

## شبیه‌سازی عددی صعود پیرایه ستون دود در شرایط جوی خنثی

خسرو اشرفی<sup>۱</sup>، مجید شفیعی‌پور<sup>۲</sup>، حدیث عباس‌زاده امیردهی<sup>۳\*</sup>

khashrafi@ut.ac.ir

۱. استادیار گروه مهندسی عمران محیط‌زیست دانشکده محیط‌زیست دانشگاه تهران

shafiepour@ut.ac.ir

۲. استادیار گروه مهندسی عمران محیط‌زیست دانشکده محیط‌زیست دانشگاه تهران

۳. کارشناس ارشد مهندسی عمران محیط‌زیست دانشکده محیط‌زیست دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۷/۳۰

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۲۶

### چکیده

راه‌حل‌های متعددی برای محاسبه میزان صعود پیرایه ستون دود موجود است. دود هنگام خارج شدن از دودکش تحت تأثیر باد جانبی قرار می‌گیرد که سبب خم شدن پیرایه ستون دود می‌شود. سرانجام صعود پیرایه ستون دود متوقف و این میزان از صعود برای تعیین ارتفاع مؤثر نشر به ارتفاع واقعی دودکش اضافه می‌شود. از آنجا که معادلات و مدل‌های موجود در زمینه صعود پیرایه ستون دود، بر اساس ساده‌سازی‌هایی به دست آمده‌اند و بسیاری از آن‌ها قادر به محاسبه دقیق صعود پیرایه ستون دود در شرایط جوی مختلف نیستند، می‌توان صعود پیرایه ستون دود را در شرایط جوی مختلف با استفاده از نرم‌افزار فلونتت شبیه‌سازی کرد. در این مقاله به منظور شبیه‌سازی خیزش پیرایه ستون دود، یک دودکش با مشخصات معلوم در محیط گمبیت شبکه‌بندی شده، سپس این شبکه‌بندی به نرم‌افزار فلونتت انتقال یافته است. در نرم‌افزار فلونتت با استفاده از امکانات تعریف توابع از سوی کاربر شرایط اولیه با نیمرخ‌های لایه مرزی جو در حالت خنثی وارد شده و سپس خیزش ستون دود در شرایط خنثای جوی برای دودکشی دارای مومنتوم و شناوری اولیه در دو حالت شبیه‌سازی شده است. در حالت اول شتاب جاذبه در نظر گرفته می‌شود و در حالت دوم بدون در نظر گرفتن شتاب جاذبه ثقلی شبیه‌سازی شکل می‌گیرد. نتایج برای حالتی که در آن شتاب جاذبه ثقلی لحاظ نشده ۶۶ درصد بیشتر از نتایج حاصل از معادلات نیمه‌تجربی است، اما با در نظر گرفتن شتاب جاذبه ثقلی، قسمت زیادی از جرم خروجی از دودکش در اثر جاذبه به سمت زمین کشیده می‌شود. بنابراین، غلظت آلاینده‌ها در ارتفاع دودکش کاهش می‌یابد و به علت سبکی، بیشتر تحت تأثیر نیروی شناوری قرار می‌گیرد و مقدار صعود پیرایه ستون دود ۲/۵ برابر حالتی می‌شود که شتاب جاذبه ثقلی در نظر گرفته شده است.

### کلیدواژه

انرژی جنبشی تلاطم، شبیه‌سازی عددی، صعود پیرایه ستون دود.

### ۱. سرآغاز

هندرسون و سلرز در سال ۱۹۸۷ مدل جامعی را توسعه دادند که در یک فرمول‌بندی عددی ساده، شامل صعود پیرایه ستون دود و پخش آلاینده است (Henderson-Sellers, 1987).

در سال ۱۹۹۵ سازمان حفاظت از محیط‌زیست امریکا (EPA) مدل ISC3<sup>۳</sup> را ارائه داد. این مدل بر اساس ستون دود گوس نوشته شده است. ارتفاع مؤثر در این روش اندکی متفاوت با روش‌های دیگر است (U.S. EPA, User's guide for ISC3 dispersion models, 1995).

آثار زیان‌بار آلودگی هوا در انسان و محیط‌زیست بر هیچ‌کس پوشیده نیست. پدیده آلودگی هوا اغلب در پایین‌ترین لایه جو که لایه مرزی سیاره‌ای (PBL)<sup>۱</sup> نام دارد رخ می‌دهد. برای پیش‌بینی میزان پخش آلاینده‌ها در جو، محققان بسیاری رفتار پیرایه ستون دود را در دو مرحله شامل صعود اولیه پیرایه ستون دود، سپس پخش آن بررسی کرده‌اند. بریگز در سال ۱۹۷۵ خصوصیات ۲۲ مدل پایه صعود پیرایه ستون دود را به صورت منظم جدول‌بندی کرد.

