شبیه‌سازی مکانیزم پخش گازهای آلوده در محیط شهری

ولی کلانتر چاهوکی* و مجید عباسپور**
دانشکدهٔفنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده - *برای آشنایی با نحوهٔ پخش گازهای سمی در اتمسفر یک برنامهٔ جامع کامپیوتری تهیه شده‌است. مبنای این برنامه بر مدل توده استوار است که از مدلهای تحلیلی پخش گوسی مشتق شده‌است. این برنامه در برابر شرایط لحظه ای و نادائم اتمسفر کاملاً انعطاف پذیر بوده و قادر است کلیهٔ 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 پدیدهٔ پخش در نظر گرفته شده‌است. این برنامه می‌تواند انتشار گازهای سبکتر و سنگینتر از هوا را مدل کرده و به صورت زمانی حقیقی نیز کار کند. در اینجا اثر کلیهٔ 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 شده‌است.*

Simulation of Dispersion of Polluted Gases in Atmosphere

V. Kalantar and M. Abbaspour
Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modaress 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

باتوجه‌به ازدیاد روزافزون منابع آلودگی هوا در اثر توسعهٔ تکنولوژی و ازدیاد جمعیت، آگاهی از نحوهٔ انتشار این مواد در اتمسفر نیز روز به روز اهمیت بیشتری می‌یابد. ساده‌ترین روش مدل کردن انتشار رشته ای از مواد آلوده در اتمسفر استفاده از روشهای تحلیلی گوسی است. امااین روشهادر شرایط

* دانشجوی مقطع دکترای مکانیک ** دانشیار

فهرست علائم

AR	نسبت منظرصفحهٔ معادل	r	فاصلهٔ شعاعی‌از محور دنباله، m	Z_e	ارتفاع‌بادسنج، m
C	غلظت مواد آلوده، g/m^3	r_b ,$\bar{r}_b$	مـــرزشعاعی دنـــباله در اثـــر تغییرات سرعت و اغتشاش، m	Z_{e1} و Z_{e2}	ارتـــفاع زبـری سـطح در پـایین دست و بالا دست جریان، m
cor	ضریب تصحیح سرعت	S	پارامترپایداری	Δt	زمان‌هرمرحله، s
d	فاصله‌مجازبین‌دوتوده، m	t	زمان‌ازآغازانتشار،s	α , β	شاخص تنش برشی، m
F	فلوی‌شناوری	T	دمای‌محیط، K	σ_w ,σ_v	نوسانهای عرضی و قائم باد(انحراف معیار)، m/s
f_2وf_1	توابع‌مناسب‌لاگرانژی	T_e	دمای‌گازدر محل خروج، K	σ_z, σ_y ,σ_x	ضرایب پخش در امتدادهای سه گانه، m
g	شتاب‌جاذبهٔ‌زمین، m/s^2	u	سرعت‌متوسط‌طولی، m/s	σ_u	انحراف مـعیار تـغییرات طـولی سرعت، m/s
H_s	ارتفاع منبع، m	u_1	سرعت‌قبل‌ازمانع، m/s	σ_{u2} و σ_{u1}	انحراف مـعیار تـغییرات طـولی باد قبل و بعد از مانع، m/s
h	ارتفاع لایه مرزی داخلی،m	u_2	ســـرعت‌بعد از مـــانع روی محوردنباله، m/s	Γ	نـرخ کـاهش دمـای آدیـاباتیک خشک، K/km
L	بعد مشخصهٔ صفحه، m	V	سرعت‌باددرمحل توده، m/s	Δ	نسبت تغییرات سرعت متوسط یا نسبت افزایش اغتشاش
L_3 ,L_2 ,L_1	طول محورهای بیضی‌گون، m	V_n و V_s	پارامترشاخص	λ	نرخ کاهش دما،s
N	تعدادتوده‌ها در هر مرحلهٔ‌زمانی	V_e	سرعت‌خروجی‌گازازمنبع،m/s	τ_L	مقیاس زمانی لاگرانژی، s
n	شاخص‌نوع‌پایداری‌اتمسفر وزبری‌سطح	W_p	سرعت‌قائم‌توده،m/s	T_I	عددثابت‌درحدود۱/۶۴برابر τ_L
P_1...P_6	نقاط شاخص‌هرتوده	X	تغییرمکان افقی، m		
q	دبـی‌جرمی‌گازخـروجی‌ازمـنبع، g/s	x	فاصله از مـانع یـا مـحل تـغییر ارتفاع زبری سطح، m		
R_L	تابع‌خودهمستهٔ‌لاگرانژی	Y	تغییرمکان‌عرضی، m		
R_{Ly} ,R_{Lz}	توابع خود همبستهٔ لاگرانژی در امتداد عرضی و قائم	Z	تغییرمکان‌عمودی، m		
r_s	شعاع‌توده‌درمحل خروج، m				

محدودی صادق‌اند. از طرف‌دیگرشایددقیقترین مدل پدیدهٔ انتشار از حل عددی معادلهٔ نفوذ[1] به دست آید. اما با توجه به محدودیت حافظه و سرعت کامپیوترها و مشکلات مربوط بـه مـدل کـردن عبارتهای نفوذ اغتشاش، استفاده از این روشها بیشتر جنبهٔ تحقیقاتی داشته و کمتر می‌توان آنها را در کاربردهای عملی‌که با یک مـیدان جریان سه بعدی و شرایط نادائم مواجه‌اند مشاهده کرد.

شی[۱]، زانتی[۲]، لودویگ[۳،۴] و مالهلند[۵] بـه مشکـلات اعمال روشهای عددی تفاضل محدود برای محاسبهٔ انـتشار مـواد 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 داده‌است [۱] که از ایـن روش مـی‌توان بـرای مـحاسبهٔ زمـان حـقیقی اسـتفاده کـرد. محدودیت عمدهٔ روشهای توده‌ای نسبت به روشهای عددی در حل معادلهٔ نفوذ، عدم توانایی آنها در مدل کردن واکـنشهای شـیمیایی است. اولین کارهای مربوط به روش توده‌ای را می‌توان به لمپ[2] و روبرتز[3] نسبت داد (نقل از [۱]). لودویگ برای محاسبهٔ زمان حقیقی روی مدل اولیه، ساده سازیهایی انجام داد. وی هـمچنین مـعیاری برای فاصلهٔ مناسب بین دو تودهٔ متوالی به دست آورد. شی اثر تنش برشی ناشی از نیمرخ باد را نیز در نظر گرفت. با آنکه ریچاردز[4] (نقل از [۱]) قبلاً به روش تحلیلی اثر تنش برشی باد را روی یک تـوده محاسبه کرده‌است، حل وی تنها برای یک تودهٔ مجزا و تنش برشی ثابت و شرایط یکنواخت و دائمی‌صادق است. در صورتی که روش ابتکاری شی امکان در نظر گرفتن شرایط کاملاً دینامیکی را فراهـم نموده‌است.

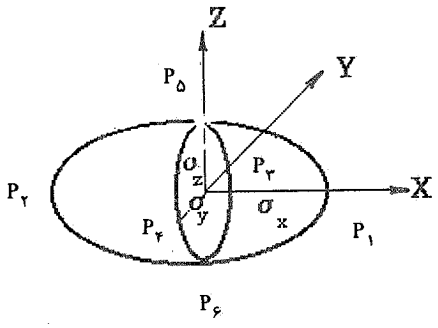
مالهلند مدل توده‌ای خاصی را ارائه داده که ترکیبی از روشهای تودهٔ متداول و روشهای تفاضل محدود است. در این مدل، انتشار هر توده نسبت به مختصات مـتصل بـه یک صـفحهٔ مـرجع بـیان می‌شود. این صفحهٔ مرجع خود می‌تواند نسبت به مختصات ثابت اویلری حرکت کند. توزیع غلظت عمود بر صفحهٔ مـرجع گـوسی فرض شده‌است و انتشار مواد به موازات صفحهٔ مرجع از حل عددی

معادلات ممانهای اول و دوم پراکندگی مواد به روش تفاضل محدود به دست می‌آید. زانتی [۲] روشی برای بهبود مدل توده در شرایط دینامیکی ارائه داد. از آنجا که در مدلهای توده خواص اتمسفر و مشخصات باد در هر مرحلهٔ زمانی ثابت فرض می‌شود، 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 می‌دهد. زانتی برای حل این مشکل در مواردی که کوچک کردن مراحل زمانی امکانپذیر نباشد، پیشنهاد کرد که در محاسبه هر مرحلهٔ زمانی از خواص درونیابی شدهٔ ابتدا و انتهای آن مرحله استفاده شود. وی نشان داد که چگونه می‌توان از یک روش درونیابی مناسب نتایج قابل قبولی به دست آورد. لودویگ [۳] مدل وفق یابندهٔ خود را برای بهبود مدل تنش برشی باد ارائه داد. ایدهٔ اصلی این مدل از روش شی اقتباس شده‌است. اما بر خلاف شی تمام نقاط شاخص در ابتدا در راستای قائم قرار داده می‌شود و بدین ترتیب امکان در نظر گرفتن تنشهای افقی باد وجود ندارد.

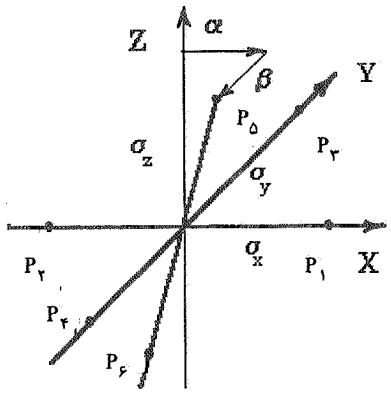
مالهلند [۵] یک مدل زمان حقیقی کامل برای انتشار مواد آلوده‌ارائه کرد که اطلاعات مربوط به جهت باد، سرعت و اغتشاش باد را به طور لحظه ای دریافت می‌کند. وی برای افزایش سرعت محاسبه، رشتهٔ پیوسته ای از مواد آلوده را با لایه‌های مجزایی عمود بر جهت باد تقریب زد و فرض کردکه هر لایه در میدان جریان به همراه جریان باد منتقل شده و درون هر لایه مواد به طور گوسی پراکنده می‌شوند. اگر چه دقت این روش کمتر از مدل توده‌است، اما مزیت استفاده از سرعت بیشتر محاسبه و همچنین امکان محاسبهٔ خطوط هم غلظت به روش تحلیلی وجود دارد. مقالهٔ حاضر بر اساس مدلی تهیه شده که ایدهٔ اصلی آن از روش شی اخذ شده‌است، اگر چه مدل زانتی تحت شرایط خاص بهتر می‌تواند 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 می‌شود و از آنجا که وجود موانع و ساختمانهای مرتفع در میدان جریان می‌تواند باعث تغییرات مولفهٔ 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 پدیدهٔ پخش ناشی از تحولات جوی و اثر سطح زمین انعطاف پذیرتر است.

