



مدلسازی سه‌بعدی پخش و صعود ستون دود شناور ناشی از احتراق ناقص در کوره‌ها

مهدی جهانگیری^۱، محسن ثقفیان^۲

دانشگاه صنعتی اصفهان

Mehdi_jahangeri@yahoo.com

چکیده

در این مقاله به مطالعه عددی پخش و صعود ستون دود ناشی از احتراق ناقص در کوره‌ها در حالت سه‌بعدی و غیر دائم پرداخته شده است. هم‌چنین نحوه گسترش ستون دود با زمان، تاثیر فاصله از دودکش روی پخش ستون دود و تاثیر سرعت باد روی صعود ستون دود نیز بررسی شده است. بدلیل اختلاف دمای حدود ۱۰۰ درجه سانتیگراد بین گازهای خروجی از دودکش و هوا نیروی شناوری از طریق وارد کردن شتاب گرانش به مساله در نظر گرفته شده و هم‌چنین از مدل توربولانسی $K-\epsilon$ RNG استفاده شده است. شرایط اتمسفر به صورت تغییر دما و تغییر سرعت باد با ارتفاع در ورودی جریان باد اعمال شده است. میزان کاهش دما با ارتفاع ۱ درجه سانتیگراد به ازاء هر ۱۰۰ متر است که بیانگر اتمسفر خنثی است. از برهم‌کنش بین گازهای خروجی و هوا صرف‌نظر شده است. در جاهایی که گرادیانهای شدید وجود دارد، شبکه ریزتر شده است. برای کاهش زمان محاسبات و بدلیل تقارن هندسه مساله، دامنه حل نصف شده است. در مقایسه نتایج پخش ستون دود بدست آمده از حل عددی با مدل گوسی پخش ستون دود تفاوت‌های کمی مشاهده شده که ناشی از نیمه تجربی بودن رابطه مدل گوسی و فرضیاتی است که برای بدست آمدن آن استفاده شده است. نتایج صعود ستون دود نیز با روابط نیمه‌تجربی مقایسه گردیده‌اند که تطابق خوبی با هم دارند. شبیه‌سازی عددی صعود ستون دود را اندکی بیشتر از مقادیر روابط نیمه‌تجربی و کارهای سایرین پیش‌بینی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: دودکش - صعود و پخش ستون دود - ستون دود شناور - اتمسفر خنثی.

۱- مقدمه

در سالهای اخیر توجه زیادی به محیط زیست شده است و به مشکلاتی از محیط زیست پی برده‌ایم که به علت استفاده از تکنولوژی بسیار پیشرفته‌ای است که برای تامین رفاه انسانها مورد نیاز بوده است. از جمله این مشکلات، اثرات آلودگی هوا است که باعث افزایش بیماریهای تنفسی، کاهش دید و ... میگردد. سه اثر جهانی آلوده‌کننده‌های هوا عبارتند از: اثر گلخانه‌ای به علت وجود دی‌اکسیدکربن، اثر ذرات معلق بر روی تعادل حرارتی زمین - جو و تغییر آب و هوا که از استفاده و اتلاف همه‌جانبه انسان از انرژی ناشی می‌شود. منابع آلوده‌کننده هوا به چهار گروه تقسیم می‌شوند: وسایل نقلیه موتوری، صنایع و کارخانجات، منابع گرمایش خانگی و تجاری و منابع متفرقه مانند سوزاندن زباله و غیره. از جمله منابع آلوده‌کننده هوا که جزء دسته صنایع و کارخانجات می‌باشد، دودکش‌ها هستند. مواد خروجی از دودکش‌ها حاصل فعالیت‌های احتراقی در کوره‌ها هستند. کوره فضای محدودی است که در آن با سوزاندن سوخت، حرارت تولید می‌شود. به‌علت وجود هوای بسیار زیاد و یا بسیار کم، درجه حرارت خیلی پایین، کم بودن زمان احتراق و یا به علت تمام موارد فوق، احتراق ناقص انجام شده، در نتیجه مواد خروجی ثانوی از طریق دودکش هوا را آلوده می‌کنند. این مواد شامل ذرات نسوخته کربن، مونوکسید کربن، خاکستر و گازهای ناشی از

