

# ارزیابی ضرایب انتشار $CO$ ، $SO_2$ و $NO_x$ برای مشعل‌های گازی واحدهای فرآورش نفت و گاز

تاریخ دریافت: ۸۸/۸/۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۲/۱۸

داود کاه‌فروشان<sup>۱</sup>، اسماعیل فاتحی‌فر<sup>۱\*</sup>، آرام زویداوی<sup>۲</sup>، نعمت‌اله جعفرزاده حقیقی‌فرد<sup>۳</sup> و سیدمهدی هدایت‌زاده<sup>۱</sup>

۱- تبریز، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی شیمی، مرکز تحقیقات مهندسی محیط زیست

۲- خوزستان، مرکز علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی

۳- اهواز، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور

Fatehifar@sut.ac.ir

پژوهش‌نفت

سال بیست و یکم

شماره ۶۷

صفحه ۴۹-۳۹، ۱۳۹۰

قطعیتهایی معادل  $27/5$ ،  $34/3$  و  $36/3$ ٪ تعیین شد. مقایسه این ضرایب انتشار با ضرایب انتشار ارائه شده در مراجع، شامل ضرایب انتشار سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (EPA) و انجمن نفت آمریکای لاتین (ARPEL) نشان داد که هر دو مرجع برای تخمین میزان انتشار آلاینده‌ها به‌خصوص در مورد آلاینده‌های  $NO_x$  و  $CO$  دارای خطای بالایی هستند. برای تعیین ضرایب واقعی مشعل‌های گازی، مطالعات دقیق در خصوص بررسی تأثیر شرایط محیطی بر بازده مشعل‌ها همراه با اندازه‌گیری آلاینده‌ها از طریق مشابه‌سازی مشعل‌های گازی، واقعی در آزمایشگاه مورد نیاز است.

## چکیده

محاسبه ضرایب انتشار یکی از روش‌های ساده و کم هزینه برای ارزیابی میزان آلاینده‌گی حاصل از منابع آلاینده می‌باشد. در بین منابع آلاینده، ضرایب انتشار مشعل‌ها با خطای بالایی همراه است. چراکه میزان احتراق در مشعل‌ها به‌خصوص در حالت‌های اضطراری نامشخص بوده و اطلاعات دقیقی در مورد بازده احتراق واقعی مشعل‌ها در دسترس نیست. مقاله حاضر به منظور ارزیابی ضرایب انتشار سه آلاینده  $CO$ ،  $SO_2$  و  $NO_x$  در مشعل‌ها انجام شده است. در این تحقیق، از روش محاسبه معکوس که بر اساس اندازه‌گیری محیطی همراه با مدل‌سازی استوار است، برای تخمین ضرایب انتشار آلاینده‌های گازی مورد نظر برای یک نمونه مشعل گازی در یکی از واحدهای موجود در مناطق نفت‌خیز جنوب ایران استفاده گردید. ضرایب انتشار متوسط آلاینده‌های  $CO$ ،  $SO_2$  و  $NO_x$  برای این مشعل نمونه به ترتیب  $1/07$ ،  $0/37$  و  $0/168$  lb/MMBtu با عدم

واژه‌های کلیدی: ضرایب انتشار، واحدهای فرآورش نفت و گاز، مشعل‌های گازی، مدل‌سازی آلودگی هوا

## مقدمه

از مشعل‌های گازی در واحدهای تولید نفت و گاز به منظور دفع ایمن گازهای زائد به‌خصوص در شرایط اضطراری و تعمیرات اساسی واحدها استفاده می‌گردد [۱]. احتراق گازهای زائد در مشعل‌ها، آلاینده‌های گازی زیادی از جمله  $CO$ ،  $NO_x$ ،  $CH_4$ ،  $SO_2$  و  $CO_2$  منتشر می‌کند که همگی برای محیط‌زیست و سلامتی انسان خطرناک هستند [۲]. در مشعل‌های گازی برخلاف سایر منابع احتراقی، اندازه‌گیری مستقیم آلاینده‌ها به سختی امکان‌پذیر است [۳]. هرچند در سال‌های اخیر برخی روش‌های سنجش از راه دور برای تخمین میزان انتشار آلاینده‌ها از مشعل ارائه شده، ولی این روش‌ها پر هزینه بوده و نیاز به تجهیزات خاص دارند [۴]. لذا در شرایط کنونی، یکی از راه‌های تخمین میزان انتشار آلاینده‌ها در این منابع، استفاده از ضرایب انتشار آلاینده‌ها است [۵].

در حال حاضر ضرایب انتشار ارائه شده در مراجع برای مشعل‌های گازی بر اساس اطلاعاتی است که نخستین بار توسط EPA در دهه ۸۰ از طریق یک دسته مطالعات پایلوت تعیین شده است. برای تعیین ضرایب انتشار مشعل‌ها به دلیل مشکل دسترسی به بالای مشعل، اندازه‌گیری در شرایط واقعی نبوده و نیز از خوراک‌های مصنوعی بسیار ساده استفاده شده است. بنابراین، خطاهای زیادی در تعیین ضرایب انتشار وجود دارد. به‌عنوان نمونه، یکی از عوامل موثر در ضریب انتشار مشعل‌ها بازده است که در مشعل‌های واقعی به دلیل سوختن در فضای باز، بازده می‌تواند از وزش باد تأثیر پذیرد. در مطالعات انجام گرفته توسط EPA با چشم پوشی از تأثیر باد، بازده مشعل‌ها ۹۸٪ تعیین گردیده است [۶]. در تحقیقاتی که به‌وسیله مشاورین تحقیقاتی نفت و گاز ایالت آلبرتا کانادا در مورد مشعل‌های گازی مناطق نفت و گاز آلبرتا صورت گرفت، مشخص شد بازده‌های احتراق در مشعل‌ها به شدت با افزایش سرعت باد از ۱ تا ۶ m/s کاهش می‌یابد. چنانچه سرعت باد به مقادیر بالای ۶ m/s افزایش یابد، بازده احتراق به مقادیر بین ۱۰ تا ۱۵٪ خواهد رسید. این امر ناشی از نسبت اختلاط استوکیومتری پایین در مشعل‌ها به دلیل وزش باد است. نتایج این مطالعه نشان داد در

صورت وزش باد با سرعت حدود ۴ m/s، مقدار متوسط بازده احتراق در مشعل‌ها حدود ۶۸۰۵٪ خواهد بود [۷]. مقاله حاضر به منظور ارزیابی ضرایب انتشار سه آلاینده  $CO$ ،  $SO_2$  و  $NO_x$  در مشعل‌ها انجام شده است. بدین منظور ضرایب انتشار آلاینده‌های گازی در یک مشعل گازی نمونه در مناطق نفت‌خیز جنوب با استفاده از روش محاسبه معکوس بر اساس اندازه‌گیری محیطی و روش مدل‌سازی تعیین گردید. ضرایب انتشار تعیین شده با ضرایب انتشار مراجع مختلف از جمله ضرایب انتشار ارائه شده برای مشعل‌ها توسط آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا مقایسه گردید تا میزان دقت این ضرایب انتشار در کاربردهای مشابه مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین از طریق ضرایب انتشار محاسبه شده، تأثیر برخی شرایط عملیاتی بر عملکرد احتراق در مشعل نمونه بررسی شد.