مکان خاص با شرایط جوی مختلف در اختیار کارشناسان محیط‌زیست قرار می‌دهد. همچنین، پیش‌بینی میزان صعود پیرایه ستون دود در تصمیم‌گیری‌های لازم برای مقابله با آثار زیان‌بار آن از اهمیت بسزایی برخوردار است. معادلات و مدل‌های موجود در زمینه صعود پیرایه ستون دود هر کدام بر اساس ساده‌سازی‌هایی به دست آمده‌اند و بسیاری از آن‌ها قادر به محاسبه دقیق میزان صعود پیرایه ستون دود در شرایط جوی مختلف نیستند. ستون دودی که از بسیاری از دودکش‌ها خارج می‌شود خصوصاً آن‌هایی که از فرایند سوختن ایجاد شده باشند، از گازهایی با ترکیبات مشابه هوا ساخته شده‌اند و در بیشتر مواقع این آلاینده‌ها با دمایی بیش از دمای محیط از دودکش خارج می‌شوند. این دمای بالا سبب شناوری ستون دود می‌شود و به این پدیده صعود ستون دود<sup>۶</sup> می‌گویند و برای تعیین ارتفاع مؤثر نشر باید مقدار صعود پیرایه ستون دود محاسبه شود. دود هنگام خارج شدن از دودکش معمولاً تحت تأثیر باد جانبی قرار می‌گیرد که سبب خم شدن پیرایه ستون دود می‌شود. سرانجام صعود پیرایه ستون دود در اثر اختلاط با هوای محیط و از دست دادن شناوری اولیه خود متوقف و این میزان از صعود برای تعیین ارتفاع مؤثر نشر به ارتفاع واقعی دودکش اضافه می‌شود. بنابراین، می‌توان گفت ارتفاع مؤثر دودکش برابر است با حاصل جمع ارتفاع فیزیکی یا واقعی دودکش به علاوه ارتفاع خیزش ستون دود (Briggs, 1969).

$$H = h_s + \Delta h (m) \quad (1)$$

در بعضی مواقع دود با دمایی معادل دمای هوای محیط از دودکش خارج می‌شود، اما از گازهایی تشکیل یافته که ترکیبات و چگالی آن‌ها بسیار با هوای اطراف متفاوت است. اگر این گازها سبک‌تر از هوا باشند دارای شناوری مثبت و اگر سنگین‌تر از هوا باشند دارای شناوری منفی‌اند. در هر دو صورت در اثر سرعت خروج دود از دودکش ستون دود دارای تکانه اولیه است که در میزان صعود اولیه آن که بسیار نزدیک به دهانه دودکش است تأثیر می‌گذارد.

توماس اورکمپ در سال ۲۰۰۵ صعود ستون دود را در حالت خنثی بررسی کرد. وی با فرض نیمرخ سرعت باد توانی و در نظر گرفتن شرایط جوی خنثی برای منابع نقطه‌ای و محدود، راه‌حلی برای دو حالت داشتن تکانه اولیه بدون شناوری و داشتن تکانه و شناوری اولیه ارائه داد. اورکمپ برای به دست آوردن حل تحلیلی از معادلات صعود پیرایه ستون دود برای نیمرخ سرعت باد توانی انتگرال‌گیری عددی کرد (Overcamp, 2005).

مختارزاده و همکارانش در سال ۲۰۰۶ درباره اثر متقابل دو پیرایه ستون دود متشکل از گازهای خشک در شرایط اتمسفری خنثی با استفاده از ۳ مدل k-ε استاندارد، RNG و k-ε (DFM)<sup>۴</sup> مطالعه‌ای عددی انجام دادند. مقایسه نتایج نشان داد که بین ارتفاع صعود پیرایه ستون دود پیش‌بینی‌شده با استفاده از این ۳ مدل تلاطمی تطابق خوبی وجود دارد، اما مدل DFM نیمرخ دما را دقیق‌تر پیش‌بینی می‌کند (Mokhtarzadeh, et al., 2006).

گان و همکارانش در سال ۲۰۰۸ اثر صعود پیرایه ستون دود را در انتقال گاز مونوکسیدکربن در افریقا بررسی کردند. آن‌ها در این مطالعه از مدل جامع جوی مرکز ملی تحقیقات جوی (CAM)<sup>۵</sup> و ردیاب گاز مونوکسیدکربن استفاده کردند. مدل CAM می‌تواند با سه هسته دینامیکی مختلف اجرا شود. در این مطالعه از هسته دینامیکی حجم محدود استفاده شده است. گان و همکارانش به این نتیجه رسیدند که وقتی همرفت شدید است مکانیزم صعود پیرایه ستون دود سبب کاهش غلظت گاز مونوکسیدکربن در قسمت بالای وردسپهر می‌شود. صعود پیرایه ستون دود به گونه‌ای است که از لایه مرزی نیز می‌گذرد و اجازه می‌دهد که در اثر همرفت شدید غلظت‌های گاز مونوکسیدکربن به نواحی بالاتر لایه مرزی برسد (Guan, et al., 2008).

در این مطالعه اولین مرحله بررسی می‌شود، زیرا ارتفاع مؤثر نشر در پخش و پراکنش آلاینده‌ها بسیار مؤثر است و اطلاعات مفیدی در خصوص چگونگی کیفیت هوای محیط در صورت استفاده از یک صنعت خاص در یک

## ۱.۲. معادلات نیمه تجربی

یکی از معادلات ساده و در عین حال تکامل یافته در این زمینه مدل ISC3 است که بر پایه مدل ستون دود گوس نوشته و از سوی سازمان حفاظت از محیط زیست آمریکا ارائه شده است (user's guide ISC3, 1995).