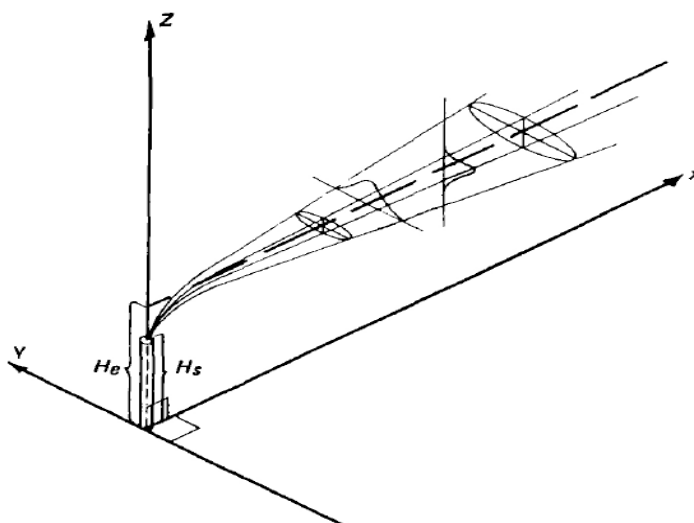
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استادیار مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

ناخالصی سوخت است. کونینگ و مختارزاده [۱] خروج ستون دود شناور از یک دودکش چند خروجی در لایه مرزی اتمسفری را بررسی کردند. اساس این بررسی حل معادلات ممنوم و انرژی بود. برای مش بندی ناحیه از نرم افزار $CFX4$ استفاده کردند. دمای ستون دود 100 درجه سانتیگراد بیشتر از دمای محیط در نظر گرفته شد. مدل توربولانسی مورد استفاده $k-\epsilon$ بود. نتایج دودکش چند خروجی با نتایج دودکش تک خروجی تحت شرایط خروجی یکسان برای دبی، ممنوم و درجه حرارت مقایسه گردید. تفاوت‌های بارزی در میدانهای سرعت و دما مشاهده کردند. اثر تغییر دمای اتمسفر با ارتفاع را بررسی نکردند. براون و فلچر [۲] به بررسی پخش دود و همچنین اثر تقطیر روی صعود دود ناشی از دودکش های یک پالایشگاه پرداختند. برای شبکه بندی ناحیه از نرم افزار $CFX4$ و $CFX5$ استفاده کردند. اثرات شناوری را در نظر نگرفتند. برای سرعت از پروفیل لگاریتمی استاندارد استفاده کردند. مدل توربولانسی مورد استفاده $k-\epsilon$ بود. اثر تغییر دمای اتمسفر با ارتفاع را بررسی نکردند. سامپایو، جونینور و لاپا [۳] به بررسی پخش آلودگی های ناشی از نیروگاه هسته ای در مجاورت نیروگاه پرداختند. اساس این بررسی حل معادلات ممنوم، انرژی و غلظت بود. سه حالت مختلف را بررسی کردند: بدون هیچگونه مانع یا ساختمان در اطراف نیروگاه و اختلاف دمای صفر بین آلاینده ها و دمای محیط، به همراه مانع یا ساختمان در اطراف نیروگاه و اختلاف دمای صفر بین آلاینده ها و دمای محیط، به همراه مانع یا ساختمانی در اطراف نیروگاه و اختلاف دمای غیر صفر بین آلاینده ها و دمای محیط. فاتحی فر و علیزاده [۴] برای مدلسازی پخش دود از یک دسته دودکش از نرم افزار متلب استفاده کردند. نمونه ی مورد بررسی یک پالایشگاه روغن در تبریز بود. اساس مدل آنها معادله بقای جرم بود. مدل برای شرایط جوی مختلف، موقعیت مکانی مختلف دودکش و پارامترهای مختلف دودکش ارائه شد. مقدار سرعت هوا بر حسب ارتفاع و شرایط اتمسفر تعیین شد. غلظت آلودگی را در سطح زمین بر حسب زوایای وزش باد مختلف بدست آوردند. اثر سرعت باد و دمای محیط را روی پخش دود بررسی کردند. اثر تغییر دمای اتمسفر با ارتفاع را بررسی نکردند. در این مقاله به بررسی پخش و صعود دود خروجی از دودکش با در نظر گرفتن اثر تغییر دمای اتمسفر با ارتفاع خواهیم پرداخت.