۲- معرفی مدل

در مدل تودهٔ، رشتهٔ پیوسته ای از مواد آلوده‌کننده با تعداد زیادی توده‌های متوالی تقریب زده می‌شود. توده‌ها در فواصل زمانی Δt آزاد شده و در اثر باد و آثار شناوری جا به جا و به واسطهٔ اغتشاش هوا بزرگ می‌شوند. هر توده مطابق شکل (۱) به صورت یکی بیضی گون در نظر گرفته می‌شود که از شش نقطهٔ شاخص می‌گذرد. مختصات این نقاط در هر لحظه از روی مختصات مرکز توده (x, y, z) و مقادیر ضرایب انتشار σ_x، σ_y و دو متغیر α و β که بیانگر اثر تنش برشی بادند، محاسبه می‌شوند. توزیع غلظت مواد آلوده در درون هر توده به صورت گوسی در نظر گرفته می‌شود. در هر لحظه با توجه به سرعت و جهت باد، میزان خیزش توده‌ها به علت نیروی شناوری، اعمال تغییر شکل به‌علت تنش برشی باد، آثار موانع و اروگرافی[۵] سطح و کلاً آثار لحظه ای و دینامیکی اتمسفر، غلظت مواد آلوده در یک نقطه از جمع زدن غلظت کلیه توده‌ها در آن نقطه به دست می‌آید.



(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

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

در زیر اجزای مختلف مدل تشریح می‌شود.

۲-۱ معیار آزاد شدن توده‌ها

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

$$N = V.\Delta t/d \qquad (۱)$$

لودویگ [۳] نشان داد برای آنکه مجموعه ای از توده‌ها یک رشتهٔ پیوسته را به خوبی مدل کنند، فاصلهٔ بین دو تودهٔ متوالی نباید از دو برابر شعاع متوسط توده‌ها بیشتر باشد. بنابراین

$$d = ۲r_s \qquad (۲)$$

درتمام‌میدان، دقت‌محاسبه کافی‌خواهدبود. امااگرهدف‌بررسی غلظت‌دریک‌میدان‌وسیع‌باشدودقت‌محاسبه‌درنقاط بسیار نزدیک به منبع مهم نباشد، می‌توان مقدار d را بزرگتر انتخاب کرد تا تعداد توده‌ها کاهش‌یابد وزمان‌محاسبه‌نیزکوتاهترشود. بدیهی‌است‌که‌در این‌صورت‌درنقاط کاملاًنزدیک به منبع، محاسبهٔ غلظت دقت کمتری دارد و پس از طی مسافتی و رشد توده، شرایط تعیین شدهٔ لودویگ ارضا می‌شود. تجربه نشان داده‌است که برای میدانی به وسعت ۱۵۰۰ متر در ۱۵۰۰ متر رابطهٔ زیر جوابهای مناسبی می‌دهد [۳].

$$d = ۱۰r_s \qquad (۳)$$

۲-۲ جابه جایی توده در اثر باد

مختصات مرکز هر توده با توجه به مشخصات باد موضعی محاسبه می‌شود.

$$X(t+\Delta t) = X(t) + V_x\Delta t \qquad (۴)$$

$$Y(t+\Delta t) = Y(t) + V_y\Delta t \qquad (۵)$$

$$Z(t+\Delta t) = Z(t) + V_Z\Delta t \qquad (۶)$$

برای محاسبهٔ بردار سرعت باد از اطلاعات بادسنجی که در ارتفاع $z_\circ$ نصب شده استفاده می‌شود. برای محاسبهٔ سرعت باد در ارتفاعهای دیگر، از قانون توانی استفاده شده‌است.

$$\frac{V(z)}{V(z_\circ)} = \left(\frac{Z}{Z_\circ}\right)^n \qquad (۷)$$

مقدار n باتوجه‌به‌زبری‌سطح‌و پایداری اتمسفر تعیین می‌شود [۱۰].

۲-۳ افزایش ارتفاع توده در اثر شناوری

برای در نظرگرفتن این اثر، لودویگ نتایج بریگز[۶] (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 کنندهٔ قلوی شناوری است که به صورت زیر تعیین می‌شود [۴]:

$$F = gV_e r_s(T_e - T)/T_e \qquad (۸)$$

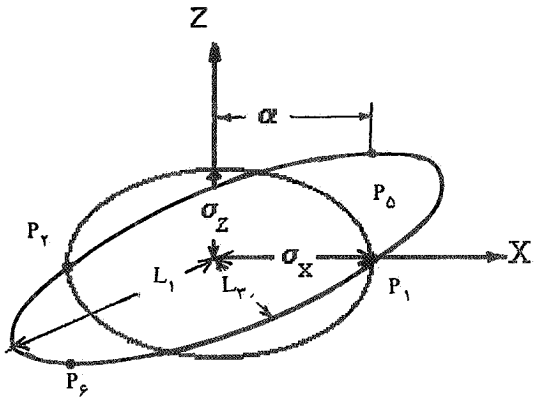
همچنین پارامتر پایداری را می‌توان به شکل زیر تعریف کرد:

$$S = g(\Gamma - \lambda)/(T_\circ - \lambda Z) \qquad (۹)$$

سرعت قائم توده برای حالتی که $S>۰/۰۴۲V^۲/H_s^۲$ باشد (اتمسفر پایدار) چنین است:

$$W_p = \left(\frac{۲/۶}{\Delta t}\right)\left(\frac{f}{۱۰۰SH^{۲}_{s}V}\right)^{\frac{۱}{۳}}\left[(X_t + V\Delta t)^{\frac{۲}{۳}} - X_t^{\frac{۲}{۳}}\right] \quad v > v_s \qquad (۱۰)$$

$$W_p = (۵/۳\Delta t)(۱۰H_s/V_s)^{\frac{۲}{۳}}(f/s^{\frac{۳}{۲}})^{\frac{۱}{۴}}\left|(t+\Delta t)^{\frac{۲}{۳}} - t^{\frac{۲}{۳}}\right| \quad v \le v_s \qquad (۱۱)$$



شکل ۲ - مختصات توده در حالت تغییر شکل یافته

$$V_s = ۰/۱۴f^{۱۴}S^{۱/۸} \qquad (۱۲)$$

برای حالتی که $S < ۰/۰۴۲V_t^{۲}/H_s^{۲}$ باشد(اتمسفرناپایدار) سرعت قائم توده چنین است:

$$V_n = \frac{۱/۶f^{\frac{۱}{۳}}(۱۰H_s)^{\frac{۲}{۳}}}{Z_{max}} \qquad (۱۳)$$

$$W_p = (\frac{۱/۶f^{\frac{۱}{۳}}}{V\Delta t})\,[(X_t + V\Delta t)^{\frac{۲}{۳}} - X_t^{\frac{۲}{۳}}] \quad V > V_n \qquad (۱۴)$$

$$W_p = (\frac{۱/۶f^{\frac{۱}{۳}}}{V_n\Delta t})\,[(X_t + V\Delta t)^{\frac{۲}{۳}} - X_t^{\frac{۲}{۳}}] \quad V \le V_n \qquad (۱۵)$$

درشرایط‌خنثی‌ازمعادلات مربوط به شرایط ناپایدار استفاده می‌شود. Z_{max} بیشترین ارتفاعی است که توده در شرایط باد آرام و شرایط ناپایدار و خنثی می‌تواند به آن برسد. در این مدل، بر طبق پیشنهاد لودویگ [۴]، مقدار آن ۳۰۰۰ متر انتخاب شده‌است. لذا در هر لحظهٔ موقعیت قائم توده چنین است:

$$Z(t + \Delta t) = Z(t) + W_p\,\Delta t \qquad (۱۶)$$

۲-۴ 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 زیرتعیین کرد [۱]:

$$\alpha(t + \Delta t) = \alpha(t) + ۰/۵[V_x(p_۵) - V_x(p_۶)]\Delta t \qquad (۱۷)$$

$$\beta(t + \Delta t) = \beta(t) + ۰/۵[V_y(p_۵) - V_y(p_۶)]\Delta t \qquad (۱۸)$$

روابط‌فوق‌باتوجه‌به ثابت بودن تنش برشی در عرض هر توده نوشته شده‌است. توزیع غلظت‌نسبت‌به‌محورهای‌اصلی‌آن‌گوسی فرض می‌شود. برای‌محاسبهٔ محورهای اصلی هر توده یک بیضی‌گون روی نقاط‌شاخص‌آن‌منطبق‌می‌کنیم‌ومحورهای‌اصلی‌بیضی‌گون‌رابه عنوان محورهای‌اصلی‌توده‌در نظر می‌گیریم. اگر X، Y، Z مختصات نسبت به مرکز بیضی گون باشد، معادلهٔ بیضی گون چنین خواهد بود:

$$\frac{X - (\frac{\alpha}{\sigma_z})Z}{[\sigma_x]^{۲}} + \frac{Y - (\frac{\beta}{\sigma_z})Z}{[\sigma_y]^{۲}} + (\frac{Z}{\sigma_z})^{۲} = ۱ \qquad (۱۹)$$

$$C = \frac{q\Delta t/N}{(۲\pi)^{\frac{۳}{۲}}L_۱L_۲L_۳}\exp\{-۰/۵([\frac{X - (\alpha/\sigma_z)Z}{\sigma_x}]^{۲} + [\frac{Y - (\beta/\sigma_z)Z}{\sigma_y}]^{۲} + (Z/\sigma_z)^{۲})\} \qquad (۲۰)$$

که در این معادله

$$L_۱ = (A\cos^{۲}\alpha_۲ + B\sin\alpha_۲\cos\alpha_۲ + D\sin^{۲}\alpha_۲)^{-\frac{۱}{۲}} \qquad (۲۱)$$

$$L_۲ = (\sin^{۲}\alpha_۱/\sigma_x^{۲} + \cos^{۲}\alpha_۱/\sigma_y^{۲})^{-\frac{۱}{۲}} \qquad (۲۲)$$

$$L_۳ = (A\sin^{۲}\alpha_۲ - B\sin\alpha_۲\cos a_۲ + D\cos^{۲}\alpha_۲)^{-\frac{۱}{۲}} \qquad (۲۳)$$

$$\alpha_۱ = \tan^{-۱}(\beta/\alpha) \qquad (۲۴)$$

$$A = \cos^{۲}\alpha_۱/\sigma_x^{۲} + \sin^{۲}\alpha_۱/\sigma_y^{۲} \qquad (۲۵)$$

$$B = ۲(\alpha\cos\alpha_۱/\sigma_x^{۲} + \beta\sin\alpha_۱/\sigma_y^{۲})/\sigma_z \qquad (۲۶)$$

$$D = [(\alpha/\sigma_x)^{۲} + (\beta/\sigma_y)^{۲} + ۱]/\sigma_z^{۲} \qquad (۲۷)$$

$$\alpha_2 = 0/5\tan^{-1}[B/(A - D)] \qquad (28)$$

دربه‌دست‌آوردن‌معادلهٔ (۲۰) ازفرضهای‌زیر استفاده شده‌است [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 حجمی‌مواد آلوده در حد جرم حجمی‌هواست.