## ضرایب انتشار مشعل‌های گازی

ضریب انتشار عبارت است از متوسط آماری میزان انتشار آلاینده به هوا به عنوان نتیجه‌ای از برخی فعالیت‌ها نظیر احتراق یا تولید در واحد صنعتی تقسیم بر میزان فعالیت مورد نظر [۸]. با توجه به این تعریف، ضریب انتشار نماینده‌ای از میزان انتشار حاصل از یک منبع آلاینده معین است که در ارتباط با میزان آلاینده ورودی به هوا از آن منبع و فعالیت مرتبط با آن در نظر گرفته می‌شود. این ضرایب معمولاً به صورت وزن آلاینده تقسیم بر واحد وزن، حجم یا دوره فعالیت انتشار آلاینده بیان می‌شوند. در بیشتر حالت‌ها این ضرایب، متوسط ریاضی از همه اطلاعات در دسترس قابل اعتماد هستند که می‌توانند به عنوان معیاری از انتشار آن منبع آلاینده مورد نظر در درازمدت در نظر گرفته شود.

رابطه کلی برای تخمین انتشار با استفاده از ضریب انتشار به صورت معادله ۱ می‌باشد.

$$E = A \times EF \times (1 - ER/100) \quad (1)$$

که در این رابطه E میزان انتشار، A میزان فعالیت، EF ضریب انتشار و ER بازده کاهش انتشار کلی به صورت درصد می‌باشد. ER در ارتباط با بازده حذف یا کاهش دستگاه‌های کنترل آلودگی موجود در محل تعریف می‌شود.

به ذکر است این ضرایب انتشار بر حسب واحد lb/MMBtu ارائه شده که برای تبدیل به واحد فعالیت lb/MMscf گاز سوخته شده، باید مقدار آن را در ارزش حرارتی گاز سوختی معادل ۱۰۲۰ Btu/scf ضرب نمود. همان گونه که مقادیر جدول ۲ نشان می دهد، کد دقت برای ضرایب انتشار ارائه شده توسط EPA حرف B می باشد. یعنی ممکن است ضرایب انتشار برای انواع دیگری از منابع آلاینده مقادیر دقیقی از تخمین انتشار را ارائه ندهد. همچنین اختلاف فاحشی بین ضرایب انتشار ارائه شده توسط EPA و ARPEL مشاهده می گردد. به طوری که کمترین اختلاف نسبی مربوط به CH<sub>4</sub> با ۱۲/۵٪ و بیشترین اختلاف مربوط به THC با ۹۷٪ می باشد.

### مواد و روش ها

#### مشخصات مشعل گازی نمونه

مشعل نمونه برای تعیین ضرایب انتشار گازی از میان مشعل های گازی یکی از واحدهای بهره برداری نفت و گاز در مناطق نفت خیز جنوب انتخاب گردید. مشعل منتخب از نوع کوتاه بوده و به دلیل ارتفاع کم آلاینده ها، کمترین پخش را داشت. در نتیجه تعیین غلظت آلاینده با دقت بالا مقدور گردید.

هر ضریب انتشار یک کد دقت یا درجه<sup>۱</sup> دارد. این سیستم درجه توسط EPA ارائه شده است. بنابراین ممکن است مستقیماً برای یک کشور خاص قابل استفاده نباشد. هنگام کاربرد ضرایب انتشار باید درجه آن معین باشد. درجه بندی A و B نسبت به D یا E دقت بالاتری دارند. هر قدر این دقت کمتر باشد، ضریب انتشار داده شده برای آن منبع و یا زمینه خاص نماینده خوبی محسوب نمی گردد. البته باید دقت نمود که این درجه بندی ملاک اصلی نیست بلکه ملاک اصلی که در دقت ضریب انتشار تأثیر می گذارد، درجه شباهت بین دستگاه/ فرآیند انتخاب شده در کاربرد این ضریب و دستگاه/ فرآیندی است که ضریب از آن استخراج شده است. در جدول ۱ درجه بندی ضرایب انتشار در سیستم EPA و مفهوم هر حرف ارائه شده است [۴]. ضرایب انتشار EPA برای مشعل های گازی در فصل ۱۳ سند ضرایب انتشار برای منابع آلاینده های ساکن موسوم به سند AP-42: Compilation of Air Pollutant Emission Factors ارائه گردیده است [۹]. این ضرایب انتشار در جدول ۲ آورده شده است. برای مقایسه، دسته دیگری از ضرایب انتشار در این جدول آمده که مربوط به ضرایب انتشار موسوم به ARPEL<sup>۲</sup> است [۱۰]. به علت اینکه این ضرایب انتشار، خاص منابع آلاینده در فرایندهای نفت و گاز ارائه شده اند، نسبت به ضرایب انتشار کلی دقت بالاتری دارند. لازم

جدول ۱- درجه بندی ضرایب انتشار و مفهوم حرف ها در سیستم درجه بندی ضرایب انتشار EPA [۵]

کد حرف	A	B	C	D	E	U
مفهوم کیفی	عالی	بالای متوسط	متوسط	زیر متوسط	ضعیف	درجه بندی نشده

جدول ۲- ضرایب انتشار EPA و ARPEL برای آلاینده های گازی ناشی از احتراق گازها در مشعل (lb/MMBtu) [۹ و ۱۰]

ضریب انتشار	NO <sub>x</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	THC	CH <sub>4</sub>
EPA	۰/۰۶۸	۰/۳۷	ارائه نشده	۰/۱۴	۰/۰۸
کد دقت EPA	B	B	ارائه نشده	B	B
ARPEL	۰/۰۹۸	۱/۳	از طریق موازنه جرم تعیین گردد	۴/۷۲	۰/۶۱
اختلاف نسبی (%)	۳۰/۷	۷۱/۵	-	۹۷	۱۲/۵

