

بررسی مدل‌های متداول برای شبیه‌سازی پخش آلاینده‌های هوا و ارائه نرم‌افزار AIRPOL، براساس مدل اولری

سید مهدی علائی
استادیار

بهرام دبیر
استاد

خشایار بدیعی
دانشجوی دکترا

دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

امروزه یکی از بزرگترین مشکلاتی که زندگی در شهرهای بزرگ صنعتی را تهدید می‌کند، انواع آلودگی‌های موجود در این مناطق می‌باشد، که از این میان آلودگی هوا یکی از مهمترین آنها است. این آلودگی از جنبه‌های مختلف قابل مطالعه می‌باشد، که از آن جمله می‌توان به مدل‌سازی معادلات ریاضی حاکم بر محیط و شبیه‌سازی شرایط فیزیکی آن اشاره نمود. برای همین منظور در مقاله حاضر به بررسی تعدادی از مدل‌های موجود، شامل مدل‌های ستون گوسی و اولری پرداخته و پس از بیان مشخصه‌های هر یک، مزایا و معایب آنها را مطرح می‌کنیم و سپس با معرفی نرم‌افزار AIRPOL و با جزئیات بیشتر، باتوجه به منابع سطحی و خطی ایجاد آلودگی در داخل شهرها و خصوصیات هوا و به خصوص مؤلفه‌های سه گانه سرعت، به توضیح و بررسی مدل اولری خواهیم پرداخت. در انتها لازم به توضیح است که نرم‌افزار AIRPOL باتوجه به پدیده پایداری جو و درجات آن و در نتیجه وجود جریان‌های درهم و لایه مرزی جو و همچنین لایه‌های نفوذناپذیر در جو مانند لایه وارونگی، به بررسی توزیع غلظت آلاینده‌ها در جو و در چهار بعد مکان و زمان می‌پردازد.

Study of the Conventional Models for Simulation of Air Pollutants Dispersion and the Introduction of AIRPOL Software, Based on Eulerian Model

B. Dabir
Professor

S.M. Alaie
Assistant Professor

K.h. Badii
P.h. D. Student

Amirkabir University of Technology

Abstract

Today one of the biggest problem that threatens life in big industrial cities is the various pollutants present in these areas, among which air pollution is one of the most important. Various aspects of this pollution are worth investigating, like its mathematical modeling and the simulation of its physical conditions.

For this purpose in the present article some of the available models including the Gaussian Plume and Eulerian models are considered. The characteristics of each model as well as their advantages and disadvantages are stated. Also the AIRPOL software is introduced and by considering the surface and line sources of pollution inside cities, the characteristics of air and especially the three components of velocity, the Eulerian model is studied in more detail.

Finally, it should be mentioned that, taking into account the atmospheric stability phenomena and its degrees and therefore the presence of turbulent flows and boundary layer of the atmosphere as well as impermeable layers like inversion layer, the AIRPOL software investigates the distribution of the concentration of pollutants in the atmosphere and in the four dimensions of place and time.

ساکن درست است، ولی پایه ای برای به دست آوردن معادله های سایر موارد ممکن در جو است. مشهورترین آنها مربوط به غلظت یک جزء منتشر شده از یک منبع نقطه ای پیوسته و مرتفع است، که به معادله ستون گوسی (Gaussian Plume Eq.) معروف بوده و ما نیز بررسی خود را روی آن متمرکز می کنیم. یکی از معمول ترین نمونه های این معادلات، معادله تحلیلی (Analytical) زیر است، که در آن مرز مسأله در جهت عمودی نیمه بی نهایت در نظر گرفته شده است و آلاینده نیز جذب زمین نمی شود:

$$C(x, y, z) = \frac{S}{2\pi \cdot \bar{u} \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (1)$$

در این معادله باد تنها در جهت x جریان داشته و منبع تولید آلودگی یک دودکش منفرد (منبع نقطه ای) در ارتفاع مؤثر h است و برای محاسبه σ_y و σ_z از روابط زیر استفاده گردیده است:

$$\sigma_y = R_y \cdot x^{r_y} \quad \text{و} \quad \sigma_z = R_z \cdot x^{r_z} \quad (2)$$

که مقادیر R_y , R_z , r_y , r_z به طبقات پایداری و زمان متوسط گیری بستگی دارند. برای این منظور در مقاله حاضر از داده های پیشنهادی Klug, 1969 برای متوسط گیری ۱۰ دقیقه ای استفاده شده است [۸]. مسأله دیگر محاسبه میزان صعود ستون دود (Plume Rise), Δh و ارتفاع مؤثر دودکش، h، است (h_s ارتفاع حقیقی دودکش است):

$$h = h_s + \Delta h \quad (3)$$

که برای تعیین این اختلاف ارتفاع از روابط ASME, 1973 استفاده گردیده است [۸]. در ضمن برای سرعت باد رابطه توانی زیر به کار رفته است:

$$\bar{u}(z) / \bar{u}_r = (z/z_r)^P \quad (4)$$

توان P را می توان از اطلاعات Ku و همکارانش [۷] برای طبقات پایداری مختلف به دست آورد [۲].

شبهه سازی پدیده ای مانند آلودگی هوا، به دلیل پیچیدگی پدیده های جوی، نیاز به بررسی و مشخص نمودن عوامل بسیاری دارد. از آن جمله می توان به سرعت و جهت باد، وضعیت درهمی (Turbulence) هوا، رطوبت، فشار، دما و همچنین میزان تشعشع در جو از یک طرف و منابع آلاینده ها و توان آنها از طرف دیگر، اشاره نمود. به همین دلیل توانایی مدل در ساده کردن مسأله، بدون آن که به ساختار کلی آن آسیبی وارد نمود و جواب ها با خطای بسیار همراه گردند، از اهمیت بالایی برخوردار است.

مدل های مختلفی تاکنون برای این منظور پیشنهاد گردیده اند، که از این میان می توان به مدل های برگشتی (Regression Models) [۱ و ۲]، جعبه ای (Box) [۱-۵]، اولری (Eulerian) [۱، ۲ و ۵-۸]، لاگرانژی (Lagrangian) [۱، ۲، ۵ و ۸]، گوسی (Gaussian) [۱، ۲، ۴، ۵ و ۸-۱۰]، پیوندی (Hybrid) [۱۱] اشاره نمود.

از میان مدل های حاضر مدل های برگشتی و جعبه ای به داده های تجربی ایستگاه های سنجش و تطبیق آنها با معادلات مناسب وابسته هستند و در نتیجه تنها برای منطقه مورد اندازه گیری و همان شرایطی که در تعیین عوامل محیطی دخیل بوده اند، کاربرد دارند و به همین دلیل تنها برای بررسی دقت مدل های پیچیده تر مناسب هستند و در مقاله حاضر مورد توجه نیستند. مدل های لاگرانژی نیز هر چند از دقت خوبی برخوردار هستند، ولی به دلیل پیچیدگی نیاز به توضیحات بیشتری دارند که خارج از حوصله این مقاله بوده و در ضمن با بررسی مدل های گوسی تا حدودی به آنها نیز اشاره می گردد. مدل های پیوندی در حقیقت مخلوطی از دو یا چند مدل هستند، که خود جای بررسی بسیار دارد. در زیر به بررسی دو مدل گوسی و اولری می پردازیم.