د - هر گاه سرعت باد از یک متر بر ثانیه تجاوز کند، از نفوذ مولکولی‌دربرابر انتقال به وسیلهٔ جابه جایی صرف‌نظر می‌شود.

۲-۵ رشد توده

متغییر مهم در میزان رشد توده‌ها و رقیق کردن آنها میزان اغتشاش‌اتمسفر است. برنامهٔ 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[۷] (نقل از [۶]) می‌گوید که در شرایط ایده ال و اغتشاش ساکن و همگن می‌توان ضرایب انتشار را به صورت زیر به دست آورد [۶]:

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

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

از آنجاکه تعیین‌شکل تابعهای‌خودهمبستهٔ لاگرانژی[۸] معمولاً امکانپذیر نیست، برای محاسبهٔ σ_x و σ_y تابعی به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

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

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

با توجه به آزمایشهای انجام شده، محققان شکلهای مختلفی برای توابع f_1 و f_2 ارائه کرده‌اند. ایروین[۹] (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.

$$f_1 = f_2 = \frac{1}{(1 + 0/9(t/\tau_1)^{\frac{1}{2}})} \qquad (33)$$

$$\tau_1 = 1/64\tau_L \qquad (34)$$

$$\tau_L = \int_0^\infty R_L(\xi)\, d\xi \qquad (35)$$

اگر شرایط اغتشاش اتمسفر نسبت به زمان زیاد تغییر کند، مستقیماً نمی‌توان از معادلات (۳۱) و (۳۲) برای محاسبهٔ σ_x و σ_y استفاده کرد. زیرا این مقادیر علاوه بر شرایط اغتشاش در حال حاضر و زمان سپری شدهٔ t، به شرایط اغتشاش در لحظه های قبل نیز بستگی دارند. برای در نظر گرفتن این مسئله معادلات (۳۱) و (۳۲) به شکل زیر اصلاح شده‌اند.

$$\sigma_y(t + \Delta t) = \sigma_y(t) + (d\sigma_y/dt)\,\Delta t \qquad (36)$$

$$\sigma_z(t + \Delta t) = \sigma_z(t) + (d\sigma_z/dt)\,\Delta t \qquad (37)$$

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

$$d\sigma_y/dt = \sigma_v\,[f(t) + t\,df(t)/dt] \qquad (38)$$

با توجه به معادلهٔ (۳۳)، نتیجه می‌شود:

$$\sigma_y(t + \Delta t) = \sigma_y(t) + \sigma_v\left[\frac{2 + 0/9(t/\tau_1)^{\frac{1}{2}}}{2(1 + 0/9(t/\tau_1)^{\frac{1}{2}})^2}\right] \qquad (39)$$

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 فاصلهٔ بین دو تودهٔ متوالی بیشتراز دو برابر شعاع متوسط دو توده نباشد، آنگاه توده‌های متوالی می‌توانند رشتهٔ پیوسته را به خوبی مدل کنند. بنابراین می‌توان پس از مدتی توده‌های بزرگ شده را در هم ادغام کرد. شرط ادغام دو تودهٔ متوالی آن است که فاصلهٔ بین آنها

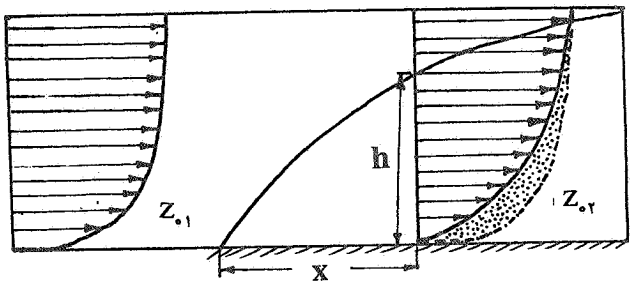
کمتر از شعاع متوسط دو توده باشد. در این صورت تودهٔ ناشی از ادغام دارای خواص و موقعیت متوسط دو تودهٔ اولیه است. با استفاده از این روش می‌توان تعداد توده‌ها راکه به علت افزایش دقت در نزدیکی منبع به تعداد زیاد تولید شده بودند به طور قابل توجهی در نقاط دورتر کاهش داد و در نتیجه سرعت محاسبه را بالا برد. به عنوان مثال، در میدانی به وسعت 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 محاسبه برای ۵ مرحلهٔ زمانی ۲۲۲ ثانیه شده‌است. با استفاده‌از الگوریتم کاهش توده در همین شرایط تعداد توده‌ها به ۲۰ عدد تقلیل یافت و زمان محاسبه به ۱۱۹ ثانیه رسید.

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

تقریباً در تمام مدلهای توده‌ای ارائه شده، میدان جریان بدون مانع بررسی شده‌است. در مدل حاضر برای منظور کردن اثر دنبالهٔ مربوط به ساختمانها و موانع دیگر مانند تپه ها، 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 لایهٔ مرزی در اثر وزش باد به وجود می‌آید. اما هنگامی‌که 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، سرعت‌در داخل لایهٔ مرزی جدید باید تصحیح شود. در خارج لایه مرزی جدید همان توزیع سرعت بالا دست حاکم است. برای محاسبهٔ 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 - الف - اثر تغییر ناگهانی ارتفاع زبری سطح روی نیمرخ سرعت باد [۹]

جواب واقعیتر می‌دهد و در این پروژه دنبال شده‌است بر اساس نتایج آزمایشهای پانوفسکی[10] (نقل از [۹]) درتونل باد می باشد که به منظور دیگری انجام شده‌است. برای محاسبهٔ ارتفاع لایهٔ مرزی جدید h بر حسب فاصله در راستای جریان نسبت به محل تغییر زبری x در ناحیهٔ پایین دست خواهیم داشت [۹]:

$$\frac{h}{z'_o}(\ln\frac{h}{z'_o} - 1) = C(\frac{x}{z'_o}) \qquad (۴۰)$$

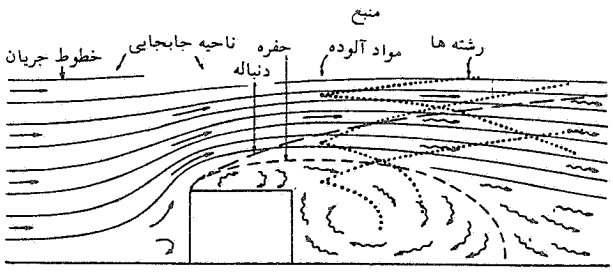
$$z'_o \in \max(z_{o1}, z_{o2}) \qquad (۴۱)$$

C یک عدد ثابت و مقدار آن تقریباً ۰/۹ است. پس از آنکه h در یک فرایند سعی و خطا در یک x معین محاسبه شد، برای محاسبهٔ سرعت در داخل لایه مرزی جدید داریم:

$$u(z_{o2}) = u(z_{o1})\,(cor) \qquad (۴۲)$$

$$cor = \frac{\ln(Z/z_{o2}).\ln(h/z_{o1})}{\ln(Z/z_{o1}).\ln(h/z_{o2})} \qquad (۴۳)$$

در این پروژه چنانچه تودهٔ 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.



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

۲-۷-۲ اثر وجود ساختمانها و موانع

یکی از مسائلی که اغلب در محاسبهٔ پدیدهٔ پخش با آن روبرو می‌شویم، 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 هر گاه میدان جریان با مانعی مانند ساختمان در نظر گرفته شود، باید اثر دنبالهٔ مربوط به آنها را در فرایند پخش مواد آلوده در نظر گرفت. در مدل حاضر برای منظور کردن آثار ذکر شده، سعی شده‌است تا تغییرات سرعت و شدت اغتشاش این نواحی به گونه‌ای در محاسبه وارد شود. برای این منظور از نتایج هالیتسکی [۷] استفاده شده‌است. وی نتایج مربوط به دنبالهٔ پشت صفحات صاف را که از آزمایشهای تونل باد به دست آمده‌اند، با توجه به آزمایشهای خود وی به گونه ای اصلاح کرد تا برای مجموعه ای از ساختمانها در لایه مرزی اتمسفری قابل استفاده باشد. خلاصهٔ آن به این شرح است:

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

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

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

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

r_b مختصات مرز دنباله تعریف می‌شود و فاصله در جهت شعاعی از 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 می‌شود 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. معادلهٔ (۴۴) تغییرات طولی سرعت و معادلهٔ (۴۵) تغییرات شدت اغتشاش را محاسبه می‌کند. برای محاسبهٔ تغییرات عرضی سرعت مطابق با معادلات زیر خواهیم داشت:

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

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

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

اساس این روش آن است که ساختمان یا هر مانع دیگر را با یک صفحهٔ صاف در جهت عمود برجریان تقریب بزنیم. این صفحه دارای پهنای W و ارتفاع 2H است(فرض می‌شود که صفحه را طوری در زمین قرار داده‌ایم که فقط نیمی‌از آن روی سطح زمین است). آنگاه می‌توان طول مشخصه و نسبت منظر[11] را به صورت زیر محاسبه کرد:

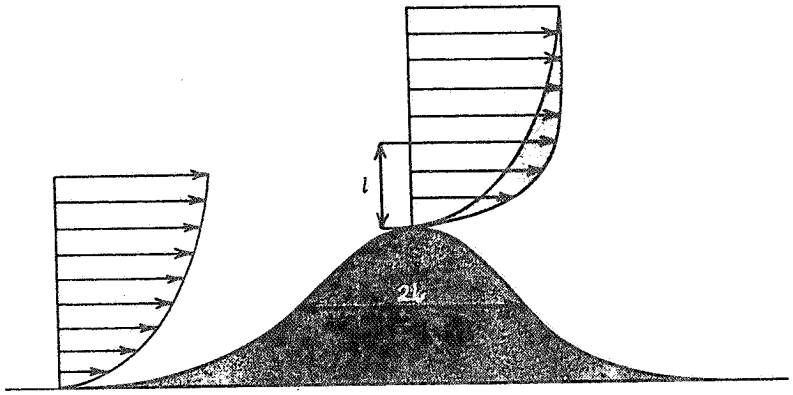
$$L = (2HW)^{\frac{1}{2}} \qquad (51)$$

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

در مدل حاضر، نخست قرار گرفتن هر توده در داخل مرز دنباله[12] را بررسی می‌کنیم. 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 می‌شود. این مدل هنگامی‌جواب مناسب می‌دهد که ابعاد توده از ابعاد مانع کوچکتر نباشد.

