

شبیه‌سازی عددی دوبرعی انتشار آلودگی از دودکش یک مجتمع صنعتی

نیما عموزاده^{۱*}، هادی کارگر شریف‌آباد^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- استادیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

*nima.amoozadeh@gmail.com، ۱۴۶۸۶۹۵۱۸۱، تهران، *

چکیده

آلودگی محیط‌زیست امروزه به یکی از مشکلات اساسی بشر تبدیل شده است. دانستن نحوه انتشار آلودگی پس از خروج از دودکش و عوامل مؤثر بر آن می‌تواند برای مدیریت آلودگی و کاهش اثرات آن کمک‌کننده باشد. در تحقیق پیش رو هندسه‌ای دوبرعی برای شبیه‌سازی دودکش و فضای انتشار آلودگی در نظر گرفته شده است. حل به صورت CFD صورت گرفته است و تأثیر عوامل مختلف مانند طول دودکش، سرعت خروج آلاینده‌ها و سرعت باد بر نحوه انتشار آلاینده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند در دودکش کوتاه‌تر انتشار آلاینده‌ها در نزدیکی سطح زمین بیشتر است و با افزایش ارتفاع دودکش این مقدار کمتر می‌شود. باین‌همه صعود آلاینده‌ها در حین حرکت زیاد نبوده و در حدود ارتفاع دودکش به مسیر حرکتشان ادامه می‌دهند. سرعت باد بیشتر باعث انتقال سریع‌تر آلاینده‌ها می‌گردد و همچنین سرعت خروج آلاینده بر میزان صعود آن‌ها در جو تأثیرگذار است.

کلیدواژگان

انتشار آلودگی، دودکش صنعتی، CFD، تحلیل دوبرعی

Numerical Simulation of Pollutant Dispersion from an Industrial Stack

Nima Amoozadeh^{1*}, Hadi Kargar SharifAbad²

1- Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

2- Strategic Center for Energy and Sustainable Development, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

*1468695181, Tehran, nima.amoozadeh@gmail.com

Abstract

Environmental pollution is one of major ahead problems. To know the manner of dispersion of pollution and effecting parameters on it can be so useful to manage and reduce its effects. In the present work a two-dimensional geometry used to simulate a stack and the dispersion domain. A CFD based approach used to investigate the effect of stack height, pollutant's exit velocity and wind velocity, on the dispersion. Results show that in shorter stack the concentrate of pollutants on earth surface is more than longer one. However pollutants rise is not significant during moving and the maximum concentration is in the stack height limits. The higher wind velocity increases dispersion rate and exit velocity causes more rise of pollutants.

Keywords

Dispersion, CFD, Industrial Stack, Pollution

اثرات بلندمدت آلودگی هوا به صورت تأثیر بر نقشه ژنتیکی بدن جانداران، میزان هوش و فیزیولوژی بدن ظاهر می‌شود. هوای آلوده، آب‌و‌خاک را آلوده ساخته و آب‌زیان و گیاهان را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد که این مواد با قرارگیری در زنجیره غذایی انسان از این طریق نیز آسیب‌رسانی می‌نمایند. حدود ۶۰٪ آلاینده‌های جوی از منابع متمرکز خارج می‌شوند. ترکیب معمول آلاینده‌های جوی شامل گردوغبار، ذرات کوچک‌تر از ۱۰ میکرون، ذرات کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون حاصل از احتراق ناقص سوخت‌ها، اکسیدهای نیتروژن (به علت ترکیب اکسیژن جو با نیتروژن در دماهای بالا)، اکسید گوگرد (به علت سوخت‌های حاوی گوگرد)، مونوکسید کربن (به علت احتراق ناقص)، ازن و سرب است. [۱]