۲- مدل های گوسی

این مدل ها در حقیقت منتج از مدل های لاگرانژی بوده و نام خود را نیز از تابع احتمال گوسی، که جانشین تابع دانسیته احتمال انتقال شده است، گرفته اند [۸]. فرض اصلی در مدل گوسی این است که تحت شرایط ایده آل معین غلظت متوسط یک جزء منتشر شده از یک منبع نقطه ای دارای توزیع گوسی است. در حقیقت، اگر چه این فرض تنها برای اغتشاش های همگن و شرایط

محل آن نسبت به نقطه صفر (دودکش) می شود، ولی در نقاط دورتر نسبت به دودکش تأثیر خود را از دست می دهد. به هر صورت این مسأله به دلیل افزایش ارتفاع مؤثر دودکش و پخش آلاینده ها در ارتفاع بالاتر و در نتیجه کاهش آلودگی در سطح زمین از اهمیت بسیاری برخوردار است.

۳- مدل اولری و نرم افزار AIRPOL

پایه اصلی این مدل معادله جابجایی - نفوذ (Advection - Diffusion Eq.) در جریان های درهم است، که درحقیقت بر رفتار و حرکت گازها و ذرات معلق در جو، که اغلب به صورت درهم است، متکی است و تفاوت اصلی آن با مدل لاگرانژی در انتخاب سیستم مختصات است. در روش اولری سیستم مختصات ثابت است و این در حالی است که در روش لاگرانژی سیستم مختصات متحرک بوده و با جریان و همراه ذرات حرکت می کند.

معادله اصلی در این روش برای N ذره با فرض تراکم ناپذیر بودن جو و صفر بودن عناصر غیرقطری تنسور ضرایب نفوذ چرخانه ها ($K_{jk}=0: j \neq k$) (Eddy Diffusivity) [۶ و ۸]، به صورت زیر تعریف می شود [۲، ۶ و ۸]:

$$\frac{\partial \langle C_i \rangle}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \langle C_i \rangle}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[K_{ij} \frac{\partial \langle C_i \rangle}{\partial x_j} \right] + R_i(\langle C_1 \rangle, \dots, \langle C_N \rangle) + S_i(x, t) \quad (5)$$

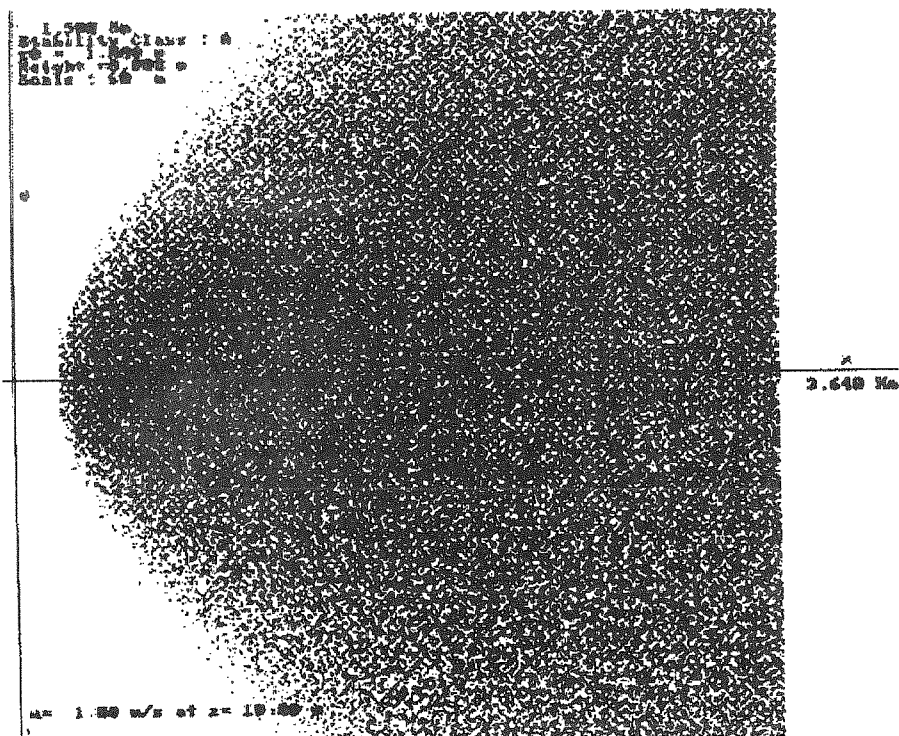
نکته بسیار مهم در این معادله نمایش تأثیر واکنش های شیمیایی (R_i) است، که به خصوص در مدل های پیشین بررسی آنها بسیار مشکل است. از طرف دیگر، تأثیر منابع آلودگی و همچنین آلاینده های مختلف در این مدل به طور همزمان و متقابل صورت می گیرد، که اینها از بزرگترین نقص های مدل های پیشین بودند. در ضمن این مدل توانایی منظور نمودن تغییرات زبری سطح را دارد.

در این مدل فرض بر این است که نفوذ در جهت x در مقابل جابجایی ناشی از باد ناچیز بوده و در ضمن بتوان ستون دود خروجی از دودکش را باریک و بدون اختلال در نظر گرفت، که در نتیجه در محاسبات از تقریب ستون باریک (Slender Plume App.) استفاده گردیده است. نکته دیگر استقلال منابع تولید آلودگی از یکدیگر و تابع توزیع بکار رفته برای هر یک است، که این خود نقص عمده ای می باشد، مضاف بر اینکه مقادیر انحراف معیار به کار رفته در این روش به شدت تابع شرایط محلی بوده و در ضمن رابطه مورد استفاده برای وسعت تنها برای مناطق مسطح مناسب بوده و برای بررسی در مناطق کوهستانی و وجود موانع نیاز به اصلاح دارد [۱۰]. با وجود نواقص موجود، این روش، به خصوص در مدل های تجارتي به همراه داده های آزمایشی کافی، از کارایی بالایی برخوردار است.