با استفاده از معادلات این مدل ارتفاع پیرایه ستون دود به صورت نظری برای همان فرضیاتی که شبیه سازی بر پایه آن انجام شده است، به دست می آید. فرضیات در نظر گرفته شده در شبیه سازی برای حالت خنثی در جدول ۱ آورده شده است. در مدل ISC3 نیروی شناوری از رابطه ۲ و نیروی تکانه از رابطه ۳ محاسبه می شود. برای تشخیص قالب بودن تکانه و شناوری در این مدل ابتدا  $\Delta t = T_s - T_a$  محاسبه، سپس با مقدار  $\Delta T_c$  مقایسه می شود. اگر  $\Delta T < \Delta T_c$  تکانه غالب و اگر  $\Delta T \geq \Delta T_c$  شناوری غالب است.  $\Delta T_c$  پارامتری برای تشخیص قالب بودن تکانه یا شناوری است.

$$F_b = g v_s d_s^2 \left( \frac{T_s - T_a}{4 T_s} \right) \quad (m^4 s^{-2}) \quad (2)$$

$$F_m = v_s^2 d_s^2 \left( \frac{T_a}{4 T_s} \right) \quad (m^4 s^{-2}) \quad (3)$$

جدول ۱. فرضیات حالت خنثی

قطر دودکش $d_s$ (m)	۲
ارتفاع دودکش $h_s$ (m)	۶۰
سرعت خروجی از دودکش $v_s$ (m/s)	۱۰
سرعت باد مبنا $u_{10}$ (m/s)	۴
دمای گازهای خروجی از دودکش $T_s$ (K)	۴۵۰
دمای محیط $T_a$ (K)	۲۹۸
$Z_{o,m}$ (m)	۰/۲
$Z_{o,h}$ (m)	۰/۰۰۲
نرخ کاهش دما (k/m)	۰/۰۰۹۸

مقادیر  $\Delta T_c$ ،  $x_f$  و  $\Delta h$  برای شرایط خنثای جوی به

شرح زیر است:

صعود پیوسته پیرایه ستون دود به طور مؤثر ارتفاع انتشار را افزایش و غلظت در سطح زمین را کاهش می دهد. غلظت در سطح زمین متناسب با عکس توان دوم ارتفاع مؤثر است. بنابراین، پیش بینی دقیق میزان صعود پیرایه ستون دود مد نظر کارشناسان است (Zannetti, 1990).

در این مقاله مدنظر است تا صعود پیرایه ستون دود در شرایط جوی خنثی با استفاده از نرم افزار فلونت شبیه سازی و مقایسه ای با نتایج تحقیقات پیشین انجام شود. فلونت از قدرتمندترین نرم افزارهایی است که تاکنون برای تحلیل مسائل مختلف و با استفاده از روش های دینامیک سیالات محاسباتی و مبتنی بر روش حجم محدود نوشته شده است. این نرم افزار می تواند برای حل مسائل جریان سیال، انتقال حرارت، فرایندهای شیمیایی، آیرودینامیک و غیره به کار رود.

## ۲. روش تحقیق

برای شبیه سازی باید فرضیاتی در نظر گرفته شود، این فرضیات در واقع شامل عوامل فیزیکی مربوط به دودکش و عوامل هواشناسی مؤثر در میزان صعود پیرایه ستون دود می شوند. ناحیه حل یک ناحیه دوبعدی به طول ۲۰۰۰ متر و ارتفاع ۱۰۰۰ متر است و برای مدل کردن دودکش دهانه آن به قطر ۲ متر در ارتفاع ۶۰ متری و در فاصله ۵۰۰ متری از ورودی این ناحیه ایجاد می شود. پس از اینکه هندسه حل ایجاد شد، باید شبکه نقاط مناسبی در ناحیه حل ایجاد شود. در مطالعه حاضر از شبکه بی سازمان با سلول های مثلثی استفاده می شود. از آنجا که تعداد نقاط شبکه در نواحی مرزی اهمیت بسیاری دارند، شبکه بندی از ریز (در نواحی خروجی دودکش و سطح زمین) به درشت (در نواحی دورتر) انجام می شود. در شکل ۱ ابعاد، مختصات و نمای کلی شبکه بندی نشان داده شده است.

نوع شرایط مرزی نیز در گمبیت تعیین می شود، اما خصوصیات و پارامترهای مربوط به این شرایط مرزی باید در نرم افزار فلونت تعریف شوند.

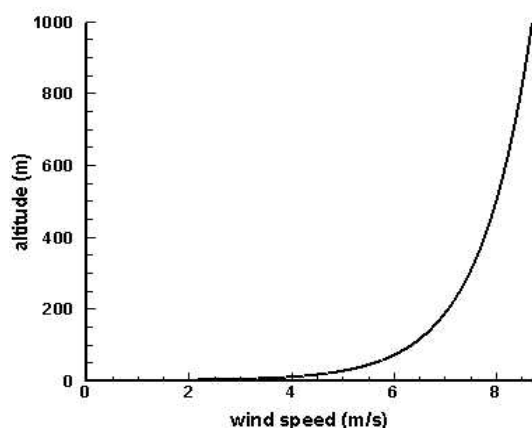
که در آن  $k$  ثابت ون کارمن و برابر با  $۰/۴$  است. برای محاسبه  $u(60)$  باید ابتدا مقدار  $u_*$  با جایگذاری سرعت باد مبنا در معادله بالا محاسبه شود.

$$۴ = \frac{u_*}{۰/۴} \ln \frac{۱۰}{۰/۲} \Rightarrow u_* = ۰/۴۰۹$$

بنابراین، سرعت باد در ارتفاع دودکش برابر است با:

$$u(۶۰) = \frac{۰/۴۰۹}{۰/۴} \ln \frac{۶۰}{۰/۲} \Rightarrow u(z) = ۵.۸۳۲ \text{ m/s}$$

نیمرخ سرعت باد به دست آمده از رابطه ۱۲ در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. نیمرخ سرعت باد در شرایط جوی خنثی

دو نیروی مؤثر در صعود پیرایه ستون دود، نیروی شناوری و تکانه برابرند با:

$$F_m = ۶۶/۰۹۲ \frac{m^f}{s^r} \quad \text{و} \quad F_b = ۳۳/۲۵۱ \frac{m^f}{s^r}$$

با توجه به اینکه  $\Delta T_c = ۱۸/۱۴ \geq \Delta T = ۱۵۲/۶$  نیروی شناوری غالب است. بنابراین داریم:

$$x_f = ۴۹ F_b^{\frac{\Delta}{r}} = ۴۳۷/۸۵ \text{ m}$$

$$\Delta h = ۲۱/۴۲۵ \frac{F_b^{\frac{r}{f}}}{u_s} = ۵۰/۸۷ \text{ m}$$

سرعت خروجی دود از دودکش ۱۰ متر بر ثانیه با دمای  $۴۵۰$  درجه کلوین در نظر گرفته می شود. سرعت باد در ارتفاع  $۱۰$  متری نیز  $۴$  متر بر ثانیه فرض می شود.  $Z_i$  (ارتفاع لایه مرزی) از رابطه تجربی برای حالت خنثی به دست می آید.