۱- مقدمه

روند سریع صنعتی شدن و انتشار آلودگی‌ها در جو باعث به وجود آمدن مشکلات فراوانی برای محیط‌زیست از قبیل آلودگی هوا، گرمایش جهانی و ... شده است. دانستن نحوه رفتار و انتشار آلاینده‌های جوی که از دودکش تأسیسات صنعتی خارج می‌شوند می‌تواند در مدیریت این آلاینده‌ها و همچنین طراحی اولیه صنایع و مکان‌یابی بهتر آن‌ها نقش مؤثری ایفا کند. حوادث بحرانی سال‌های اخیر در خصوص افزایش میزان آلاینده‌های جوی، ضرورت شناخت بیشتر علل وقوع این حوادث را مطرح ساخته است. افزایش میزان آلاینده‌ها از سطوح مجاز در سطح کوتاه‌مدت و بلندمدت بر محیط‌زیست اثرگذار بوده به طوری که اثرات کوتاه‌مدت آلودگی هوا به صورت بروز و تشدید بیماری‌های چشمی، تنفسی، ریوی، سرطان و ... ظاهر می‌شود.

پرداختند. در این تحقیق به‌روش‌های مطالعه تأثیرات ساختمان‌ها و بناهای شهری در نحوه انتشار آلودگی در نزدیکی سطح زمین پرداخته شد. در این بررسی مشخص شد که انتخاب روش عددی مناسب و شرایط مرزی صحیح در به دست آمدن نتایج قابل قبول بسیار حائز اهمیت است.

در سال ۲۰۱۳ آموریم و همکاران [۹] در یک بررسی عددی سعی کردند تا تأثیر آلودگی درختان در انتشار آلودگی در مناطق شهری را تشریح کنند. آن‌ها در این بررسی میزان تأثیر درختان در انتشار گاز مونوکسید کربن (CO) که توسط بار ترافیکی ایجاد شده بود را بررسی کردند. در این بررسی از مدل اغتشاش $\kappa - \epsilon$ استفاده شد و دو مدل هندسی برای بررسی ایجاد گردید. کیفیت هوا برای دو حالت شهر لیسبون و آویرو به‌عنوان نمونه در نظر گرفته شد و با به‌صورت فرضی با زاویه ۴۵ درجه نسبت به خیابان در نظر گرفته شد. مشخص گردید که وجود درختان به میزان ۱۲٪ انتشار گاز مونوکسید کربن را تقلیل می‌دهد. در آرایش دیگری از درختان این میزان به ۱۶٪ رسید.

در بررسی حاضر سعی شده است با ایجاد هندسه‌ای دوبعدی از دودکش یک مجتمع صنعتی و دامنه انتشار آلودگی به شبیه‌سازی نحوه انتشار آلودگی پرداخته شود. رژیم جریان آشفته در نظر گرفته شده است و باد به‌صورت یکنواخت به دامنه وارد شده است. در این حل که به‌صورت عددی صورت گرفته است، با تغییر برخی پارامترها به بررسی تأثیر آن‌ها مقدرات شده است.

۲- تشریح مسئله

به‌منظور حل عددی دوبعدی انتشار آلودگی سه نوع هندسه در نظر گرفته شده است:

- هندسه ۱: طول دامنه ۲ کیلومتر، ارتفاع دامنه ۵۰۰ متر و ارتفاع دودکش ۷۵ متر
- هندسه ۲: طول دامنه ۲ کیلومتر، ارتفاع دامنه ۵۰۰ متر و ارتفاع دودکش ۲۵ متر
- هندسه ۳: طول دامنه ۱۲ کیلومتر، ارتفاع دامنه ۲ کیلومتر و ارتفاع دودکش ۷۵ متر

در این هندسه‌ها عرض دودکش ۶ متر در نظر گرفته شده است و سرعت باد برابر با 13 m/s لحاظ شده است. مش بندی دامنه‌ها با نرم‌افزار گم بیت صورت گرفته است. در هندسه‌های ۱ و ۲ به علت اندازه نسبتاً کوچک دامنه از شبکه‌بندی متراکم‌تر و مربعی استفاده شده است.