1. Emission Factor Rating

2. Regional Association of Oil and Natural Gas Companies in Latin America and the Caribbean

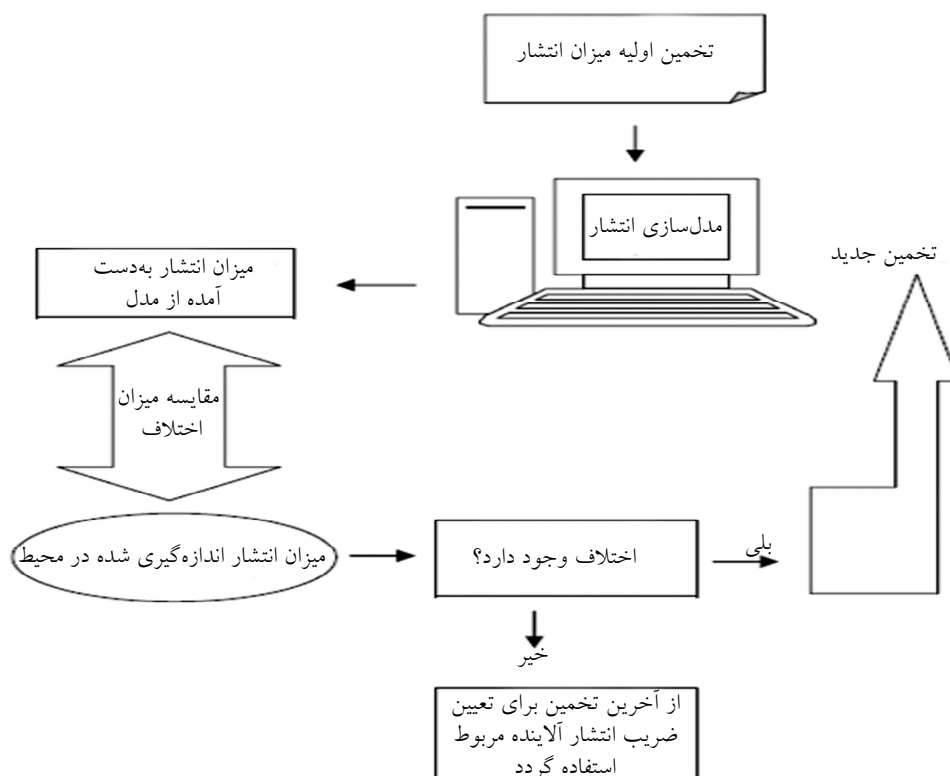
محاسبه معکوس استفاده شد. اساس این روش به طور کامل توسط Faulkner و همکارانش توضیح داده شده است [۱۱]. از این روش در مطالعات اخیر، بیشتر برای تعیین میزان انتشار ذرات جامد و ترکیبات فرار استفاده شده است [۱۲]. همان گونه که در شکل ۱ ارائه شده، در این روش پس از حدس اولیه برای غلظت آلاینده در خروجی مشعل، غلظت آلاینده در فاصله مشخصی از مشعل توسط مدل تعیین شده و از طریق مقایسه با مقدار اندازه گیری شده، حدس اولیه با هدف رسیدن به مقدار اندازه گیری شده تصحیح می گردد. این روش هر چند یک روش تخمینی است، ولی می توان عدم قطعیت مقادیر انتشار به دست آمده را به راحتی با دانستن خطاهای مدل و دستگاه اندازه گیری تعیین نمود.

بررسی هانسان داد این مشعل در بیشتر مواقع در حالت پایلوت بوده و از گاز سوختی با دبی متوسط  $0/25 \text{ MMscf/day}$  برای حالت پایلوت استفاده می گردد. برای آنالیز مشخصات سوخت گازی ۶ نوبت نمونه برداری از سوخت گازی به صورت ماهانه (مهر تا بهمن سال ۸۷) صورت گرفت و اجزاء ترکیب آن با دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC) مدل Chrom Pack CP9000 ساخت کشور هلند آنالیز گردید. متوسط ترکیب اجزاء گاز به عنوان معیاری از کیفیت متوسط سوخت گازی در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین متوسط جرم مولکولی و ارزش حرارتی گاز به ترتیب  $20/17$  و  $1230 \text{ Btu/scf}$  تعیین گردید.

**روش محاسبه معکوس برای تعیین میزان انتشار آلاینده ها**  
در این تحقیق، برای تعیین میزان انتشار آلاینده ها از خروجی مشعل مورد نظر و تعیین ضرایب انتشار، از روش

جدول ۳- ترکیب درصدها سوخت مشعل گازی منتخب (% مولی)

$\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_3\text{H}_8$	$\text{C}_4\text{H}_{10}$ (نرمال و ایزو)	$\text{C}_5\text{H}_{12}$ (نرمال و ایزو)	$\text{C}_5+$	$\text{H}_2\text{S}$	$\text{N}_2$	$\text{CO}_2$
۷۷/۵	۱۶/۳۷	۴/۷	۰/۷۵	۰/۰۷	۰/۰۲	-	۰/۱۵	۰/۳۵



شکل ۱- الگوریتم تعیین ضرایب انتشار آلاینده ها با استفاده از روش محاسبه معکوس

## اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌ها در محیط

برای اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌های گازی شامل  $\text{CO}$ ،  $\text{SO}_2$ ،  $\text{NO}_x$  از دستگاه اندازه‌گیری آلاینده‌های محیطی مدل Street Box، ساخت شرکت Signal Group، این دستگاه قابل حمل بوده و از طریق حسگرهای الکتروشیمیایی میزان سه آلاینده را در محیط اندازه‌گیری می‌نماید. دستگاه قادر است در طول نمونه‌برداری، اطلاعات غلظت آلاینده‌ها را به صورت متوسط ۱۵ دقیقه‌ای ارائه دهد. در جدول ۴ محدوده و دقت اندازه‌گیری دستگاه Street Box برای آلاینده‌های هوای محیط ارائه شده است.

جدول ۴- محدوده اندازه‌گیری و دقت دستگاه Street Box برای آلاینده‌های هوای محیط

آلاینده	محدوده اندازه‌گیری	دقت
CO	۰-۱۰۰ ppm	۰/۱ ppm
NO <sub>x</sub>	۰-۱۰ ppm	۲۰ ppb
SO <sub>2</sub>	۰-۴۰ ppm	۲۵ ppb

اندازه‌گیری در جهت باد غالب، در فاصله ۳۰ متری مشعل منتخب و در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین انجام گرفت. همچنین در هر بار نمونه‌گیری، غلظت محیط پیرامون در جهت عکس باد غالب تعیین گردید، تا مقادیر اندازه‌گیری شده از مقدار موجود در محیط کسر گردد. با توجه به تعداد زیاد داده‌ها پس از هر بار نمونه‌گیری، از مقادیر غلظت آلاینده‌ها متوسط‌گیری شد.

