

## شبیه‌سازی عددی پخش CO<sub>2</sub> در لایه مرزی اتمسفری در اطراف کارخانه آلومینیوم ایران و ارائه مناسب‌ترین الگوی فضای سبز

امین محمدزاده ثانی<sup>۱</sup>، حسام مقدسی<sup>۲</sup> و غلامرضا شهریاری مقدم<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۹۶/۷/۱۳، پذیرش: ۹۷/۲/۸، نشر آنلاین: ۹۷/۲/۹)

### چکیده

گاز دی‌اکسیدکربن (CO<sub>2</sub>) خروجی از دودکش‌ها در صنایع مختلف به عنوان یکی از منابع عمده آلودگی هوا و یک عامل مهم در بررسی کیفیت هوا مطرح می‌باشد. در پژوهش حاضر به مطالعه تأثیر عوامل توپوگرافیک، جوی و ساختمان‌ها بر پخش گاز CO<sub>2</sub> از کارخانه آلومینیوم ایران در لایه مرزی اتمسفری پرداخته شده است. موقعیت جغرافیایی کارخانه آلومینیوم ایران واقع در شهرستان اراک، این کارخانه را به عنوان یکی از منابع عمده آلودگی هوای این شهر صنعتی مطرح کرده است. به علاوه با استفاده از نتایج عددی که در نرم‌افزار ANSYS FLUENT صورت پذیرفته، تأثیر ساختمان‌های شهر بر نحوه پخش آلاینده‌ها با در نظر گرفتن جهت وزش باد مدل‌سازی شده و مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است. در ادامه به محاسبه فضای سبز مورد نیاز اطراف کارخانه پرداخته و مناسب‌ترین الگوی فضای سبز استخراج شده است. نرخ تجمع گاز CO<sub>2</sub> اطراف کارخانه پس از رسیدن توده بحرانی به سطح زمین در حالت گذرا با در نظر گرفتن واکنش رادیکال‌های OH و CO و لحاظ کردن اثرات ته‌نشست CO<sub>2</sub> به روش نیمه تحلیلی و تجربی به ترتیب ۲/۱۵ و ۲/۰۹ g/(hectar.min) محاسبه گردیده است، همچنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهد وجود رشته کوه‌های جنوب شهر باعث انتقال نقطه با غلظت بیشینه به ۵۰۰ متر جلوتر می‌گردد.

**کلیدواژه‌ها:** لایه مرزی اتمسفری، پخش آلاینده‌ها، عوامل توپوگرافیک و جوی، گاز دی‌اکسیدکربن، الگوی فضای سبز.

### ۱- مقدمه

موارد می‌توان به دو کارخانه آلومینیوم ایران و نیروگاه شازند به عنوان اصلی‌ترین منابع نقطه‌ای آلاینده هوای این شهر اشاره کرد. لازم به ذکر است منابع آلوده کننده عبارتند از منابع نقطه‌ای (مانند دودکش کارخانجات)، منابع خطی (مانند اتوبان‌ها)، منابع سطحی (مانند جنگل در حال آتش‌سوزی) و منابع حجمی (مانند آلودگی منتشر شده از یک فلانچ یا شیر در ارتفاعی معین در یک نیروگاه) (علیاری، ۱۳۸۲). مدل‌سازی آلودگی هوا به دلیل پیچیدگی‌های معادلات حاکم بر حرکت آلاینده‌ها معمولاً از روش‌های عددی صورت می‌گیرد. محققین مختلفی در زمینه بررسی آلاینده‌ها در شهرهای مختلف به مطالعه و پژوهش پرداخته‌اند (نورپور و شهابی، ۱۳۹۳). به مدل‌سازی پراکنش آلاینده‌های هوا خروجی از دودکش کارخانه سیمان ایلام پرداختند. برای این منظور، ابتدا پارامترهای جریان و میزان

امروزه آلودگی هوا یکی از بزرگ‌ترین مشکلاتی است که بشر با آن روبرو است. استفاده از سوخت‌های فسیلی در اکثر صنایع، حمل و نقل و تولید انرژی را می‌توان یکی از دلایل عمده آلودگی اتمسفر به شمار آورد. ادامه روند صنعتی شدن شهرستان اراک که پیش از این باغستانی کوچک و خوش آب و هوا بوده، آن را به یکی از آلوده‌ترین شهرهای کشور تبدیل کرده که آلودگی هوای آن در شرایط بحرانی قرار گرفته است. به‌دلیل قرار گرفتن شهر در مسیر وزش بادهای موافق، آلودگی وارد شهر می‌شود. عوامل مختلفی در افزایش میزان آلودگی هوای این شهر تأثیر داشته که از جمله آنها می‌توان به فعالیت و افزایش صنایع و همچنین رشد جمعیت و شهرنشینی و به تبع آن افزایش خودروها اشاره کرد. صنایع عامل اصلی آلودگی شهرستان اراک می‌باشند. در این

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۲۱-۷۳۹۱۲۹۷۹

آدرس ایمیل: amin.mohammadzade2013@gmail.com (ا. محمدزاده ثانی)، hesam\_moghadasi@mecheng.iust.ac.ir (ح. مقدسی)،

shahriari@iust.ac.ir (غ. شهریاری مقدم).

شد. در این مقاله به مطالعه تأثیر عوامل توپوگرافیک، جوی و ساختمان‌ها بر پخش گاز CO<sub>2</sub> از کارخانه آلومینیوم ایران (واقع در شهرستان اراک) در لایه مرزی اتمسفری پرداخته شده است. به علاوه با استفاده از نتایج عددی که در نرم‌افزار ANSYS FLUENT صورت پذیرفته، تأثیر ساختمان‌های شهر بر نحوه پخش آلاینده‌ها با در نظر گرفتن جهت وزش باد مدل‌سازی شده و مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. همچنین در ادامه به محاسبه فضای سبز مورد نیاز اطراف کارخانه پرداخته و مناسب‌ترین الگوی فضای سبز استخراج شده است.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- معادلات حاکم

لایه مرزی اتمسفری نوعی لایه مرزی است که در جریان اتمسفری به دلیل حضور سطح زمین به وجود می‌آید. در این لایه اثرات توربولانس محسوس است و از این لایه به بالا اثرات آشفتگی قابل صرف‌نظر می‌باشد. تأثیر ساختمان‌های شهر بر لایه مرزی اتمسفری که لایه مرزی آشفتگی نیز می‌باشد کاهش ضخامت زیر- لایه لزج و افزایش ضخامت ناحیه لگاریتمی است. حال با توجه به این که لایه مرزی اتمسفری به شدت آشفتگی می‌باشد معادلات حالت دائم حرکت حاکم بر جریان به فرم تانسوری به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(u_j \bar{T}) = \alpha \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{T} \frac{\partial}{\partial x_j}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{T'u'_j}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(u_j \bar{Y}_i) = \alpha \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{Y}_i \frac{\partial}{\partial x_j}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{Y'_i u'_j}) \quad (4)$$

$$\bar{P} = \rho \bar{R} \bar{T} \quad (5)$$

معادلات متوسط رینولدز نیازمند روابطی برای تعیین تنش-های رینولدز هستند. یکی از این راه‌ها، استفاده از فرضیه بوزینسک است که تنش‌های رینولدز را به گرادیان‌های سرعت متوسط مربوط می‌سازد.

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (6)$$

ذرات معلق خروجی دودکش‌ها به کمک تجهیزات سخت‌افزاری اندازه‌گیری شده است. سپس به کمک نرم‌افزار AERMOD پخش و پراکنش ذرات معلق در منطقه اطراف مدل‌سازی شده است.

سرلک (۱۳۹۰)، به تحلیل عناصر موجود در ذرات معلق هوای به روش فعال‌سازی نوترونی و جذب اتمی و مدل‌سازی انتشار آلودگی از طریق نرم‌افزار AERMOD که یک حل عددی از حرکت آلاینده‌ها ارائه می‌دهد پرداخته است. در سال ۱۳۸۹ برای بررسی آلودگی هوای شهر اراک نمونه‌گیری از هوا به عمل آمد و این نمونه‌گیری در اوقات ورود ریزگرد هم انجام شد و غلظت عناصر مختلف از طریق آنالیز به روش فعال‌سازی نوترونی (INAA) و جذب اتمی (AAS) تعیین گردید. همچنین پیشنهاد شد که از طریق مدل AERMOD، ذرات معلق حاصل از آلاینده‌های صنعتی اندازه‌گیری شود و با نتایج حاصل از داده‌های تجربی مقایسه گردید (Crasto, ۲۰۰۷). در پایان‌نامه خود با بررسی اثر عوامل طبیعی همچون تپه و جنگل بر لایه مرزی اتمسفری در نرم‌افزار FLUENT به شبیه‌سازی عددی لایه مرزی اتمسفری پرداخته است. او در قسمت اول تحقیق خود با در نظر گرفتن ناحیه‌ای به ابعاد مشخص و رسم تپه اسکروین در مرکزیت ناحیه مورد مطالعه، رفتار لایه مرزی اتمسفری را در اطراف این تپه شبیه‌سازی نمود. برای این کار او نیاز به شبکه‌بندی ناحیه مورد نظر داشت که با ریز کردن شبکه‌بندی در نواحی مجاور سطح تپه به این مهم دست پیدا کرد. Crasto در قسمت دوم تحقیق خود با شبیه‌سازی درخت‌های جنگل به عنوان زبری به بررسی رفتار لایه مرزی اتمسفری تحت این زبری‌ها در نرم‌افزار ویندسیم<sup>۱</sup> پرداخت. اما در مواردی خاص و با اعمال یک سری فرضیات می‌توان به مدل‌سازی تحلیلی پخش آلاینده‌ها دست پیدا کرد (Stockie, ۲۰۱۱). در تحقیقی با ارائه ریاضیات مدل‌سازی پخش اتمسفری با در نظر گرفتن دودکش‌های کارخانه اینکو در شهر سادبری واقع در ایالت آنتاریو کشور کانادا اقدام به حل معادله گونه‌ها تحت شرایط مرزی خاص متناسب با مسأله در حالت‌های پایا و گذرا نمود. او با وارد کردن پارامترهایی از جمله سرعت باد، ارتفاع دودکش، نرخ نشر آلاینده‌ها و ضرایب انحرافات معیار که پارامترهای معادله گوسی می‌باشند کانتورهای پخش آلاینده‌ها را برای هر یک از دودکش‌ها در سطح زمین ارائه نمود (Rigby, ۲۰۰۷). با در نظر گرفتن شهر لندن درون یک جعبه و با اعمال واکنش‌های شیمیایی و ته‌نشست<sup>۲</sup> به بررسی تغییرات غلظت آلاینده‌ها با زمان درون این جعبه پرداخت. همچنین در این تحقیق به منظور بررسی رفتار پلوم ناشی از منبع سطحی درون دامنه محاسباتی معادله گونه  $i$  تحت شرایط مرزی خاص متناسب با مسأله حل گردید و پارامترهای معادله گوسی حاصله محاسبه شدند. منبع آلاینده در این تحقیق یک منبع سطحی در نظر گرفته

$$\begin{aligned} \bar{c}(\infty, y, z) = 0, \quad \bar{c}(x, \pm\infty, z) = 0 \\ \frac{\partial \bar{c}(x, y, 0)}{\partial z} = 0, \quad \bar{c}(x, y, \infty) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \bar{c}(x, y, z) \\ = \frac{\dot{m}}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[ \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right. \\ \left. + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \bar{c}(x, y, z, t) \\ = \frac{m}{(2\pi)^{\frac{3}{2}}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{(x-\bar{u}t)^2}{2\sigma_x^2}\right. \\ \left. + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \left[ \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right. \\ \left. + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