در هندسه ۳ دامنه به‌صورت مثلثی مش بندی شده است. در هر دو هندسه لایه‌مرزی‌ای با پنج ردیف مش که ضخامت لایه اول 10cm است، در نظر گرفته شده است تا اثرات لایه‌مرزی دیده شود (شکل‌های ۱ و ۲). سعی شده است در نواحی حساس هندسه شبکه‌بندی متراکم‌تر و در نواحی با گرادبان‌های ملایم رژیم جریان از شبکه‌بندی با تراکم پایین استفاده شود.

در سال ۱۹۸۸ دوری [۲] تلاش کرد تا پایه و اساس مدل‌سازی تجربی پراکنش آلاینده‌های جوی را تشریح کند. در این بررسی وی پارامترهای مختلف تأثیرگذار در نحوه پراکنش آلاینده‌ها را مورد بررسی قرار داد و روابطی تجربی برای برخی خواص به دست آورد.

به علت اهمیت این موضوع تحقیقات فراوانی در زمینه مدل‌سازی انتشار آلاینده‌های جوی صورت گرفته است. در سال ۲۰۰۶ فتحی فر و همکاران [۱] با توسعه کدی که به زبان مطلب نوشته شده بود توانستند انتشار آلودگی از یک منبع متمرکز را مدل کنند. در این بررسی یک شبیه‌سازی سه‌بعدی برای آلاینده‌های خروجی از یک دودکش صنعتی صورت گرفت. این شبیه‌سازی بر پایه مدل چند سلولی^۱ صورت گرفت. نتایج این شبیه‌سازی با نتایج حاصل از مدل‌های موجود سنجیده شد و بهبودهایی ملاحظه گردید. تأثیر پارامترهایی مانند طول دودکش، دمای خروج گازها از دودکش، غلت آلاینده‌ها و ... مورد بررسی قرار گرفت.

محبی و باروتیان در سال ۲۰۰۶ در مقاله‌ای [۳] به بررسی انتشار آلاینده‌ها از کارخانه سیمان کرمان اقدام کردند. در این بررسی آن‌ها به تشریح تجربی و تئوری نحوه انتشار آلاینده‌ها از کارخانه سیمان پرداختند. نتیجه این تحقیق نشان داد که غلت ذرات کمتر از ۱۰ میکرون در فاصله ۵۹۰ تا ۱۳۷۰ متری دودکش از محدوده مجاز بیشتر است. در این بررسی انطباق خوبی بین نتایج تحلیلی و تجربی مشاهده شد.

سنگ و زائو در سال ۲۰۰۸ [۴] طی یک بررسی عددی به شبیه‌سازی جریان و انتشار آلودگی در لایه‌های مرزی جوی شهری پرداختند. آن‌ها در این بررسی مشخصات میدان جریان و انتشار آلودگی را در فرورفتگی‌های دوبعدی و سه‌بعدی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده برای حالت‌های دوبعدی با نتایج حاصل از تونل باد مطابقت خوبی نشان داد ولی برای انطباق نتایج سه‌بعدی کار بیشتری نیاز است.

در سال ۲۰۰۸ فتحی فر و همکاران [۵] مدل تازه‌ای برای شبیه‌سازی انتشار آلودگی از شبکه‌ای از دودکش‌ها توسعه دادند. آن‌ها در این کار با استفاده از کار قبلی نویسندگان مدل چند سلولی را توسعه بخشیدند و قابلیت تغییر سرعت باد و مکان دودکش‌ها به مدل افزوده شد. مدل ساخته شده از رابط کاربری گرافیکی برخوردار گردید و زمینه‌های کاربری آن بیشتر گردید. همچنین تأثیر برخی دیگر از پارامترها نیز بر نحوه انتشار آلودگی مورد مطالعه قرار گرفت.

سال ۲۰۰۹ اسکورزینسکی و همکاران [۶] نرم‌افزاری آموزشی برای مدل‌سازی انتشار آلودگی آماده کردند. در بررسی آن‌ها تغییرات آلاینده‌ها در زمان و فضا به‌جای مقدار نقطه‌ای آن‌ها به دست آمد. در نرم‌افزار نوشته شده قابلیت تغییر متغیرهای مؤثر بر انتشار آلودگی وجود داشت.

