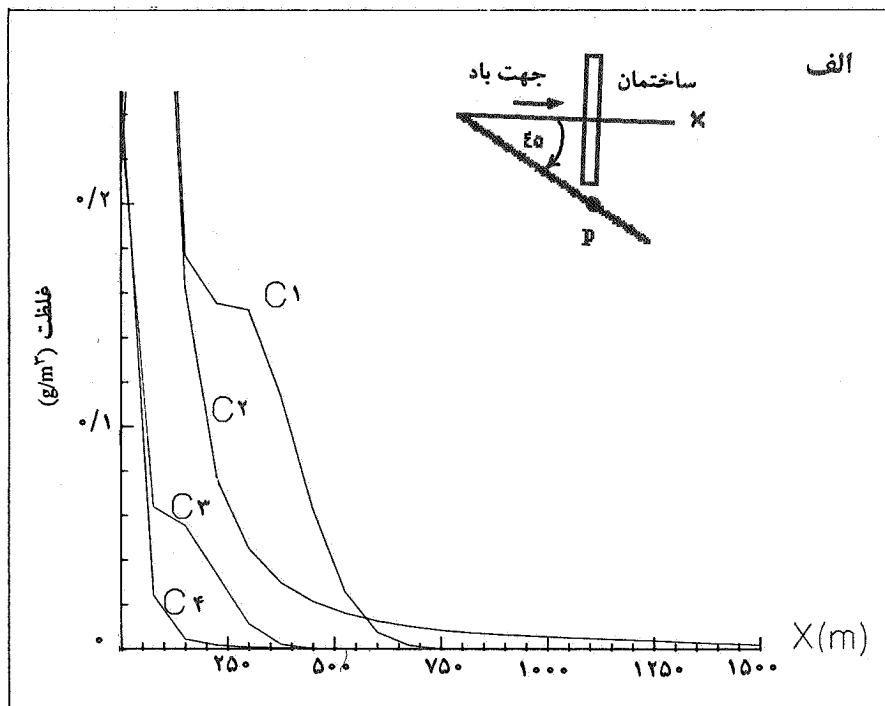




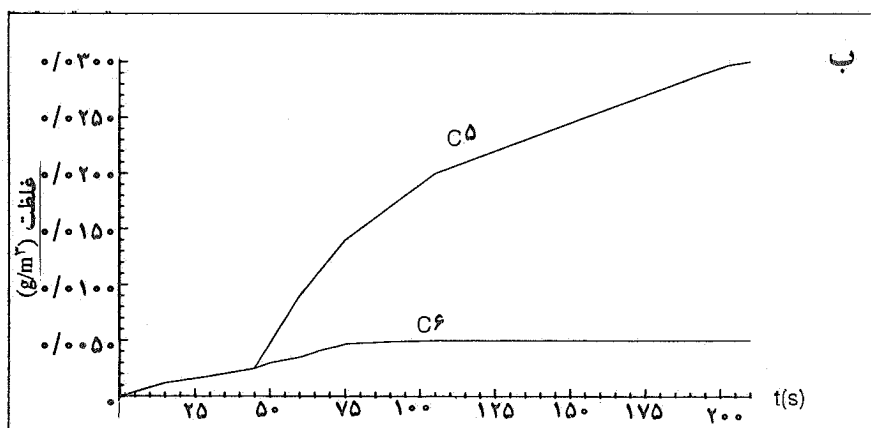
شکل ۱۱ - اثر موانع در پدیده پخش الف - اجرای عادی منبع لحظه ای (بدون هرگونه مانع) ب - در ۲۵۰ متری منبع یک تپه با طول زیاد و ارتفاع ۱۵۰ متر وجود دارد (عمود بر باد). ج - در ۴۰۰ متری منبع یک ساختمان به ارتفاع ۱۰۰ متر و طول ۳۰۰ متر (عمود بر باد) وجود دارد. د - پخش مواد آلوده از یک منبع پیوسته (بدون هرگونه مانع) ه - در ۲۵۰ متری منبع یک تپه با طول زیاد و ارتفاع ۱۵۰ متر و شیب ۰/۴۵ وجود دارد. و - در ۲۰۰ متری منبع یک ساختمان به ارتفاع ۱۰۰ متر و طول ۲۰۰ متر (عمود بر باد) وجود دارد.  $V_c$ : سرعت خروجی گاز از منبع  $U_m$ : سرعت متوسط هوا