پارامترهای گوسی از جمله انحرافات استاندارد و ارتفاع مؤثر دودکش از روابط متعددی قابل محاسبه هستند که بیان این روش‌ها خارج از حوصله پژوهش حاضر است اما در تمامی این روش‌ها وابستگی انحرافات استاندارد به شدت تابش خورشیدی و سرعت باد و ارتفاع مؤثر دودکش به اختلاف دمای هوا و دودکش و همچنین پارامتر فلاکس شناوری غیر قابل اغماض است. در این پژوهش برای محاسبه انحرافات استاندارد از روش پاسکویل گیفورد (Konstantinos و Assael، ۲۰۱۰) و جهت رسیدن به مقدار ارتفاع مؤثر هر یک از دودکش‌ها به دلیل غلبه شناوری بر مومنتوم از روش بریگز در حالت ناپایدار استفاده شده است (Harry و Carson، ۱۹۶۹). همان‌طور که گفته شد لایه مرزی اتمسفری لایه مرزی آشفته می‌باشد. در این لایه مرزی، ساختمان‌های شهر موجب انتقال ناحیه لگاریتمی<sup>۳</sup> به اندازه  $\Delta B$  به نزدیک سطح زمین و کوچک شدن زیر لایه لُج می‌شوند (Craστο، ۲۰۰۷). به بیان دیگر:

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln(y^+) + B - \Delta B \quad (17)$$

$$\Delta B = \frac{1}{k} \ln(1 + c_s k_s^+) , \quad k_s^+ = \frac{\rho k_s u^*}{\mu} \quad (18)$$

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln(y^+) + B - \frac{1}{k} \ln(1 + c_s k_s^+) \quad (19)$$

با تغییر متغیر  $B = \frac{1}{k} \ln(E)$  رابطه (۱۹) به شکل رابطه (۲۰) بازنویسی می‌شود:

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln(y^+) + \frac{1}{k} \ln(E) - \frac{1}{k} \ln(1 + c_s k_s^+) \quad (20)$$

در فرضیه بوزینسک، مدل‌های زیادی جهت محاسبه لزجت دینامیکی  $\mu_t$  به کار می‌روند. در پژوهش حاضر از معادلات استاندارد  $k$  و  $\epsilon$  برای محاسبه این پارامتر استفاده شده است که معادلات آن به شکل زیر نوشته می‌شوند:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \frac{\epsilon M}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \frac{\epsilon M}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + G_b) - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (8)$$

$G_k$  نمایانگر تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از گردان‌یان-های سرعت متوسط و  $G_b$  مربوط به تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از شناوری است. در معادلات  $\epsilon - k$  ضرایب آشفتگی عبارتند از:

$$\sigma_\epsilon = 1.3, C_{1\epsilon} = C_{2\epsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0 \quad (9)$$

در نهایت لزجت گردابه‌ای از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (10)$$

معادله (۴) که معادله گونه  $i$  نامیده می‌شود با اعمال فرضیات زیر دارای حل تحلیلی خواهد بود.

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial}{\partial x} \right) (\overline{u'Y_i'}) \ll \left( \frac{\partial}{\partial y} \right) (\overline{v'Y_i'}) , \quad \left( \frac{\partial}{\partial z} \right) (\overline{w'Y_i'}) \\ x \sim L, \quad y \sim W, \quad z \sim H, \quad L \gg W, H \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \ll \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \frac{\partial^2}{\partial z^2} \\ v' \neq 0, \quad w' \neq 0, \quad \bar{v} = \bar{w} = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

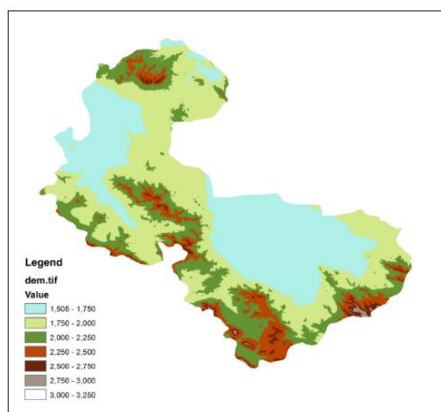
با اعمال فرضیات ارائه شده در معادله (۱۱) معادله (۴) به شکل زیر استخراج می‌گردد:

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{Y}_i}{\partial x} = D_i \nabla^2 \bar{Y}_i - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{v'Y_i'}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{w'Y_i'}) \quad (12)$$

این معادله تحت شرایط مرزی متفاوت، جواب‌های مختلفی دارد. با تبدیل کسر جرمی به غلظت به کمک رابطه (۱۳) و با در نظر گرفتن شرایط مرزی (۱۴) جواب معادله گونه  $i$  با اعمال اثرات انعکاس زمین به شکل رابطه (۱۵) ارائه می‌شود. با در نظر گرفتن ترم زمانی در معادله (۱۲) و با جایگزینی  $\bar{c}(0, y, z) \bar{u} = \dot{m} \delta(y) \delta(z-H) \delta(t)$  به جای رابطه اول شرایط مرزی (۱۴)، جواب به شکل رابطه (۱۶) بازنویسی می‌شود (Stockie، ۲۰۱۱؛ Marco و Moreira، ۲۰۰۹).

$$\begin{aligned} \rho \bar{Y}_i = \frac{m_{tot}}{V_{tot}} \times \frac{m_i}{m_{tot}} = \frac{m_i}{V_{tot}} = \bar{c}_i \\ \bar{c}(0, y, z) \bar{u} = \dot{m} \delta(y) \delta(z-H) \end{aligned} \quad (20) \quad (13)$$

از کوه‌های غربی در آلودگی این شهر تأثیرگذار هستند چون منطقه صنعتی در نزدیکی این کوه‌ها واقع شده و همچون سدی مانع انتقال آلاینده‌ها می‌شود و در نتیجه آلودگی داخل شهر تجمع پیدا می‌کند. مدول رقومی دو و سه بعدی ارتفاع منطبق بر داده‌های سازمان نقشه برداری که از نرم‌افزار GIS استخراج شده است در شکل‌های (۲) نمایش داده شده است.



شکل ۲- مدول رقومی دو بعدی ارتفاع خروجی از نرم‌افزار GIS مربوط به شهرستان اراک

### ۲-۲-۲-۲- اطلاعات شهرسازی

شهرستان اراک متشکل از پنج منطقه می‌باشد. به علت وزش بادهای شرق به غرب و شمال شرقی به جنوب غربی در ماه‌های گرم سال و به علت وجود کوه‌های جنوب شهر، منطقه بحرانی مجاور کوه مورد مطالعه قرار گرفته است. منطقه بحرانی از شهرستان اراک در نقشه رینگ‌بندی منفک شده و در شکل (۳) ارائه شده است.



شکل ۳- نقشه رینگ‌بندی مناطق مجاور محدوده صنعتی و رشته کوه‌های جنوب شهر اراک (شهرداری اراک- ۱۳۹۳)

### ۲-۲-۲-۳- اطلاعات کارخانه آلومینیوم ایران

شرکت آلومینیوم ایران به عنوان اصلی‌ترین منبع نقطه‌ای تولیدکننده مونوکسیدکربن (CO) در شهر و به دلیل فاصله بسیار نزدیک آن به حومه شهری و واقع شدن شهرستان اراک در پایین دست این کارخانه برای مطالعه موردی انتخاب شده است. این

از آنجا که در لایه مرزی اتمسفری داریم:  $1 \gg c_s k_s^+ u^+$  بنا بر این:

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln(y^+) + \frac{1}{k} \ln(E) - \frac{1}{k} \ln(c_s k_s^+) \quad (21)$$

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{\rho y u^*}{\mu}\right) + \frac{1}{k} \ln(E) - \frac{1}{k} \ln\left(c_s \frac{\rho k_s u^*}{\mu}\right) \quad (22)$$

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{E \frac{\rho y u^*}{\mu}}{c_s \frac{\rho k_s u^*}{\mu}}\right) \rightarrow u^+ = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{E y}{c_s k_s}\right) \quad (23)$$

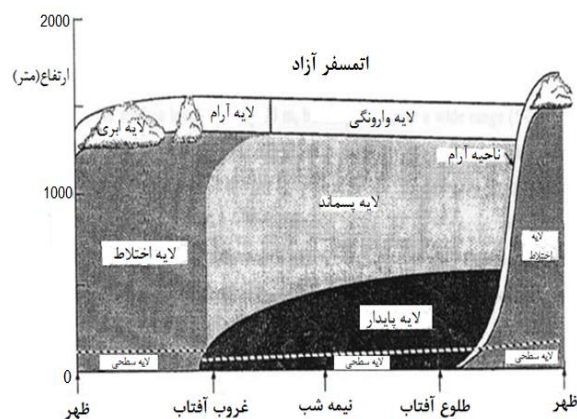
ساختار لایه مرزی اتمسفری در شکل (۱) نمایش داده شده است. در لایه سطحی، پروفیل سرعت از رابطه (۲۴) به دست می‌آید.

$$\frac{\bar{u}(z)}{u^*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (24)$$

از مقایسه روابط (۲۳) و (۲۴) و به کمک هم ارزی  $y \sim z$  رابطه (۲۵) نتیجه می‌شود که بیانگر ارتباط ارتفاع ساختمان‌ها (به عنوان زبری سطح) و المان زبری است.

$$\frac{1}{z_0} \approx \frac{E}{c_s k_s} \rightarrow K_s = \frac{E z_0}{C_s} = \frac{\exp(kB) z_0}{C_s} \quad (25)$$

لازم به ذکر است محورهای مختصات مربوط به معادلات (۱) تا (۲۵) در شکل (۲) که بیانگر توپوگرافی واقعی شهرستان اراک می‌باشد نمایش داده شده است.