برای  $F_b \geq 55 \text{ m}^4 \text{ s}^{-3}$

$$\Delta T_c = ۰/۰۰۵۷۵ T_s \frac{v_s^{\frac{r}{f}}}{d_s^{\frac{1}{r}}} \quad (۴)$$

اگر نیروی شناوری غالب باشد:

$$x_f = ۱۱۹ F_b^{\frac{\Delta}{r}} \quad \text{و} \quad \Delta h = ۳۸/۷۱ \frac{f_b^{\frac{\Delta}{r}}}{u_s} \quad (۵)$$

اگر تکانه غالب باشد:

$$x_f = ۱۱۹ F_b^{\frac{\Delta}{r}} \quad \text{و} \quad \Delta h = ۳ d_s \frac{v_s}{u_s} \quad (۶)$$

برای  $F_b < 55 \text{ m}^4 \text{ s}^{-3}$

$$\Delta T_c = ۰/۰۲۹۷ T_s \frac{v_s^{\frac{1}{r}}}{d_s^{\frac{r}{f}}} \quad (۷)$$

اگر نیروی شناوری غالب باشد:

$$x_f = ۴۹ F_b^{\frac{\Delta}{r}} \quad \text{و} \quad \Delta h = ۲۱/۴۲۵ \frac{F_b^{\frac{r}{f}}}{u_s} \quad (۸)$$

اگر تکانه غالب باشد:

$$x_f = ۴۹ F_b^{\frac{\Delta}{r}} \quad \text{و} \quad \Delta h = ۳ d_s \frac{v_s}{u_s} \quad (۹)$$

اگر  $F_b = ۰$  باشد آن گاه:

$$x_f = \frac{۴ d_s (v_s + ۳ u_s)^{\frac{r}{f}}}{v_s u_s} \quad (m) \quad (۱۰)$$

رابطه ای نیز میزان صعود را در فواصل کوچک تر از  $x_f$  تعیین می کند.

$$\Delta h = ۱/۶ \left[ \frac{F_b^{\frac{1}{r} \times \frac{r}{f}}}{u_s} \right] \quad (۱۱)$$

همان طور که دیده می شود در روابط بالا یکی از عوامل مهم مقدار عددی سرعت باد افقی در ارتفاع دودکش است که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$u(z) = \frac{u}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (ms^{-1}) \quad (۱۲)$$

بستگی دارد که رابطه سعی و خطایی زیر برای به دست آوردن TKE انتخاب می‌شود (Jacobson, 2005).

$$K_h = S_H \lambda_e \sqrt{2E} \quad (19)$$

$$S_H = 2E \left( \frac{0.74 P_\tau + 0.6992 P_\tau}{P_\tau P_\tau - P_\tau P_\tau} \right) \quad (20)$$

$$P_1 = 2E - 30.5916 G_H \quad (21)$$

$$P_2 = 4.0848 G_M \quad (22)$$

$$P_3 = 16.284 G_H \quad (23)$$

$$P_4 = 6.1272 G_H - 5.0784 G_M - 2E \quad (24)$$

$$G_M = \frac{\lambda_e^2}{2E} \left[ \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (25)$$

$$G_H = -\frac{\lambda_e^2}{2E} \frac{g}{\theta_v} \frac{\partial \bar{\theta}_v}{\partial z} \quad (26)$$

رابطه  $K_h$  در حالت خنثی به صورت زیر است  
برای  $(z/z_i) < 0.1$

$$K_h = k u_* z \quad (27)$$

برای  $0.1 \leq (z/z_i) \leq 1/1$

$$K_h = k u_* z (1/1 - z/z_i) \quad (28)$$

برای  $(z/z_i) > 1/1$

$$K_h = 0$$

شبیه‌سازی در دو حالت انجام شده؛ حالتی با در نظر گرفتن شتاب جاذبه و حالتی بدون در نظر گرفتن اثر نیروی جاذبه ثقلی است. حالت بدون در نظر گرفتن اثر نیروی جاذبه ثقلی به این جهت در نظر گرفته شده است که در برخی از مدل‌های گاوسی معمولی شتاب جاذبه ثقلی در نظر گرفته نمی‌شود و برای اینکه مقایسه با روش‌های گاوسی منطقی‌تر صورت گیرد این حالت انتخاب شده است. سپس، نتایج حاصل از دو شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه می‌شوند. یکی از قسمت‌های مهم کار، مقایسه نتایج به دست آمده با روابط و کارهایی است که تاکنون روی این موضوع انجام گرفته است.

### ۳. نتایج و بحث

سرعت‌های ورودی که شرایط مرزی ورودی را برای

$$Z_i = \text{cons} \frac{u_*}{f} \quad (13)$$

در رابطه بالا  $f = 2\Omega \sin \phi$  پارامتر کوریولیس است. مقدار ثابت در رابطه بالا عددی بین ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ و  $\frac{\text{rad}}{\text{s}} = 7/292 \times 10^{-5}$  است.  $u_*$  نیز برای حالت خنثی از رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود که در آن  $u(z)$  سرعت باد اندازه‌گیری شده در ارتفاع  $z$  و  $k = 0.4$  ثابت ون کارمن است.