سرعت کاهش می یابد. این کاهش سریعتر از منحنی  $C_2$  به سمت صفر میل می کند. منحنی  $C_3$  توزیع غلظت را در راستای ۴۵ درجه نشان می دهد. نسبت به حالتی که ساختمان در مسیر نباشد (منحنی  $C_4$ ) مقداری افزایش غلظت داریم. بنابراین می توان چنین نتیجه گرفت که برای نقاطی که در صورت نبودن ساختمان به طور طبیعی در معرض مواد آزاد شده قرار می گرفتند، وجود ساختمان باعث کاهش غلظت در آن نقاط می شود. اما در نقاطی که در مجاورت ساختمان به فاصله کمی قرار داشته و به طور طبیعی در معرض مواد آلوده کننده قرار نمی گرفتند، وجود ساختمان باعث افزایش غلظت در آنها می شود. شکل (۱۲ - ب) با فعال شدن منبع، نحوه تغییرات غلظت بر حسب زمان را در نقطه P که رو به روی ساختمان در امتداد ۴۵ درجه قرار دارد نشان می دهد. وجود ساختمان سبب بالا رفتن غلظت در این نقطه شده است. همچنین ملاحظه می شود زمان رسیدن به حالت

شکل (۱۱) اثر موانع را در میدان جریان نشان می دهد. با قرار گرفتن موانع نظیر ساختمان یا تپه در پایین دست منبع، بر اثر افزایش اغتشاش ناشی از دنباله پشت موانع، ضرایب انتشار افزایش یافته و غلظت مواد آلوده در پایین دست موانع کم می شود. اما در امتدادهای دیگر مطابق با شکل (۱۲) وجود موانع باعث افزایش غلظت می شود. شکل (۱۲ - الف) توزیع غلظت بر حسب فاصله در پایین دست یک منبع پیوسته را نشان می دهد (مطابق با شکل های ۱۱ - د، و) در این حالت یک ساختمان به ارتفاع ۱۰۰ متر و پهنای ۲۰۰ متر در ۲۰۰ متری منبع قرار دارد. با پدید آمدن یک حفره ۱۸۰ بلا فاصله بعد از ساختمان، مواد آلوده در داخل این حفره قرار گرفته و جریان چرخشی به دور خود پیدا می کنند. در این ناحیه مطابق منحنی  $C_1$  غلظت افزایش می یابد. اما ابعاد این ناحیه نسبت به دنباله ایجاد شده در پشت ساختمان کوچک بوده و ملاحظه می شود که غلظت به



فاصله از منبع (متر)



شکل ۱۲ - الف - توزیع غلظت مواد آلوده در پایین دست یک منبع پیوسته بر حسب فاصله

$C_1$ : در ۲۰۰ متری منبع یک ساختمان به ارتفاع ۱۰۰ متر و پهنای ۲۰۰ متر وجود دارد.  $C_2$ : در مسیر هیچ گونه مانعی وجود ندارد.  $C_3$ : توزیع غلظت در امتداد ۴۵ درجه با در نظر گرفتن ساختمان.  $C_4$ : توزیع غلظت در امتداد ۴۵ درجه بدون در نظر گرفتن ساختمان

