

## کاربرد تحلیل CFD در ارزیابی مشخصه های احتراقی برج سوزا کم فشار پالایشگاه پارس جنوبی

سارا شفیعی<sup>۱</sup>، یعقوب بهجت<sup>۲</sup>، محسن دوازده امامی<sup>۳</sup>، ارجمند مهربانی<sup>۴\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، sarahshafiei@iut.ac.ir

۲- استادیار، مهندسی شیمی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، Behjaty@ripi.ir

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، mohsen@iut.ac.ir

۴- استاد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، arjomand@iut.ac.ir

\* نویسنده مخاطب

### چکیده

در این پژوهش شبیه سازی سه بعدی تیپ برج سوزا کم فشار در مقیاس صنعتی از نوع بخار کمکی پالایشگاه پارس جنوبی به منظور بررسی مشخصه های احتراقی و بررسی عوامل محیطی بر عملکرد آن انجام شد. در این بررسی از یک شبکه محاسباتی هیبریدی بهره گرفته شد. مدل های حاکم بر مسئله شامل مدل های هیدرودینامیکی، انتقال گرما، احتراق، تابش و اغتشاش می باشد که به صورت هم زمان و تاثیر پذیری برهمکنش از یکدیگر در نرم افزار تجاری Ansys Fluent مدل شد. مدل اغتشاشی دو معادله ای  $k-\epsilon$  جهت شبیه سازی رفتار سیال درهم و از مدل Finite Rate/Eddy Dissipation برای محاسبه نرخ واکنش های احتراق استفاده شد. همچنین برای مدل سازی تابش نیز از مدل P1 استفاده گردید. نتایج بدست آمده از مدل محاسباتی توسعه یافته شامل مشخصه های هیدرودینامیکی، دما، غلظت گازهای ارسالی به تیپ برج سوزا، محصولات حاصل از احتراق و بازده دوده در کل دامنه محاسباتی برج سوزا می باشد. همچنین اثر عامل محیطی (وزش باد) بر عملکرد احتراقی برج سوزا بررسی شده است. نتایج حاصل از مدل محاسباتی نشان می دهد که با افزایش سرعت وزش باد از  $2 \text{ m/s}$  به  $5 \text{ m/s}$  بازده احتراق کاهش می یابد که در نتیجه میزان دوده تولیدی افزایش می یابد.

**کلمات کلیدی:** شبیه سازی، برج سوزا، احتراق، بازده دوده، دینامیک محاسباتی سیال

### مقدمه

احتراق از جمله فرایندهایی است که در بسیاری از مسائل صنعتی کاربرد دارد. از فرایندهای مهم احتراقی، فرایند سوزاندن<sup>۱</sup> در برج های سوزا<sup>۲</sup> است. وظیفه اصلی یک برج سوزا استفاده از احتراق برای تبدیل بخارات و گاز های سمی، خورنده و آتش زا به موادی با آلودگی کمتر و کم خطرتر است. احتراق در یک برج سوزا افراشته در یک شعله نفوذی (غیر پیش آمیخته<sup>۳</sup>) آشفته انجام می شود که موقعیت شعله تحت تاثیر جریان عرضی هوا تغییر می کند. یکی از موضوعات مهم در رابطه با این شعله ها، طول و میزان انحراف آن در اثر جریان عرضی هوا است. تعیین شکل و طول شعله نقش مهمی در طراحی ارتفاع برج سوزا دارد و مقدار حریم مجاز اطراف برج سوزا بستگی به طول شعله و مقدار شدت تابش آن در شرایط دفع و آزاد سازی اضطراری دارد. همچنین طول شعله برای یک مخلوط گازی ویژه، معیاری از بازده احتراق در برج سوزا است و بطور معمول شعله های با طول کمتر هستند دارای بازده احتراقی بالاتری هستند. این موضوع به دلیل اختلاط موثرتر سوخت و جریان عرضی در شعله است [۱، ۲]. یکی از متداول ترین برج های سوزا با جریان بخار آب<sup>۴</sup> می باشد که در این برج ها بخار از طریق یک یا مجموعه ای از نازل ها به ناحیه احتراق تزریق می شوند. تزریق بخار علاوه بر افزایش اختلاط، همانند یک کاتالیست عمل کرده و دمای احتراق را با رقیق کردن کاهش