## مدل پخش آلاینده‌ها

برای لحاظ کردن میزان پخش آلاینده در محیط به دلیل وزش باد و پدیده نفوذ، از مدل اولری درجه اول با معادله اساسی زیر استفاده شد:

$$\hat{u} \frac{\partial}{\partial x}(\hat{c}_i) = \frac{\partial}{\partial y}(K_H \frac{\partial \hat{c}_i}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_V \frac{\partial \hat{c}_i}{\partial z}) \quad (2)$$

در رابطه بالا  $\hat{u}$  سرعت متوسط باد غالب،  $\hat{c}_i$  غلظت متوسط آلاینده  $i$  و  $K_H$  و  $K_V$  به ترتیب ضرایب تجربی نفوذ آلاینده‌ها در جهت‌های عمودی و افقی هستند [۱۳]. در مدل مورد استفاده جهت باد ثابت فرض شده و از واکنش آلاینده‌ها با توجه به نزدیک بودن محل اندازه‌گیری به مشعل صرف نظر گردیده است [۱۴]. برای محاسبه ضرایب نفوذ، معمولاً از روابط تجربی استفاده می‌گردد. در جدول ۵ ضریب نفوذ  $K_V$  برای حالت‌های مختلف پایداری اتمسفر ارائه شده است. در مطالعات صورت گرفته، مشخص شده که توزیع غلظت، چندان به تغییرات  $K_H$  حساس نیست. در این تحقیق، از یک مقدار متوسط برابر  $50 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  برای  $K_H$  در شرایط مختلف پایداری اتمسفری استفاده شد [۱۳]. برای حل معادله دیفرانسیل درجه دوم مربوط به مدل پخش آلاینده‌ها، از روش اختلاف محدود<sup>۱</sup> و برای حل عددی معادله حاصل از روش اختلاف محدود، از روش صریح استفاده شد. مشتق مرتبه اول به صورت برگشت به عقب<sup>۲</sup> و مشتقات مرتبه دوم به صورت مرکزی<sup>۳</sup> حول نقطه  $(i, j, k)$  بر طبق معادلات ۳ تا ۵ گسسته شدند [۱۴].

جدول ۵- روابط مورد استفاده برای محاسبه ضریب نفوذ  $K_V$  [۱۳]

توضیحات	ضریب نفوذ	حالت پایداری
-	$K_V = K_H z e^{-z/H}$	خشی
$b = 0.91$ $\eta = (z/L)\mu^{-1/2}$ $\mu = z_0/L$	$k_V = \frac{ku_* z}{0.74 + 4.7 z/L} e^{-b\eta}$	پایدار
-	$K_V = w_* H [2.5 (z/H)^{1/3} (1-15z/L)^{1/4}]$	ناپایدار
	$K_V = w_* H [0.021 + 0.408 (z/H) + 1.352 (z/H)^2 + 0.44096 (z/H)^3 + 2.56 (z/H)^4]$	
	$K_V = w_* H [0.2 \exp(6-10 z/H)]$	

1. Finite difference
2. Backward
3. Central

۸۷۱۰ dscf/MMBtu می‌باشد. ضریب تصحیح دمای محیط نسبت به دمای °C ۲۰ از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۱۹]:

$$T_{Correction} = \left( \frac{528^{\circ}R}{460^{\circ}R + T^{\circ}R} \right) \quad (9)$$

### نتایج و بحث

در جدول ۶، نتایج چهار نوبت نمونه‌گیری از مشعل مورد مطالعه ارائه شده است. با توجه به این که میزان متوسط غلظت آلاینده‌ها در محیط پیرامون (آلودگی زمینه) برای  $NO_x$ ،  $SO_2$  و CO به ترتیب ۰، ۰ و ۱۶۹۵ ppb به‌دست آمد، غلظت‌های ارائه شده در جدول از مقادیر فوق کسر گردید. با توجه به غلظت‌های به‌دست آمده، با فرض سرعت باد متوسط برابر  $4 \text{ m/s}$  که متناظر با وجود شرایط ناپایدار

جدول ۶- غلظت‌های متوسط محیطی اندازه‌گیری شده برای آلاینده گازی حاصل از مشعل منتخب (ppb)

نمونه	دمای محیط (°C)	غلظت CO	غلظت $NO_x$	غلظت $SO_2$
اردیبهشت ماه ۸۸				
۱	۳۶	۴۰۰۱	۰	۶۵
۲	۴۱	۳۳۸۰	۰	۰
۳	۳۰	۳۱۸۲	۰	۶۵
۴	۳۳	۲۳۳۱	۲۰	۰
۵	۳۵	۲۲۴۱	۲۶	۰
خرداد ماه ۸۸				
۱	۳۸	۵۶۱۵	۰	۰
۲	۴۵	۲۱۱۱	۳۰	۰
۳	۴۳	۲۰۳۵	۶۵	۰
تیر ماه ۸۸				
۱	۴۰	۶۶۱۲	۰	۸۳
۲	۴۱	۲۲۰۱	۱۰	۰
مرداد ماه ۸۸				
۱	۳۵	۳۳۶۲	۰	۰
۲	۳۸	۴۳۲۳	۰	۰
۳	۴۵	۱۶۳۴	۲۰	۰

است، با روش محاسبه معکوس، غلظت آلاینده‌ها در خروجی مشعل نمونه تعیین گردید که نتایج آن در جدول ۷ ارائه شده است.

$i$ ،  $j$  و  $k$  به ترتیب شماره‌های معادله در جهت‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  هستند. با جایگزین کردن روابط مربوطه در معادله اصلی، معادله ۶ به‌دست می‌آید.

$$\frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{i,j,k} = \frac{1}{\Delta x} (C_{i,j,k} - C_{i-1,j,k}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \Big|_{i,j,k} = \frac{1}{\Delta y^2} (C_{i,j+1,k} - 2C_{i,j,k} + C_{i,j-1,k}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \Big|_{i,j,k} = \frac{1}{\Delta z^2} (C_{i,j,k+1} - 2C_{i,j,k} + C_{i,j,k-1}) \quad (5)$$

$$(\Delta y^2 \Delta z^2 u_k + 2\Delta x \Delta z^2 K_H + 2\Delta x \Delta y^2 K_v) C_{i,j,k} = \quad (6)$$

$$\Delta y^2 \Delta z^2 u_k C_{i-1,j,k} + (\Delta x \Delta z^2 k_H C_{i,j+1,k} + C_{i,j-1,k}) +$$

$$\Delta x \Delta y^2 K_v (C_{i,j,k+1} + C_{i,j,k-1})$$

شرایط پایداری برای حل معادله (۵) به صورت زیر خواهد بود [۱۵]:

$$\Delta x \leq \frac{U_x}{2K_v \left( \frac{5}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)} \quad (7)$$

پس از تعیین مختصات منابع آلاینده، مدل پخش آلاینده مورد نظر بر اساس معادلات به‌دست آمده، در نرم‌افزار *MATLAB* برنامه‌نویسی شد. سرعت باد غالب با توجه به اطلاعات هواشناسی منطقه به صورت متوسط  $4 \text{ m/s}$  فرض گردید [۱۶]. سایر جزئیات روش حل معادله و متغیرهای محیطی و هواشناسی در مطالعه‌ای که فاتحی‌فر و همکارانش، برای پیش‌بینی نحوه پخش آلاینده‌ها از دودکش‌های پالایشگاه تبریز انجام داده‌اند، ارائه شده است. در مطالعه ایشان، نتایج پیش‌بینی پخش آلاینده‌ها، توافق خوبی با نتایج تجربی دارد [۱۷].