۲- پخش دود

یک منبع نقطه‌ای مانند شکل ۱ را در نظر بگیرید. در این شکل، z جهت عمودی و x امتداد حرکت ستون دود به طرف پایین دست را نشان می‌دهد. با بررسی ستون دود در زمان‌های مختلف خواهیم دید که شکل توده دود غیر یکنواخت است، یعنی در مسیر حرکت باد با حرکات نامنظم و متلاطم گسترش می‌یابد و به صورتی است که شکل نشان می‌دهد.



شکل ۱ - توزیع نرمال در ستون دود به سمت پایین دست

چندین مدل برای پیش‌بینی غلظت آلودگی منتشره از یک تک منبع در پایین‌دست جریان باد وجود دارد. تابع گوس یکی از مدل‌های نحوه انتشار ستون دود از یک دودکش است و برای نمایش ریاضی حرکات فیزیکی ستون دود گویا می‌باشد. در مدل گوس، چنین فرض می‌شود که غلظت مواد آلاینده در جهت افقی و عمودی از توزیع نرمال پیروی می‌کند. در شکل ۱ توزیع نرمال در جهت افقی و عمودی نشان داده شده است [۵]. برای محاسبه انتشار ستون دود معادله‌ی گوس به فرم زیر است:

$$c(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi U \sigma_z \sigma_y} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{y-H}{\sigma_y}\right)^2\right) \times \left\{ \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right) \right\} \quad (1)$$

که در آن C غلظت آلاینده بر حسب گرم بر متر مکعب، Q دبی جرمی خروجی از منبع بر حسب گرم بر ثانیه، U سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه، σ_y و σ_z به ترتیب ضرایب پخش در جهات z و y بر حسب متر و H ارتفاع موثر دودکش بر حسب متر می‌باشد.

ضرایب پخش σ_y و σ_z در واقع معیار انحرافات توزیع عمودی و افقی گوس از حالت استاندارد هستند به طوری که ۶۸ درصد مساحت زیر منحنی نرمال گوس در محدوده‌ی $\pm \sigma$ قرار گرفته است. این ضرایب علاوه بر اینکه تحت تاثیر فاصله تا پایین‌دست قرار می‌گیرند، به طور پیچیده‌ای نیز به شرایط جوی وابسته هستند و به شکل زیر محاسبه می‌شوند [5]:

$$\sigma_z = ax^b + c \quad (2)$$

$$\sigma_y = mx^n$$

که در آن x فاصله از دودکش بر حسب کیلومتر می‌باشد. a, b, c, m و n مقادیر ثابتی هستند که به شرایط پایداری اتمسفر بستگی دارند و برای حالت اتمسفر خنثی به ترتیب برابر ۴۴/۵ و ۰/۵۱۶ و -۱۳ و ۶۸ و ۰/۸۹۴ می‌باشند. اگر چه معادله مدل گوسی مبتنی بر تئوری و داده‌های اندازه‌گیری شده است ولی باید در نظر داشت که یک مدل بسیار ساده است و تخمین‌های آن را با احتیاط بکار گرفت.

۳- صعود دود

موادی که از یک دودکش بر می‌خیزند فوراً در جهت افقی حرکت نمی‌کنند بلکه مقداری در هوا بالا می‌روند. این صعود دود به بلندی دودکش یک ارتفاع اضافی Δh را می‌افزاید. بنابراین $h_s + \Delta h$ ارتفاع مناسبی است که برای محاسبات پراکندگی آلاینده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و ارتفاع موثر دودکش H، می‌نامند. در حالت خنثی پارامترهای شناوری F و سرعت باد U، اثر عمده‌ای روی صعود ستون دود دارند.