در این شبیه‌سازی نیمرخ واقعی سرعت باد با استفاده از مدل aermod طبق رابطه زیر به صورت (UDF) وارد نرم‌افزار می‌شود.

برای  $z < z_o$

$$u = u(z_o) \left[ \frac{z}{z_o} \right] \quad (14)$$

برای  $z_o \leq z \leq z_i$

$$u = \frac{u_*}{k} \left[ \ln \left[ \frac{z}{z_o} \right] - \psi_m \left[ \frac{z}{L} \right] + \psi_m \left[ \frac{z_o}{L} \right] \right] \quad (15)$$

برای  $z > z_i$

$$u = u(z_i) \quad (16)$$

که در حالت خنثی  $\psi_m = 0$  است. بنابراین،  $u_*$  در حالت خنثی از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$u_* = \frac{u(z_r) k}{\log \frac{z_r}{z_{o,m}}} \quad (17)$$

نیمرخ دما نیز مطابق رابطه زیر وارد محاسبه می‌شود.

$$T = -0.098 \Delta Z + T_o \quad (18)$$

یکی از مهم‌ترین مراحل شبیه‌سازی وارد کردن انرژی جنبشی تلاطم (TKE) در حل است. رابطه  $E = (u'^2 + v'^2 + w'^2) / 2$  انرژی جنبشی تلاطم بر واحد جرم است ( $m^2 s^{-2}$ ). انرژی جنبشی تلاطم از مهم‌ترین متغیرها در مطالعات خرد مقیاس هواشناسی است، زیرا مقدار شدت تلاطم را نشان می‌دهد. TKE مستقیماً به انتقال حرارت، تکانه و رطوبت در لایه مرزی

حداکثر صعود خود می‌رسد و از بعد از آن خط مرکزی غلظت افت می‌کند. بنابراین، با در نظر گرفتن بیشینه غلظت برای حالت جوی خنثی داریم:

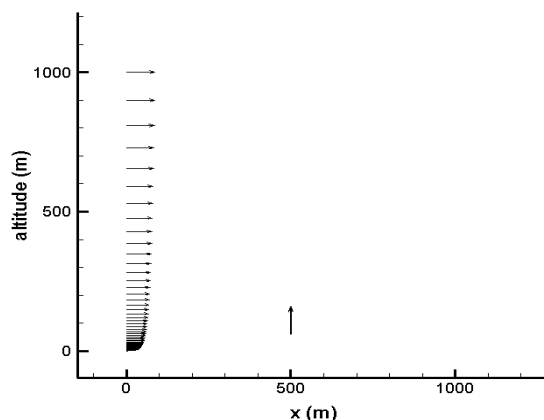
$$x_f = 20 \text{ m} \quad \Delta h = 2/43 \text{ m}$$

با شبیه‌سازی مجدد بدون در نظر گرفتن اثر نیروی جاذبه ثقلی که روند صعود در شکل ۷ نشان داده شده است، می‌توان مقایسه‌ای برای بررسی تأثیر جاذبه روی نتایج داشت. نمودارهای خطوط مرکزی غلظت برای حالت بدون در نظر گرفتن اثر نیروی جاذبه ثقلی نیز در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. در شکل ۸ دیده می‌شود خط مرکزی غلظت افت چندانی نداشته و تقریباً مسیر افقی را طی کرده است. نتایج شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن اثر نیروی جاذبه ثقلی نشان می‌دهند که پیرایه ستون دود حدوداً بعد از ۴۵۰ متر به حداکثر میزان صعود خود می‌رسد و پس از آن خط مرکزی غلظت تقریباً به صورت افقی به مسیر خود ادامه می‌دهد. بنابراین، با در نظر گرفتن بیشینه غلظت برای حالت جوی خنثی بدون در نظر گرفتن اثر نیروی جاذبه ثقلی داریم:

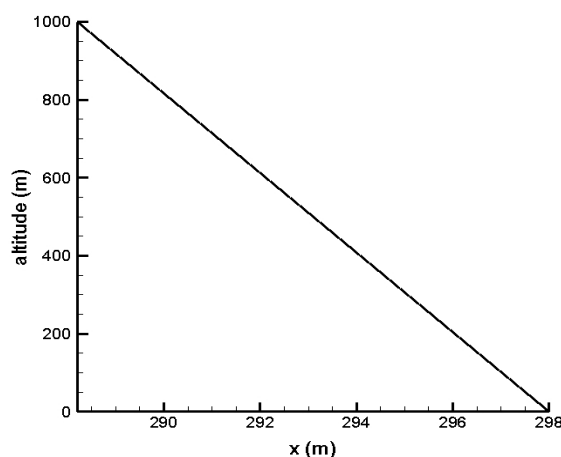
$$x_f = 450 \text{ m} \quad \Delta h = 8/48 \text{ m}$$

همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود در حالتی که اثر نیروی جاذبه ثقلی در نظر گرفته نمی‌شود پیرایه ستون دود به ستون دود گوس نزدیک‌تر می‌شود و غلظت در وسط پیرایه ستون دود بیشترین مقدار را دارد و تقریباً به طور یکنواخت در جهت‌های دیگر پخش می‌شود. برای بررسی بهتر نتایج، نمودار به‌دست آمده از معادلات نیمه‌تجربی با نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی مقایسه می‌شود. در شکل ۹ مقایسه بین نمودار حاصل از معادلات نیمه‌تجربی با نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی با در نظر گرفتن اثر نیروی جاذبه ثقلی نشان داده شده است. در شکل ۹ خط - نقطه میزان صعود پیرایه ستون دود به‌دست آمده از معادلات نیمه‌تجربی، خط پر میزان صعود پیرایه ستون دود با در نظر گرفتن بیشینه غلظت، خط چین خط مرکزی هندسی پیرایه ستون دود و خط - نقطه مقدار میانگین دو حالت بیشینه

شروع حل نشان می‌دهند در شکل ۳ مشاهده می‌شوند. نیمرخ‌ی که در شکل مشاهده می‌شود مطابق نیمرخ واقعی سرعت باد است که به صورت برنامه رایانه‌ای و با استفاده از امکانات UDF وارد نرم‌افزار فلوئنت شده است. روند تغییر دمایی که برای حالت خنثای جوی به کار رفته نیز در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳. نیمرخ سرعت باد ورودی



شکل ۴. نیمرخ دما در شرایط جوی خنثی

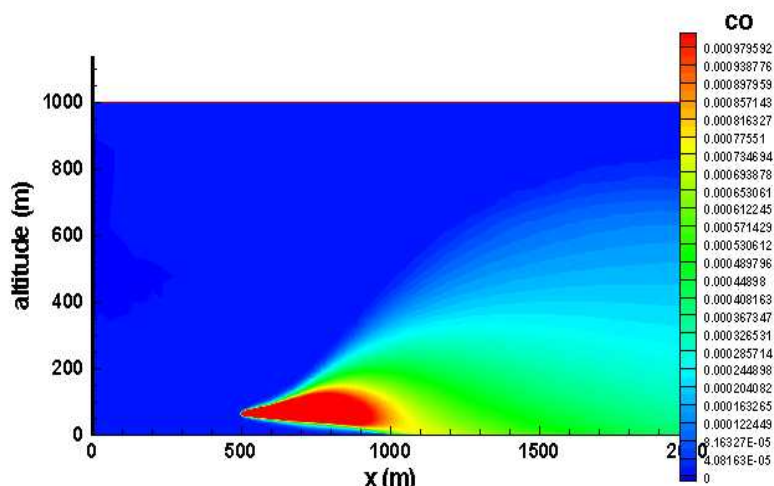
در شکل ۵ روند صعود پیرایه ستون دود با در نظر گرفتن نیروی جاذبه نشان داده شده است که برای بررسی دقیق‌تر روی نتایج باید خط مرکزی غلظت را به دست آورد. خط مرکزی غلظت بر اساس بیشینه غلظت و مرکز هندسی پیرایه ستون دود به دست آمده و در شکل ۶ نشان داده شده است. پیرایه ستون دود بعد از حدود ۲۰ متر به

توضیح داده شد این معادلات بر پایه مدل ستون دود گوس نوشته شده‌اند. غلظت در مدل گوس از توزیع نرمال پیروی می‌کند. بنا بر این فرض، بیشینه غلظت از نظر هندسی در وسط مخروط پیرایه‌ستون دود واقع شده است. با توجه به نمودارهای ترسیم‌شده در شکل ۹ و خصوصاً نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی، دیده می‌شود که توزیع غلظت در واقعیت غیریکنواخت است و با نرخ بالایی به سمت زمین کشیده می‌شود.

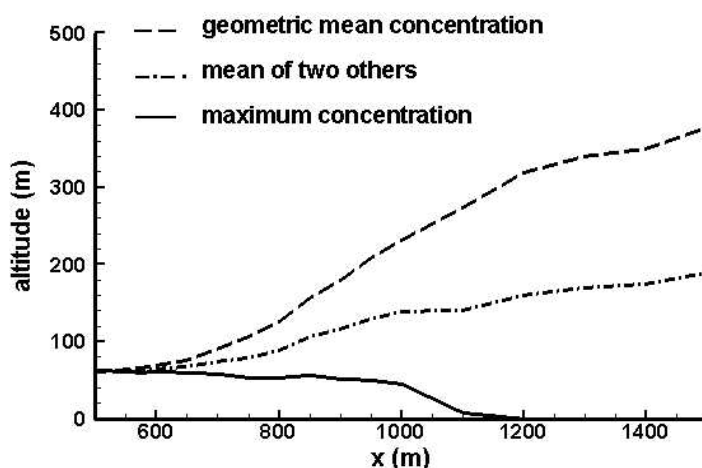
شکل ۱۰ نمودار حاصل از معادلات نیمه‌تجربی با نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن شتاب جاذبه ثقلی را نشان می‌دهد.

غلظت و خط مرکزی هندسی پیرایه‌ستون دود حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود تفاوت زیادی بین هر یک از خطوط بیشینه غلظت و خط مرکزی پیرایه‌ستون دود با نتایج حاصل از معادلات نیمه‌تجربی وجود دارد، اما مقدار میانگینی که از نتایج حاصل از شبیه‌سازی به دست آمد کمی نزدیک به نمودار مربوط به معادلات نیمه‌تجربی است.