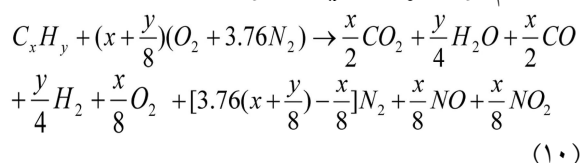
### محاسبه ضرایب انتشار آلاینده‌ها

برای تعیین ضرایب انتشار از روش ارائه شده توسط EPA موسوم به روش ۱۹ بر اساس معادله زیر استفاده گردید [۱۸]:

$$EF = \frac{C_{ppb} \times F \times Mw}{(10^9 \times 385.5)} \times T_{Correction} \quad (8)$$

در این رابطه EF ضریب انتشار آلاینده بر حسب lb/MMBtu، F ضریب سوخت (فوت مکعب استاندارد خشک در میلیون (Btu)، Mw وزن مولکولی آلاینده (lb/lb mole)،  $C_{ppb}$  غلظت آلاینده‌ها بر حسب ppb و  $T_{Correction}$  ضریب تصحیح دمای محیط می‌باشد. فاکتور سوخت برای سوخت‌های مختلف در مراجع ارائه شده و مقدار آن برای گاز طبیعی برابر

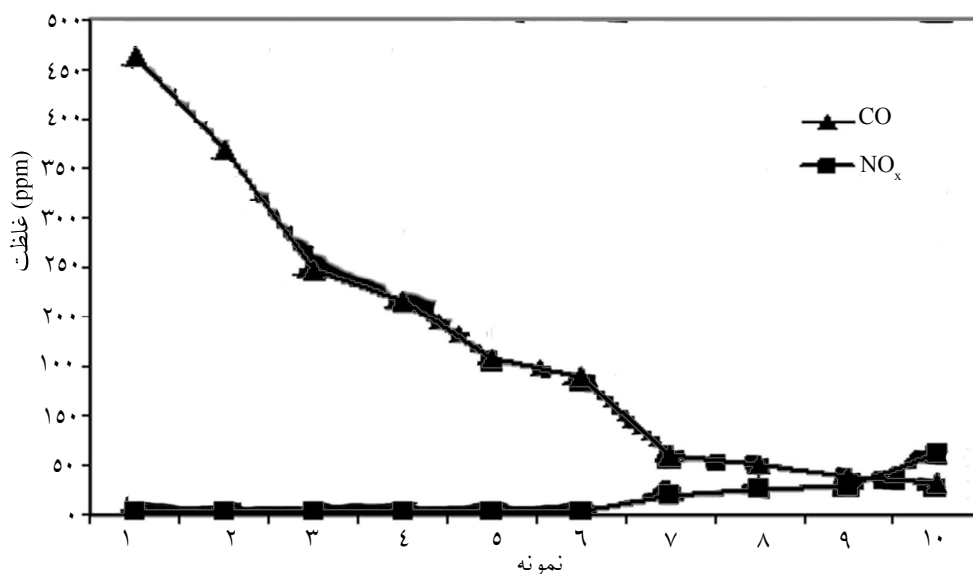
شد. البته بسته به دمای احتراق، ترکیبات  $\text{NO}_x$  در احتراق کامل نیز ممکن است تولید گردند. در مشعل‌ها، معمولاً گازهای زائد شامل ترکیبات نیتروژنی نیستند. بنابراین NO یا به وسیله ترکیب نیتروژن هوا با اکسیژن تشکیل شده یا از طریق واکنش بین رادیکال‌های هیدروکربن حاضر در محصولات احتراق و نیتروژن هوا از طریق مراحل میانی در دماهای بالا تشکیل می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، بین غلظت CO و  $\text{NO}_x$  رابطه عکس برقرار است و با افزایش یکی، دیگری کاهش می‌یابد. دلیل این امر به مکانیسم احتراق در مشعل‌ها مربوط می‌شود. ترکیبات  $\text{NO}_x$  در دمای احتراق بالاتر از  $1200\text{ K}$  تولید می‌شوند. اگر دما بین  $1600\text{ K}$  -  $1200\text{ K}$  باشد، تقریباً نصف نیتروژن موجود در هوا به صورت NO و بقیه به صورت  $\text{N}_2$  در هواها می‌گردد. اگر دما بالاتر از  $1600\text{ K}$  باشد، هم NO و هم  $\text{NO}_x$  تولید می‌شوند. علاوه بر آن، مقداری  $\text{N}_2$  آزاد نیز در محصولات احتراق باقی می‌ماند. در مشعل‌ها در حالت احتراق ناقص که به مفهوم افت بازده است، دما کاهش می‌یابد. کاهش دما نیز منجر به تولید کم و یا عدم تولید ترکیبات  $\text{NO}_x$  خواهد شد [۲۰].