شکل ۱- ساختار لایه مرزی طی شبانه روز (Katharina, ۲۰۰۶)

### ۲-۲-۲-۴- اطلاعات مورد نیاز شهرستان اراک

#### ۲-۲-۲-۱- اطلاعات توپوگرافیک

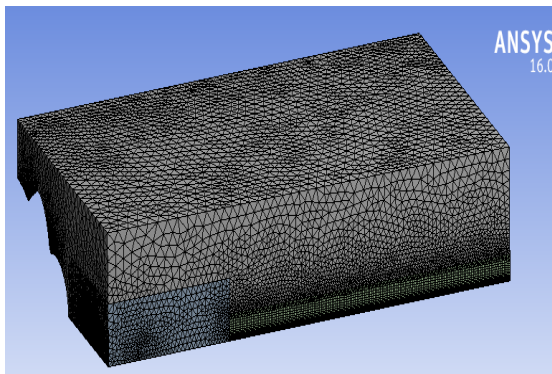
شهرستان اراک در جنوب غربی استان تهران و در فاصله ۲۸۸ کیلومتری آن قرار دارد. کوه‌های اطراف اراک و دریاچه میقان و دشت فراهان در آب و هوای این منطقه اثر کرده و ویژگی‌های خاصی به آن بخشیده است. حومه شهری از دو طرف به کوه محصور و از دو طرف منتهی به دشت است. کوه‌های جنوبی بیشتر

برای آن در نظر گرفته شده است. مقدار پیشنهادی نرم افزار ANSYS برای رشد لایه‌ها ۱/۱ می‌باشد. اگر ارتفاع اولین لایه ۱/۵ متر در نظر گرفته شود، آنگاه تعداد لایه‌های مورد نیاز برای پوشش لایه سطحی از رابطه مجموع تصاعد هندسی به دست می‌آید.

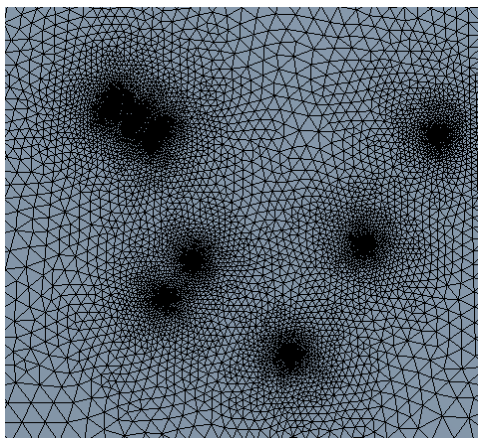
$$S_n = a_1 \left( \frac{1 - q^n}{1 - q} \right) \quad (24)$$

$$S_n = 300, a_1 = 1.5, q = 1.1 \rightarrow n = 23$$

همان طور که در شکل (۵) مشخص است برای بالا بردن دقت در نواحی مجاور سطح شهر مش مربعی و بسیار ریز و به منظور کاهش هزینه‌های محاسباتی، در سایر نواحی مش مثلثی و درشت به کار گرفته شده است. در شکل (۶) نیز ریز شدن شبکه‌بندی اطراف هریک از دودکش به وضوح دیده می‌شود. برای بررسی استقلال حل از شبکه مشخصات دو نوع شبکه‌بندی نهایی به همراه مشخصات کیفیت مش در جداول (۲) و (۳) ارائه شده است. همان طور که مشخص می‌باشد میزان خطا خیلی محسوس نمی‌باشد.



شکل ۵- نمای کلی از شبکه‌بندی دامنه محاسباتی



شکل ۶- شبکه‌بندی اطراف دودکش‌ها

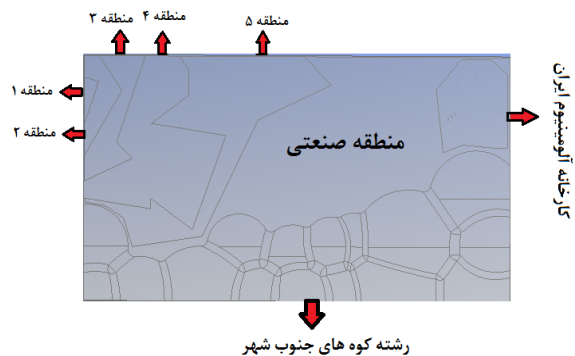
کارگاه‌ها شامل ۱۷ دودکش آلاینده است که دودکش ۱ و ۲ مربوط به کارگاه‌های پخت آند قدیم و جدید، دودکش ۳ مربوط به کارگاه مرکزی و دودکش‌های ۴ تا ۱۳ مربوط به کارگاه ریخت می‌باشند. دو دودکش کارگاه مرکزی و دو دودکش کارگاه ریخت نیز به علت مشکلات فنی در محاسبات وارد نشده‌اند ولی هندسه آنها رسم شده است. مشخصات این دودکش‌ها در جدول (۱) ارائه شده است (قیاسی، ۱۳۹۰).

## ۳-۲- شبیه‌سازی عددی

### ۳-۲-۱- هندسه

هندسه مورد مطالعه توسط نرم افزار ANSYS و با استفاده از ماژول Design Modeler (DM) طراحی شده است. ۱۷ دودکش کارخانه به همراه رشته کوه‌های جنوب شهر با ارتفاع ۵۰۰-۸۰۰ متر در مجاورت حومه شهر و ۱۳۰۰-۷۰۰ متر در امتداد رشته کوه‌های مجاور در نرم افزار (DM) رسم شده‌اند. منطقه شامل طول ۷km، عرض ۳km و ارتفاع ۱/۵km می‌باشد. طول دودکش‌ها ۶۰m و قطر آنها ۵m می‌باشد. هندسه مورد نظر شامل محدوده ای بحرانی از مناطق پنجگانه شهرستان اراک است که در امتداد رشته کوه‌های جنوب شهر قرار دارد.

به منظور عدم برخورد به خطاهای متعدد شبکه‌بندی، نوک تیز رشته کوه‌ها به فرم تپه و محل تلاقی رشته کوه‌ها (دره‌ها) با نواری باریک به شکل پخ تغییر شکل داده شده‌اند. نمای بالایی هندسه که محصور در مکعب می‌باشد در شکل (۴) نمایش داده شده است.



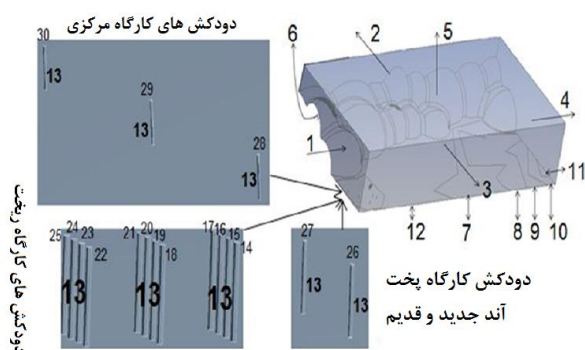
شکل ۴- هندسه مورد مطالعه

### ۳-۲-۲- شبکه‌بندی

شبکه‌بندی هندسه با استفاده از ماژول Meshing در نرم افزار ANSYS صورت پذیرفته است. به منظور رسیدن به دقت بالا در لایه سطحی و اطراف دودکش‌ها، باید شبکه‌بندی در این لایه ریزتر از سایر نواحی باشد. با توجه به تغییر ارتفاع لایه سطحی طی شبانه روز از ۲۰۰ متر تا ۴۰۰ متر مقدار متوسط ۳۰۰ متر

جدول ۱- مشخصات دودکش‌های کارخانه آلومینیوم ایران

ردیف	P(mbar)	T(□)	$V_s(m/s)$	D(m)	$x_{CO_2}$	$c_{CO}$ (ppm)
۱	۰/۴۱	۲۲۹	۸/۱	۵	۲/۳	۳۷۱
۲	۰/۴۱	۲۲۸	۹/۴	۵	۱/۲	۱۰۰
۳	۰/۲۵	۳۳۳	۸/۷	۵	۴/۲	۲۷۱
۴	۰/۳۳	۱۹۰/۷	۷/۶	۵	۰	۱۶۲
۵	۰/۱۹	۲۰۵	۵/۷	۵	۰/۴	۶۸۱
۶	۰/۳۴	۱۹۰/۵	۷/۸	۵	۰/۱	۴۳۶
۷	۰/۳۵	۱۹۹/۷	۷/۸	۵	۳/۱	۲۴۲
۸	۰/۲۲	۱۹۰/۲	۵/۹	۵	۲/۲	۷۰۷
۹	۰/۲۲	۱۲۸	۶/۵	۵	۰/۱	۲۰۸۵
۱۰	۰/۳۵	۲۵۶	۸	۵	۲/۱	۹۵۶
۱۱	۱/۸۴	۷۳	۱۶/۸	۵	۱/۱	۷۰۸۲
۱۲	۰/۲۳	۷۲/۶	۴/۱	۵	۲/۲	۱۵۹۶۹
۱۳	۰/۱۴	۱۹۲/۶	۴/۹	۵	۲/۹	۷۱۰۲



شکل ۷- شرایط مرزی تعریف شده در نرم‌افزار فلونت

به منظور حل عددی جریان در دامنه محاسباتی از نرم‌افزار ANSYS FLUENT استفاده شده است. به علت پایین بودن سرعت جریان از حل کننده فشار مینا<sup>۴</sup> و به علت محدودیت حافظه در دسترس و صرفه‌جویی در زمان و هزینه محاسباتی از الگوریتم تفکیکی<sup>۵</sup> برای حل معادلات بهره گرفته شده است. به علت اهمیت بالای آشفستگی در لایه مرزی اتمسفری و جلوگیری از وقوع واگرایی در روند حل عددی به دلیل ورودی‌های بزرگ به دامنه محاسباتی تلاش شد تا آشفستگی به بهترین نحو مدل شود. به همین خاطر گسسته‌سازی معادلات مومنتوم،  $k$  و  $\epsilon$  با دقت بالاتری نسبت به سایر معادلات باید انجام گیرد. لازم به ذکر است که اگر معادلات انرژی و گونه‌ها نیز با دقت معادلات مومنتوم و آشفستگی حل شوند زمان حل بسیار بالا رفته و هزینه محاسبات افزایش می‌یابد. با توجه به توضیحات ارائه شده گسسته‌سازی معادلات مومنتوم و آشفستگی از روش اختلاف بالادست مرتبه دوم و گسسته‌سازی معادلات انرژی و گونه‌ها از روش اختلاف بالا دست مرتبه اول صورت پذیرفت. برای حل معادلات آشفستگی نیز از مدل  $(k - \epsilon)$  استاندارد استفاده شده

جدول ۲- مقایسه کیفیت شبکه‌بندی از منظر تعداد المان، سطح و

گره	مقایسه کیفیت شبکه‌بندی از منظر تعداد المان، سطح و	
	ماکزیمم انحراف از المان	ماکزیمم نسبت
شبکه‌بندی اول	متساوی الزویه (درجه)	منظری
	۰/۹۲	۴۲
شبکه‌بندی دوم	۰/۷۶	۳۷