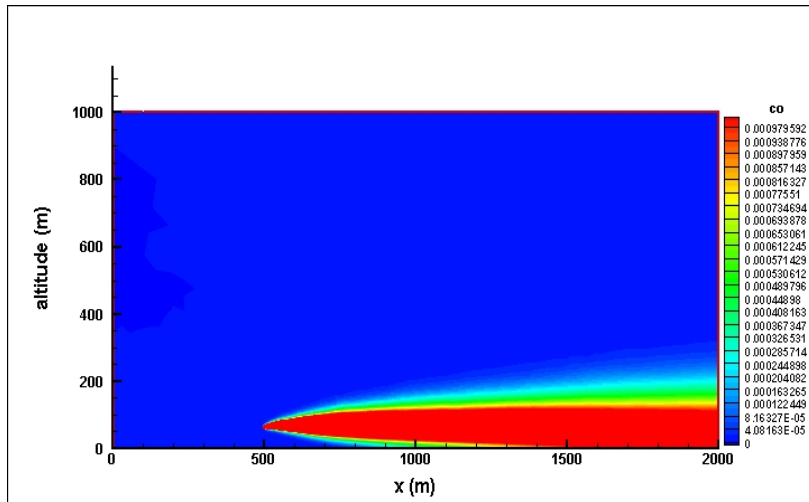
با توجه به اینکه شبیه‌سازی با در نظر گرفتن نیمرخ واقعی سرعت باد، نیمرخ واقعی دما، انرژی جنبشی تلاطمی و نیروی جاذبه ثقلی انجام شده است، می‌توان به این نتیجه رسید که نتایج حاصل از شبیه‌سازی به واقعیت نزدیک‌ترند. همان‌طور که در قسمت معادلات نیمه‌تجربی



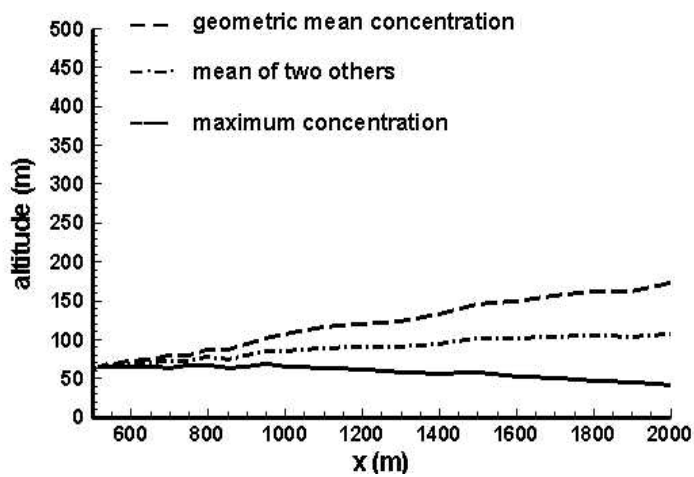
شکل ۵. صعود پیرایه‌ستون دود در حالت خنثی با در نظر گرفتن شتاب جاذبه ثقلی



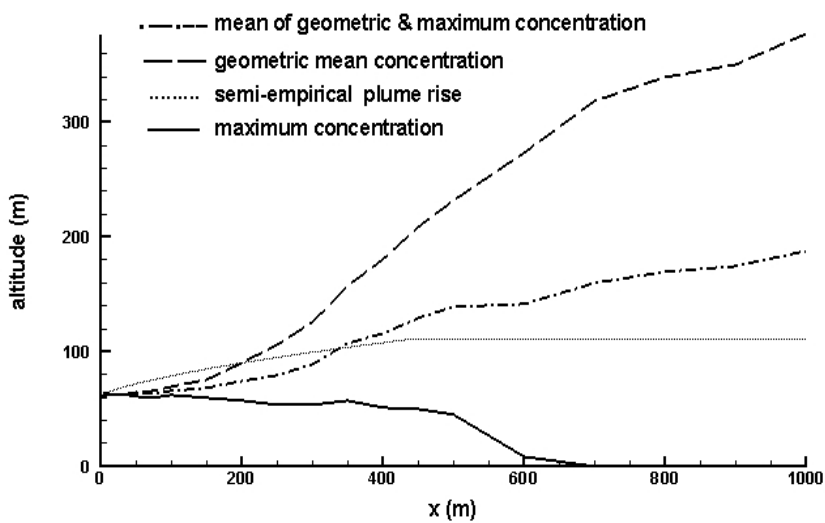
شکل ۶. نمودار صعود پیرایه‌ستون دود حاصل از شبیه‌سازی در شرایط جوی خنثی با در نظر گرفتن اثر نیروی جاذبه ثقلی



شکل ۷. صعود پیرایه ستون دود در حالت خنثی بدون در نظر گرفتن اثر نیروی جاذبه ثقی

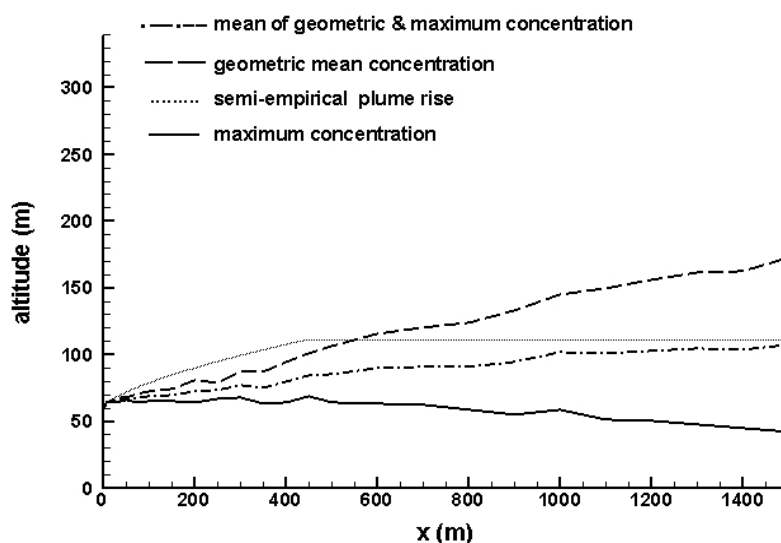


شکل ۸. نمودار صعود پیرایه ستون دود حاصل از شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن اثر نیروی جاذبه ثقی در شرایط جوی خنثی