جدول ۷- مقادیر انتشار محاسبه شده برای غلظت آلاینده‌های خروجی از مشعل منتخب با استفاده از روش مدل‌سازی (ppm)

ردیف	دمای محیط	CO	$\text{NO}_x$	$\text{SO}_2$
۱	۴۰	۴۶۲۷	۱۰ >	۷۸
۲	۳۸	۳۶۸۹	۱۰ >	۲۰ >
۳	۳۸	۲۴۷۳	۱۰ >	۲۰ >
۴	۳۶	۲۱۷۰	۱۰ >	۶۱
۵	۳۵	۱۵۸۶	۱۰ >	۲۰ >
۶	۳۰	۱۳۹۹	۱۰ >	۶۱
۷	۳۳	۶۰۱	۲۱	۲۰ >
۸	۳۵	۵۱۴	۲۷	۲۰ >
۹	۴۵	۳۹۲	۳۰	۲۰ >
۱۰	۴۳	۳۲۰	۶۲	۲۰ >

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، مقادیر غلظت خروجی آلاینده‌ها متفاوت بوده و بالاترین غلظت مربوط به CO می‌باشد. مقدار این آلاینده شاخصی از میزان احتراق ناقص در مشعل است. احتراق ناقص که معمولاً در شرایط واقعی در سیستم‌های احتراق به وجود می‌آید، در شرایطی روی می‌دهد که به علتی نسبت سوخت به هوا کمتر از نسبت استوکیومتری باشد. در احتراق ناقص علاوه بر  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{O}$  که محصولات احتراق کامل هستند، مقداری از محصولات واسطه پایدار نظیر منوکسیدکربن، هیدروژن و هیدروکربن‌ها نیز به عنوان آلاینده هوا مطابق معادله ۱۰ تولید خواهند



شکل ۲- رابطه بین غلظت محاسبه شده آلاینده‌های CO و  $\text{NO}_2$  خروجی از مشعل منتخب (غلظت‌های CO بر ۱۰ تقسیم شده اند)



محاسبه شده است. با توجه به این که تعداد داده‌ها کمتر از ۳۰ می‌باشد، برای محاسبه حد داده‌ها به جای توزیع نرمال از توزیع t-student با دقت ۹۵٪ استفاده شد [۲۱]. برای داده‌هایی که به صورت حدی مشخص شده بودند، نصف مقدار حد به عنوان متوسط غلظت لحاظ گردید.

چنانچه از مقادیر متوسط جدول ۸ برای محاسبه ضرایب انتشار متوسط نهایی استفاده گردد، نتایج جدول ۹ حاصل می‌شود. مقادیر ضرایب انتشار این جدول در دمای متوسط هوا معادل ۳۷ °C تصحیح شده است.

عدم قطعیت ضرایب انتشار ارائه شده ناشی از خطای مدل، خطاهای اندازه‌گیری و انحراف معیار داده‌ها می‌باشد. معمولاً می‌توان از خطای مدل به دلیل ناچیز بودن، در مقابل خطای اندازه‌گیری و انحراف معیار داده‌ها صرف نظر کرد که در این صورت عدم قطعیت ضرایب انتشار از معادله زیر قابل محاسبه است:

$$U = \sqrt{\frac{\tau^2}{N} + \frac{e}{3}} \quad (11)$$

در رابطه بالا U عدم قطعیت ضریب انتشار، N تعداد کل نمونه‌ها،  $\tau$  انحراف معیار داده‌ها و e دقت وسیله اندازه‌گیری است [۲۲].

با توجه به نتایج جدول ۹، عدم قطعیت ضریب انتشار متوسط برای آلاینده  $\text{NO}_x$  نسبت به آلاینده‌های دیگر بیشتر است.

ترکیبات گوگردی موجود در جریان گاز مشعل در اثر سوختن به  $\text{SO}_2$  تبدیل می‌شوند. مقدار انتشار یافته، مستقیماً به مقدار گوگرد موجود در گازهای مشعل بستگی دارد. همان طور که نتایج نیز نشان می‌دهد، میزان تولید  $\text{SO}_2$  در مشعل منتخب الگوی خاصی ندارد و تنها در ارتباط با میزان ترکیبات گوگردی سوخت، مخصوصاً  $\text{H}_2\text{S}$  است. هر چند نتایج آنالیز سوخت، میزان این ترکیب را صفر ثبت می‌کند، ولی نتایج نشان می‌دهد که در برخی از مواقع، در سوخت  $\text{H}_2\text{S}$  وجود دارد. تعیین مقادیر دقیق  $\text{NO}_x$  و  $\text{SO}_2$  در غلظت‌های پایین‌تر از حد تشخیص دستگاه، امکان پذیر نمی‌باشد. مطالعات Susu و همکارانش در مورد آلاینده‌های خروجی از یک مشعل، نشان داد که غلظت  $\text{NO}_x$  و  $\text{SO}_2$  در خروجی مشعل به ترتیب برابر ۰/۰۳ و ۰/۰۲ ppm می‌باشد. چنانچه ضرایب انتشار معادل غلظت‌ها بر حسب lb/MMBtu محاسبه گردند، کمترین و بیشترین مقادیر ضریب انتشار، برای CO به ترتیب ۰/۱۹ و ۲/۷ lb/MMBtu، برای  $\text{NO}_x$  ۰/۰۱ < و ۰/۰۶۱ lb/MMBtu و برای  $\text{SO}_2$  ۰/۰۲۷ < و ۰/۱۰۵ lb/MMBtu خواهد بود. برای محاسبه ضریب انتشار کلی متوسط بر حسب داده‌های مدل‌سازی، لازم است غلظت متوسط آلاینده‌ها لحاظ گردد. در جدول ۸ متوسط غلظت آلاینده‌ها، انحراف معیار و حد داده‌ها

جدول ۸ میانگین و انحراف معیار متوسط میزان انتشار آلاینده‌های هوا در مشعل گازی نمونه (ppm)

$\text{NO}_x$	$\text{SO}_2$	CO	
۱۷	۲۷	۱۷۷۷	متوسط
۱۸/۸	۲۷/۸	۱۴۷۶	انحراف معیار
۱۳/۳	۱۹/۷	۱۰۴۸	حدود داده‌ها

جدول ۹- نتایج محاسبه ضریب انتشار متوسط آلاینده‌ها در مشعل گازی نمونه

$\text{NO}_x$	$\text{SO}_2$	CO	
۰/۰۱۶۸	۰/۰۳۷	۱/۰۷	ضریب انتشار متوسط (lb/MMBtu)
۳۶/۳	۳۴/۳	۲۷/۵	عدم قطعیت (%)
۰/۰۳۰	۰/۰۶۴	۱/۶۹	حد بالای ضریب انتشار (lb/MMBtu)
۰/۰۰۴	۰/۰۱۰	۰/۴۴	حد پایین ضریب انتشار (lb/MMBtu)
-۳۰۵	-	۶۵	اختلاف نسبت به ضریب انتشار EPA (%)
-۴۸۳	-	-۲۱	اختلاف نسبت به ضریب انتشار ARPEL (%)



در مناطق تولید نفت، مقدار گوگرد در سوخت‌های مصرفی می‌تواند بسیار متفاوت باشد. بنابراین استفاده از ضرایب انتشار کلی در این مورد خطای فاحشی در پی خواهد داشت. بنابراین علاوه بر این که باید ضریب انتشار  $SO_2$  به‌طور مستقیم از روش آنالیز سوخت و انتقال جرم به‌دست آید، لازم است شرایط عملیات نیز از لحاظ تغییر در میزان گوگرد سوخت لحاظ گردد. در این مورد بهتر است آنالیز سوخت، مستقیماً روی سوخت ورودی به مشعل صورت گیرد.