در سال ۲۰۱۱ لارت و همکاران [۷] به بررسی تأثیر ارتفاع دودکش در نحوه انتشار آلاینده‌ها در ناحیه پشت ساختمان پرداختند. در این تحقیق یک نمونه ۱:۲۰۰ برای بررسی در تونل باد از هندسه مدنظر ساخته شد و همچنین بررسی CFD نیز صورت گرفت. در این بررسی مشخص شد افزایش ارتفاع دودکش همان تأثیری را دارد که افزایش سرعت گازهای خروجی از دودکش.

در سال ۲۰۱۳ تومیناگا و استاتوپولوس [۸] در یک بررسی به مطالعه روش‌های استفاده شده در مطالعه CFD انتشار آلودگی در محیط‌های شهری

¹ Multiple cell model

دودکش باشد و به‌صورت دیواره لحاظ گردد اما باید در نظر داشت که جریان‌های عبوری از دو سمت بدنه دیواره باعث می‌شوند در عمل این بخش نیز همانند مرز ۱ دارای دیبی هوا باشد.

معادلات حاکم

در این بخش معادلات حاکم بر جریان سیال که اساس روش CFD هستند و در واقع بیان ریاضی قوانین بقا هستند، بیان می‌گردند (بقای جرم، مومنتوم و انرژی):

- جرم یک سیال پایستار است
 - نرخ تغییر مومنتوم برابر با برآیند نیروهای وارد بر یک جزء سیال است (قانون دوم نیوتن)
 - نرخ تغییر انرژی برابر با میزان گرمای داده‌شده و کار انجام‌گرفته روی جزء سیال است (قانون اول ترمودینامیک)
- صورت ریاضی این معادلات به شکل زیر است

معادله پیوستگی (بقای جرم)

با اعمال قانون بقای جرم به یک حجم کنترل به معادله زیر می‌رسیم:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

با در نظر داشتن اینکه

$$\frac{D(\rho)}{Dt} \equiv \frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla(\rho) \quad (2)$$

می‌توان معادله (۱) را به‌صورت زیر نوشت

$$\frac{D(\rho)}{Dt} + \rho(\nabla \cdot \mathbf{V}) = 0 \quad (3)$$

این معادله در دستگاه اولری به‌دست‌آمده است. از دیدگاه لاگرانژی معادله مومنتوم برای یک دستگاه معادلات کارترین که در آن v_x, v_y, v_z نشانگر مؤلفه‌های سرعت در راستاهای x, y, z باشند، به‌صورت زیر است.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (4)$$

معادله مومنتوم

با اعمال قانون دوم نیوتن به سیال عبوری از یک حجم کنترل ثابت به معادله مومنتوم زیر می‌رسیم

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{V}) + \nabla \cdot \rho \mathbf{V} \mathbf{V} = \rho \mathbf{f} + \nabla \cdot \Pi_{ij} \quad (5)$$

با توجه به اینکه

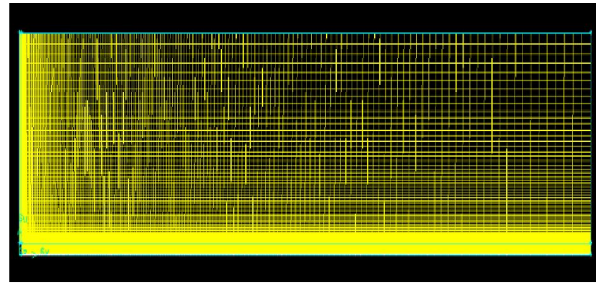
$$\nabla \cdot \rho \mathbf{V} \mathbf{V} = \rho \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} + \mathbf{V} \cdot (\nabla \cdot \rho \mathbf{V}) \quad (6)$$