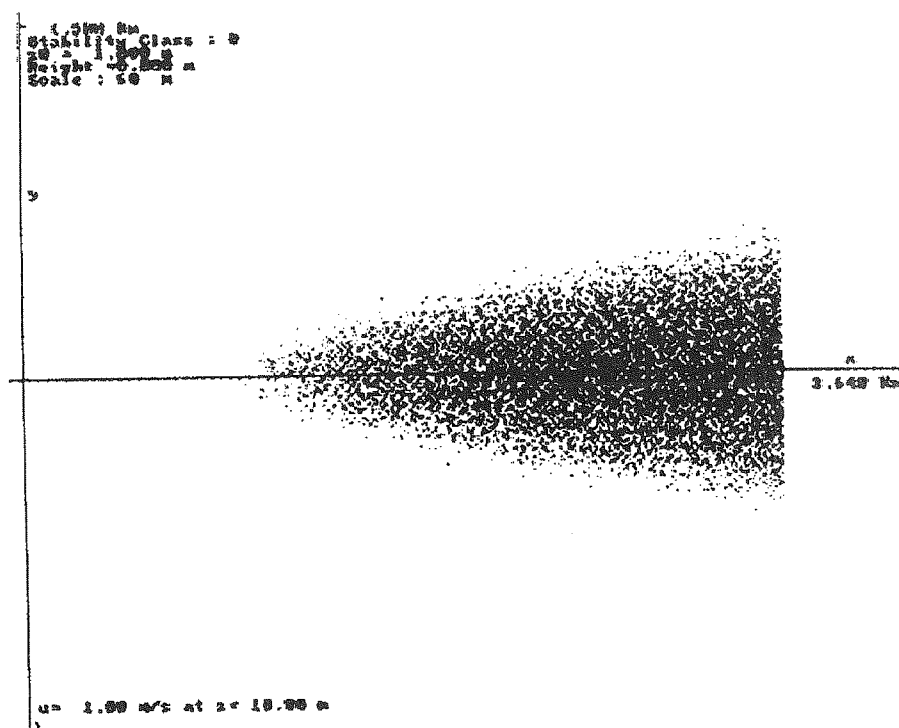
شکل های (۱) الی (۳) مقایسه ای کیفی از پخش آلاینده در سطح زمین (در حالت بازگشت کامل)، برحسب طبقات پایداری D, A و E هستند. چنانچه از این شکل ها مشخص است، با افزایش ناپایداری (A) و در نتیجه در همی بیشتر، پخش آلودگی افزایش یافته و همانگونه که از این سه شکل نیز برداشت می شود، در زمانی که پایداری افزایش می یابد، آلاینده ها به کندی پخش گردیده و به صورت متمرکز انتقال می یابند.

شکل (۴) تأثیر سرعت باد را در میزان پخش آلودگی در سطح زمین نشان می دهد. همانگونه که از این شکل مشخص است با افزایش سرعت و در نتیجه انتقال سریع تر آلودگی و کاهش تأثیر نفوذ در جهت عمودی، میزان آلاینده در سطح زمین به شدت کاهش می یابد. از طرفی افزایش زبری سطح و وجود موانع سبب افزایش غلظت آلاینده در سطح زمین می شود، که این نکته در شکل (۵) به خوبی مشخص است.

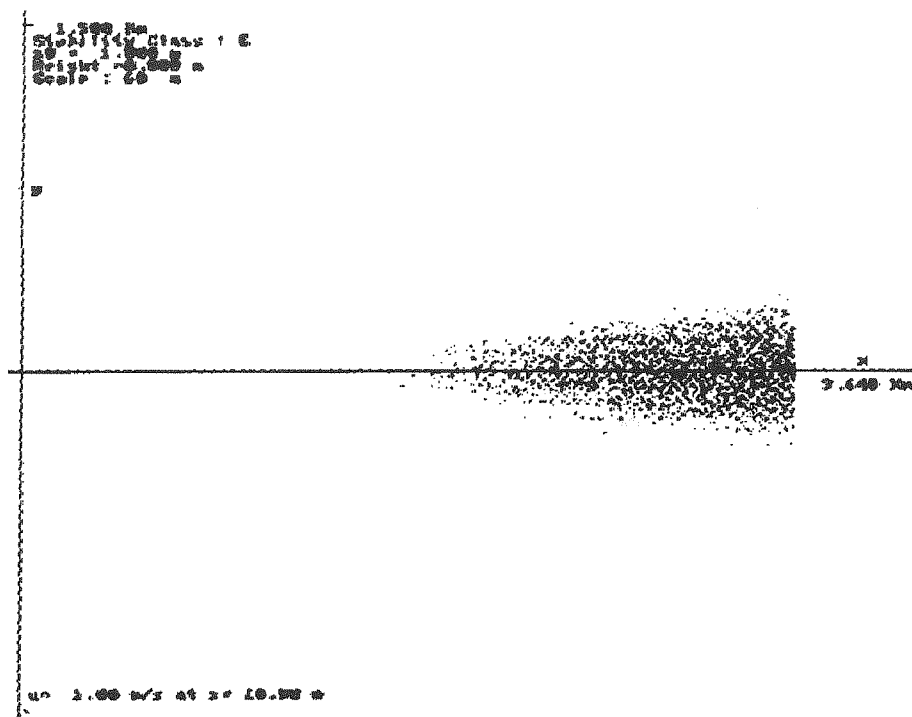
افزایش سرعت خروج آلاینده از دودکش نیز می تواند به عنوان یک عامل تعیین کننده مورد توجه قرار گیرد. چنانچه در شکل (۶) می توان دید، افزایش این عامل سبب کاهش مقدار حداکثر آلودگی و همچنین جابجا شدن



شکل (۱) نمایی از توزیع غلظت در صفحه x-y (در ارتفاع 0 m) در طبقه پایداری A برای دفع کامل آلاینده در سطح زمین.

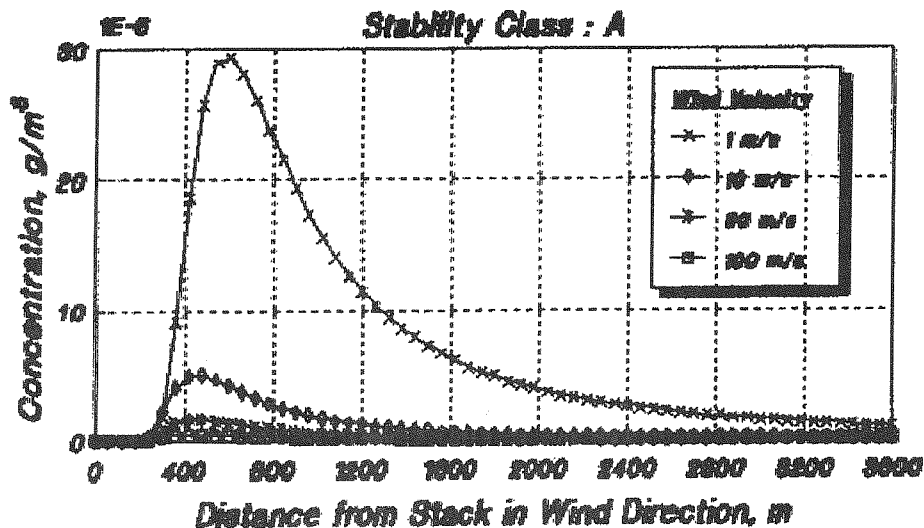


شکل (۲) نمایی از توزیع غلظت در صفحه x-y (در ارتفاع 0 m) در طبقه پایداری B برای دفع کامل آلاینده در سطح زمین.