جدول ۳- مقایسه شبکه‌بندی از منظر انحراف و نسبت منظری

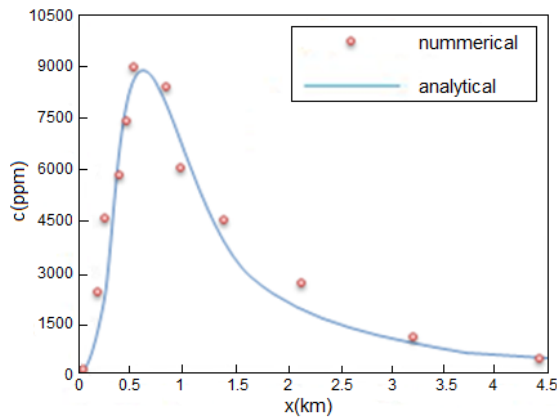
تعداد المان‌ها	تعداد سطوح	تعداد گره‌ها
۳۱۵۸۷۲۲	۶۵۹۰۱۳۰	۹۶۵۴۷۵
۴۷۸۴۲۵۹	۹۰۰۹۸۷۱	۲۲۲۷۹۰۳

## ۳-۳-۳- شرایط مرزی

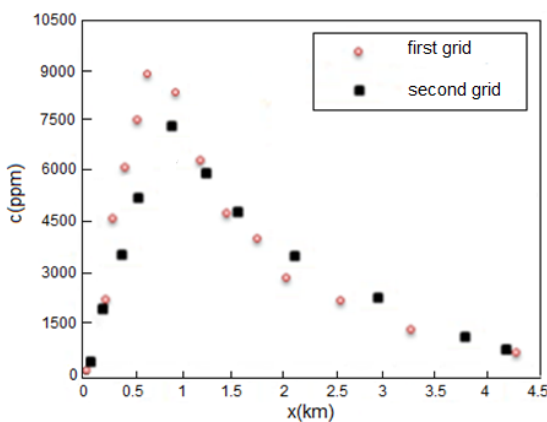
شرایط مرزی ۱ تا ۳۰ در شکل (۷) نمایش داده شده و هریک از این شرایط در زیر تعریف گردیده‌اند:

- (۱) ورود جریان هوا به دامنه محاسباتی
- (۲-۵) خروج هوا و آلاینده‌ها از دامنه محاسباتی
- (۶) رشته کوه‌های جنوب شهر به عنوان دیواره با اصل عدم لغزش
- (۷-۱۱) مناطق پنجگانه با اصل عدم لغزش
- (۱۲) منطقه صنعتی با اصل عدم لغزش
- (۱۳) سطوح جانبی دودکش‌ها با اصل عدم لغزش
- (۱۴-۳۰) ورود آلاینده‌ها از دودکش‌ها به دامنه محاسباتی





شکل ۱۰- اعتبارسنجی حل عددی با حل تحلیلی



شکل ۱۱- بررسی استقلال حل از شبکه بندی

### ۳-۲- محدوده های $Y^+$

در حل عددی جریان بیانگر طول بی بعدی است که فاصله اولین گره تا دیواره را مشخص می کند. محدوده مجاز  $Y^+$  برای مدل  $(k - \epsilon)$  به صورت  $30 < Y^+ < 300$  گزارش شده است. محدوده  $Y^+$  استخراج شده از پژوهش حاضر برای هر یک از شروط در جدول (۴) ارائه شده است.

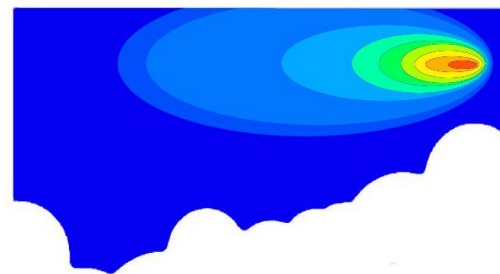
### ۳-۳- تأثیر عوامل توپوگرافیک و جوی

اگر جهت باد در راستای شمال شرقی به جنوب غربی در نظر گرفته شود و این راستا  $x'$  نامیده شود این محور با راستای  $x$  زاویه  $34$  درجه می سازد، بنابراین با تعریف مبدأ مختصات روی هر دودکش رسم منحنی تغییرات  $C(x, x \tan 34, 1/5)$  مدنظر است. با مقایسه این منحنی ها می توان به تأثیرات رشته کوه های جنوب شهر پی برد. همان طور که از این نمودارها برمی آید وجود رشته کوه های جنوب شهر باعث انتقال نقطه با غلظت بیشینه به مکانی جلوتر می گردد. توضیحات ارائه شده برای کارگاه مرکزی در شکل (۱۲) نمایش داده شده است.

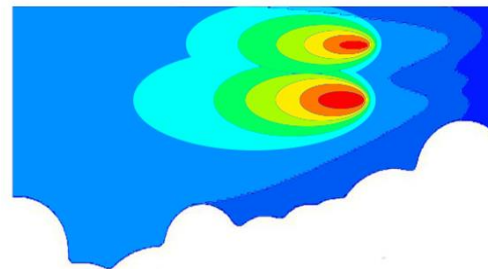
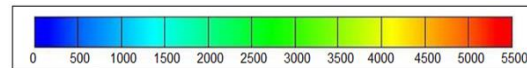
است. به منظور بستن معادلات انرژی و گونه ها عدد پیرانتل آشفته و اشویت آشفته به ترتیب  $0.9$  و  $0.7$  در نظر گرفته شده اند.

### ۳- نتایج و بحث

با در نظر گرفتن مقطعی از هندسه مورد مطالعه موازی با صفحه  $x-y$  و در ارتفاع  $z = 1/5m$ ، می توان نحوه پخش آلاینده ها را از دودکش ها بررسی نمود. در اطراف هر یک از دودکش ها، آلودگی به شکل گوسی منتشر می گردد ولی اثر برهم نهی دودکش ها شکل گوسی را تغییر می دهد. به عنوان نمونه شکل گوسی کانتور غلظت  $CO_2$  متساعد از دودکش کارگاه مرکزی در شکل (۸) و کانتور برهم نهی غلظت تمام دودکش ها در شکل (۹) نمایش داده شده است.



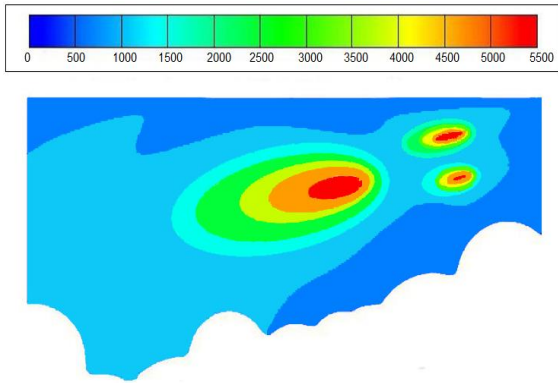
شکل ۸- کانتور غلظت  $CO_2$  متساعد از دودکش کارگاه مرکزی



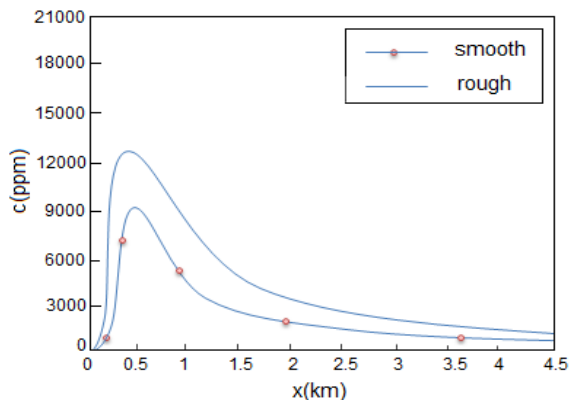
شکل ۹- کانتور برهم نهی غلظت تمام دودکش ها

### ۳-۱- اعتبارسنجی حل عددی

برای حصول اطمینان از صحت نتایج حل عددی، منحنی تغییرات غلظت استخراج شده از حل عددی در راستای خط مرکزی پلوم دودکش کارگاه مرکزی با حل تحلیلی مقایسه شده است. این مقایسه در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. جهت باد از شرق به غرب در نظر گرفته شده و با تعریف مبدأ مختصات روی دودکش، رسم منحنی تغییرات  $C(x, 0, 1/5)$  که معادله آن در رابطه (۱۵) ارائه شده مدنظر است. به منظور اثبات استقلال حل از شبکه بندی، نتایج حل عددی برای دو نوع شبکه بندی نهایی در شکل (۱۱) با یکدیگر مقایسه شده اند.



شکل ۱۳- تأثیر عوامل توپوگرافیک و جوی بر الگوی پخش جریان

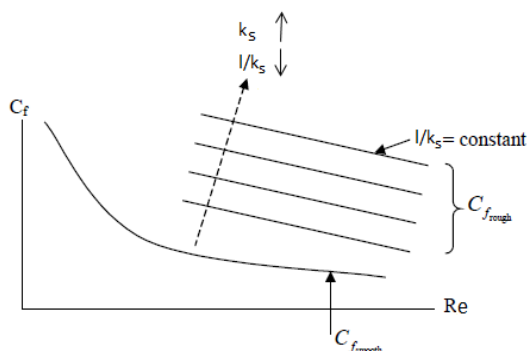


شکل ۱۴- تأثیر ساختمان‌ها بر افزایش پیک

$$C_f \uparrow \rightarrow St_m \uparrow \rightarrow Sh \uparrow \rightarrow j_0 \uparrow \rightarrow \frac{\partial c}{\partial y} \Big|_{y=0^+} \uparrow$$

افزایش ضریب پسای اصطکاکی منجر به افزایش عدد استانتون جرمی شده که خود آن نیز افزایش عدد شرود را در پی خواهد داشت. در توجیه ارائه شده  $D_i$  و  $(c_0 - c_\infty)$  در یک  $x$  ثابت، بدون تغییر باقی می‌مانند.

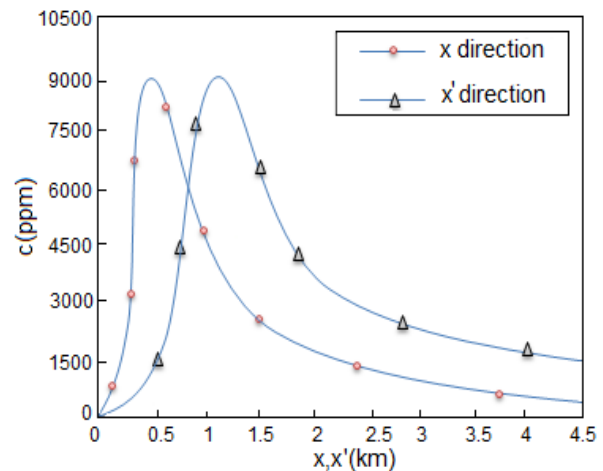
کانتور غلظت حاصل از برهم نهی دودکش نیز در این حالت در شکل (۱۶) نمایش داده شده است. همان طور که دیده می‌شود با اعمال اثرات ساختمان‌ها نواحی وسیع‌تری غلظت بحرانی را تجربه می‌کنند.