می‌توانیم بنویسیم

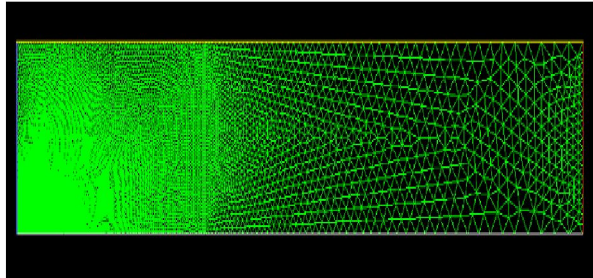
$$\rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = \rho \mathbf{f} + \nabla \cdot \Pi_{ij} \quad (7)$$

عبارت Π_{ij} بیانگر تانسور تنش است و می‌تواند به‌صورت زیر نوشته شود

$$\Pi_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \quad i, j, k = 1, 2, 3 \quad (8)$$



شکل ۱ هندسه شبکه‌بندی شده شماره ۱ مش بندی به‌صورت مربعی و تراکم مش در نزدیکی دودکش و زمین

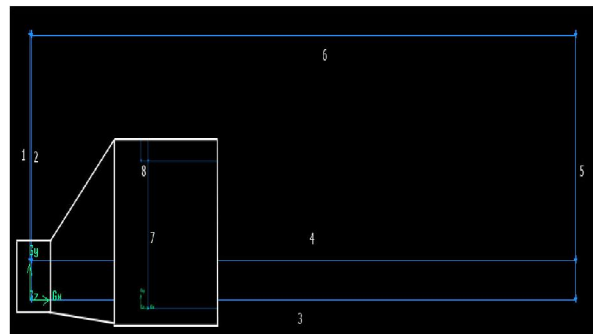


شکل ۲ مش بندی ایجادشده برای هندسه شماره ۳ مش مثلثی و تراکم در نزدیکی دودکش و زمین اطراف آن

شرایط مرزی لحاظ شده برای هندسه ایجادشده به شرح زیر است (اعداد

نشان داده‌شده در شکل ۳):

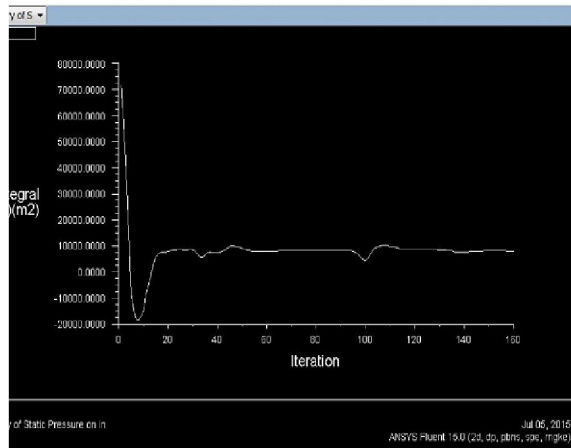
۱. ورودی هوای پیرامون (باد) با سرعت 13 m/s (Velocity Inlet)
۲. فضای بینابین (Interior)
۳. زمین (Wall) با زبری حداکثر نیم متر (Roughness=0.5m)
۴. فضای بینابین (Interior)
۵. خروجی دامنه (Pressure Outlet)
۶. هوای بین‌هایت (Symmetry or pressure far field)
۷. دیواره دودکش (velocity Inlet) - توضیح علت انتخاب این شرط مرزی در ادامه آمده است.
۸. دهانه خروجی دودکش (Velocity Inlet)



شکل ۳ مرزهای هندسه ایجادشده

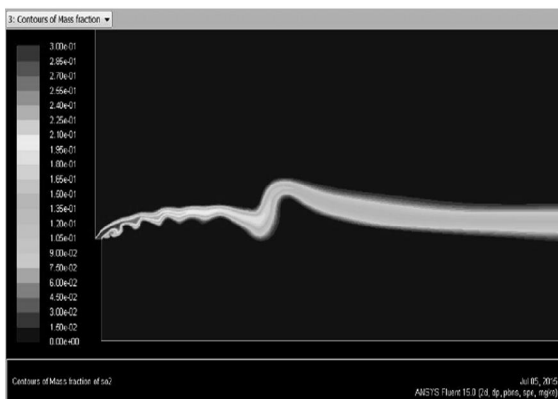
مرزهای ۲ و ۴ به علت بهبود مش بندی و توانایی هدایت تراکم به مکان‌های دلخواه ایجادشده‌اند. شرط مرزی ۷ به‌صورت ورودی سرعت انتخاب‌شده است. هرچند در نگاه اول به نظر می‌رسد که این مرز همان بدنه