بریگز [۶] پیشنهاد می‌کند که از معادله‌ی زیر برای محاسبه‌ی Δh به عنوان تابعی از موقعیت x، استفاده گردد:

$$\Delta h = 1.6 \frac{F^{\frac{1}{3}} x^{\frac{2}{3}}}{U} \quad (3)$$

در رابطه اخیر مقدار F به فرم زیر محاسبه می‌گردد:

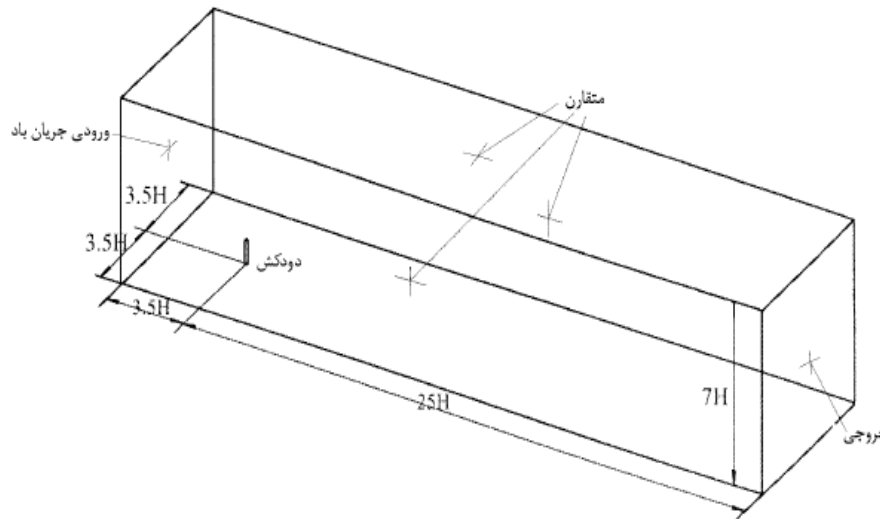
$$F = g V_s \left(\frac{D}{2}\right)^2 \frac{T_s - T_a}{T_a} \quad (4)$$

که در آن g شتاب گرانش بر حسب متر بر مجذور ثانیه، V_s سرعت گاز خروجی از دودکش بر حسب متر بر ثانیه، D قطر دودکش بر حسب متر، T_s دمای گاز خروجی از دودکش بر حسب کلوین و T_a دمای محیط بر حسب کلوین می‌باشد. فی و همکاران [۷] عدد ثابت ۱/۳۲ را برای معادله‌ی (۳) پیشنهاد داده‌اند.

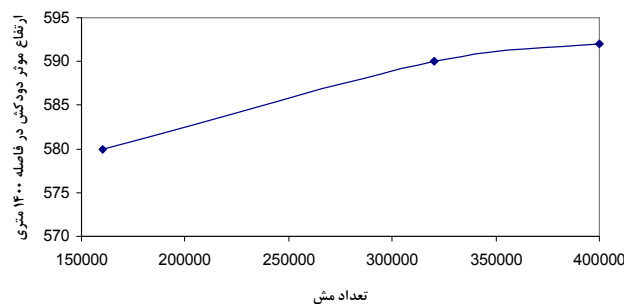
صعود ستون دود به عنوان تابعی از موقعیت x ، باید در یک جایی قطع گردد. هیچ‌گونه توافقی برای تعیین این موقعیت وجود ندارد. بریگز [۸] توصیه می‌کند که از معادله‌ی (۳) تا فاصله‌ی $x = 10H_s$ استفاده گردد.

۴- مدلسازی و حل عددی

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد دودکش با ابعاد مشخص، متناسب با حوزه‌ی حل در مکانی مناسب داخل میدان حل قرار داده شده و سپس میدان محاسباتی مورد نظر شبکه‌بندی گردیده است. از آنجایی‌که علاوه بر شبکه‌بندی، بهینه‌سازی آن نیز بسیار مهم است، یعنی اندازه‌ی شبکه تأثیری بر جواب‌های شبیه‌سازی نداشته باشد، ابتدا شبکه درشت و با سلول‌های کم انتخاب شد و سپس تا جایی‌که جواب‌ها مستقل از شبکه شوند، سلول‌ها ریز و فشرده شدند که در نمودار ۱ نشان داده شده است. برای آنالیز پخش و صعود دود خروجی از دودکش در مقیاس اتمسفریک در جریان عرضی هوا از دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شد. شرایط اتمسفر به‌عنوان شرط اولیه به مساله اعمال گردید.