شکل (۳) نمایی از توزیع غلظت در صفحه x - y (در ارتفاع 0m) در طبقه پایداری E برای دفع کامل آلاینده در سطح زمین.

Effect of Wind Velocity (at $h = 10\text{ m}$) on Concentration of Pollutant at Surface Roughness = 1 m

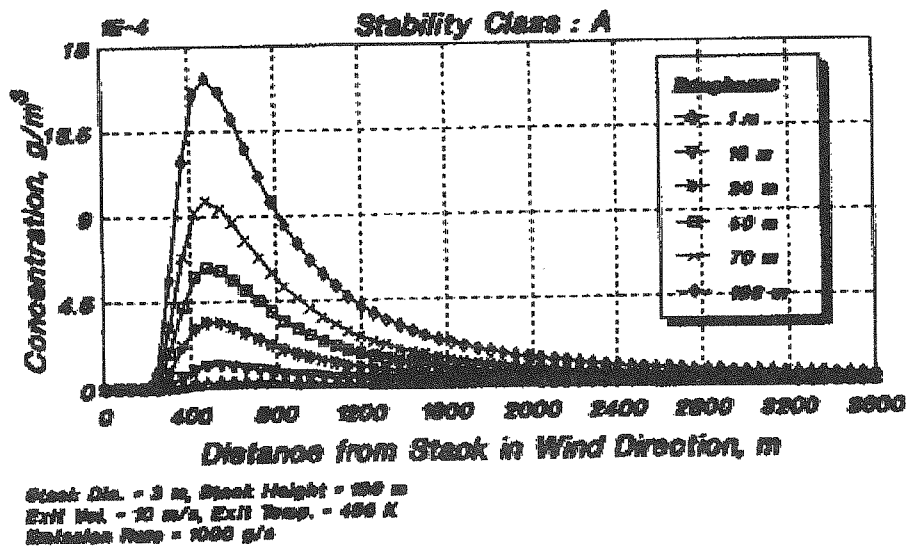


Stack Dia. = 3 m, Stack Height = 100 m
Exit Vel. = 10 m/s, Exit Temp. = 400 K
Emission Rate = 1000 g/s

شکل (۴) تأثیر سرعت باد بر روی غلظت آلاینده در سطح زمین در طبقه پایداری A برای دفع کامل آلاینده در سطح زمین.

Effect of Roughness on Concentration of Pollutant at Surface

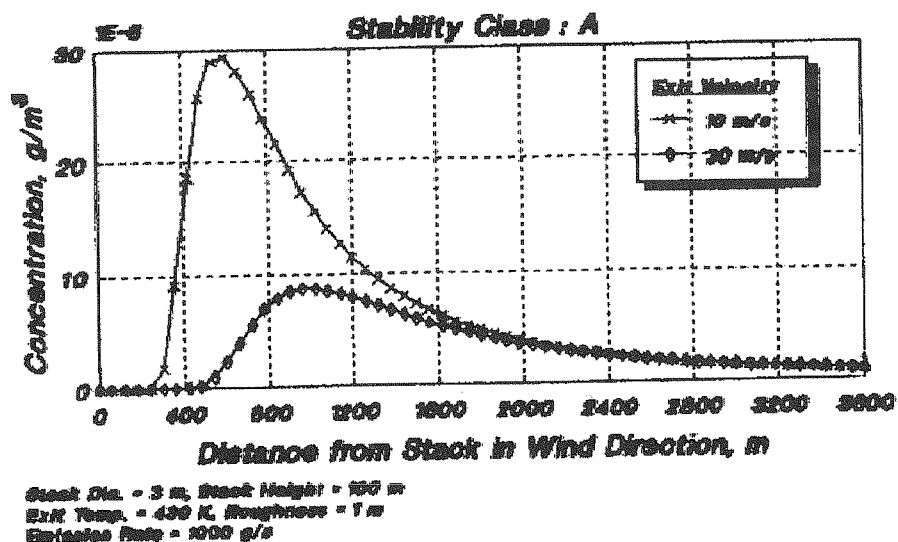
Wind Velocity at 10 m = 1 m/s



شکل (۵) تأثیر زبری بر روی غلظت آلاینده در سطح زمین در طبقه پایداری A برای دفع کامل آلاینده در سطح زمین.

Effect of Exit Velocity of Pollutant on its Concentration at Surface

Wind Velocity at 10 m = 1 m/s



شکل (۶) تأثیر سرعت خروج آلاینده بر روی غلظت آن در سطح زمین در طبقه پایداری A برای دفع کامل آلاینده در سطح زمین.

نرم افزار AIRPOL حل می گردد.

آنچه در این محاسبات از اهمیت بسیاری برخوردار بوده و به خصوص نقش تعیین کننده ای بر روی تعداد تقسیمات و اندازه آنها در جهت عمودی دارد، میزان Z_{max} (ارتفاع حداکثر) است. برای این منظور نرم افزار ابتدا مقداری برای ارتفاع وارونگی (Z_i , Inversion) از استفاده کننده خواسته و سپس با استفاده از روابط Tennekes, Blackadar - 1968 و Zilitinkevich, 1972 [۸] ارتفاع لایه مرزی جو (Z_p , Atmospheric Boundary Layer) را محاسبه و این دو مقدار را با هم مقایسه و کوچکترین آنها را به جای Z_{max} منظور می کند، که اگر این مقدار کوچکتر از 0.5 کیلومتر باشد، Z_{max} را برابر 0.5 در نظر می گیرد. در این روابط برای محاسبه پارامتر کوریولیس (Coriolis) از رابطه $f = 2\Omega \cdot \sin(\beta)$ ، طول Monin-Obukhov از 1972 Golder و سرعت اصطکاکی از رابطه Benoit, 1977 استفاده شده است [۸].

سرعت باد در این نرم افزار با استفاده از معادله توانی (۴) محاسبه می شود. مسأله ای که باقی می ماند محاسبه ضرایب نفوذ چرخانه ها در سه جهت مختصات است. برای این منظور در جهات x و y از رابطه Seinfeld, 1986 [۸] و در جهت z برای شرایط ناپایداری و خنثی جو از دسته معادلات Lamp, et. al., 1975 و برای شرایط پایدار از رابطه Businger-Arya, 1974 استفاده شده است [۸]. ضریب نفوذ مولکولی در این نرم افزار با استفاده از رابطه Chen-Othmer [۱۳] تخمین زده شده است.