به مرز ورودی و کامل شدن حل بیان کرد. به بیان دیگر هنگامی که الگوریتم حل بتواند تأثیر فشار خروجی در ورود را به صورت پایدار احساس کند همگرایی احصاء شده است. همان‌طور که در شکل ۴ قابل مشاهده است حل پس از حدود ۸۰ تکرار همگرا می‌شود.



شکل ۴ همگرایی حل به ثابت شدن فشار در ورودی

پس از حل نتایج به دست آمده در ادامه قابل مشاهده است. در شکل ۵ شمارگر کسر مولی دی‌اکسید کربن در نزدیکی خروجی از دودکش ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که با دور شدن از دودکش دی‌اکسید کربن رقیق‌تر شده و در ناحیه بزرگ‌تری پراکنده می‌شود. البته به نظر می‌رسد در حل حاضر به دلیل صرف‌نظر از نوسانات جریان هوای جو دودهای خروجی نوسان بسیار کمی از خود نشان داده است که اگر نحوه ورود جریان هوا در ورودی به حالت واقعی نزدیک‌تر گردد این رژیم به هم خواهد ریخت.



شکل ۵ شمارگرهای غلظت دی‌اکسید کربن در هندسه شماره ۱

در شکل ۶ خطوط مسیر گازهای خروجی از دودکش مشاهده می‌شود. مشابه می‌شود که اغتشاشاتی در مسیر گازهای خروجی وجود دارد. میزان این اغتشاشات در حالت واقعی حتماً بیشتر از این خواهد بود اما چون در این مورد از آشفتگی‌های جوی صرف‌نظر شده است نتایج به این شکل به دست آمد است.

با جاگذاری معادله (۸) در معادله مشهور ناویر-استوکس به دست می‌آید.

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho f - \nabla p + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \quad (9)$$

اگر جریان تراکم ناپذیر باشد و ضریب لزجت μ ثابت فرض شود معادله به صورت ساده‌شده زیر قابل نوشتن می‌شود

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho f - \nabla p + \mu \nabla^2 V \quad (10)$$

معادله انرژی

با اعمال قانون اول ترمودینامیک به سیال عبوری از یک حجم کنترل ثابت معادله انرژی زیر قابل احصاء است.

$$\frac{\partial E_t}{\partial t} + \nabla \cdot E_t V = \frac{\partial Q}{\partial t} - \nabla \cdot q + \rho f \cdot V + \nabla \cdot (\Pi_{ij} \cdot V) \quad (11)$$

در این رابطه E_t انرژی کل به ازای واحد حجم است و به صورت زیر نوشته می‌شود

$$E_t = \rho \left(e + \frac{V^2}{2} + \text{potential energy} + \dots \right) \quad (12)$$

و e انرژی درونی به ازای واحد جرم است. اگر در معادله فقط انرژی درونی و جنبشی در نظر گرفته شود با تعریف تابعی به نام تابع اضمحلال به شکل زیر

$$\Phi = \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (13)$$

و تعریف آنتالپی به صورت

$$h = e + \frac{p}{\rho} \quad (14)$$

معادله انرژی را می‌توان به شکل زیر به دست آورد

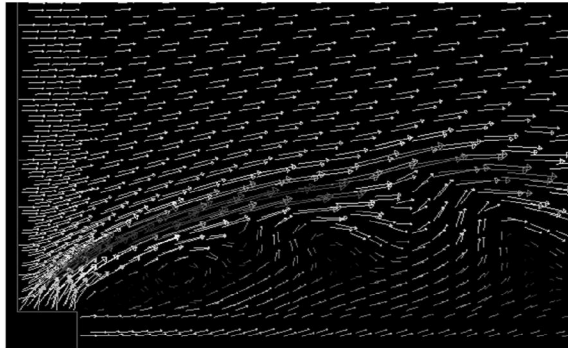
$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \frac{\partial Q}{\partial t} - \nabla \cdot q + \Phi \quad (15)$$