شکل ۲- دامنه‌ی حل

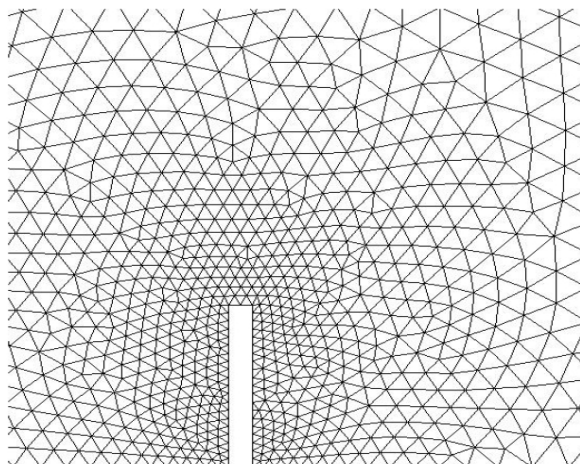


نمودار ۱- بررسی استقلال جواب‌ها از شبکه

۴-۱- دامنه‌ی محاسباتی

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد دامنه‌ی حل $28/5H$ طول، $7H$ ارتفاع و $7H$ عرض دارد که H ارتفاع دودکش است. در این مقاله از طول 200 متر برای دودکش استفاده شده است [۱]. ارتفاع دامنه‌ی حل به‌گونه‌ای انتخاب شده است که

صعود ستون دود متأثر از شرط مرزی بالای دامنه‌ی حل نباشد. دودکش به‌فاصله‌ی $3/5H$ از ورودی جریان باد قرار دارد. قطر دودکش ۱۲ متر در نظر گرفته شده است. برای شبکه‌بندی دامنه‌ی حل از شبکه بی‌سازمان^۱ استفاده شده است که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد. پس از حل در جاهایی که گرادیان غلظت شدید بود شبکه را ریزتر کردیم که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد.



شکل ۳- شبکه بی‌سازمان



شکل ۴- ریزتر کردن شبکه در نواحی دارای گرادیان غلظت شدید

۲-۴- شرایط مرزی

در ورودی جریان باد از پروفیل لگاریتمی استاندارد $(U = 0.7689 \ln(\frac{z}{0.3}))$ برای سرعت استفاده شده است. مقدار کاهش دما با ارتفاع در هر ۱۰۰ متر معادل ۱ درجه سانتی‌گراد است که بیانگر اتمسفر خنثی است. دمای محیط در سطح زمین برابر ۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. برای انرژی جنبشی توربولانس در ورودی جریان باد از پروفیل یکنواخت $(k = 1.19 m^2 s^{-2})$ و برای نرخ استهلاک در ورودی جریان باد نیز از پروفیل یکنواخت $(\epsilon = 0.00266 m^2 s^{-3})$ استفاده شده است. سرعت و دمای گاز خروجی از دودکش به‌ترتیب ۲۰ متر بر ثانیه و ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد است. همچنین برای انرژی جنبشی توربولانس و نرخ استهلاک در خروجی دودکش از معادله (۵) استفاده شده است [۱]:

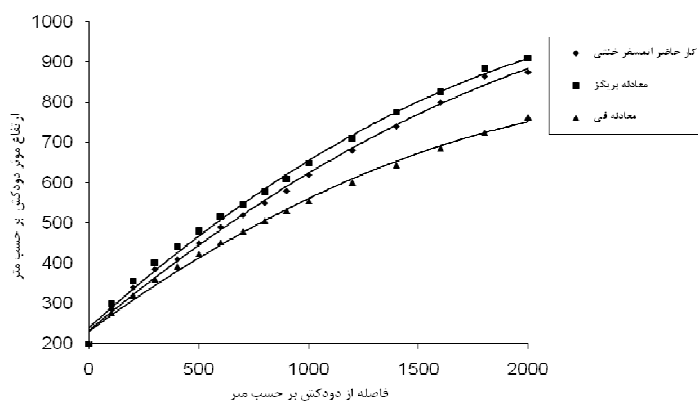
$$k \approx 0.002w^2, \epsilon = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{0.1D} \quad (5)$$