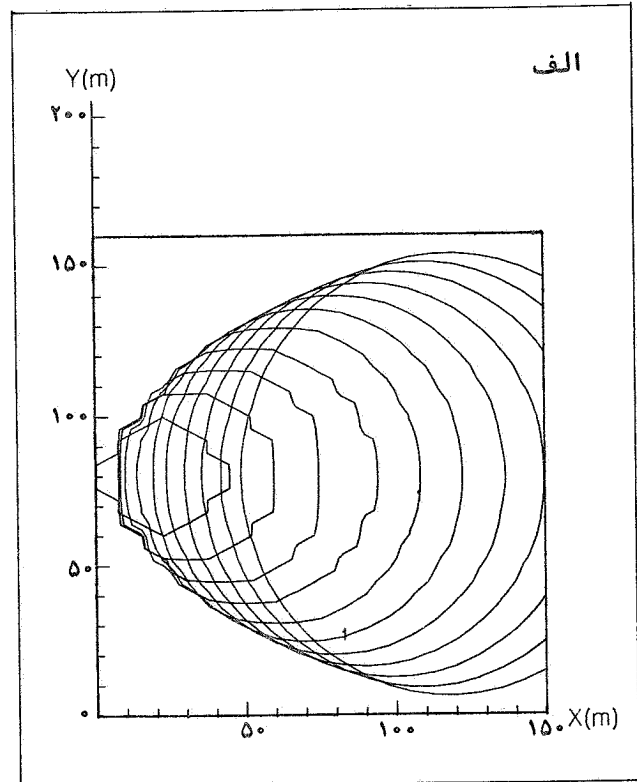
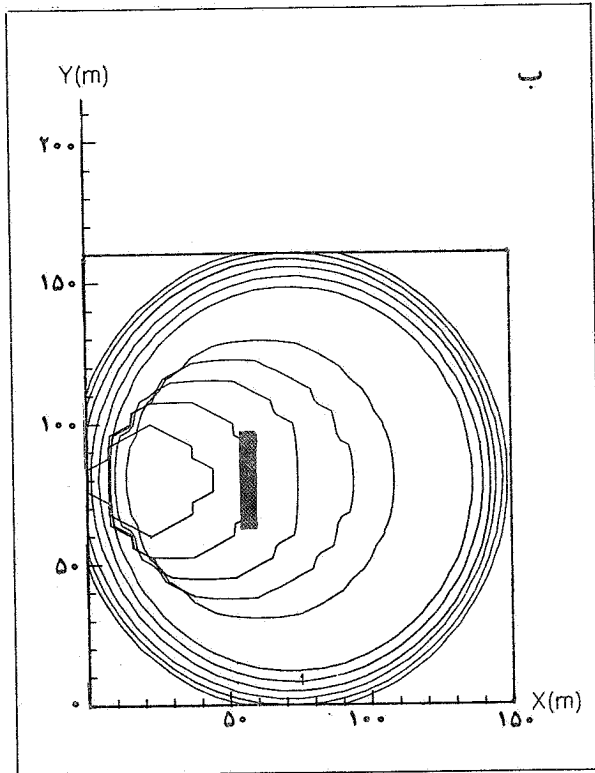
ب - توزیع غلظت مواد آلوده بر حسب زمان در نقطه P رو به روی ساختمان در راستای ۴۵ درجه

$C_5$ : با در نظر گرفتن ساختمان در مسیر  $C_6$ : بدون در نظر گرفتن ساختمان در مسیر

متری) یک منبع لحظه ای (یک توده از مواد آلوده) قرار گرفته نشان می دهد. ملاحظه می شود با رسیدن توده به ساختمان، بر اثر افزایش ضرایب اغتشاش، توده به سرعت رشد کرده، کانتورهای غلظت بعد از ساختمان منطقه وسیعتری را در بر گرفته است. حتی اثر آن به خود

دائم با در نظر گرفتن ساختمان مطابق منحنی (C5) افزایش می یابد، درحالی که وقتی ساختمان در مسیر نباشد مطابق منحنی (C6) تغییرات غلظت در نقطه P سریعتر به سمت صفر میل می کند.

شکل (۱۳) تأثیر یک ساختمان را که در فاصله نزدیک (۵۰



شکل ۱۳ - نحوه پخش یک توده در ناحیه‌ای به ابعاد  $150 \times 160$  متر مربع

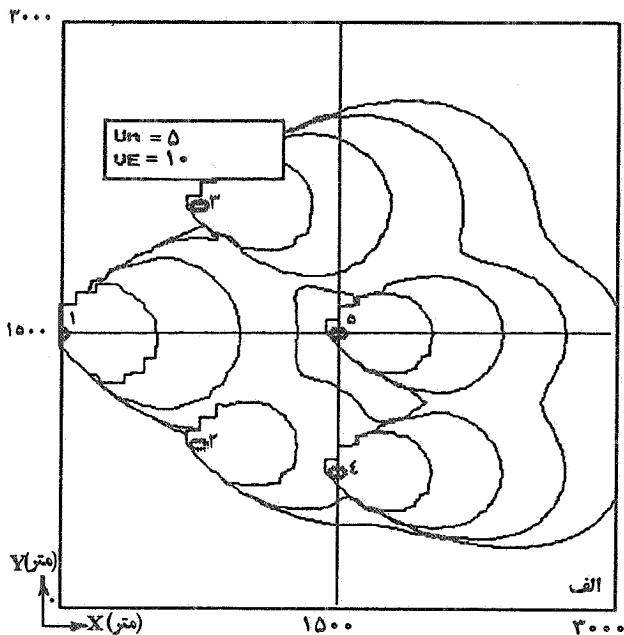
توده در نقطه  $(0, 80)$  ناگهان آزاد می‌شود، سرعت متوسط باد ۵ متر بر ثانیه است. در ۵۰ متری منبع یک ساختمان به ارتفاع ۵۰ متر و پهنای ۴۰ متر قرار دارد، غلظت کلیه کاتورها  $0.005$  گرم بر متر مکعب است. الف - بدون ساختمان در مسیر ب - با وجود ساختمان در مسیر