۱-۳- نتایج نرم افزار AIRPOL

در حال حاضر باتوجه به این نکته که اندازه گیری ها در سطح شهرهای کشور تکمیل نگردیده اند، نرم افزار AIRPOL در این مقاله به صورت کیفی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۷) وضعیت یک ناحیه مجازی به ابعاد 10×10 کیلومتر مربع را در لحظه ای که تولید آلودگی (که در اینجا SO_2 است) تازه آغاز گردیده و غلظت این آلاینده در تمامی نقاط صفر است، نشان می دهد. سطح ناحیه مورد نظر به وسیله خطوط باریک به سطوح (جهت منابع تولید آلودگی های سطحی، مانند کارخانجات و مناطق مسکونی) و خطوطی (جهت منابع تولید آلودگی های خطی، مانند بزرگراه ها و خیابان ها)، برابر نقشه ناحیه، تقسیم شده، و بر روی صفحه کامپیوتر نمایش داده شده است.

ورود به جزئیات این نرم افزار نیاز به توضیحات بیشتری دارد که از حوصله این مقاله خارج است و در اینجا تنها به بیان اصول ریاضی به کار رفته در آن خواهیم پرداخت. از آنجا که امکان محاسباتی موجود محدود است، و نرم افزار نیز بر روی کامپیوترهای شخصی (PC) اجرا می گردد، سعی شده که با بعضی فرض های ساده کننده، زمان محاسبات ویرایش اول آن را کمتر نمود. در این نرم افزار فرض گردیده است که واکنش شیمیایی نداریم ($R_i = 0$)، مقادیر K_{ij} تنها تابع ارتفاع z ، هستند. فشار ثابت است. دما با ارتفاع تابعی خطی دارد و سطح مورد مطالعه مسطح بوده و زبری محدود و یکنواختی دارد. همچنین فرض گردیده است که مقادیر نفوذ مولکولی در سرعت های کم هوا مؤثر بوده و باید در کنار ضرایب نفوذ چرخانه ها مورد استفاده قرار گیرند، که در نتیجه معادله (۵) را به شکل زیر می توان ساده نمود:

$$\frac{\partial \langle C_i \rangle}{\partial t} + \bar{u}_x \frac{\partial \langle C_i \rangle}{\partial x} + \bar{u}_y \frac{\partial \langle C_i \rangle}{\partial y} + \left(\bar{u}_z - \frac{\partial K_{zz}}{\partial x_z} \right) \frac{\partial \langle C_i \rangle}{\partial z} = (K_{xx} + D_A) \frac{\partial^2 \langle C_i \rangle}{\partial x^2} + (K_{yy} + D_A) \frac{\partial^2 \langle C_i \rangle}{\partial y^2} + (K_{zz} + D_A) \frac{\partial^2 \langle C_i \rangle}{\partial z^2} + S_i(x, y, z, t) \quad (6)$$

شرایط مرزی مورد استفاده برای حل این مسأله عبارتند از:

$$C_i = C_{initial} : x = 0, x = x_{max}, y = 0, y = y_{max}, t = 0 \quad (7)$$

$$(K_{zz} = D_A) \frac{\partial \langle C_i \rangle}{\partial z} + E_i(x, y, 0, t) = v_d \cdot \langle C_i \rangle : z = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \langle C_i \rangle}{\partial z} = 0 : z = z_{max} \quad (9)$$

دسته معادله حاصل به روش تفاضل محدود (Finite Difference) [۱، ۲، ۷، ۸] و طریقه ضمنی کامل (Fully Implicit) بسط یافته و سپس به روش تکرار گوس - سایدل (Gauss-Seidel Iteration) و به وسیله

فشار جو ثابت و برابر 88KPa ، دمای حداکثر سطح زمین برابر با 312K در ساعت ۱۴ و دمای حداقل سطح زمین 292K در ساعت ۴، دما در ارتفاع 2Km برابر 273 (ثابت با زمان)، ارتفاع وارونگی 1Km ، زبری سطح 1m ، عرض جغرافیایی ناحیه 30 درجه، سرعت انتشار متوسط منابع تولید آلودگی (تنها برای منابع مستقر در مرزهای مسأله) 1cm/s و زمان شروع تولید آلودگی ساعت ۱۰ در نظر گرفته شده‌اند. براساس اطلاعات ورودی بالا پنج اجرا با شرایط مختلف انجام گردیده است که در این مقاله به دلیل فشردگی بودن موضوع، تنها به بعضی از نتایج آن برای توزیع غلظت در سطح زمین اشاره می‌شود. ذکر این نکته لازم است که طول تقسیمات مکانی در صفحه افقی 0.5Km برای هر جهت و برای تقسیمات زمانی 0.5 ساعت است. در جهت عمودی کلاً 7 شبکه در نظر گرفته شده که طول تقسیمات براساس محاسبه Z_p و مقایسه آن با Z_i انجام می‌پذیرد.

الف - اجرای ۱: در این اجرا با فرض عدم جذب آلودگی توسط خاک و مقادیر ۳، ۲ و صفر کیلومتر بر ساعت برای مؤلفه‌های x ، y ، z سرعت باد، به ترتیب در ارتفاع مرجع 10m ، پس از یک ساعت شکل (۸) حاصل گردیده است.

ب - اجرای ۲: در این اجرا با فرض دفع آلودگی با سرعت 10cm/s توسط خاک و همان مؤلفه‌های سرعت باد در اجرای ۱، پس از یک ساعت شکل (۹) به دست آمده است.

پ - اجرای ۳: در این اجرا با فرض جذب آلودگی با سرعت 10cm/s به وسیله خاک و همان مؤلفه‌های سرعت باد در اجرای ۱، بعد از گذشت یک ساعت شکل (۱۰) نتیجه شده است.

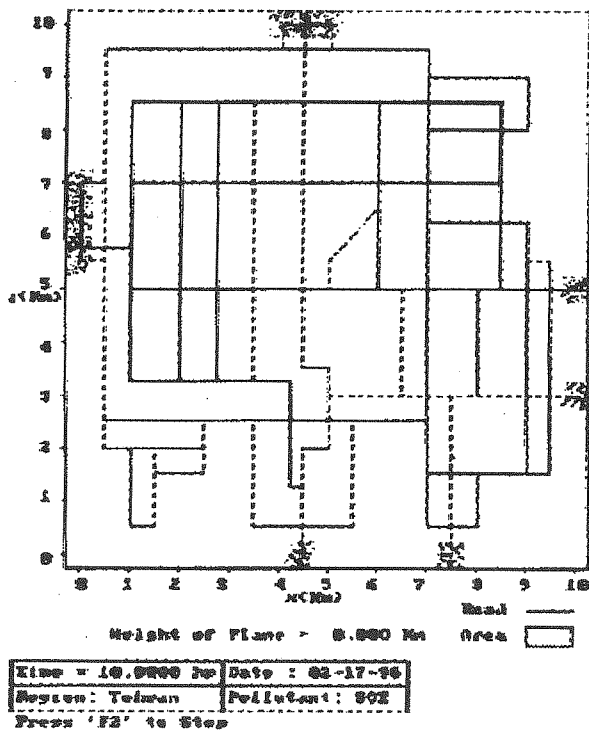
ت - اجرای ۴: اجرای ۴ با فرض عدم جذب آلودگی توسط خاک و سکون هوا (مقادیر صفر کیلومتر بر ساعت برای هر سه مؤلفه سرعت باد)، پس از یک ساعت شکل (۱۱) را بر صفحه کامپیوتر نمایش می‌دهد.