¹ UNSTRUCTURE

در رابطه‌ی اخیر w سرعت گاز خروجی از دودکش و D قطر دودکش است. شرط مرزی کف دامنه‌ی حل و دیواره‌ی دودکش، دیواره‌ی جامد در نظر گرفته شده است. برای بالای دامنه‌ی حل شرط متقارن^۱ در نظر گرفته شده است تا جریان جرمی عبوری از مرز بالایی صفر باشد. در خروجی دامنه‌ی حل از شرط مرزی جریان خروجی^۲ استفاده شده است، زیرا که هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد خروجی جریان نداریم.

۳-۴- نتایج

همان‌طور که از نمودار ۲ نتیجه گرفته می‌شود ارتفاع موثر بدست‌آمده از حل عددی بین ارتفاع موثر حاصل از روابط بریگز و فی است. جوابهای حاصل از حل عددی انجام شده باید منطبق بر روابط نیمه تجربی باشد که به دلایلی همچون نیمه تجربی بودن روابط و خطای ناشی از مدلسازی تطابق کامل وجود ندارد. دلیل دیگر تفاوت‌هایی که بین نتایج حل عددی و روابط بریگز و فی مشاهده می‌گردد این است که برای دستیابی به روابط بریگز و فی ساده‌سازی‌هایی انجام شده است. بطور مثال برابر قرار دادن ρc_p مربوط به گاز خروجی از دودکش و هوا که با این استدلال که بیشتر گازهای خروجی از دودکش نیتروژن، بخار آب و دی‌اکسیدکربن هستند و تفاوت دماهای مطلق نیز چندان زیاد نیست این ساده‌سازی را توجیه کردند. هم‌چنین ارتفاع موثر بدست‌آمده از حل عددی به رابطه‌ی بریگز نزدیکتر است که نشان می‌دهد رابطه‌ی بریگز برای حالت سه‌بعدی بهتر می‌تواند صعود ستون دود را پیش‌بینی کند.

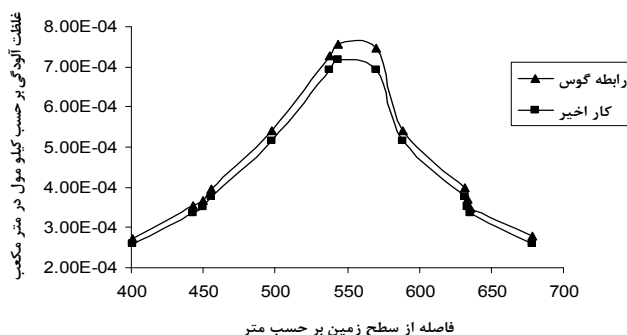


نمودار ۲- ارتفاع موثر بر حسب فاصله از دودکش

در نمودار ۳ غلظت ستون دود حاصل از کار عددی اخیر در فاصله‌ی ۷۰۰ متری از دودکش با رابطه گوس مقایسه شده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی این هستند که مقدار ماکزیمم غلظت آلاینده‌ها حاصل از کار عددی اخیر کمی کمتر از رابطه گوس می‌باشد.