### نتیجه‌گیری

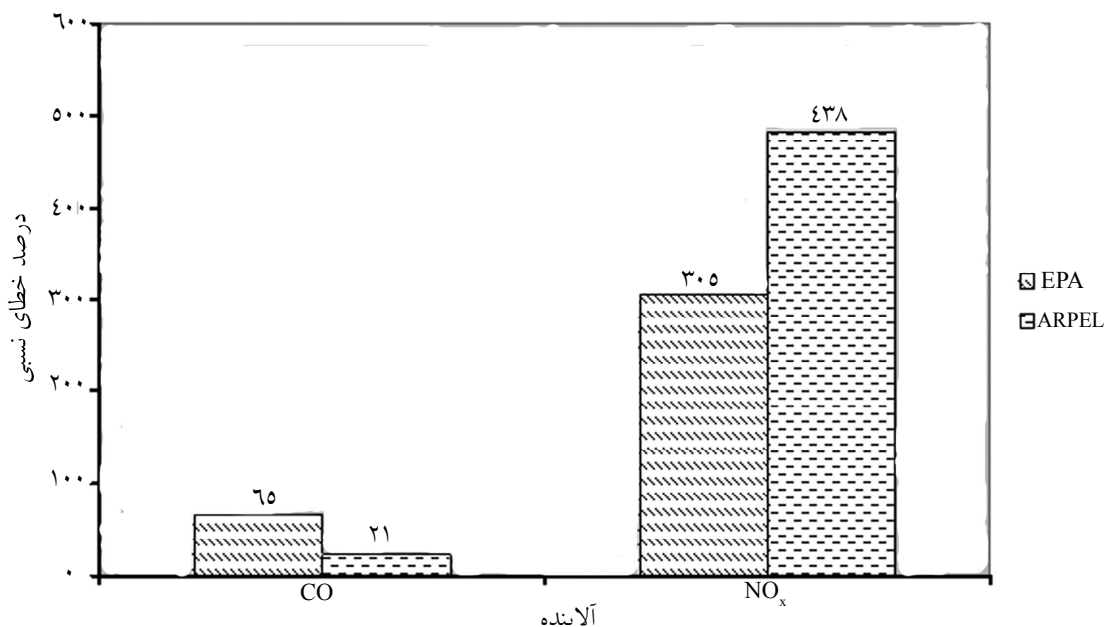
ارزیابی قابلیت ضرایب انتشار مراجع برای تخمین میزان انتشار آلاینده‌های هوا در واحدهای فرآورش نفت و گاز نشان داد که به‌دلیل نبود اطلاعات کافی از عملکرد مشعل‌ها و کمبود داده‌های اندازه‌گیری مستقیم، ضرایب انتشار ارائه شده برای این منابع تقریبی بوده و باهم اختلاف اساسی دارند. بنابراین لازم است ضرایب انتشار دقیق و با دقت بالا برای مشعل‌های موجود در واحدهای فرآورش نفت و گاز محاسبه گردند.

در این تحقیق، با استفاده از روش محاسبه معکوس و از طریق اندازه‌گیری محیطی همراه با مدل‌سازی آلاینده‌ها، ضرایب انتشار متوسط آلاینده‌های  $CO$ ،  $SO_2$  و  $NO_x$  برای یک مشعل نمونه تعیین شد. روش به‌کار رفته در این تحقیق با توجه به ماهیت اندازه‌گیری در شرایط واقعی، می‌تواند نتایج قابل قبولی را ارائه دهد. البته باید توجه داشت که چون مقادیر ضریب انتشار در این تحقیق برای یک مشعل نمونه به‌دست آمده، می‌تواند در صورت استفاده برای سایر مشعل‌ها به‌خصوص مشعل‌های گاز اسیدی و مشعل‌های بلند با خطا همراه باشد. به‌ویژه اینکه مشعل نمونه فاقد هرگونه جریان کمکی نظیر بخار یا هوای اضافی برای افزایش اختلاط هوا با سوخت و در نتیجه افزایش بازده است. بنابراین، تعیین ضرایب انتشار آلاینده‌های گازی برای سایر مشعل‌های مناطق بهره‌برداری نفت و گاز با توجه به وابستگی ضرایب انتشار به ماهیت فرایندها و ویژگی‌های عملیاتی مشعل‌ها، می‌تواند ضرایب انتشار دقیق‌تری را برای مشعل‌های گازی از طریق دسته‌بندی آنها فراهم آورد.

با توجه به رابطه عدم قطعیت، این مسأله در ارتباط مستقیم با انحراف معیار مقادیر اندازه‌گیری شده است که برای آلاینده  $NO_x$  انحراف معیار از مقدار متوسط بیشتر است. عدم قطعیت برای  $CO$  و  $SO_2$  به ترتیب ۲۷/۵٪ و ۳۴/۳٪ می‌باشد. از آنجایی که پراکندگی مقادیر اندازه‌گیری شده برای این آلاینده‌ها بیشتر بوده، انحراف معیار نیز برای آلاینده‌های  $CO$  و  $SO_2$  بیشتر است. همان‌طور که قبلاً بحث شد، با توجه به شرایط شعله باز در مشعل‌ها و تأثیر زیاد وزش باد در بازده مشعل‌ها، در عمل مقادیر آلاینده‌ها می‌تواند بسیار متفاوت باشد. این امر نشان می‌دهد ضرایب انتشار کلی متوسط برای تخمین میزان انتشار آلاینده‌ها در مشعل‌های گازی در شرایط کوتاه مدت، عدم قطعیت بالایی خواهد داشت. با توجه به شکل ۲ چنین بر می‌آید که روند تغییرات دو آلاینده  $CO$  و  $NO_x$  از الگوی واحدی پیروی می‌کنند. در مشعل‌های واقعی عدم قطعیت به ترکیب گاز، شرایط باد و نوع مشعل بستگی دارد. در ضرایب انتشار گزارش شده توسط مراجع، عدم قطعیت بالاتر از ۱۰۰ درصد برای ضرایب انتشار آلاینده‌ها گزارش شده است [۱]. اختلاف نسبی بین مقایسه ضرایب انتشار محاسبه شده در این تحقیق با ضرایب انتشار EPA و ARPEL در شکل ۳ رسم شده است که مطابق این شکل، مقدار اختلاف نسبی آلاینده  $NO_x$  بسیار بالا است. مقدار اختلاف نسبی ضریب انتشار واقعی  $NO_x$  با ضرایب انتشار EPA و ARPEL به ترتیب ۳۰۵٪ و ۴۸۳٪ می‌باشد. علامت منفی نشان دهنده مقدار تخمین بالا برای آلاینده  $NO_x$  برای هر دو مرجع است. توجه به وضعیت مشعل نمونه از لحاظ شرایط وزش باد نسبتاً تند و عدم وجود جریان کمکی برای افزایش اختلاط، نشان می‌دهد که در این مشعل به‌علت بازده پایین و کاهش دما،  $NO_x$  یا تولید نمی‌گردد و یا در مقادیر نسبتاً کم تولید می‌شود. برای آلاینده  $CO$  مقادیر اختلاف برای هر دو مرجع در مقایسه با  $NO_x$  نسبتاً پایین است. مخصوصاً اختلاف بین ضریب انتشار ARPEL با ضریب محاسبه شده در این تحقیق برای  $CO$  چندان زیاد نیست. نتیجه دیگر این که هرچند ضریب انتشار  $SO_2$  در ارتباط نزدیک با مقدار گوگرد سوخت است، اما مقادیر مختلف به‌دست آمده، نشان می‌دهد که در شرایط عملیات واقعی