شکل ۹. مقایسه ۴ حالت صعود پیرایه ستون دود در شرایط جوی خنثی با در نظر گرفتن اثر نیروی جاذبه ثقی





شکل ۱۰. مقایسه ۴ حالت صعود پیرایه ستون دود در شرایط جوی خنثی بدون در نظر گرفتن شتاب جاذبه ثقلی

جریان‌های متلاطم است. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی صعود پیرایه ستون دود نشان می‌دهند که در نظر گرفتن شتاب جاذبه ثقلی، نیمرخ واقعی دما، نیمرخ واقعی سرعت باد و انرژی جنبشی تلاطم روی روند صعود پیرایه ستون دود بسیار تأثیرگذار است. در جدول ۲ مقادیر  $\Delta h$  متناظر با  $x_f$  به دست آمده از معادلات نیمه تجربی، بر اساس نمودار میانگین که از میانگین نمودارهای غلظت بیشینه و مرکز هندسی پیرایه ستون دود به دست آمده، آورده شده است. در حالت خنثی وقتی شتاب جاذبه ثقلی در نظر گرفته نمی‌شود میزان صعود به مقدار به دست آمده از معادلات نیمه تجربی نزدیک‌تر می‌شود، اما با در نظر گرفتن شتاب جاذبه صعود تقریباً  $2/5$  برابر بیشتر خواهد شد. این تفاوت زیاد به این علت است که وقتی شتاب جاذبه ثقلی در نظر گرفته می‌شود غلظت بیشتری از جرم خروجی دودکش به سمت زمین کشیده می‌شود. در نتیجه، غلظت‌های کمتر جریان در ارتفاع دودکش باقیمانده به علت سبکی بیشتر تحت تأثیر نیروی شناوری قرار می‌گیرند و پخش بیشتری خواهند داشت بنابراین، هندسه خروجی از دودکش تغییر می‌کند و خط مرکزی غلظت بالاتر خواهد رفت.

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود وقتی شتاب جاذبه ثقلی در نظر گرفته نمی‌شود نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی به نمودار حاصل از معادلات نیمه تجربی نزدیک می‌شوند. در حالت خنثی وقتی شتاب جاذبه ثقلی در نظر گرفته می‌شود خط مرکزی غلظت در فاصله کمی از دودکش به بیشترین مقدار صعود خود می‌رسد. با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰ دیده می‌شود که علاوه بر تأثیر نیمرخ‌های واقعی دما، سرعت باد و انرژی جنبشی تلاطمی، جاذبه به تنهایی تأثیر بسزایی در غیریکنواخت‌سازی غلظت پیرایه ستون دود دارد و سبب کشیده شدن غلظت بالایی از پیرایه ستون دود به سمت زمین می‌شود. بنابراین، جرم پیرایه ستون دود در ارتفاع دودکش کاهش می‌یابد و در نتیجه بیشتر تحت تأثیر نیروی شناوری قرار می‌گیرد و دیده می‌شود حتی غلظت‌های کمی از جریان به ارتفاع‌های بالاتری خواهند رسید.

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده نشان‌دهنده قابلیت دینامیک سیالات محاسباتی و نرم‌افزار فلوئنت در پیش‌بینی و مطالعه

## یادداشت‌ها

1. Planetary Boundary Layer (PBL)
2. Environmental Protection Agency (EPA)
3. Industrial Source Complex Version 3 (ISC3)
4. Differential Flux Model (DFM)
5. Community Atmospheric Model (CAM)
6. Plume rise
- 7 Von karman constant (k)
- 8 User Defined Function (UDF)

جدول ۲. مقادیر  $x_f$  و  $\Delta h$  در حالت‌های مختلف

	معادلات نیمه تجربی	شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن شتاب جاذبه	شبیه‌سازی با در نظر گرفتن شتاب جاذبه
$\Delta h(m)$	۵۰/۸۷	۸۴/۵۳	۱۲۸/۹۴
$x_f(m)$	۴۳۷/۸۵	۴۳۷/۸۵	۴۳۷/۸۵

## منابع

- Briggs, G.A. 1969. Plume Rise. USAEC Critical Review Series, TID-25075, National Technical Information Service, Springfield, Virginia 22161.
- Guan, H., R.B., Chatfield, S.R., Freitas, R.W., Bergstrom, K.M., Longo. 2008. Modeling the effect of plume rise on the transport of carbon monoxide over Africa with NCAR CAM. Journal of Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 8, pp: 6801-6812.
- Henderson-Sellers, B. 1987. Plume Rise Modeling: The effects of including a wind shear and a variable surface roughness. Journal of Ecological Modelling, vol 37, pp:269-286.
- Jacobson, M.Z. 2005. Fundamentals OF Atmospheric Modeling, second edition, Cambridge.
- Mokhtarzadeh-Dehghan, M.R., C.S., Konig, A.G., Robins. 2006. Numerical study of single and two interacting turbulent plumes in atmospheric cross flow. Journal of Atmospheric Environment, vol. 40, pp: 3909-3923.
- Overcamp, T. J. 2005. Plume Rise in a Shear Layer with Neutral Stability. Journal of Air and Waste Manage, vol. 55, pp: 669-676.
- user 's guide for the industrial source complex (ICS3) dispersion models, 1995. U.S. Environmental Protection Agency.
- Zannetti, P. 1990. Air Pollution Modeling, VAN NOSTRAND REINHOLD.