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 اروگرافی سطح) مدل تهیه شده در این زمینه گام نخستین بوده و به نظر می‌رسد که برای اخذ نتایج بهتر می‌بایست کارهای بیشتری انجام گیرد. این پروژه از مطالعه یک رشته ساده گوسی شروع شده و مرتب با افزودن قسمتهایی به آن اکنون قادر است دیدگاه کلی را در این زمینه ترسیم نماید. بعضی از قسمتها از جمله "اثر تغییر ناگهانی زبری، اثر موانع و اروگرافی سطح، روش پانل به ویژه حالت سه بعدی و روش کاهش توده‌ها" نوآوریهای هستند که تقریباً در تمام مدلهایی که تاکنون ارائه شده است به چشم نمی‌خورد. همچنین تنظیم برنامه‌ای که در یک چارچوب معین اثر تمام پارامترها را مدل نماید با توجه به عدم وجود 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.

منبع نیز سرایت کرده است. لذا فاصله مانع از منبع نیز پارامتر مهمی است. چنانچه در یک ناحیه منابع متعددی به طور همزمان یا با تأخیر فعال شوند و گازهای خروجی از این منابع خنثی باشند، یا اینکه با هم واکنش شیمیایی ننمایند، مدل توده مطابق با شکل (۱۴) قادر است پخش آنها را مدل نماید. از این رو این مدل منابع خطی و صفحه ای را نیز در بر می‌گیرد. اما به علت بالا رفتن تعداد توده‌ها در ناحیه، زمان محاسبه افزایش می‌یابد که با اجرای الگوریتم کاهش توده تا حدودی قابل جبران است. اما برای اجرای یک برنامه زمان حقیقی احتیاج به کامپیوتری با سرعت و حافظه زیاد است.

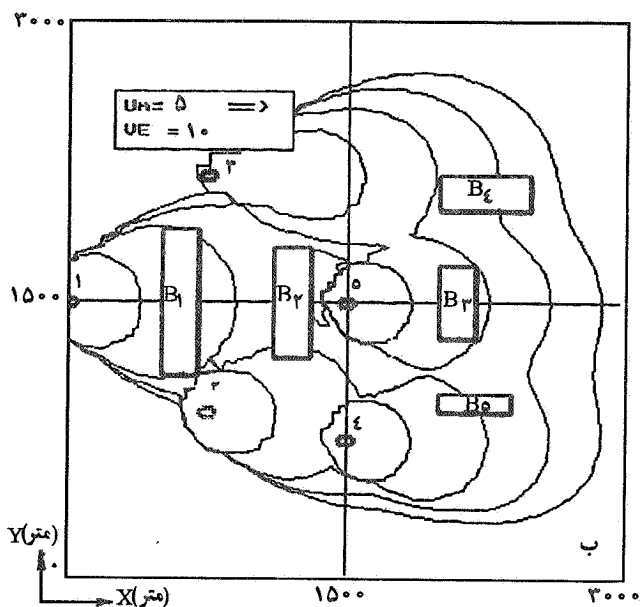
#### نتیجه گیری

در عرض ۲/۵ سال مطالعه و جمع آوری منابع، سعی شده است مدلی تهیه شود که معادلات آن دقت لازم و کارایی کافی را داشته باشند. اما با توجه به ماهیت جریان مغشوش و پیچیدگیهایی که در



cal. dt = ۸۶۴/۹	cal. Time = ۱۵۴۸/۳
R. dt = ۶۰/۱۰	R. Time = ۲۴۰
$C_{\mu} = ۷/۷۶۱۳$	$X_{\mu} = ۰$
$Z_{\mu} = ۰/۱۰۰۰$	$Y_{\mu} = ۱۵۰۰$
Puff No. = ۱۶۶	

time	Y	X	No
۰	۱۵۰۰	۰	۱
۰	۹۰۰	۷۵۰	۲
۰	۲۲۰۰	۷۵۰	۳
۰	۷۵۰	۱۵۰۰	۴
۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۵