شکل ۱۵- تغییرات ضریب اصطکاک با زبر شدن سطح یک صفحه خارجی

جدول ۴- محدوده  $Y^+$  برای هریک از شروط

بازده $Y^+$	انواع شروط
$128 < Y^+ < 421$	شروط ۱
$101 < Y^+ < 547$	شروط ۲
$45 < Y^+ < 292$	شروط ۳
$88 < Y^+ < 430$	شروط ۴
$37 < Y^+ < 72$	شروط ۵
$107 < Y^+ < 221$	شروط ۷-۱۱
$58 < Y^+ < 133$	شروط ۱۲
$107 < Y^+ < 221$	شروط ۱۳
$96 < Y^+ < 160$	شروط ۱۴



شکل ۱۲- تأثیر عوامل توپوگرافیک و جوی بر انتقال پیک

در شکل (۱۳) نیز کانتور غلظت حاصل از برهم نهی اثرات تمامی دودکش‌ها نمایش داده شده است. نکته جالب توجه این که با تغییر جهت باد از شرق- غرب به شمال شرقی- جنوب غربی الگوی جریان تغییر می‌کند. بررسی‌ها نشان می‌دهند که دو پیک به سه پیک غلظتی تغییر کرده است. لازم به ذکر است که در این شکل‌ها اثرات ساختمان‌ها اعمال نشده است.

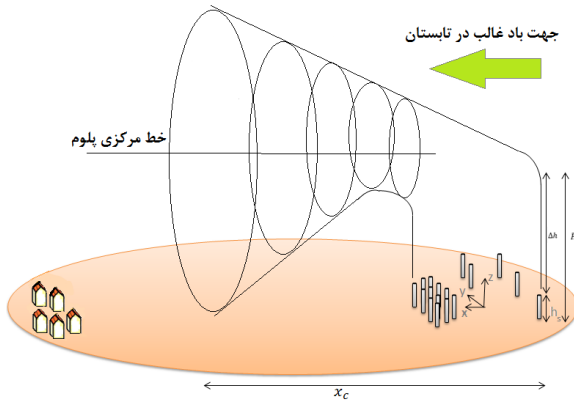
### ۴-۳- تأثیر ساختمان‌ها

با اعمال اثرات ساختمان‌های مناطق ۱ تا ۵ و ساختمان‌های منطقه صنعتی پیک غلظت منحنی‌های گوسی افزایش می‌یابد. تغییرات غلظت در راستای خط مرکزی پلوم دودکش کارگاه مرکزی در دو حالت صاف و زبر در شکل (۱۴) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. برای توجیه این افزایش غلظت در لایه مرزی روی سطح زبر نسبت به لایه مرزی روی سطح صاف می‌توان از رابطه کولبرن غلظتی بهره جست (Schlichting و Klaus, ۲۰۰۲).

$$St_m \cdot Sc^{2/3} = \frac{1}{2} C_f \tag{27}$$

از آنجا که ضریب اصطکاک با زبر شدن سطح زیاد می‌شود (شکل (۱۵)) بنابراین:





شکل ۱۷- شماتیکی از توده بحرانی در حال فرود به سطح زمین

۳-۶- تعیین ابعاد حجم کنترل و محاسبه نرخ تجمع

با در نظر گرفتن مکعب مستطیلی به طول  $L=2a \cong 1km$ ، عرض  $W=2b \cong 1km$  و ارتفاع  $H=2c = 1/4km$ ، ابعاد حجم کنترل تعیین می‌گردد. در مدل جعبه‌ای، ارتفاع جعبه برابر ارتفاع لایه اختلاط می‌باشد که جز داده‌های هواشناسی است (Rigby, ۲۰۰۷). از آنجا که میانگین ارتفاع لایه اختلاط طی شبانه روز  $H_{mix} = 1/3km$  است بین مدل‌سازی حاضر ( $H=2c$ ) و داده هواشناسی ( $H_{mix}$ ) تطابق خوبی دیده می‌شود. جهت نیل به رابطه صریح غلظت بر حسب زمان در حجم کنترل مورد نظر با ابعاد مشخص شده، موازنه جرمی باید نوشته شود.

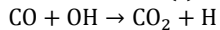
+ خروج آلاینده از کرانه‌ها - ورود آلاینده از کرانه = تجمع آلاینده در جعبه

- تولید یا مصرف آلاینده توسط واکنش  $\pm$  تولید آلاینده از منابع

حذف آلاینده توسط سطح

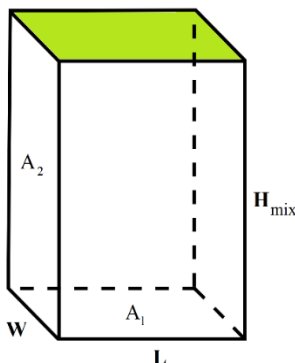
$$V \frac{dc}{dt} = \bar{u}A_1(c_{in} - c_{out}) + S_i \pm VR_i - v c A_2 \quad (32)$$

$$t = 0 \rightarrow c(t) = c_0 \quad (33)$$

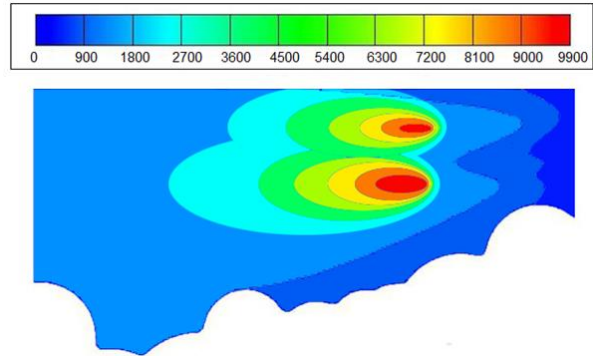


$$C(t) = \frac{\left(\frac{\bar{u}}{L}(c_{in} - c_{out}) + R_{CO_2}\right) H_{mix}}{v + c_0 \left(e^{\frac{-v}{H_{mix}}t}\right)} \left(1 - e^{\frac{-v}{H_{mix}}t}\right)$$

$$R_{CO_2} = k[CO][OH] \quad (34)$$



شکل ۱۸- پارامترهای هندسی مؤثر در مدل جعبه



شکل ۱۶- تأثیر عوامل توپوگرافیک و جوی بر الگوی پخش جریان

۳-۵- تعیین مشخصات توده بحرانی

با تعیین زمان ( $t_c$ ) و مکان ( $x_c$ ) فرود توده گاز  $CO_2$  با غلظت بحرانی به سطح زمین می‌توان با در نظر گرفتن یک محدوده معین به عنوان حجم کنترل، نرخ تجمع این گاز را پیش‌بینی نمود. این کار موجب می‌شود که بتوان تدابیر مناسبی برای الگوی فضای سبز سازگار با محدوده مورد نظر اندیشید. از آنجا غلظت بحرانی برای گاز دی‌اکسیدکربن  $400ppm$  می‌باشد (Brunekreef و Holgate, ۲۰۰۲). بنابراین مقدار  $400ppm$  یا  $3/5 \times 10^{-9} \frac{kg}{m^3}$  را به  $C(x,y,z,t)$  (رابطه (۱۶)) تخصیص داده و از طرفین آن لگاریتم گرفته می‌شود. با جاگذاری  $x=1/57t$  (مکان هندسی مرکز حرکت توده‌ها) در روابط  $\sigma_x = \sigma_y = 0/18x^{0/92}$  و  $\sigma_z = 0/72x^{0/76}$  (استخراج شده از معیار پاسکویل گیفورد)، معادله (۱۶) تبدیل به فرم استاندارد یک بیضیگون به اقطار  $2a$  و  $2b$  و مرکز  $0$  خواهد شد که  $a, b, c$  و  $0$  به صورت توابع صریحی بر حسب زمان در زیر نمایش داده شده‌اند:

$$o = (x_0, y_0, z_0) = (1/57t, 0, 703) \quad (28)$$

$$a = \sqrt{-2(0/07t^{1/84})\text{Ln}(0/094 \times 10^{-12}t^{1/6})} \quad (29)$$

$$b = \sqrt{-2(0/07t^{1/84})\text{Ln}(0/094 \times 10^{-12}t^{1/6})} \quad (30)$$

$$c = \sqrt{-2(1/1t^{1/52})\text{Ln}(0/094 \times 10^{-12}t^{1/6})} \quad (31)$$

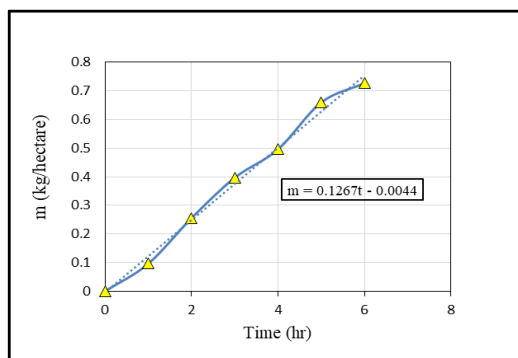
حال به کمک نرم‌افزار Maple با تعریف قید  $c=H=703m$  که در آن  $H$  ارتفاع مؤثر میانگین تمامی دودکش‌هاست زمان رسیدن توده بحرانی به سطح زمین قابل حصول است (شهریاری و محمدزاده ثانی، ۱۳۹۴).  $t_c$  و  $x_c$  به ترتیب 460s و 763m گزارش می‌شوند. با جایگذاری  $t_c = 460s$  در روابط (۳۱-۲۸)،  $(763, 0, 703)$  مشخصات توده بحرانی می‌باشند. شماتیکی از مدل‌سازی انجام شده در زیر ارائه شده است.

به عمل آمده غلظت اندازه‌گیری شده با ایستگاه نمونه‌گیری شرق شهرستان اراک مورد صحت‌سنجی قرار گرفت که مقدار  $258 \text{ ppm}$  گزارش شد. لازم به ذکر است زمان شروع کار کارخانه ساعت ۷ صبح روز شنبه می‌باشد و توده با غلظت بحرانی در ثانیه ۴۶۰ ام وارد باکس می‌شود (یعنی تقریباً ۷ دقیقه از زمان شروع کار کارخانه گذشته). از میانگین مقادیر غلظت در انتهای جعبه‌های ۲ و ۵ و ۸ و  $c_{in}$  از میانگین مقادیر غلظت در ابتدای جعبه‌های ۳، ۶ و ۹ به دست می‌آید.