۳-۷-۳ اثر وجود تپه

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



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

به قدر کافی زیاد است مطابق شکل (۳ - ج) در نظر می‌گیریم. در این پروژه برای محاسبهٔ تغییرات سرعت و تعیین یک توزیع مناسب سرعت پیرامون تپه از روش پانل[۱۳] که برای محاسبهٔ 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 ورقه های چشمه با قدرت ثابت اما مجهول توزیع می‌شود. اکنون پتانسیلی که کلیهٔ قطعات بر روی یک قطعه القا می‌کنند قابل محاسبه است [۱۱]. با اعمال شرط مرزی صفر بودن مؤلفهٔ 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 محاسبهٔ تابع پتانسیل روی هر قطعه در نتیجهٔ 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 نتیجهٔ آن همراه با نتیجهٔ کار بلجارز[۱۴] (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 اهبا[۱۵] [۹] به صورت زیر استفاده شده‌است:

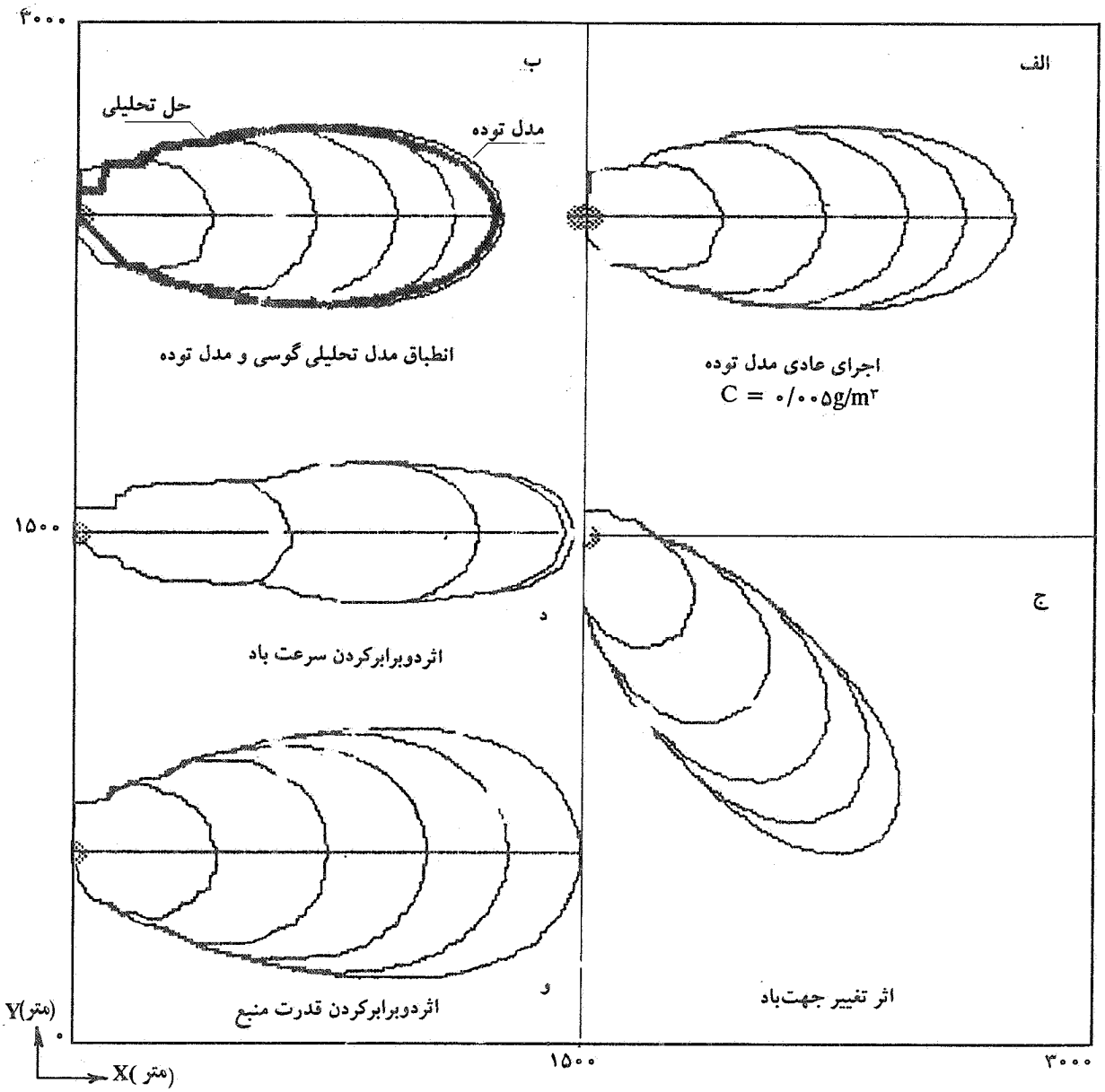
$$\sigma_y = a\sigma_y\,(\text{تخت}) + b \qquad (۵۳)$$

$$\sigma_z = c\sigma_z\,(\text{تخت}) + d \qquad (۵۴)$$

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

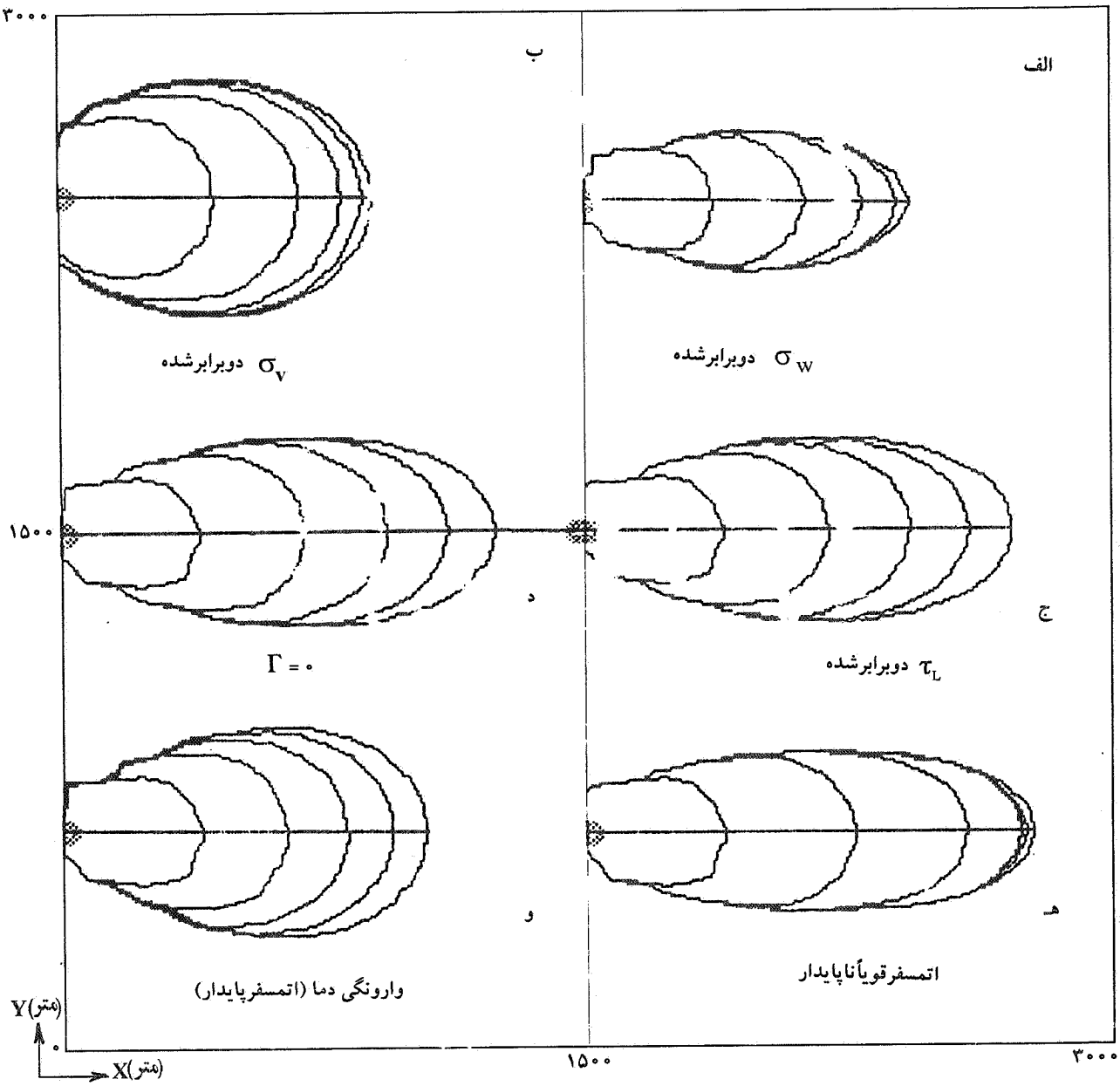
۳- نتایج

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 نقطه ای پیوسته که در ارتفاع پنج متری از سطح زمین قرار دارد در نظر گرفته شده‌است. از لحظهٔ فعال شدن منبع (آغاز انتشار) تا زمانی که به حالت دائم می‌رسد (آخرین کانتور غلظت مرتب روی خودش رسم می‌شود) خطوط هم غلظت (غلظت کلیهٔ خطوط ۰/۰۰۵ گرم بر متر مکعب) در روی سطح زمین رسم شده‌است. ناحیه در نظر گرفته شده به ابعاد ۳×۳ کیلومتر است. شکل (۴ - الف) نحوهٔ 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 رشتهٔ 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 لحظه ای تبدیل می‌شود (توده‌های به هم پیوسته) به طوری که رفتار مجموع



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 شده‌است، شکل (و) دبی جرمی‌گاز خروجی از منبع دو برابر شده‌است.