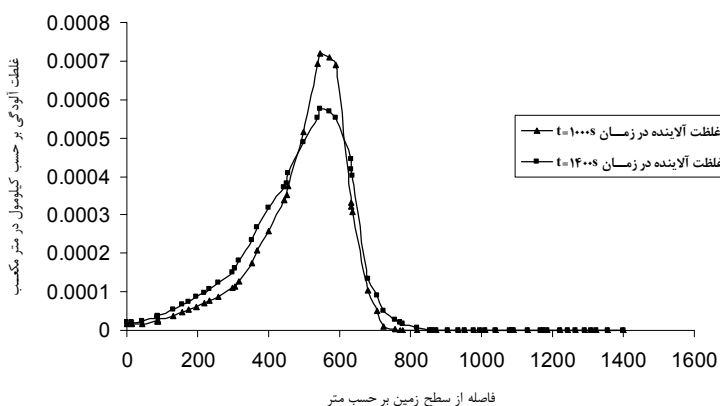
¹ SYMMETRY

² OUTFLOW



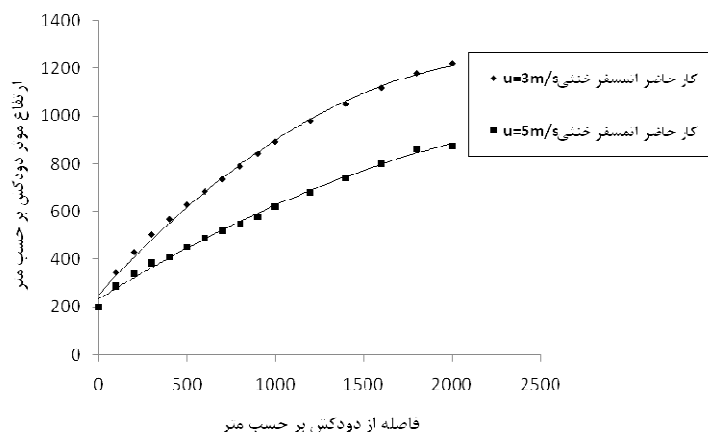
نمودار ۳- مقایسه غلظت ستون دود حاصل از کار عددی اخیر با رابطه گوس

در نمودار ۴ غلظت ستون دود در فاصله‌ی ۷۰۰ متری دودکش در دو زمان مختلف با هم مقایسه شده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی این هستند که علاوه بر اینکه توزیع غلظت در جهت عمود بر مسیر وزش باد به صورت منحنی گوس است، ابعاد ستون دود تابع زمانی است که ستون دود از منبع حرکت کرده است. ستون دود در فاصله‌ی زمانی کوتاهتر غلظت بالاتری دارد و چون گسترش آن کمتر است، شکل آن به صورت منحنی سینوسی باریکتری است. با گذشت زمان ستون دود با سطح وسیع‌تری برخورد می‌کند و غلظت آلاینده‌ها هم پایین خواهد آمد. همچنین حداکثر غلظت آلاینده‌ها در محور مرکزی ستون دود رخ می‌دهد.



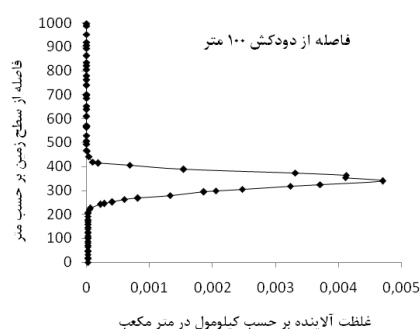
نمودار ۴- اثر زمان روی پخش ستون دود

نمودار ۵ تاثیر سرعت باد روی صعود ستون دود را نشان می‌دهد. همان‌طور که تجربه و ادراک نیز حکم می‌کند در بادهای ملایم، ستون دود بیشتر از حالتی که باد قوی وجود داشته باشد بالا خواهد رفت. به‌طور مشخص ارتفاع صعود با توانی از عکس سرعت باد تناسب دارد.