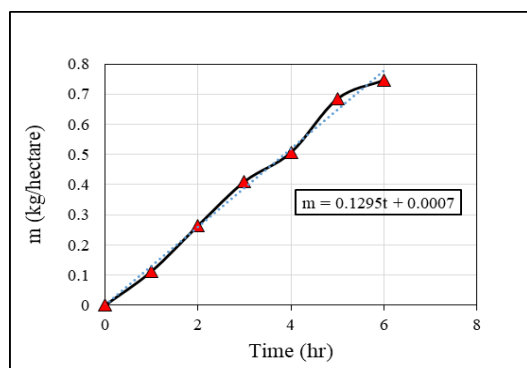
جدول ۶- مقادیر غلظت ورودی و خروجی حجم کنترل (جهت باد از شرق به غرب)

$c_{in}(\text{ppm})$	$c_{out}(\text{ppm})$	ساعت نمونه‌گیری
۸۵۰۲	۷۹۸۳	۸/۷ صبح
۱۴۸۶۰	۱۴۰۱۴	۹/۷ صبح
۲۰۸۹۶	۱۹۶۳۳	۱۰/۷ صبح
۲۴۷۲۰	۲۳۴۰۰	۱۱/۷
۳۱۷۱۷	۳۰۱۷۰	۱۲/۷
۳۴۳۶۴	۳۲۷۵۵	۱۳/۷

به منظور صحت‌سنجی نتایج، نرخ تجمع به کمک داده‌های تجربی یعنی اندازه‌گیری مستقیم غلظت دی‌اکسید کربن محاسبه شد. به دلیل کمبود نه دستگاه از یک نوع، اندازه‌گیری‌ها به کمک دستگاه‌های منتخب انجام پذیرفت.



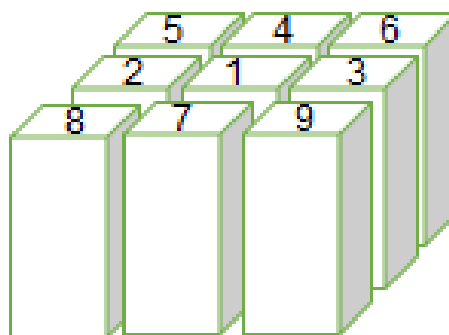
شکل ۲۰- منحنی برازش جرم- زمان از روش نیمه تحلیلی



شکل ۲۱- منحنی برازش جرم- زمان از روش تجربی

از آنجا که در حجم کنترل هیچ منبع آلاینده‌ای وجود ندارد پس با اعمال شرط اولیه (۳۳) و سرعت واکنش (۳۴) جواب معادله بالا به فرم معادله (۳۵) استخراج می‌گردد که در آن سرعت واکنش طبق رابطه (۳۶) تعریف می‌گردد.

جاگذاری  $R_{CO_2}$  در رابطه (۳۶) مستلزم اندازه‌گیری غلظت CO در زمان‌های مختلف است. این اندازه‌گیری‌ها توسط نه دستگاه Micro IV در محدوده  $L \times W = 1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  انجام شده است. اگر ناحیه به نه جعبه کوچک تقسیم شود نتایج دقیق‌تری حاصل خواهد شد. شماره‌گذاری ترتیب این جعبه‌ها با توجه به فاصله آنها از کارخانه در شکل (۱۹) نمایش شده است.



شکل ۱۹- نمایی از جعبه‌ها به همراه شماره آنها

جدول ۵- سرعت واکنش در ساعات بعد از خروج اولین توده از دودکش‌ها

$R_{CO_2}(\text{ppm}/\text{min})$	ساعت نمونه‌گیری بعد از خروج اولین توده از دودکش‌ها
۲۲۷	۱ ساعت بعد
۳۶۶	۲ ساعت بعد
۴۸۴	۳ ساعت بعد
۵۹۹	۴ ساعت بعد
۵۹۹	۵ ساعت بعد
۸۴۳	۶ ساعت بعد

در دمای  $25^\circ\text{C}$ ، مقدار  $k$  برابر  $440 \text{ ppm}^{-1} \text{ min}^{-1}$  بوده (Westley, ۱۹۸۰) و میانگین تعداد رادیکال‌های OH طی روز  $10^5 \frac{\text{molecule}}{\text{cm}^3}$  می‌باشد (Paul, ۲۰۰۵). میانگین سرعت ته‌نشست خشک  $\text{CO}_2$  نیز برابر  $\frac{m}{s}$  ۰/۰۵ گزارش می‌شود (Dyster و Apsley, ۲۰۰۵). برای به‌دست آوردن غلظت با توجه به حل تحلیلی، دانستن غلظت اولیه ضروری می‌باشد. از آنجا که بالانس جرمی در جعبه پس از رسیدن توده بحرانی داخل جعبه نوشته شده و هدف، برآورد تجمع غلظت پس از رسیدن غلظت بحرانی به سطح زمین می‌باشد بنابراین باید غلظت اولیه را  $4000 \text{ ppm}$  گرفت اما با توجه به اندازه‌گیری که قبل از شروع به کار نمودن کارخانه (روز جمعه) به عمل آمد مشاهده شد  $312 \text{ ppm}$  از گاز کربن‌دی‌اکسید در هوای اطراف کارخانه وجود دارد. لازم به ذکر است که به منظور حصول اطمینان از اندازه‌گیری

اگر تخمین فضای سبز مورد نیاز برای حجم کنترل مورد مطالعه جهت جلوگیری از رسیدن غلظت شهر به غلظت بحرانی مدنظر باشد باید به صورت زیر عمل نمود:

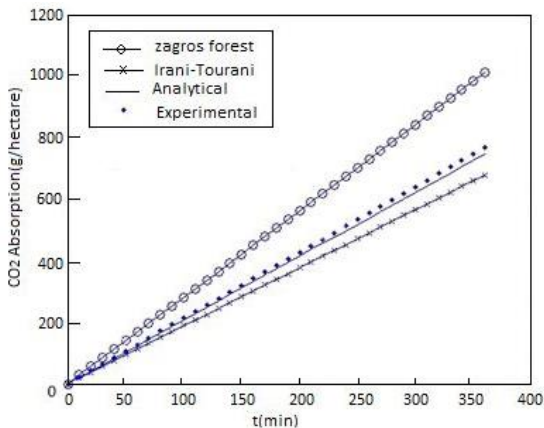
= نرخ جذب CO<sub>2</sub> برای تجمع پیش‌بینی شده از شکل (۲۰):

$$0/126 \frac{\text{kg}}{\text{hectar.h}} = 2/09 \frac{\text{g}}{\text{hectar.min}} \quad (۳۵)$$

= نرخ جذب CO<sub>2</sub> برای تجمع پیش‌بینی شده از شکل (۲۱):

$$0/129 \frac{\text{kg}}{\text{hectar.h}} = 2/15 \frac{\text{g}}{\text{hectar.min}} \quad (۳۶)$$

با تبدیل واحدهای صورت گرفته در (۳۵) و (۳۶)، مقایسه شیب نمودارهای شکل‌های (۲۰) و (۲۱) با مقادیر جدول (۸) و (۷) امکان پذیر شده است. با مقایسه این مقادیر، می‌توان الگوهای جنگلی زاگرس و ایرانی-تورانی را به ترتیب به عنوان حدود بالا و پایین حجم کنترل مورد مطالعه در نظر گرفت (شکل (۲۲)).



شکل ۲۲- حدود بالا و پایین به عنوان الگوهای فضای سبز پیشنهادی

برای رسیدن به نرخ تجمع باید تغییرات غلظت در هر بازه زمانی را در مقدار حجم کنترل ضرب نمود. شیب منحنی برازش گذرنده از این نقاط بیانگر نرخ تجمع در ۱۰۰ هکتار می‌باشد. برای محاسبه نرخ تجمع در هر هکتار باید محور عمودی این نمودار را بر ۱۰۰ تقسیم نمود. نمودار حاصل از معادله نیمه تحلیلی (۳۶) در شکل (۲۰) و نمودار حاصل از داده‌های تجربی در شکل (۲۱) نمایش داده شده‌اند. به توجه به شیب منحنی برازش این دو نمودار، تطابق خوبی دیده می‌شود.

### ۳-۷- ارائه مناسب‌ترین الگوی فضای سبز

با مطالعه تحقیقات انجام شده بر روی جذب CO<sub>2</sub> گونه‌های گیاهی مختلف که اطلاعات در جدول (۷) جمع‌آوری شده است. علت اختلاف زیاد جذب CO<sub>2</sub> در الگوهای اطراف کارخانه فولاد مبارکه، پارک پردیسان و باغ گیاه‌شناسی ملی ایران نسبت به جنگل‌های زاگرس، ایرانی-تورانی و خلیج عمانی وجود گونه‌های پهن‌برگ و سوزنی‌برگ با فراوانی بالا در الگوهای اطراف کارخانه فولاد مبارکه، پارک پردیسان و باغ گیاه‌شناسی ملی ایران می‌باشد در حالی که گونه‌های غالب در جنگل‌های زاگرس، ایرانی-تورانی و خلیج عمانی گونه‌های سوزنی‌برگ است و نکته مهم این که جذب CO<sub>2</sub> در گونه‌های پهن‌برگ بیشتر از گونه‌های سوزنی‌برگ می‌باشد (بختیاروند و سهرابی، ۱۳۹۰؛ سازمان بوستان‌ها و فضای سبز شهرداری تهران، ۱۳۹۳؛ پناهی، پورهاشمی و حسینی‌نژاد، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۳).