توده‌ها همان رفتار واقعی منبع پیوسته را دنبال نمایند، می‌توانیم در هر لحظه آثار نادائم و نایکنواخت اتمسفر و سطح را در پدیدهٔ انتشار دخالت دهیم. در شکل (۴ - ج) که نسبت به حالت (۴ - الف) تنها جهت باد به اندازهٔ ۴۵ درجه تغییر کرده و سایر شرایط ثابت باقی مانده‌است، ملاحظه می‌شود که همراه با تغییر جهت باد خطوط هم غلظت نیز انحراف پیدا کرده‌است. این موضوع اهمیت در نظر گرفتن شرایط دینامیکی و نا دائم اتمسفر را نشان می‌دهد. در شکل (۴ - د) که نسبت به حالت (۴ - الف) تنها سرعت باد دو برابر شده‌است ($u = ۲\times۵$ 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 مواد آلوده تا فواصل بیشتری برده می‌شوند. علت این امر را می‌توان چنین توجیه

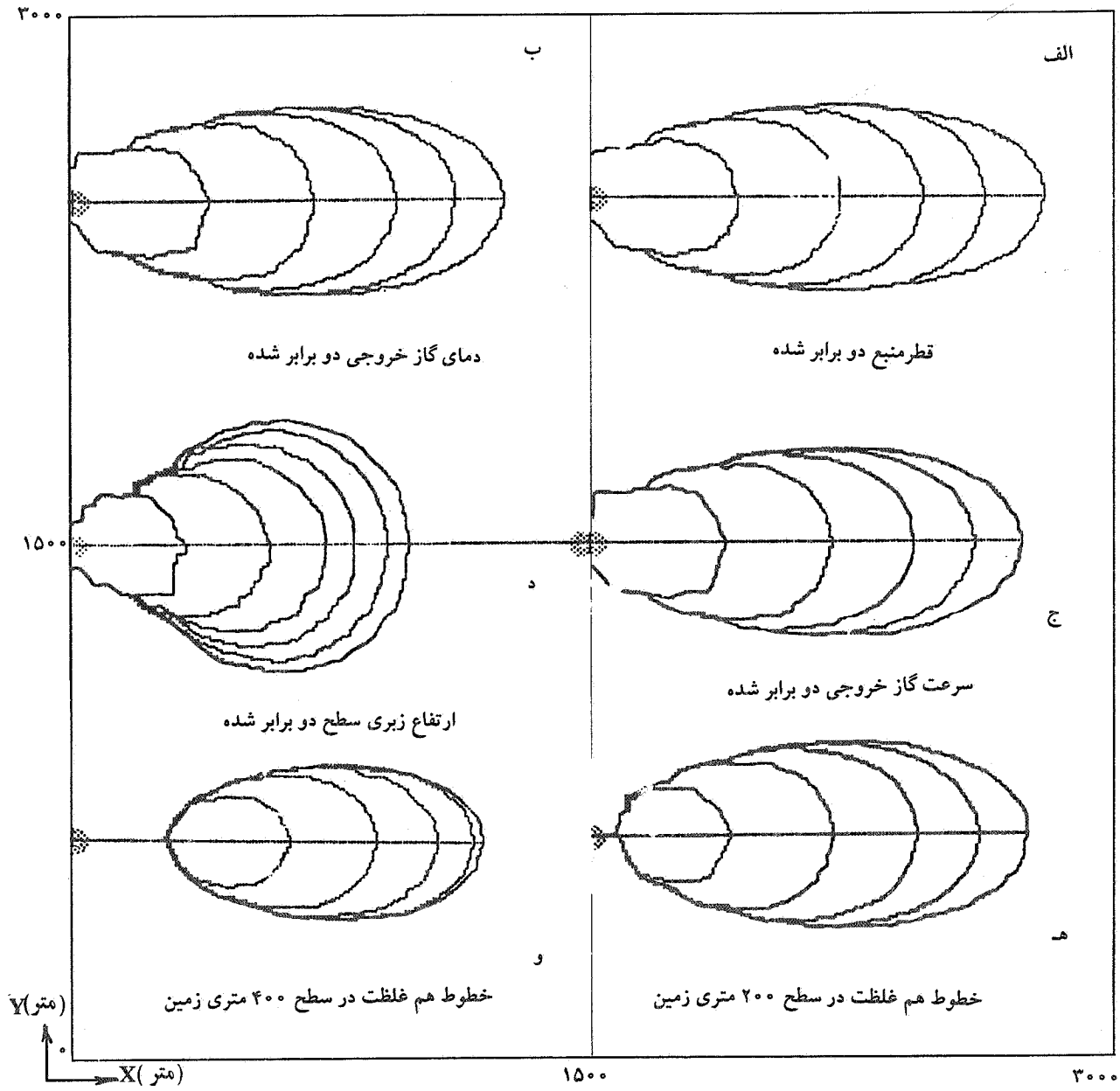


شکل ۵ - اثر ضرایب پخش و تغییرات دما روی پدیده انتشار مواد آلوده

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

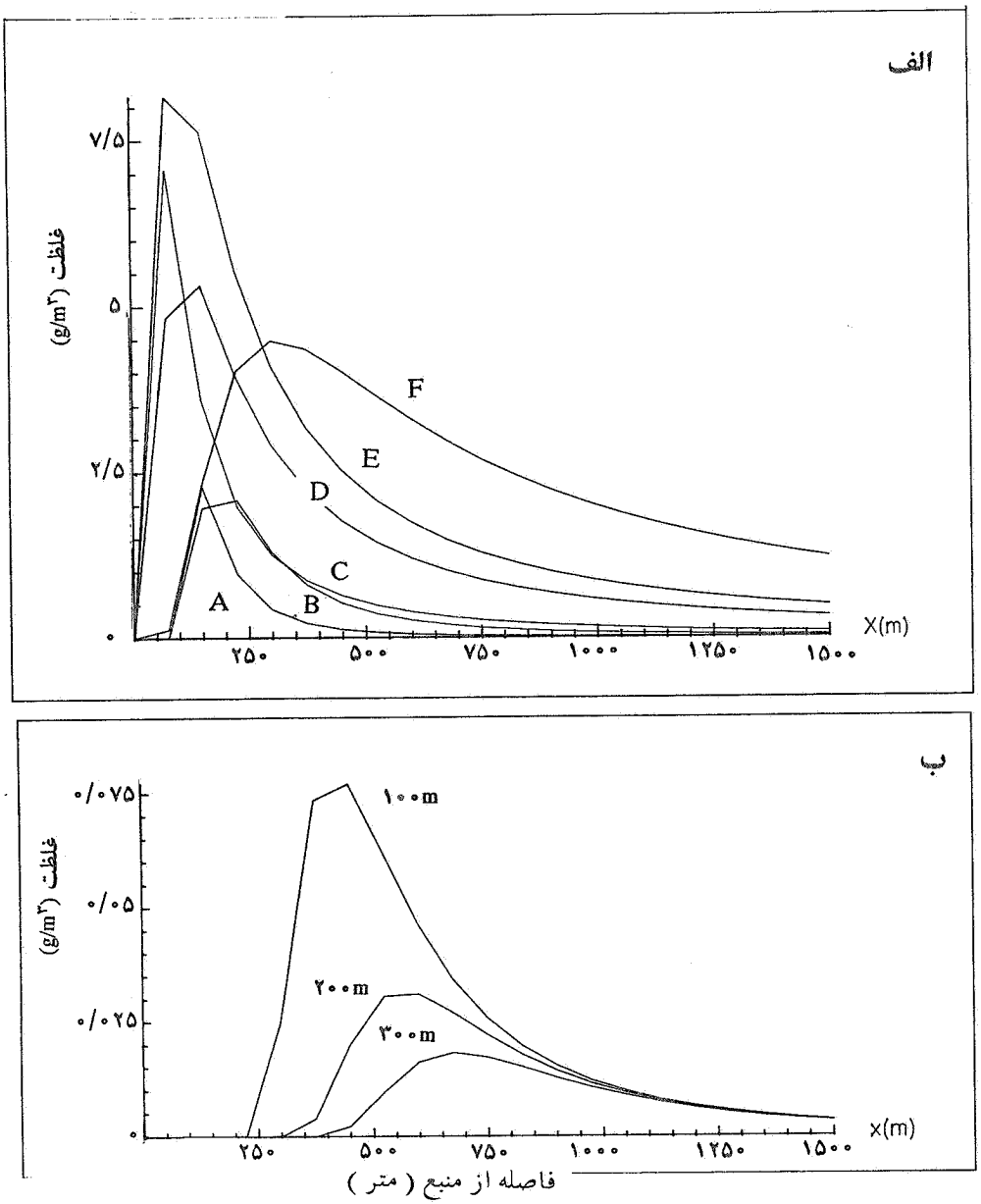
نمود که با افزایش سرعت باد، مواد آلوده کننده فرصت کمتری پیدا می‌کنند تا در اثر اغتشاش اتمسفر در جهات عرضی منتشر شوند. با افزایش سرعت باد تعداد توده‌های بیشتری برای مدل کردن رشتهٔ دود لازم است. از این رو زمان محاسبه افزایش و زمان لازم برای رسیدن به حالت دائم کاهش می‌یابد. در شکل (۴ - و) دبی جرمی خروجی از منبع نسبت به حالت (۴ - الف) دو برابر شده‌است. دیده می‌شود که با افزایش دبی جرمی خروجی از منبع غلظت مواد آلوده نیز به همان نسبت مطابق معادلهٔ (۲۰) افزایش می‌یابد.

شکلهای (۵ - الف و ب) اثر تغییر انحراف معیار نوسانهای باد در جهتهای قائم و افقی را نشان می‌دهد. در مقایسه با شکل (۴ - الف) ملاحظه می‌شود پدیدهٔ انتشار شدیداً نسبت به تغییرات پارامترهای اغتشاش نظیر σ_W، σ_V حساس است. در شکل (۵ - الف)



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

با افزایش σ_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 هم غلظت جمعتر می‌شود) . با افزایش σ_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 در محاسبهٔ این پارامتر از روی نوسانهای باد اثر ناچیزی در نتایج نهایی می‌گذارد. شکلهای (۵ - د، هـ ، و) اثر تغییر دما را در پدیدهٔ پخش در راستای قائم نشان می‌دهند. اتمسفر، بسته به چگونگی توزیع دما در لایه های 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 کاهش‌دمای آدیاباتیک خشک[۱۶] [۱۰] که یک درجه به ازای هر ۱۰۰ متر است). در این حالت قدرت اتمسفر در پراکنده ساختن ذرات و رقیق نمودن



شکل ۷ - الف - اثر انواع مختلف پایداری اتمسفر روی پدیدهٔ پخش گازهای آلوده از حالت کاملاً ناپایدار اتمسفر تا حالت پایدار.