ث - اجرای ۵: تمام شرایط این اجرا مشابه اجرای ۱ است. با این تفاوت که مقادیر ۱۰، صفر و صفر کیلومتر بر ساعت برای مؤلفه‌های x ، y ، z سرعت باد، به ترتیب، در ارتفاع مرجع 10m در نظر گرفته شده‌اند. نتیجه حاصل از این اجرا پس از گذشت یک ساعت در شکل (۱۲) آورده شده است. حال که با هر یک از اجراهای پنج گانه آشنا شدید،

می‌توان به بررسی و مقایسه میان آنها پرداخت. ابتدا سه شکل (۸) - (۱۰) را در نظر می‌گیریم. تفاوت عمده در این سه اجرا جذب و یا دفع آلاینده به وسیله خاک می‌باشد. اگر به این سه شکل توجه کنید، تراکم بیشتر آلاینده در شکل (۹) را نسبت به دو شکل دیگر به وضوح مشاهده می‌کنید، و این در حالی است که در اجرای ۳، به دلیل جذب آلاینده توسط خاک، حتی در سر تقاطع‌ها نیز تراکم آلودگی چندان بالا نبوده و کمتر از دو مورد دیگر است که این نتیجه‌گیری با حقیقت مطابقت دارد.

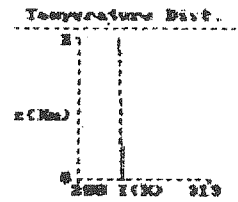
از طرف دیگر تفاوت میان سه شکل (۹)، (۱۱) و (۱۲) تنها در مقدار مؤلفه‌های سرعت است، به طوری که در شکل (۱۱) هوا ساکن بوده و در شکل (۱۲) تنها در جهت x باد دارای مؤلفه است، آنهم با مقداری به مراتب بالاتر از اجرای ۱. در هر صورت نتیجه‌ای که از این اجراها حاصل گردیده است، نشان دهنده این نکته می‌باشد که در حالی که در اجرای ۱ (و حتی اجراهای ۲ و ۳) آلودگی به سمت بالا و گوشه راست نقشه رانده شده است، در اجرای ۴ (شکل ۱۱) کاملاً یکنواخت بوده و در اجرای ۵ (شکل ۱۲) به سمت راست رانده شده و در ضمن به دلیل افزایش سرعت باد، توزیع یکنواخت‌تری در سطح زمین داشته و در تقاطع‌ها نیز تجمع موضعی آلاینده را نداریم، که نشان دهنده جابجایی بهتر آلاینده‌ها در سرعت‌های بالاتر باد است. نکته جالب در بین پنج اجرا مربوط به اجرای ۴ است، که در آن هوا ساکن است. در این اجرا تنها عامل جابجایی آلودگی نفوذ مولکولی است، که نسبت به پدیده جابجایی هوا بسیار کند عمل میکند، که این نکته در شکل (۱۱) به خوبی نمایش داده شده است. به همین دلیل است که تنها در نواحی که آلودگی تولید می‌گردد، می‌توان توزیع آن را مشاهده نمود.

به هر صورت آنچه از این پنج اجرا مشاهده می‌شود، تأیید کیفی بر عملیات نرم افزار AIRPOL است. با وجود بر این نرم افزار حاضر برای تکمیل شدن راه طولانی درپیش دارد، که از این میان می‌توان به لزوم توجه دقیق‌تر به مسأله پایداری در جو، حل معادلات موازنه ممنتوم و حرارت و در آخر یافتن روش‌های ریاضی جدید جهت بهینه نمودن حافظه و زمان محاسبات و در نتیجه گسترش محدوده ناحیه مورد مطالعه اشاره نمود.

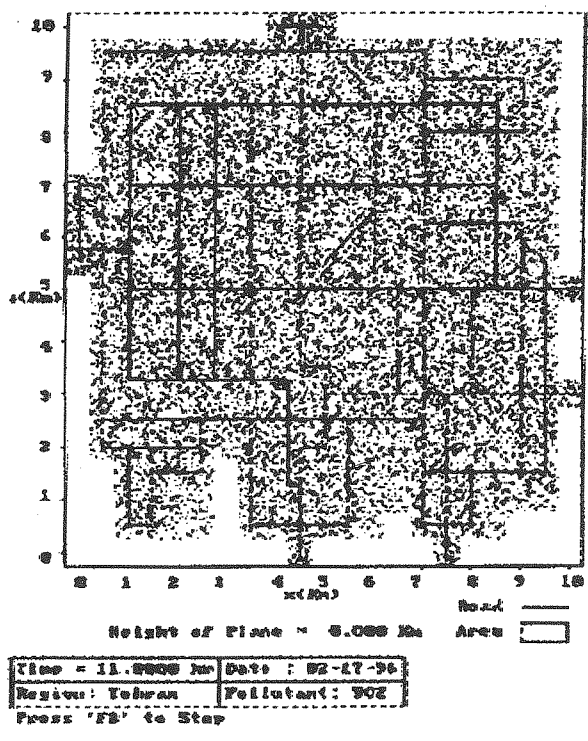


Con. Dist., $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
0.00+00	1.00-07
1.00-07	1.00-06
1.00-06	1.00-05
1.00-05	1.00-04
1.00-04	1.00-03
1.00-03	1.00-02
1.00-02	1.00-01
1.00-01	1.00+00
1.00+00	1.00+01
1.00+01	1.00+02
1.00+02	

Pressure = 99.000 Kpa
 Stability Class: C
 Ref. Height = 10.00 m
 Velocity at Ref. Height
 $U_x = 3.000 \text{ m/hr}$
 $U_y = 2.000 \text{ m/hr}$
 $U_z = 0.000 \text{ m/hr}$