جدول ۷- الگوهای مختلف فضای سبز

جذب CO <sub>2</sub> (g/hectare.min)	الگوی فضای سبز
۲۲/۶۶	اطراف کارخانه فولاد مبارکه
۱۴/۹	پارک پردیسان
۷/۱۶	باغ گیاه‌شناسی ملی ایران
۲/۸۳	جنگل‌های زاگرس
۱/۹	جنگل‌های ایرانی-تورانی
۱/۱	جنگل‌های خلیج عمانی

جدول ۱۱- غلظت CO<sub>2</sub> در هریک از جعبه‌ها در ساعات مختلف

ساعت نمونه‌گیری	جعبه ۱	جعبه ۲	جعبه ۳	جعبه ۴	جعبه ۵	جعبه ۶	جعبه ۷	جعبه ۸	جعبه ۹	میانگین غلظت محدوده CO <sub>2</sub>
۷/۷	۴۵۲۰	۴۱۰۲	۴۵۰۷	۴۳۶۷	۳۹۷۶	۴۱۱۴	۴۱۱۲	۳۸۹۴	۴۰۸۹	۴۱۸۶
۸/۷	۹۷۸۷	۸۵۲۳	۸۷۲۲	۹۴۸۳	۸۳۶۰	۸۵۴۹	۹۲۹۶	۷۳۲۱	۸۱۶۹	۸۶۸۷
۹/۷	۱۵۴۴۲	۱۴۲۷۲	۱۴۸۰۷	۱۵۵۳۹	۱۴۱۸۸	۱۵۰۱۷	۱۵۳۰۲	۱۳۷۲۰	۱۴۵۴۶	۱۴۷۵۹
۱۰/۷	۲۲۰۱۴	۲۰۶۸۴	۲۰۹۹۴	۲۱۰۴۲	۲۰۳۹۲	۲۰۷۷۷	۲۰۳۴۵	۱۹۰۰۱	۲۰۱۱۸	۲۰۵۹۶
۱۱/۷	۲۵۱۵۳	۲۳۷۹۴	۲۴۹۸۷	۲۵۷۹۳	۲۳۱۵۳	۲۴۲۹۷	۲۵۴۷۸	۲۳۲۲۰	۲۴۲۳۶	۲۴۴۵۷
۱۲/۷	۳۳۷۸۸	۳۱۱۲۵	۳۲۰۰۴	۳۲۳۵۷	۳۰۸۶۶	۳۱۱۹۰	۳۲۱۹۸	۳۰۷۴۵	۳۰۹۶۵	۳۱۵۸۲
۱۳/۷	۳۵۱۱۶	۳۳۸۷۳	۳۴۸۲۹	۳۴۹۷۶	۳۲۸۴۴	۳۴۰۵۲	۳۴۱۰۷	۳۲۶۹۲	۳۳۹۹۷	۳۴۰۵۴

## ۳-۸- تحلیل خطا

در حل عددی عواملی همچون ساده‌سازی نوک تیز رشته کوه-ها می‌توانند موجب بروز خطا بشوند. اما قبل از پرداختن به خطای مربوط به اندازه‌گیری، بیان چند نکته ضروری به نظر می‌رسد. بسته به هدف نمونه‌برداری، آن را به نمونه‌برداری فردی<sup>۸</sup>، منبع<sup>۹</sup> و محلی یا ناحیه‌ای<sup>۱۰</sup> تقسیم‌بندی می‌کنند (ASTM، ۱۹۶۲). در این پژوهش نمونه‌برداری محلی یا ناحیه‌ای مد نظر می‌باشد. نمونه-گیری‌ها به دو روش آنالیز آزمایشگاهی و قرائت مستقیم صورت می‌پذیرد.

در این پژوهش از گاز یاب‌ها به عنوان یکی از روش‌های رایج قرائت مستقیم بهره گرفته شده است. گاز یاب‌ها در داخل خود دارای فیلامنت کاتالیستی از جنس پلاتین هستند که در غلظت-های زیر حد انفجار می‌تواند امکان ترکیب گاز و اکسیژن را فراهم سازد و نسبت به میزان غلظت گاز، دمای فیلامنت تغییر کرده و نتیجه به صورت تغییر مقاومت در یک مدار الکتریکی و پس از آن تغییر جریان حاصله به صورت علائم بصری-آنالوگ یا دیجیتال- بر روی صفحه نشانگر و علائم صوتی مشخص می‌شود. مکانیسم عمل گاز یاب‌ها برای سنجش گازهای سمی بر اساس واکنش شیمیایی است که این واکنش شیمیایی در گاز یاب با توجه به میزان آلودگی بر حسب ppm گزارش می‌شود و چنانچه از حد خاصی بالاتر رود به صورت آلام هشدار خواهد داد (Khopkar، ۲۰۰۷). طبق دستورالعمل‌های ASTM<sup>۱۱</sup> نمونه‌گیری محلی یا ناحیه‌ای زمانی از دقت مناسب برخوردار خواهد بود که طبق یک قانون تجربی، ارتفاع دودکش از ۲/۵ برابر ارتفاع بلندترین ساختمان‌های اطراف بیشتر باشد. در این صورت ساختمان‌های اطراف یک دودکش تأثیر بسیار کمی بر پراکندگی جریان آلودگی دارند و نمونه‌گیری می‌تواند دقت خوبی به همراه داشته باشد. از آنجا که در اطراف کارخانه آلومینیوم ایران ساختمان‌های بلند وجود ندارد و منطقه صنعتی با سوله‌های نه چندان بلند دیده می‌شود به همین خاطر می‌توان به دقت مطلوب در نمونه‌گیری دست یافت. عواملی که موجب بروز خطا در اندازه‌گیری محلی می‌شوند عبارتند از: عدم کالیبراسیون صحیح دستگاه‌های گاز یاب، تجاوز سرعت باد محلی به بیش از ۲ متر بر ثانیه و تجاوز دمای محیط از مقداری مشخص که مقدار این دما برای تمامی گاز یاب-های استفاده شده در این پژوهش در جدول (۹) ذکر شده است. مشخصات هر یک از دستگاه‌های گاز یاب در زیر ذکر گردیده است:

## جدول ۹- مشخصات گاز یاب‌های مورد استفاده در پژوهش

حاضر		نام گاز یاب
محدوده نمونه- برداری (ppm)	محدوده دمایی (°C)	
۰-۲۰۰۰	۰-۴۰	Micro IV
۰-۵۰۰۰۰	۰-۴۰	CO <sub>2</sub> Monitor 2800
۰-۲۰۰۰۰۰	۰-۶۰ (-۲۰)	CO <sub>2</sub> Hand - held meter GM70
۰-۱۰۰۰۰۰	۲۰-۳۰	CO <sub>2</sub> Gas sensor 0660I
۰-۵۰۰۰۰	۰-۴۵	CO <sub>2</sub> meter 8560

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر عوامل توپوگرافیک، جوی و ساختمان‌ها بر پخش گاز CO<sub>2</sub> از شرکت آلومینیوم ایران واقع در شهرستان اراک در لایه مرزی اتمسفری مورد بررسی قرار گرفت. حال به نتایج حاصل از پژوهش اشاره می‌نماییم:

- با اعمال اثرات ساختمان‌ها، نواحی بیشتری از شهر غلظت بحرانی را تجربه می‌کنند. از برهم نهدی اثر کارخانه آلومینیوم با سایر منابع نقطه‌ای، سطحی و حجمی شهر اراک، رسیدن غلظت کل شهر به بیش از حد مجاز در حالت پایا دور از انتظار نیست.
  - با توجه به کانتور غلظت برهم‌نهدی در حالت پایا، نواحی اطراف میدان ورزش و پارس واگن دارای ماکزیمم غلظت بوده و غلظتی در حد دو برابر حد مجاز را تجربه می‌کنند. فاز ۱ و ۲ بهشتی و همچنین کوی کارمندان شرکت نفت نیز غلظت بحرانی را تجربه کرده و سایر نواحی نزدیک‌تر به شهر غلظتی زیر حد مجاز را دارا می‌باشند.
  - وجود رشته کوه‌های جنوب شهر باعث انتقال نقطه با غلظت بیشینه به ۵۰۰ متر جلوتر می‌گردد. این فاصله در نمودار غلظت هریک از دودکش‌ها در راستای خط مرکزی پلوم آنها و کانتور حاصل از برهم‌نهدی دودکش‌ها تقریباً تغییر نکرده و در تمامی آنها مشترک است.
- با مطالعه تحقیقات انجام شده بر روی جذب CO<sub>2</sub> گونه‌های گیاهی موجود و با مقایسه میزان نرخ تجمع CO<sub>2</sub> در حجم کنترل محیط بر توده بحرانی رسیده به زمین با مقادیر جذب گونه‌های گیاهی نامبرده شده می‌توان الگوهای جنگلی زاگرس و ایرانی-تورانی را به ترتیب به عنوان حدود بالا و پایین این حجم کنترل مورد مطالعه در نظر گرفت تا از رسیدن غلظت شهر به غلظت بحرانی جلوگیری به عمل آید. محدوده مورد نیاز فضای سبز ۱۰۰ هکتار تخمین زده شده است.

10. Area monitoring

11. American Society for Testing and Materials

8. Personnel monitoring

9. Source monitoring

## ۵- مراجع

نورپور ع، کاظمی شهبانی ن، حسینی نژاد، م، "مدل سازی پراکنش آلاینده‌های هوا خروجی از دودکش کارخانه سیمان ایلام"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۴۴، شماره ۱، بهار ۱۳۹۳.

Apsley DD, Dyster SJ, McHugh S, "Modelling dry deposition", 17, Technical Report, 2005.

Assael M J, Konstantinos, EK, "Fires, explosions, and toxic gas dispersions: effects calculation and risk analysis", CRC Press, 2010.

Brunekreef B, Holgate S, "Air pollution and health", The lancet, 2002.

Carson JE, Harry M, "The validity of several plume rise formulas", Journal of the Air Pollution Control Association, 1969, 19(11), 862-866.

Craoto G, "Numerical simulations of the atmospheric boundary layer", Universita degli Studi di Cagliari: Cagliari, Italy, 2007.

Fluent Ansys, "16.0 User's Guide", Ansys Inc, 2015.

Katharina S, "Determination of the atmospheric boundary layer height in complex terrain during SALSA 2005", Diss. Diploma thesis, University of Bayreuth, Bayreuth, 2006.

Khopkar SM, "Environmental pollution monitoring and control", New Age International, 2007.

Materials Committee D-22 on Methods of Sampling and Analysis, "ASTM standards on methods of atmospheric sampling and analysis: methods of testing, recommended practices, definitions", American Society for Testing and Materials, 1962.

Moreira D, Marco V, "Air pollution and turbulence modeling and applications", CRC Press, 2009.

Paul SM, "Gas-phase radical chemistry in the troposphere", 2005, Chemical Society Reviews, 34(5), 376-395

Rigby M, "Air pollution climatology using meteorological reanalysis", Ph.D. thesis, Imperial college London, London, England, 2007.

Schlichting H, Klaus G, "Boundary-layer theory", Springer Science and Business Media, 2000.

Stockie John M, "The mathematics of atmospheric dispersion modeling", Siam Review 53, no. 2, 2011, 349-372.

Westley F, "Table of recommended rate constants for chemical reactions occurring in combustion", 1980, National Standard Reference Data System, NSRDS-NBS 67.

بختیاروند بختیاری س، سهرابی ه، "قابلیت تجارت کربن از طریق پروژه‌های جنگل کاری در اطراف مناطق صنعتی"، اولین کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۹۰.

پناهی پ، پورهاشمی م، حسینی نژاد م، "برآورد زیتوده و ذخیره کربن برگ گونه بانه در باغ گیاه شناسی ملی ایران"، مجله جنگل ایران، انجمن جنگل‌بانی ایران، بهار ۱۳۹۰، سال سوم، شماره ۱، ۱۳۹۰.

پناهی پ، پورهاشمی م، حسینی نژاد م، "آلومتری زیتوده و ذخیره کربن برگ بلوط، های باغ گیاه‌شناسی ملی ایران"، مجله پژوهش‌های گیاهی مجله زیست‌شناسی ایران، ۱۳۹۳، جلد ۲۷، شماره ۱.