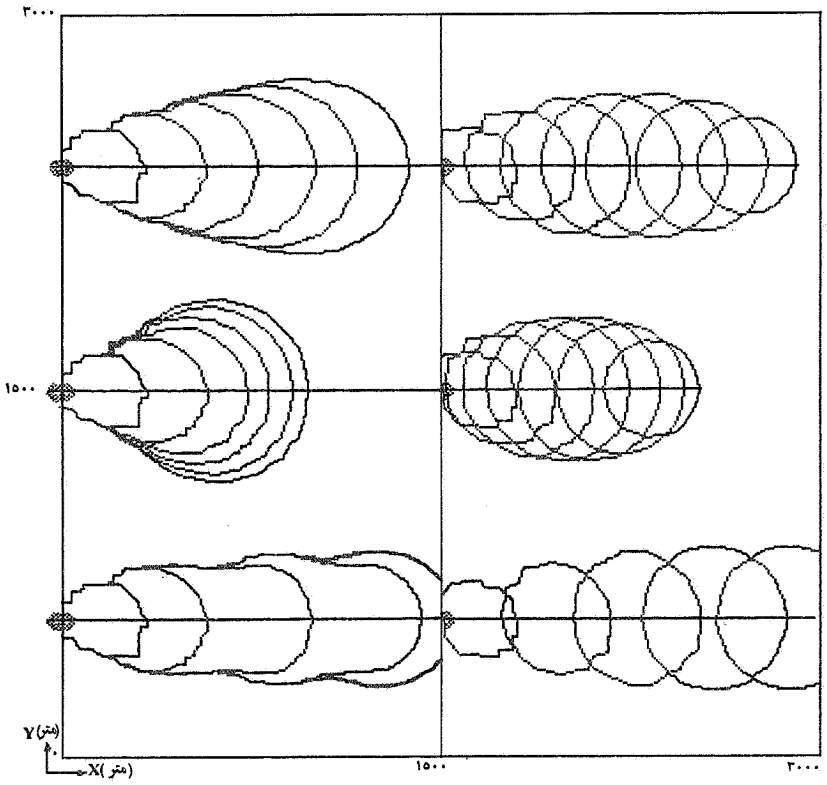
A: قویاًناپایدار B: ناپایدار C: کمی‌ناپایدار

D: خنثی E: کمی‌پایدار F:پایدار

ب - اثر ارتفاع منبع صدور گاز روی پدیدهٔ پخش

آنها زیاد بوده به همین دلیل مطابق با شکل (۵ - هـ) غلظت مواد آلوده روی سطح زمین کاهش یافته است. در حالتی که با دور شدن از سطح زمین دما افزایش یابد(حالت وارونگی دما[۱۷]) مواد آلوده تمایلی به بالا رفتن ندارند، مطابق شکل (۵ - و) غلظت آنها روی سطح زمین افزایش می‌یابد. (این حالت معمولاً صبح زود روزهای زمستان پیش می‌آید.)

مطابق شکلهای (۶ - الف، ب و ج) متغییرهای اندازهٔ منبع، افزایش دما و سرعت گازهای خروجی هر کدام اثر ناچیزی روی



شکل ۸ - اثر تغییر ناگهانی ارتفاع زبری در پدیدهٔ پخش

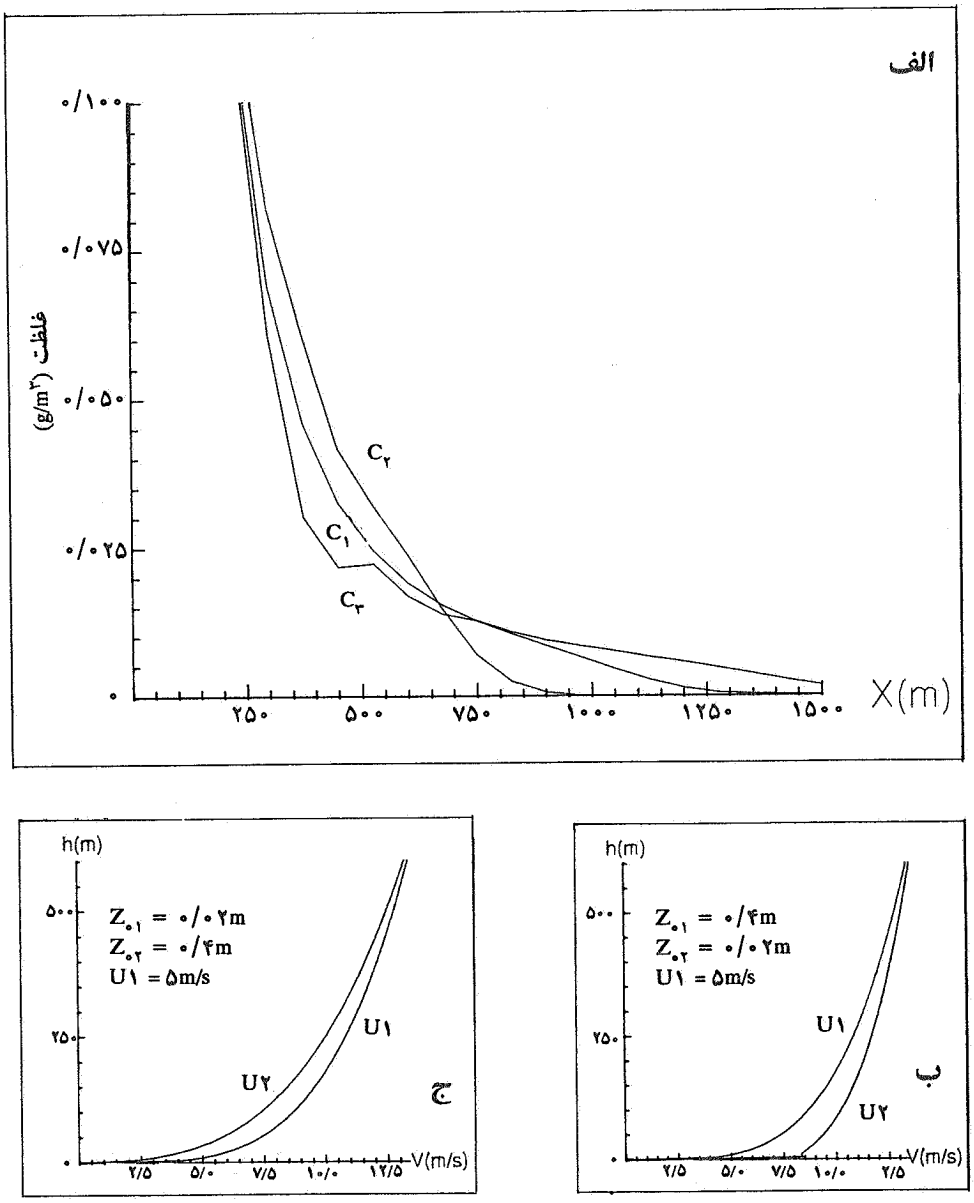
سمت راست: منابع نقطه ای لحظه ای سمت چپ : منابع نقطه ای پیوسته

شکل بالا: اجرای عادی (برای ارتفاع زبری یکنواخت) شکل وسط: تغییر ناگهانی زبری از ۰/۰۲ به ۰/۴ متر در ۲۵۰ متری منبع

شکل پایین: تغییر ناگهانی زبری از ۰/۴ به ۰/۰۲ متر در ۲۵۰ متر منبع

خطوط هم غلظت می‌گذارند. زیرا میزان رشد توده‌ها آن قدر بالاست که با اندکی تغییر در مقدار موارد فوق تفاوتی احساس نمی شود. برای آنکه اثر این متغییرها 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 لایه های 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 محاسبه کند. مطابق شکلهای (۶ - هـ ، 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 لحظهٔ رها شدن در اتمسفر (درپنج 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 پراکندگی آن بالا بوده و نفوذ هوا به درون توده ها 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 می کند عکس حالت (A) صادق است. شکل (۷ - ب) اثر ارتفاع دودکش را روی پدیدهٔ پخش نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود با زیاد شدن



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 متر ی منبع زبری سطح کم شده‌است.

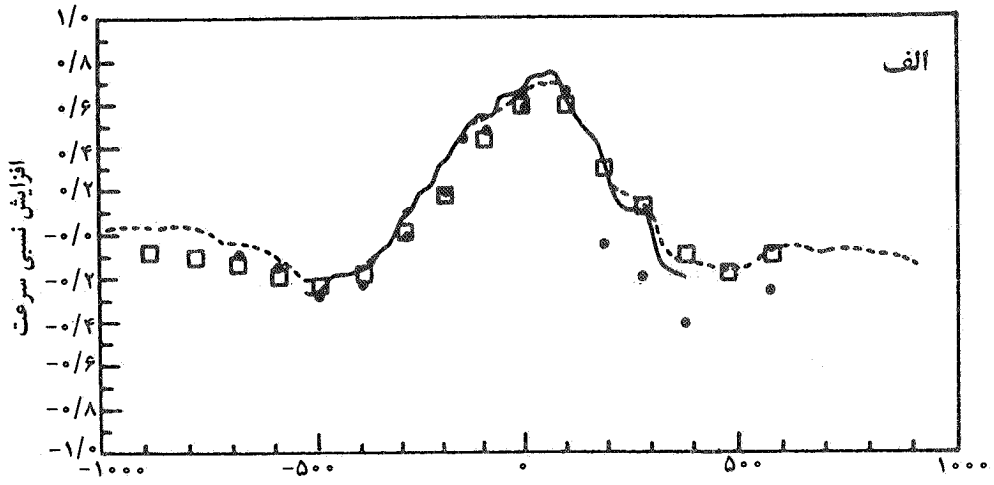
C_3: در ۲۵۰ متری منبع زبری سطح زیاد شده‌است.