زمان واقعی از شروع انتشار	: R. Time
زمان یک مرحله از انتشار	: R. dt
مقدار غلظت ماکزیمم در ناحیه	: C <sub>m</sub>
مختصات نقطه با بیشترین غلظت	: Y <sub>μ</sub> , X <sub>μ</sub>
ارتفاع از سطح زمین	: Z <sub>m</sub>
تعداد کل توده های موجود در ناحیه	: Puff No
محاسباتی در اثر فعال شدن پنج منبع	
زمان محاسبات کل	: C. Time
زمان محاسبات یک مرحله زمانی	: Cal. dt
سرعت خروجی گاز از منابع (متر بر ثانیه)	: V <sub>e</sub>
سرعت متوسط باد (متر بر ثانیه)	: U <sub>m</sub>

شکل ۱۴ - نحوه پخش مواد آلوده از تعدادی منبع پیوسته که همزمان فعال شده اند (از لحظه شروع تا رسیدن به حالت دائم، خطوط هم غلظت بادقت  $0.005 \text{ g/m}^3$  رسم شده اند). الف - ناحیه بدون مانع ب - ناحیه با در نظر گرفتن موانع

واژه نامه

- |              |   |                         |                          |
|--------------|---|-------------------------|--------------------------|
| 1. diffusion | 5. orography                            | 9. Irwin                | 14. Beljaars             |
| 2. lamp      | 6. Briggs                               | 10. Panofsky            | 15. Ohba                 |
| 3. Roberts   | 7. Taylor                               | 11. aspect ratio        | 16. adiabatic lapse rate |
| 4. Richards  | 8. Lagrangian auto correlation function | 12. wake                | 17. inversion            |
|              |   | 13. source panel method | 18. cavity               |

1. Shieh, C. M., "A Puff Pollutant Dispersion Model with Shear and Dynamic Plume Rise," *Atmospheric Environment*, Vol. 12, pp. 1933-1938, 1987.
  2. Zanetti, P., "An Improved Puff Algorithm for Plume Dispersion Simulation," *Applied Meteorology*, Vol. 4, pp. 56-74, 1981.
  3. Ludwig, F. L., and Gasiorek, L. S., and Ruff, R. E., "Simplification of Gaussian Puff Model for Real-Time Minicomputer Use," *Atmospheric Environment*, Vol. 11, pp. 431-436, 1977.
  4. Ludwig, F. L., and Salvador, R., and Bornstein, R., "An Adaptive Volume Plume Model," *Atmospheric Environment*, Vol. 23, pp. 127-138, 1989.
  5. Burger, L. W., and Mulholand, M., "Real-Time Prediction of Point Source Distribution Using an Anemometer-Bivane and a Microprocessor," *Atmospheric Environment*, Vol. 22, pp. 1309-1317, 1987.
  6. Draxler, R. R., "Determination of Atmospheric Diffusion Parameters," *Atmospheric Environment*, Vol. 10, pp. 99-105, 1976.
  7. Halitsky, J., "Wake and Dispersion Model for the EBR-II Building Complex," *Atmospheric Environment*, Vol. 11, pp. 577-596, 1976.
  8. Ohba, R., Okabayashi, K., and Okamoto, H., "Prediction of Gas Diffusion in Complicated Terrain by a Potential Flow Model," *Atmospheric Environment*, Vol. 23, pp. 7180-8002, 1988.
  9. Lundtang Petersen, E., *European Wind Atlas*, Riso National Lab, 1989.
  10. Dobbins, R. A., *Atmospheric Motion and air Pollution*, John Wiley & Sons, 1979.
۱۱. عباسپور، م. و کلاتر، و.، "اثرات تغییر ناگهانی زبری، موانع واروگرافی سطح روی پخش گازهای سنگین در محیط،" مجموعه مقالات سومین کنفرانس سالانه انجمن مهندسين مکانیک، ص ۲۱-۲۹، ۱۳۷۴.
۱۲. عباسپور، م. و کلاتر، و.، "اثرات تغییر ناگهانی زبری، موانع واروگرافی سطح روی پخش گازهای سبک در اتمسفر،" مجموعه مقالات سومین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، ص ۱۷۵-۱۹۱، ۱۳۷۳.