سرلک م، "تحلیل عناصر موجود در ذرات معلق هوای شهر اراک به روش فعال سازی نوترونی و جذب اتمی و مدل سازی انتشار آلودگی از طریق AERMOD"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۹۰.

سازمان بوستان‌ها و فضای سبز شهرداری تهران، "عملکرد جنگل کاری‌های شهری در جذب گازهای گلخانه"، ۱۳۹۳.

شهریاری غ، محمدزاده ثانی ا، "مدل سازی تجمع گاز کربن دی-اکسید اطراف کارخانه آلومینیوم ایران (اراک) پس از رسیدن توده بحرانی به سطح زمین"، نخستین همایش ملی توسعه پایدار در سیستم‌های مهندسی انرژی، آب و محیط زیست، ۳۰ و ۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۴، تهران.

علیاری شوره‌دلی م، "پیش‌بینی رفتار آلاینده‌های هوای اراک با استفاده از شبکه‌های عصبی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر، تهران، ۱۳۸۲.

قیاسی س، "نقش خاک و نوع پیوند فلزات سنگین در دسترسی بیولوژیکی (مطالعه موردی: کارخانه آلومینیوم ایران واقع در شهر اراک)"، رساله دکتری، دانشگاه علوم و تحقیقات، تهران، ۱۳۹۰.

## EXTENDED ABSTRACT

# Numerical Simulation of the CO<sub>2</sub> Emission in the Atmospheric Boundary Layer Environment around the Iranian Aluminum Company and the Presentation of the Most Appropriate Green Space Pattern

Amin Mohammadzadeh Sani, Hesam Moghadasi, Gholamreza Shahriari Moghadam\*

*School of Mechanical Engineering, Department of Energy Conversion, Iran University of Science and Technology (IUST), Narmak, 16846-13114, Tehran, Iran*

**Received:** 05 October 2017; **Accepted:** 28 April 2018

---

### Keywords:

Atmospheric Boundary Layer, Diffusion of Pollutants, Topographic and Atmospheric Factors, Carbon Dioxide Gas, Green Space Pattern.

---

## 1. Introduction

Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions from output chimneys in various industries are considered as one of the main sources of air pollution and an important factor in air quality assessment. During the last few years, many researchers have studied in this field. (Craστο (2007), Stockie (2011), Rigby (2007)). In the present study, the effect of topographic, atmospheric and building factors on the CO<sub>2</sub> emissions from the "Iranian Aluminum Company" in the atmospheric boundary layer are investigated. The geographic location of "Iranian Aluminum Company" in Arak city has raised the company as one of the major sources of air pollution in this city. In addition, using numerical results in ANSYS FLUENT software, the impact of city buildings on the diffusion of pollutants with regard to wind direction is modeled and verified. After that, we calculate the green space needed around the company; then, the most appropriate green space pattern is extracted.

## 2. Methodology

### 2.1. Numerical modeling

The geometry of this study was designed by the ANSYS software (using the Design Modeler (DM) module). 17 chimneys of the factory, along with mountains of the south of the city with a height of 500-800 meters or 700-1300 meters designed in the DM. The length, Width and height of region are 7, 3 and 1.5km ,respectively. Also, the length of the chimneys is 60m and their diameter is 5m. The computational domain presented in Fig. 1. In Fig. 2. view of geometry gridding is depicted. As it can be seen in this Fig, for the purpose of raising accuracy in the adjacent regions of the city, the grid is triangular and coarse mesh, the square and very small region of the city and in order to reduce computational costs is used. Several grid resolutions including coarse, medium and fine grids are employed to determine the effects of grid size on the obtained solution and to ensure grid independence in the considered domain. A sample of the mesh structure of the computational domain is shown in Fig. 2.

---

\* Corresponding Author

*E-mail addresses:* amin.mohammadzade2013@gmail.com (Amin Mohammadzadeh Sani),  
hesam\_moghadasi@mecheng.iust.ac.ir (Hesam Moghadasi), shahriari@iust.ac.ir (Gholamreza Shahriari Moghadam).



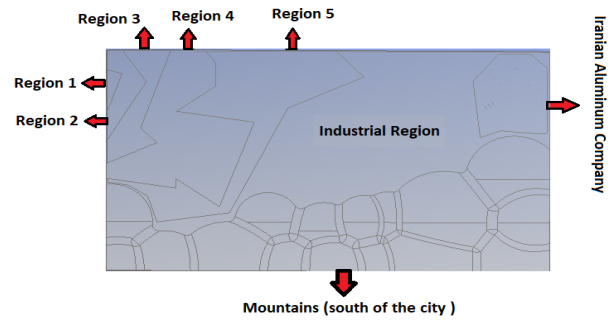


Fig. 1. Computational domain

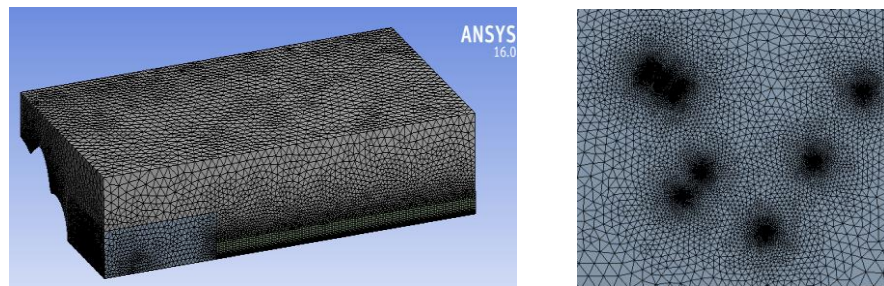


Fig. 2. Mesh structure of the computational domain

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Effect of concentration

By considering the cross-sectional dimension of the understudy geometry parallel to the x-y plane (at  $z = 1.5$  m), it is possible to examine the emission of pollutants from the chimneys. Inside the chimneys, pollution is released in Gaussian form, but the effect of Superposition of the chimneys the changes Gaussian form. For example, the concentration contours for chimneys illustrated in Fig. 3.

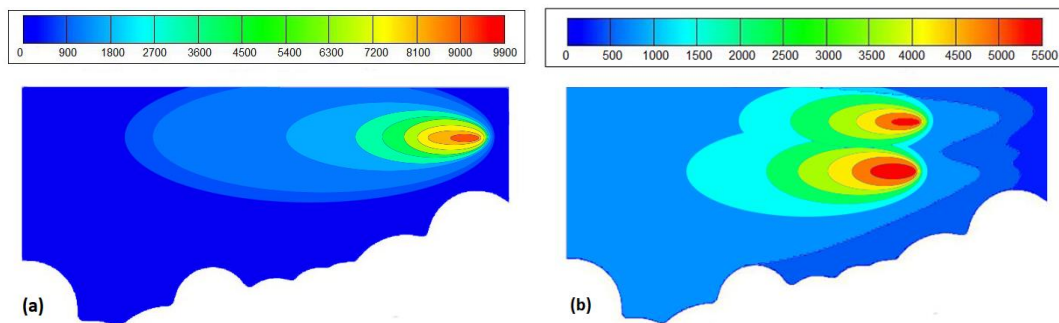


Fig. 3. The concentration contours: (a) Central workshop chimney, (b) Superposition for all chimneys

#### 3.2. Effect of buildings

The concentration of Gaussian curves is increased by applying the effects of buildings 1 to 5 and buildings of the industrial district. In Fig. 4. the variation of concentration along the central line of the chimney plume of the central workshop have been compared in two states (smooth and rough). The trend of curve changes is justified by the use of the Colburn formula. (Schlichting and Klaus, 2002)

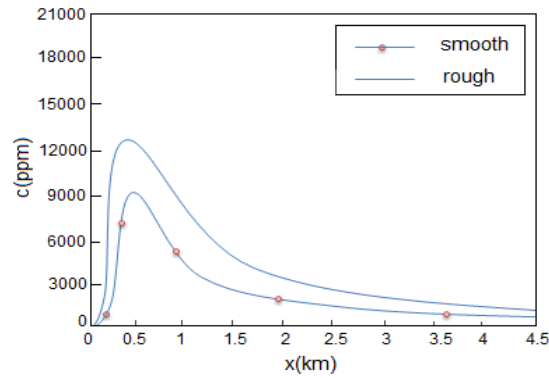


Fig. 4. Effect of buildings (smooth and rough)

### 3.3. Presentation of the most appropriate green space pattern

By studying on the absorption of CO<sub>2</sub> plant species in Pardisan Park, green space around Mobarakeh Steel Company, Iranian National Botanical Garden, Zagros forests, Iranian-Turanian forests and Omanian Gulf forests. Now, we can choose the appropriate pattern. By comparing these values, it is possible to consider Zagros and Iranian-Turanian forest patterns as upper and lower limits of the control volume, as shown in Fig. 5.

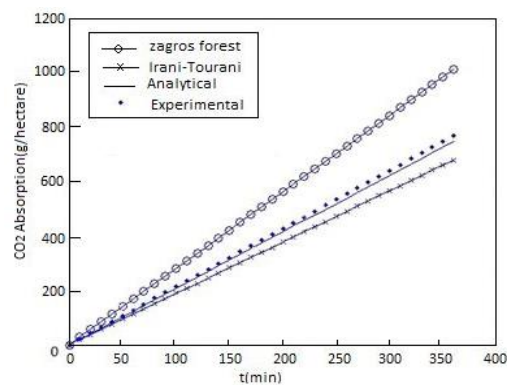


Fig. 5. Upper and lower bounds as suggested green space patterns

## 4. Conclusions

In this paper, the effect of topographic, atmospheric and building factors on the CO<sub>2</sub> emissions from Iranian Aluminum Company located in Arak city in the atmospheric boundary layer was investigated. We now mention the important results of the research:

By applying the effects of buildings, more regions of the city can be experience critical concentrations. The rate of CO<sub>2</sub> accumulation is measured around the plant after reaching critical mass to the surface of the earth in the transient state. This rate is calculated based on two assumptions: (1) The reaction of OH and CO radicals and (2) The effects of CO<sub>2</sub> deposition on the semi-analytical and experimental methods. These rates are reported as 2.09 and 2.15g/ (hectar.min) respectively. The results indicate that the presence of a southern mountain range leads to a point moving at a maximum concentration of 500 meters ahead. Furthermore, it is possible to consider Zagros and Iranian-Turanian forest patterns as upper and lower limits of the control volume. Also, the required region of 100 hectares is estimated.

## 5. References

- Craoto G, "Numerical simulations of the atmospheric boundary layer", Universita degli Studi di Cagliari: Cagliari, Italy, 2007.
- Stockie John M, "The mathematics of atmospheric dispersion modeling", Siam Review 53, no. 2, 2011, 349-372.
- Rigby M, "Air pollution climatology using meteorological reanalysis", Ph.D. thesis, Imperial College London, London, England, 2007.
- Schlichting H, Klaus G, "Boundary-layer theory", Springer Science and Business Media, 2000.