با در نظر داشتن این معادلات و پس از ایجاد مش و آماده‌سازی شرایط مرزی هندسه در نرم‌افزار ANSYS FLUENT فراخوانی می‌شود. در این نرم‌افزار پس از آماده‌سازی مقیاس‌ها و فعال کردن نیروهای جاذبه به بخش انتخاب معادلات لازم برای حل می‌رسیم. مدل آشفتگی انتخاب‌شده برای این حل $k-\epsilon$ است. معادله انرژی به علت اختلاف دمای گازهای خروجی و هوای پیرامون فعال‌شده و گزینه گونه‌ها (Species) نیز فعال می‌گردد. ترکیب گاز خروجی از دودکش به صورت ۳۰٪ دی‌اکسید کربن، ۳۰٪ دی‌اکسید گوگرد، ۳۰٪ دی‌اکسید نیتروژن و ۱۰٪ مونوکسید کربن است. در حل از الگوریتم SIMPLEC استفاده شده است.

۳- نتیجه‌گیری

معیار همگرایی در حل حاضر ثابت شدن فشار در مرز ورودی هوا در نظر گرفته شده است. علت این انتخاب را می‌توان به صورت رسیدن فشار خروجی

در شکل ۹ وکتورپلات جریان خروجی از دهانه دودکش قابل مشاهده است.



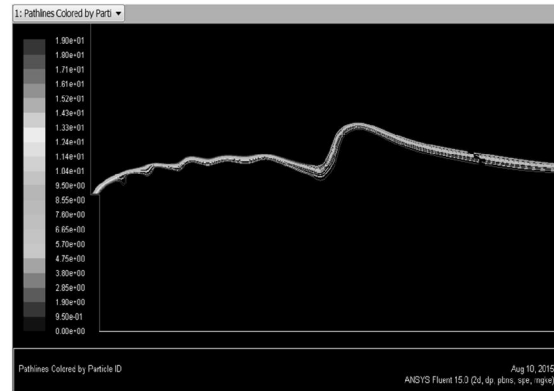
شکل ۹ وکتور پلات در نزدیکی خروجی دودکش

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به بررسی عددی انتشار آلاینده‌های جوی از یک دودکش صنعتی پرداخته شد. در این راستا هندسه‌ای دوبردی برای شبیه‌سازی دودکش و فضای اطراف آن در نظر گرفته شد. پس از ایجاد شبکه‌های مربعی و مثلثی به مقتضای شرایط هندسه و در نظر گرفتن شرایط مرزی حل توسط نرم‌افزار فلونت صورت گرفت و نتایج به دست آمد. نتایج نشان‌دهنده نحوه انتشار آلاینده در راستای پایین‌دست دودکش و همچنین نحوه انتشار غلظت آلاینده در پایین‌دست است. رژیم جریان در دهانه دودکش و همچنین تأثیر ارتفاع دودکش نیز قابل بررسی است.