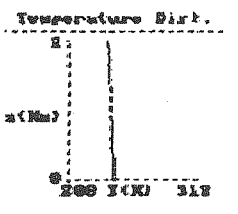


شکل (۷) شرایط اولیه برای پنج اجرای نرم افزار AIRPOL

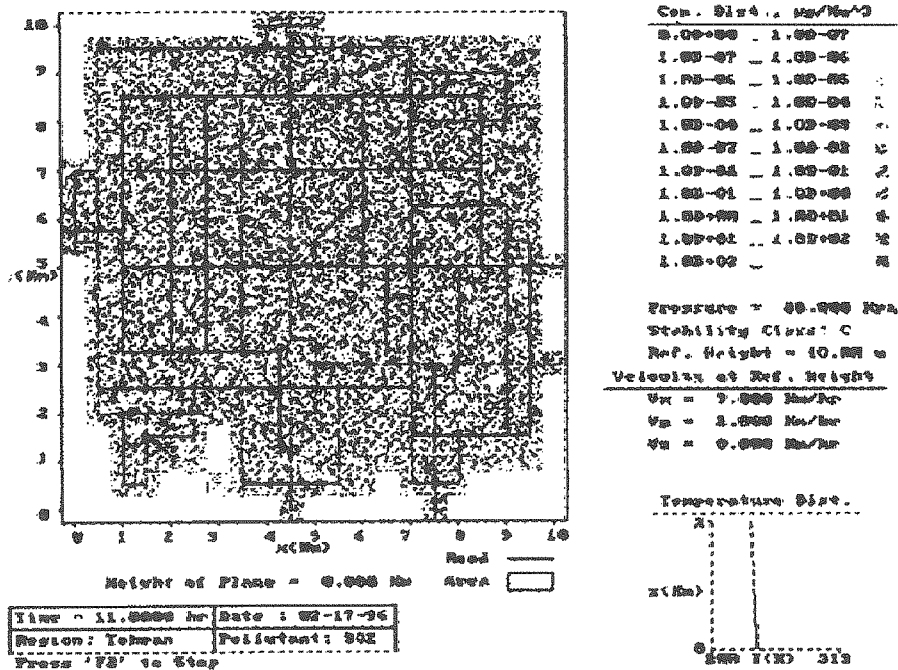


Con. Dist., $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
0.00+00	1.00-07
1.00-07	1.00-06
1.00-06	1.00-05
1.00-05	1.00-04
1.00-04	1.00-03
1.00-03	1.00-02
1.00-02	1.00-01
1.00-01	1.00+00
1.00+00	1.00+01
1.00+01	1.00+02
1.00+02	

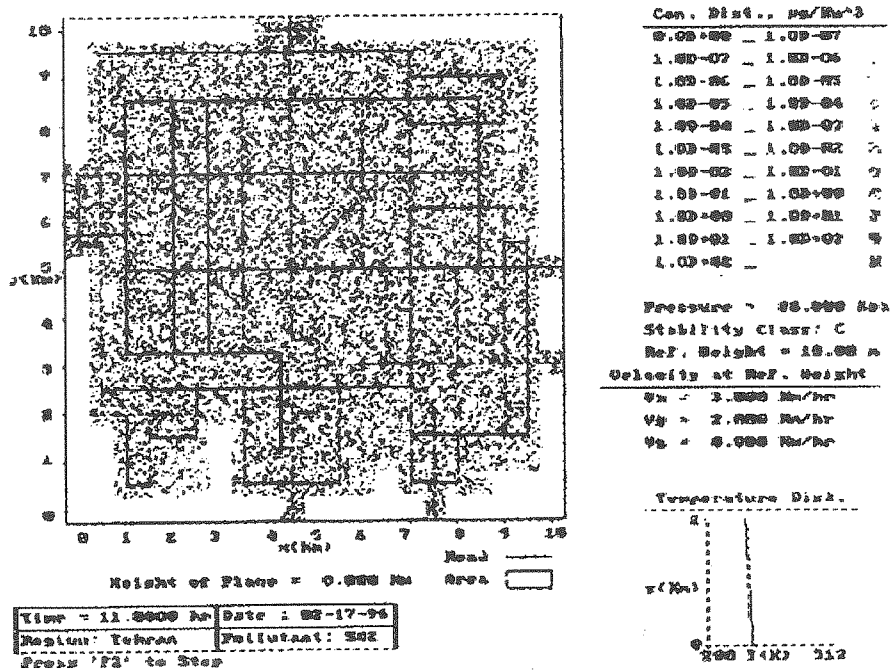
Pressure = 99.000 Kpa
 Stability Class: C
 Ref. Height = 10.00 m
 Velocity at Ref. Height
 $U_x = 3.000 \text{ m/hr}$
 $U_y = 2.000 \text{ m/hr}$
 $U_z = 0.000 \text{ m/hr}$



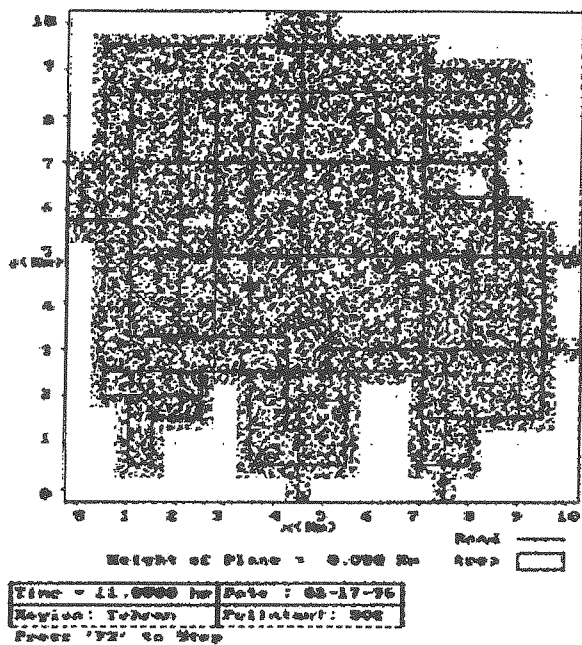
شکل (۸) نمایش توزیع غلظت آلاینده در سطح زمین پس از يك ساعت برای اجرای ۱



شکل (۹) نمایش توزیع غلظت آلاینده در سطح زمین پس از یک ساعت برای اجرای ۲.

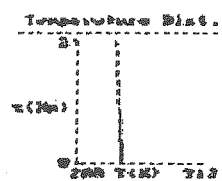


شکل (۱۰) نمایش توزیع غلظت آلاینده در سطح زمین پس از یک ساعت برای اجرای ۳.