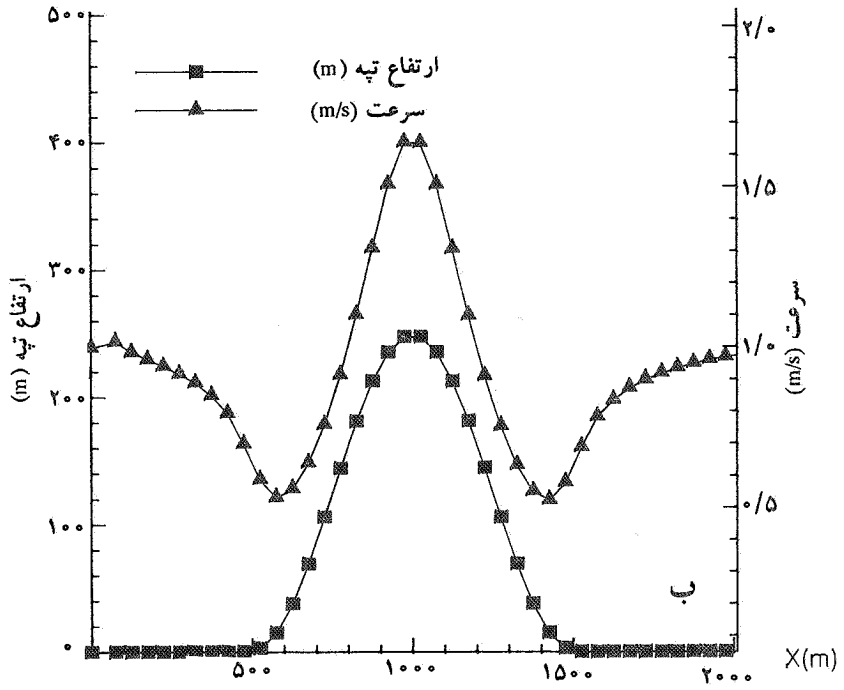
ب - اثر تغییر ارتفاع زبری روی نیمرخ سرعت با عبور باد از سطح زبر به سطح صاف

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

u_1: نیمرخ سرعت بالا دست u_2:نیمرخ سرعت بعد از تغییرزبری

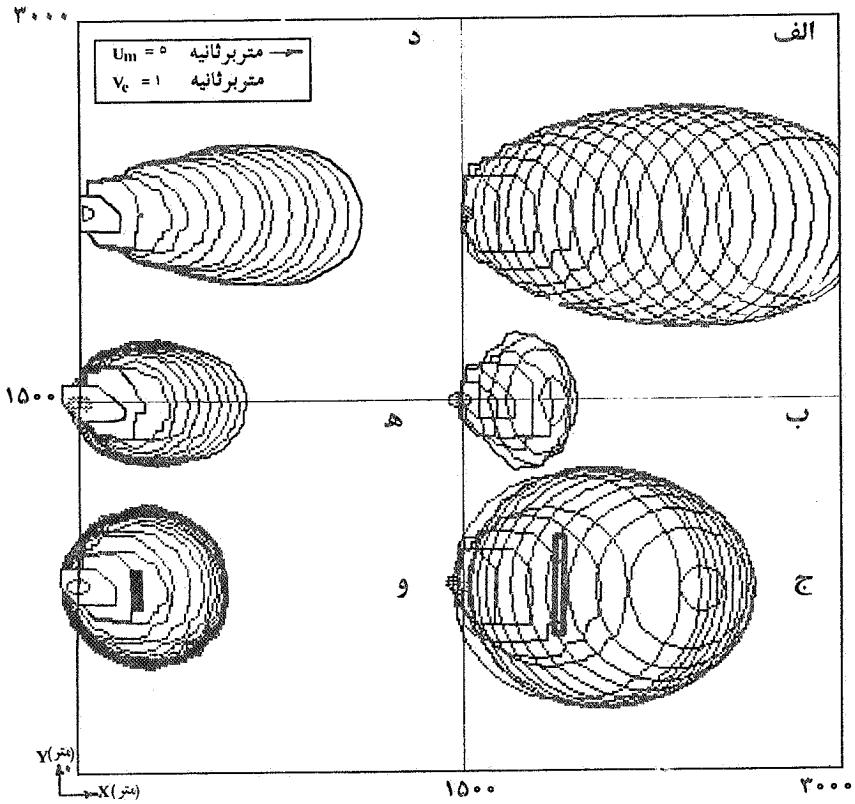
ارتفاع دودکش اولاً غلظت مواد آلوده در پایین دست منبع کاهش می‌یابد. ثانیاً غلظت ماکزیمم در فاصلهٔ دورتری از منبع اتفاق می‌افتد. بدین ترتیب می‌توان ارتفاع منبع را به گونه ای تنظیم کرد که هنگام تماس مواد آلوده با سطح زمین، مردم یا محیط شهری در معرض آلودگی قرار نگیرد. برنامه برای حالتی که ارتفاع زبری سطح ناگهان تغییر کند اجرا شده‌است. مطابق با شکلهای (۸ و ۹) ملاحظه





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)

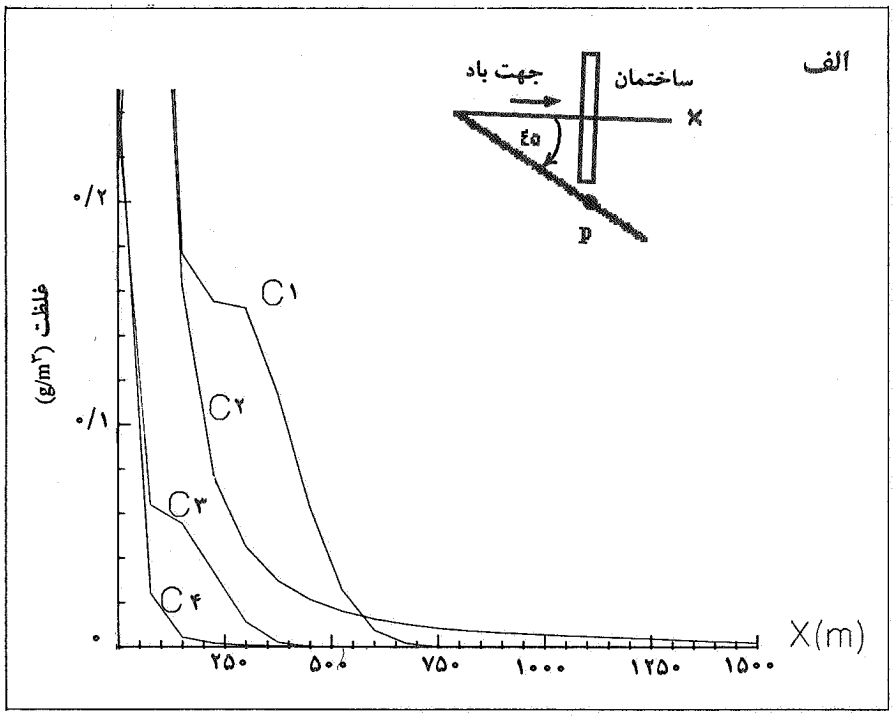
می‌شود در مقایسه با حالتی که ارتفاع زبری سطح یکنواخت باشد (شکل (۸) ردیف بالا) این پدیده در برابر تغییر زبری نیز حساس است. با کم شدن زبری سطح سرعت هوا در نزدیکی سطح افزایش یافته و لذا مواد آلوده تا مسافت بیشتری از منبع دور می‌شوند. لیکن با زیاد شدن زبری سطح سرعت باد در نزدیکی سطح کاهش یافته و غلظت مواد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



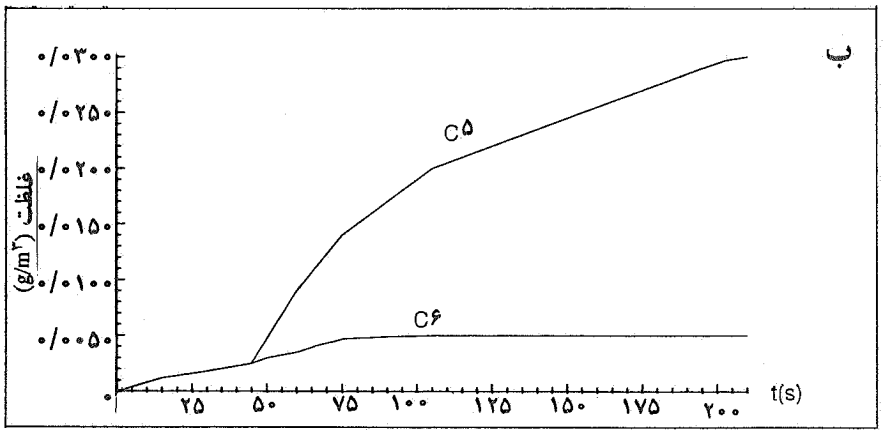
شکل ۱۱ - اثر موانع در پدیدهٔ پخش الف - اجرای عادی منبع لحظه ای (بدون هر گونه مانع) ب - در ۲۵۰ متری منبع یک تپه با طول زیاد و ارتفاع ۱۵۰ متر وجود دارد (عمود برباد). ج - در ۴۰۰ متری منبع یک ساختمان به ارتفاع ۱۰۰ متر و طول ۳۰۰ متر (عمود برباد) وجود دارد. د - پخش مواد آلوده از یک منبع پیوسته (بدون هر گونه مانع) هـ - 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 برباد) وجود دارد. V_e: سرعت خروجی گاز از منبع U_m: سرعت متوسط هوا

شکل (۱۱) اثر موانع را در میدان جریان نشان می‌دهد. 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 می‌شود. اما درامتدادهای دیگرمطابق‌باشکل (۱۲) وجود موانع باعث افزایش غلظت می‌شود.

شکل (۱۲ - الف) توزیع غلظت بر حسب فاصله در پایین دست یک منبع پیوسته را نشان می‌دهد(مطابق با شکلهای 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[۱۸] بلا فاصله بعد از ساختمان، مواد آلوده در داخل این حفره قرار گرفته و جریان چرخشی به دور خود پیدا می‌کنند. در این ناحیه مطابق منحنی C۱ غلظت افزایش می‌یابد. اما ابعاد این ناحیه نسبت به دنبالهٔ ایجاد شده در پشت ساختمان کوچک بوده و ملاحظه می‌شود که غلظت به سرعت‌کاهش‌می‌یابد. این‌کاهش‌سریعتراز منحنی C۲ به سمت صفر میل می‌کند. منحنی C۳ توزیع غلظت را در راستای ۴۵ درجه نشان می‌دهد. نسبت به حالتی که ساختمان در مسیر نباشد (منحنی C۴) مقداری افزایش غلظت داریم. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که برای نقاطی که در صورت نبودن ساختمان به طور طبیعی در معرض مواد آزاد شده قرار می‌گرفتند، وجود ساختمان باعث کاهش غلظت در آن نقاط می‌شود. اما در نقاطی که در مجاورت ساختمان به فاصلهٔ کمی‌قرار داشته و به طور طبیعی در معرض مواد آلوده کننده قرار نمی‌گرفتند، وجود ساختمان باعث افزایش غلظت در آنها می‌شود. شکل (۱۲ - ب) با فعال شدن منبع، نحوهٔ تغییرات غلظت بر حسب زمان را در نقطهٔ P که رو به روی ساختمان در امتداد ۴۵ درجه قرار دارد نشان می‌دهد. وجود ساختمان سبب بالا رفتن غلظت در این نقطه شده‌است. همچنین ملاحظه می‌شود زمان رسیدن به حالت