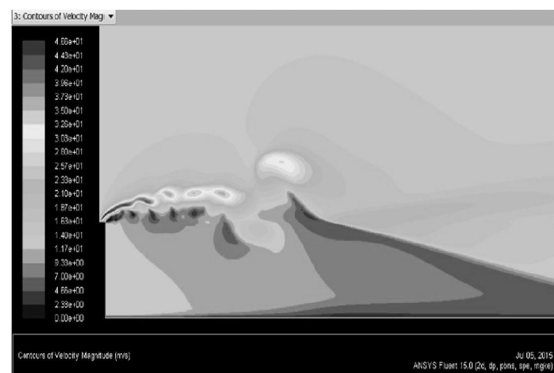
۵- مراجع

1. E. Fatehifar, A. Elkamel, M. Taheri, A MATLAB-Based Modeling and Simulation Program for Dispersion of Multipollutants From an Industrial Stack for Educational Use in a Course on Air Pollution Control, Inc. Comput Appl Eng Educ 14, 2006
2. A. Doury, A Design Basis for the Operational Modeling of Atmospheric Dispersion, J. Loss Prev. Process Ind. 1988
3. A. Mohebbi, S. Baroutian, A Detailed Investigation of Particulate Dispersion from Kerman Cement Plant, Iranian Journal of Chemical Engineering, 2006
4. Yan Vang, Yaping Shao, Numerical simulations of flow and pollution dispersion in urban atmospheric boundary layers, Environmental Modelling & Software, Volume 23, Issue 7, July 2008, Pages 906-921, 2008
5. E. Fathifar, A. Elkamel, A. Alizadeh Osalu, A.Charchi, Developing a new model for simulation of pollution dispersion from a network of stacks, Applied Mathematics and Computation 206, 662-668, 2008
6. E. Skorzinski, M. Shacham, N. Brauner, A Simulation Program for Modelling Pollutant Dispersion for Educational Applications, 19th European Symposium on Computer Aided Process Engineering- ESCAPE19, 2009
7. M. Lateb, C. Masson,... Effect of stack height and exhaust velocity on pollutant dispersion in the wake of a building, International journal of applied engineering, 432-756, 2011



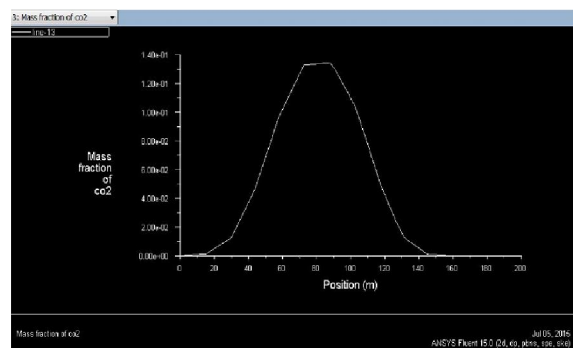
شکل ۶ خطوط مسیر (Path Line) گازه‌های خروجی از دودکش

در شکل ۷ شمارگرهای سرعت نشان داده شده است. نقاط نشان‌دهنده سرعت‌بالا در واقع مراکز گرداب‌های ایجاد شده هستند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در نزدیکی سطح زمین لایه‌مرزی تشکیل شده و رفته‌رفته توسعه می‌یابد.



شکل ۷ شمارگرهای سرعت هندسه ۱

در شکل ۸ نمودار توزیع غلظت دی‌اکسید کربن در فاصله ۵۰۰ متری از دودکش در هندسه ۱ نشان داده شده است. این نمودار به صورت عرضی ترسیم شده است بدین معنی که توزیع غلظت دی‌اکسید کربن در فاصله ۵۰۰ متری از دودکش و در امتداد ارتفاع عمود بر زمین است. مشاهده می‌شود که غلظت حداکثر تقریباً در ارتفاع دودکش رخ می‌دهد و صعود اندکی از دهانه دودکش صورت گرفته است. با کاهش سرعت باد و یا افزودن دبی گازه‌های خروجی از دودکش می‌توان این حداکثر را به ارتفاع‌های بالاتر برد.



شکل ۸ غلظت دی‌اکسید کربن در ۵۰۰ متری دودکش هندسه ۱

8. Y. Tominaga, T. Stathopoulos, CFD simulation of near-field pollutant dispersion in the urban environment: A review of current modeling techniques, Atmospheric Environment, 2013
9. J. H. Amorim, V. Rodrigues, R. Tavares, J. Valente, C. Borrego, CFD modeling of the aerodynamic effect of trees on urban air pollution dispersion, Science of The Total Environment, 541-551, 2013