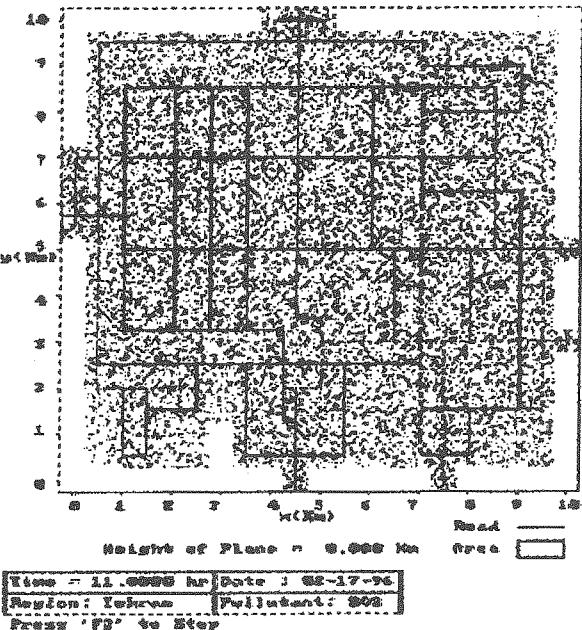


Con. Dist., $\mu\text{g}/\text{M}^3$	
0.00+00	1.00-07
1.00-07	1.00-06
1.00-06	1.00-05
1.00-05	1.00-04
1.00-04	1.00-03
1.00-03	1.00-02
1.00-02	1.00-01
1.00-01	1.00+00
1.00+00	1.00+01
1.00+01	1.00+02
1.00+02	

Pressure = 99.999 kPa
 Stability Class: C
 Ref. Height = 10.000 m
 Velocity at Ref. Height
 $V_x = 0.000 \text{ m/hr}$
 $V_y = 0.000 \text{ m/hr}$
 $V_z = 1.000 \text{ m/hr}$

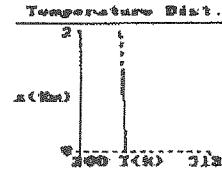


شکل (۱۱) نمایش توزیع غلظت آلاینده در سطح زمین پس از یک ساعت برای اجرای ۴.



Con. Dist., $\mu\text{g}/\text{M}^3$	
0.00+00	1.00-07
1.00-07	1.00-06
1.00-06	1.00-05
1.00-05	1.00-04
1.00-04	1.00-03
1.00-03	1.00-02
1.00-02	1.00-01
1.00-01	1.00+00
1.00+00	1.00+01
1.00+01	1.00+02
1.00+02	

Pressure = 99.999 kPa
 Stability Class: C
 Ref. Height = 10.000 m
 Velocity at Ref. Height
 $V_x = 10.000 \text{ m/hr}$
 $V_y = 0.000 \text{ m/hr}$
 $V_z = 0.000 \text{ m/hr}$



شکل (۱۲) نمایش توزیع غلظت آلاینده در سطح زمین پس از یک ساعت برای اجرای ۵.

تشکر و قدردانی

در اینجا لازم می‌دانیم که از کلیه کارکنان معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی امیرکبیر به خصوص جناب آقای دکتر جعفر میلی منفرد، که در تمامی مراحل تهیه این نرم افزار ما را یاری نمودند، تشکر و قدردانی نمایم.

نشانه‌ها

P: توان رابطه (۴)
 P: لایه مرزی جو (زیرنویس)
 R: سرعت واکنش شیمیایی، $\text{mg/Km}^3/\text{hr}$
 r: مرجع (زیرنویس)
 S: قدرت منبع آلودگی، $\text{mg/Km}^3/\text{hr}$
 t: زمان، hr
 u: مؤلفه سرعت در جهت x، Km/hr
 \bar{u}_z : مؤلفه سرعت متوسط در جهت z، Km/hr
 V_d : سرعت جذب آلودگی توسط خاک، cm/sec
 X : بردار متغیر مکان (x, y, z)، Km
 x, y, z: مختصات مکان
 z: ارتفاع
 β : عرض جغرافیایی ناحیه
 σ^2 : واریانس
 Ω : سرعت زاویه‌ای زمین
 < : متوسط روی زمان و مکان معین
 - : نشانه متوسط (بالانویس)

C: غلظت، $\mu\text{g/Km}^3$
 D_A : ضریب نفوذ ملکولی جزء A، Km^2/hr
 E: توان انتشار منبع، $\mu\text{g/Km}^2/\text{hr}$
 f: پارامتر کوریولیس
 h: ارتفاع مؤثر دودکش، m
 h_s : ارتفاع حقیقی دودکش، m
 i: جزء $i = 1, 2, \dots, N$ (زیرنویس)
 : وارونگی (زیرنویس)
 z: جهت z، $z = 1, 2, 3$ (زیرنویس)
 K: ضریب نفوذ چرخانه‌ای، Km^2/hr

مراجع

- [1] Berlyand, M. F., Prediction and Regulation of Air Pollution, Kluwer Academic Publishers, Netherlands (1991).
- [۲] دبیر، ب.، علانی، س. م. و بدیعی، خ. « بررسی مدل‌های شبیه‌سازی آلودگی هوای شهری با تأکید روی آلودگی هوای تهران - گزارش نهایی «دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، تیر ۱۳۷۵».
- [3] Jakeman, A., J., Bai Jun and Taylor, J. A. "On the Variability of the Wind Speed Exponent in Urban Air Pollution, Hemisphere Pub. Corp. & Springer-Verlage (1987).
- [4] Pickett, E.E., Atmospheric Pollution, Hemisphere Pub. Corp. & Springer - Verlage (1987).
- [5] Zannetti, P., Environmental modeling Vol. I, comp. Mech. Pub. & Elsevier Applied Science (1993).
- [6] Chrysikopoulos, C. V., Hildemann, L. M. and Roberts, P. V. "A Three - Dimensional Steady - State Atmospheric Dispersion - Deposition Model for Emissions from A Ground - Level Area Source," Atmos. Environ., Vol. 26A, No. 5, pp. 747-757 91992).
- [7] Ku., J. Y., Rao. T. and Rao. K. S. "Numerical Simulation of Air Pollution in Urban Area: Model Development" Atmos. Environ., Vol. 21, No. 1 pp. 201-212 (1987).
- [8] Seinfeld, J. H., Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution, John Wiley & sons, Inc. (1986).
- [9] Feng, L. "Regional Diffusion Model on Estimating Long - Term Average Concentration of Atmospheric Pollutants" Atmos. Environ., Vol. 26A, No. 15, pp. 2733-2735 (1992)
- [۱۰] عباسپور، م. و کلانتر چاهوکی، و. «بررسی اثرات تغییر ناگهانی زبری، وجود موانع و آروگرافی سطح روی انتشار گازهای سنگین در اتمسفر» مجموعه مقالات سومین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، ج. ۱، ص. ۲۸ - ۲۱، ۲۷-۲۵ اردیبهشت ماه ۱۳۷۴.
- [11] Jakeman, A. j., Simpson, R. W. and Taylor, J. A. "Modeling Distributions of Air Pollutant Concentrations - III. the Hybrid Deterministic - Statistical Distribution Approach" Atmos. Environ., Vol. 22, No. 1, pp. 163-174 (1988).
- [12] Carnahan, B. Luther, H. A. and Wilkes, J. O., Applied Numerical Methods, John Wiley & Sons, inc. (1969).
- [13] McCabe, W. L. and Smith, J., C., Unit Operation of Chemical Engineering, 3rd ed., McGraw - Hill Book Co., ISE (1976).