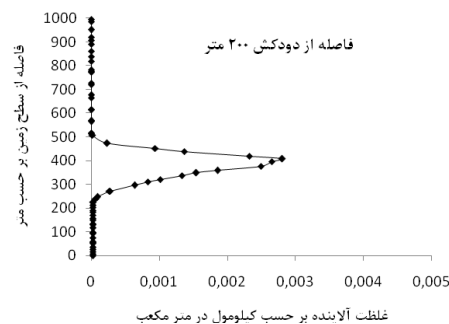


نمودار ۵- اثر سرعت باد روی صعود ستون دود

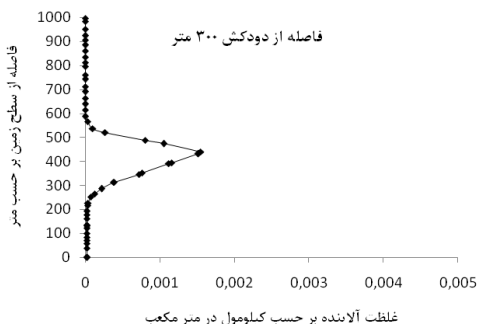
نمودار ۶ تاثیر فاصله از دودکش را روی نحوه‌ی پخش ستون دود نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که با دور شدن از دودکش پهنای ستون دود بیشتر می‌گردد که این امر نشان‌دهنده‌ی گسترش ستون دود می‌باشد. هم‌چنین ارتفاعی که ماکزیمم غلظت در آن رخ می‌دهد نیز افزایش می‌یابد.



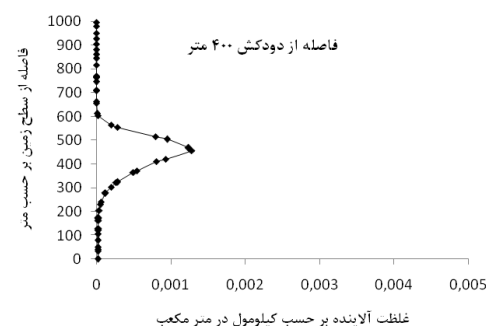
فاصله از دودکش ۱۰۰ متر



فاصله از دودکش ۲۰۰ متر



فاصله از دودکش ۳۰۰ متر



فاصله از دودکش ۴۰۰ متر

نمودار ۶- تاثیر فاصله از دودکش روی صعود و پخش ستون دود

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی عددی پخش و صعود ستون دود شناور خروجی از یک دودکش سه‌بعدی در حالت اتمسفر خنثی و با صرف‌نظر از برهم‌کنش بین گاز خروجی از دودکش و هوا و استفاده از روش $K-\epsilon$ RNG پرداختیم. تاثیر سرعت باد و



انجمن احتراق ایران

FCCI2010- 6147

سومین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - اسفند ماه ۱۳۸۸



دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشکده مهندسی هوافضا

فاصله از دودکش نیز روی صعود و پخش ستون دود بررسی گردید. تفاوت‌های کمی بین نتایج عددی و نتایج روابط نیمه‌تجربی مشاهده گردید که عمدتاً بدلیل ساده‌سازیهایی انجام شده در بدست آمدن روابط نیمه‌تجربی و یا خطاهای ناشی از مدل‌سازی است، زیرا که نمی‌توان تمام شرایط اتمسفر از جمله شب یا روز بودن و ... را مدل‌سازی کرد.

مراجع

- 1- C.S. Konig, M.R. Mokhtarzadeh-Dehghan, "Numerical study of buoyant plumes from a multi-flue chimney released into an atmospheric boundary layer ", *Atmospheric Environment* 36, pp3951–3962, 2002.
- 2- G.j. Brown and D.F.Fletcher, "Cfd prediction of odour dispersion and plume visibility for alumina refinery calciner stacks ", *Third international conference on CFD in the materials and process industries*, 2003.
- 3- Paulo A. B. de Sampaio, Milton A. G. Junior and Celso M. F. Lapa, "A CFD approach to the atmospheric dispersion of radionuclide's in the vicinity of NPPS ", *International Nuclear Atlantic Conference*, 2007.
- 4- E. Fatehifar, 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*, 2008.
- ۵- م. عرفان منش، م. افیونی. "آلودگی محیط زیست: آب، خاک، هوا". انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، چاپ دوم، ۱۳۷۹.
- 6- G.A. Briggs, "Some recent analyses of plume rise observations " *Academic Press*, New York, 1971.
- 7- J.A. Fay, M. Escudier and D.P. Hoult, " A Correlation of field observations of plume rise ", *J.Air pollution control assoc.*, vol. 19, pp. 585-590, 1969.
- 8- G.A. Briggs, " Plume rise model compared with observations " *J.Air pollution control assoc.*, vol. 15, pp. 433-438, 1965.