روش‌های سنجش از راه دور برای تعیین ضرایب انتشار مشعل‌ها با عدم قطعیت پایین استفاده نمود [۲۲ و ۲۳].

همچنین به دلیل مشکل بودن اندازه‌گیری مستقیم در مشعل‌های گازی، لازم است از روش‌های سنجش مستقیم نظیر مشعل‌های مشابه‌سازی شده آزمایشگاهی و یا



شکل ۳- مقایسه درصد اختلاف نسبی ضرایب انتشار CO و NO<sub>x</sub> مشعل نمونه و ضرایب انتشار EPA و ARPEL

### منابع

- [1] European Environment Agency (EEA), *Waste incineration: flaring in gas and oil extraction*, Emission Inventory Guidebook, EEA, Copenhagen, Denmark, pp. 1-7, 2006.
- [2] Bhatia S.C., *Environmental pollution and control in chemical process industries*, Khanna Publishers: New Delhi, India, 2001.
- [3] Cairncross E., *Report and technical protocol for the monitoring and regulation of flaring from oil refineries in South Africa*, Flaring Project Final Report, 2007.
- [4] Chambers A.K., *DIAL measurements of fugitive emissions from natural gas plants and the comparison with emission factor estimates*, 15<sup>th</sup> Emission inventory conference, New Orleans, Available at: <http://www.epa.gov/ttn/chief/conference/ei15/session14/chambers.pdf>, May 2006.
- [5] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), *Introduction to AP 42, Compilation of air pollutant emission factors*, Fifth Edition, Vol. I: Stationary point and area sources, EPA, Research Triangle Park, North Carolina, USA, 1995.
- [6] McDaniel M., *Flare efficiency study*, EPA-600/2-83-052, 1983.
- [7] Leahey D.M., Preston K. & Strosher M., "Theoretical and observational assessments of flare efficiencies", *Journal of the Air and Waste Management Association*, Vol. 51, pp. 1610-16, 2001.
- [8] Stern A.C., *Air Pollution, Measuring, monitoring and surveillance of air pollution*, New York: Academic Press, 3rd Ed. 1976.

- [9] USEPA, "Compilation of air pollutant emission factors", Vol. 1: Stationary Point and Area Sources, Fifth edition, AP-42. "Section 13.5. Industrial Flares", U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, USA, 1993.
- [10] Regional Association of Oil and Natural Gas Companies in Latin America and the Caribbean (ARPEL), *Guidelines for atmospheric emissions inventory methodologies in the petroleum industry*, Alberta, Canada, 1998.
- [11] Faulkner W.B., Lange J.M., Powell J.J., Shaw B.W. & Parnell C.B., "Sampler placement to determine emission factors from ground level area sources", *Atmospheric Environment*, Vol. 41, pp. 7672-7679, 2007.
- [12] Wanjura J.D., Parnell C.B., Shaw B.W. & Lacey R.E., *A protocol for determining a fugitive dust emission factor from a ground level area source*, In: Paper presented at the 2004 ASAE/CSAE Annual International Meeting held from 1-4 August 2004 at Ottawa, Ontario, Canada. Paper No. 044018, 2004.
- [13] Ku J. & Rao, S., "Numerical simulation of air pollution in urban areas: model development", *Atmospheric environment*, Vol. 21, pp.201-212, 1987.
- [14] Kahforoushan D., Fatehifar E., Babalou A.A., Ebrahimian A.R., Elkamel A & Soltanmohammadzadeh J.S., *Modeling and evaluation of air pollution from a gaseous flare in an oil and gas processing area*, proceeding of WSEAS international conference in computing and computational techniques in sciences, pp.180-186, Spain, 2008.
- [15] Constantinides A. & Mostoufi N., *Numerical methods for chemical engineers with Matlab applications*, Prentice Hall, Inc., 1999.
- ۱۶- اداره کل هواشناسی استان خوزستان، اطلاعات سرعت باد و جهت باد در اهواز، ۱۳۷۸.
- [17] Fatehifar E., Elkamel A., Taheri M., Anderson W.A. & Abdul-Wahab S.A., "Modeling and simulation of multi-pollutant dispersion from a network of refinery stacks using a multiple cell approach", *Environmental Engineering Science*, Vol. 24, pp.795-811, 2007.
- [18] EPA, 1994. "Quality assurance handbook for air pollution measurement systems", Vol. III., Stationary source-specific methods, Interim edition. United States Environmental Protection Agency. EPA-600/R-94/038c, Research Triangle Park, North Carolina, USA.
- [19] National Pollutant Inventory (NPI), *Emission estimation technique manual for combustion in boilers*, Version 1.2, Environment Australia. GPO Box 787, Canberra, 2003. Available at: <http://www.naei.org.uk/>
- [20] Sonibare J.A. & Akeredolu F.A., "A theoretical prediction of non-methane gaseous emissions from natural gas combustion", *Energy Policy*, Vol. 32, pp.1653-1665, 2004.
- [21] Canadian Association of Petroleum Producers (CAPP), *A National inventory of greenhouse gas, Criteria Air Contaminant and Hydrogen Sulphide Emissions by the Upstream Oil and Gas Industry*, Clearstone Engineering Ltd. 700, 900-6 Avenue S.W.Calgary, Alberta, T2P 3K2, 2004.
- [22] Rivera J.D. & Rodriguez J., "Emission of industrial sources converted to natural gas", *Energy Sources*, Vol. 23, pp. 115-126, 2001.
- [23] Ezersky A., *Proposed regulation 12, and rule 11: flare monitoring at petroleum refineries*, drafts staff report, Bay Area Air Quality Management District 939 Ellis Street, San Francisco, CA, USA, 2003.