فاصله ازمنبع (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

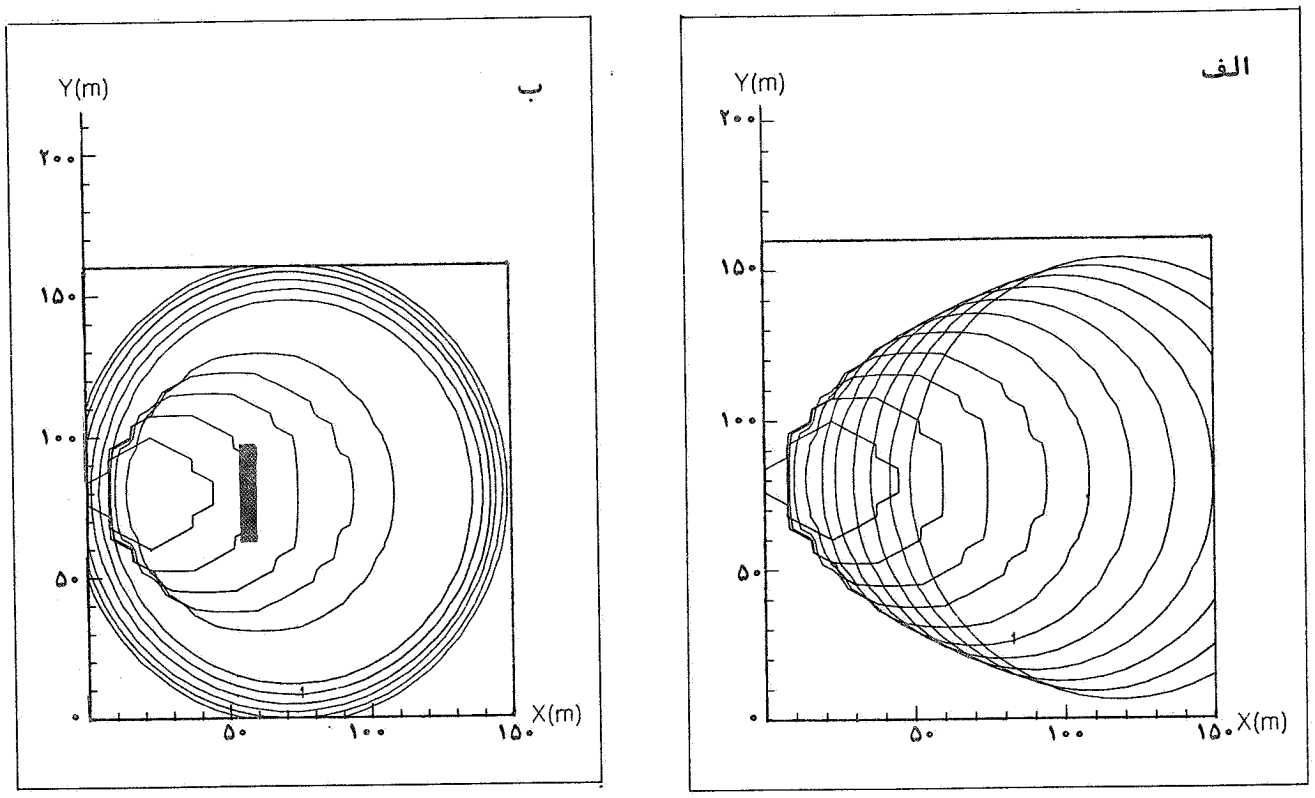
C_3 : توزیع غلظت در امتداد ۴۵ درجه با در نظر گرفتن ساختمان C_4 : توزیع غلظت در امتداد ۴۵ درجه بدون در نظر گرفتن ساختمان

ب - توزیع غلظت مواد آلوده بر حسب زمان در نقطهٔ 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

دائم با در نظر گرفتن ساختمان مطابق منحنی (C۵) افزایش می‌یابد، درحالی که وقتی ساختمان درمسیرنباشد مطابق منحنی (C۶) تغییرات غلظت درنقطهٔP سریعتربه سمت صفرمیل می‌کند.

شکل (۱۳) تأثیر یک ساختمان راکه در فاصله نزدیک (۵۰ متری) یک منبع لحظه ای (یک توده از مواد آلوده) قرار گرفته نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود با رسیدن توده به ساختمان، بر اثر افزایش ضرایب اغتشاش، توده به سرعت رشد کرده، کانتورهای غلظت بعد از ساختمان منطقهٔ وسیعتری را در برگرفته است. حتی اثر آن به خود



شکل ۱۳ - نحوهٔ پخش یک توده در ناحیه‌ای به ابعاد ۱۶۰×۱۵۰ متر مربع

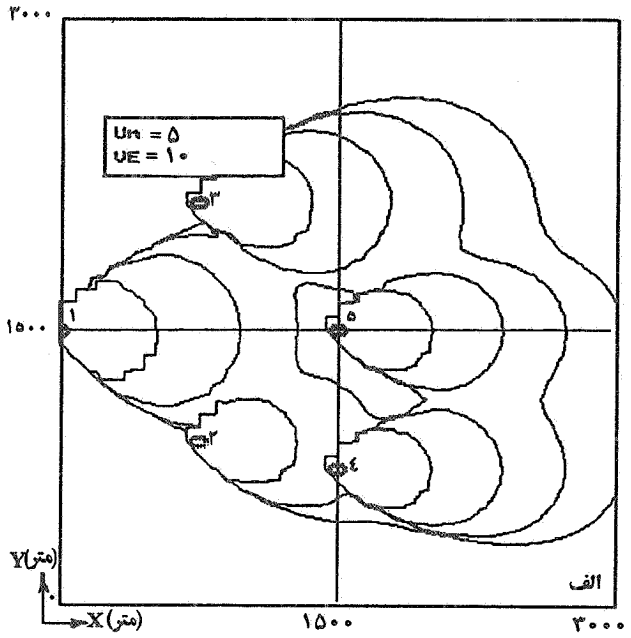
توده در نقطه (۸۰ ، ۰) ناگهان آزاد می‌شود، سرعت متوسط باد ۵ متر بر ثانیه است. در ۵۰ متری منبع یک ساختمان به ارتفاع ۵۰ متر و پهنای ۴۰ متر قرار دارد، غلظت کلیه کانتورها ۰/۰۰۵ گرم بر متر مکعب است. الف - بدون ساختمان در مسیر ب - با وجود ساختمان در مسیر

منبع نیز سرایت کرده‌است. لذا فاصلهٔ 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 برنامهٔ زمان حقیقی احتیاج به کامپیوتری با سرعت و حافظه زیاد است.

نتیجه گیری

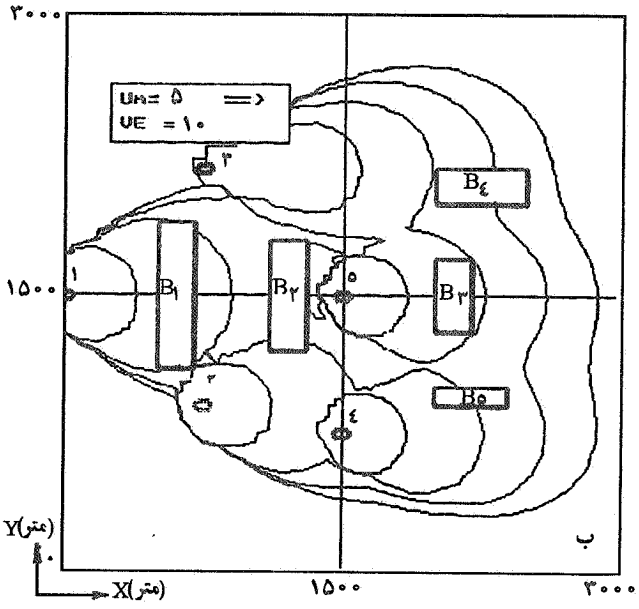
در عرض ۲/۵ سال مطالعه و جمع آوری منابع، سعی شده‌است مدلی تهیه شود که معادلات آن دقت لازم و کارایی کافی را داشته باشند. اما با توجه به ماهیت جریان مغشوش و پیچیدگیهایی که در مدل کردن جزئیات آن وجود دارد، انجام چنین تحقیقاتی تنها با ایجاد آزمایشگاههای مجهز عملی می‌شود. از این رو لازم به ذکر است که در بعضی 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 مطالعهٔ یک رشتهٔ سادهٔ 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" نوآوریهایی هستند که تقریباً در تمام مدلهایی که تاکنون ارائه شده‌است 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 نحوهٔ پخش گازهای سنگینتر از هوا (با شناوری منفی) را نیز مدل نماید.



cal. dt = ۸۶۴/۹	cal. Time = ۱۵۴۸/۳
R. dt = ۶۰/۰	R.Time = ۲۴۰
C_μ = ۲/۷۶۱۳	X_μ = ۰
Z_μ = ۰/۰۰۰	Y_μ = 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



R. Time: زمان واقعی از شروع انتشار

R. dt: زمان یک مرحله از انتشار

Cm: مقدارغلظت ماکزیمم در ناحیه

Y_μ, X_μ: مختصات نقطه‌با بیشترین غلظت

Z_m: ارتفاع از سطح زمین

Puff No: تعداد کل توده های 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 برثانیه)

U_m: سرعت متوسط باد (متر برثانیه)

شکل ۱۴ - نحوهٔ پخش مواد آلوده از تعدادی منبع پیوسته که همزمان فعال شده‌اند (از لحظه شروع تا رسیدن به حالت دائم، خطوط هم غلظت بادقت g/m^3 ۰/۰۰۵ رسم شده‌اند.) الف - ناحیه بدون مانع ب - ناحیه با در نظر گرفتن موانع

واژه نامه

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

مراجع

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 Envioronment,* 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 Wily & Sons, 1979.

۱۱. عباسپور، م. و کلانتر، و.، "اثرات تغییر ناگهانی زبری، موانع واروگرافی سطح روی پخش گازهای سنگین در محیط،" مجموعه مقالات سومین کنفرانس سالانهٔ انجمن مهندسین مکانیک، ص ۲۱-۲۹، ۱۳۷۴.

۱۲. عباسپور، م. و کلانتر، و.، " اثرات تغییر ناگهانی زبری، موانع واروگرافی سطح روی پخش گازهای سبک در اتمسفر،" مجموعه مقالات سومین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، ص ۱۷۵-۱۹۱، ۱۳۷۳.