می دهد. مقدار بخار مورد نیاز تابعی از مشخصات گاز می باشد و به طور معمول ۱- ۰/۱ کیلوگرم بخار به ازای هر کیلوگرم گاز است. شعله ها به طور کلی به سه دسته شعله های پیش مخلوط<sup>۵</sup>، شعله های غیر پیش مخلوط و شعله های پیش مخلوط جزئی<sup>۶</sup> تقسیم بندی می شوند. در شعله های غیر پیش مخلوط سوخت و اکسید کننده به طور جداگانه وارد ناحیه واکنش می شوند. این شعله ها را دیفیوژن<sup>۷</sup> می نامند، زیرا مقیاس زمانی دیفیوژن (پخش) بزرگتر از مقیاس زمانی واکنش بوده لذا پدیده پخش نقش تعیین کننده ای دارد [۳]. شعله موجود در برج های سوزا از نوع شعله های غیر پیش آمیخته می باشند. زیرا گاز ارسالی به برج سوزا، قبل از تزریق به محیط بیرون هیچ گونه اختلاطی با هوا ندارد. این نوع از شعله ها همواره با مشکلات زیست محیطی و ایمنی همراه می باشند [۴]. در شبیه سازی دقیق جریان های احتراقی، مدل احتراقی نقش اساسی دارد، زیرا علاوه تعیین مقدار گونه ها و محصولات احتراق، نرخ آزاد شدن انرژی حاصل از ترکیب سوخت و اکسیدکننده را نیز تعیین می کند. نرخ آزاد شدن انرژی در اثر پیشرفت واکنش های احتراقی بر مقدار دما در نقاط مختلف موثر است و دمای هر نقطه بر رفتار جریان از جمله مولفه های سرعت، فشار و مشخصات سیال در آن نقطه موثر است. سرعت پیشرفت واکنش های شیمیایی و آزاد شدن گرما، به سرعت ترکیب سوخت و اکسید کننده بستگی دارد و نرخ ترکیب سوخت و اکسید کننده تابع عوامل مختلفی از جمله چگونگی اختلاط سوخت و هوا، غلظت واکنش دهنده ها، دمای محفظه احتراق و غیره می باشد. یک مدل مناسب احتراقی بایستی تمام عوامل تاثیر گذار را منظور نماید. به طور کلی دو وظیفه مهم مدل ها احتراقی عبارتند از:

الف) تعیین تغییرات شیمیایی در مواد شرکت کننده احتراق.

ب) تعیین سرعت رخ دادن تغییرات شیمیایی مذکور و آزاد شدن انرژی.

مدل های احتراقی را بر اساس سرعت پیشرفت واکنش ها می توان به دو طبقه کلی تقسیم نمود [۵]:

الف) مدل های با سرعت واکنش شیمیایی محدود<sup>۸</sup>

ب) مدل احتراقی با سرعت واکنش شیمیایی سریع<sup>۹</sup>

کاستینیرا و ادگار [۶] در سال ۲۰۰۶ به بررسی تاثیر هوای اضافی بر روی شعله های پیش آمیخته پرداخته. و دریافتند که افزودن مقادیر بسیار زیاد هوا و بخار به شدت منجر به رخ دادن احتراق ناقص و کاهش بازده و حتی خاموشی شعله می شود. این پژوهشگران همچنین در سال ۲۰۰۸ به بررسی تاثیر باد بر روی بازده احتراق در برج های سوزا پرداختند [۷]. سینگ و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۲ برج سوزا با شدت جریان و ارزش گرمایی پایین سوخت را شبیه سازی کردند. پاتکی و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۴ با شبیه سازی شعله های غیر پیش آمیخته در شرایط مختلف، تاثیر میزان هوای

<sup>6</sup> Partially Permixed

<sup>7</sup> Diffusion Flame

<sup>8</sup> Finite Rate

<sup>9</sup> Fast Chemistry

<sup>1</sup> Flaring

<sup>2</sup> Flare

<sup>3</sup> Non Permited

<sup>4</sup> Steam Assisted Flare

<sup>5</sup> Premixed

دسترس برای احتراق و همچنین ترکیب درصد سوخت و سرعت جریان گاز را بر میزان دوده تولیدی مطالعه نمودند. در سال ۲۰۱۶ آلچنو و همکاران [۱۰] با شبیه سازی و همچنین مطالعات آزمایشگاهی، مشخصات شعله از قبیل ارتفاع، محصولات تولید شده، دما و ارتفاع جدایش را در برج سوزا متان و پروپان مورد بررسی قرار داده و مقایسه نمودند. گوان و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۸ یک برج سوزا با هوای اضافی را شبیه سازی کرده و تولید دوده در آن را بررسی کردند. مصطفایی و رشیدی [۱۲] در سال ۲۰۲۰ با مطالعه بر روی یک برج سوزا چندشاخه اثر دوده و NO<sub>x</sub> را بررسی کردند.

### معادلات حاکم

معادلات حاکم بر پدیده احتراق برج سوزا شامل معادلات پیوستگی<sup>۱</sup>، حرکت<sup>۲</sup>، انرژی و بقا جرم جزئی برای گونه ها می باشند. با توجه به آشفته بودن جریان از معادلات متوسط گیری شده زمانی رینولدز<sup>۳</sup> RANS برای محاسبه رفتار توربولانسی جریان استفاده شده است. متغیر های مربوط به معادلات انتقال در مدل توربولانسی RANS به دو مولفه ی متوسط<sup>۴</sup> و نوسانی<sup>۵</sup> تجزیه می شوند. معادلات حالت پایدار متوسط رینولدز ناویر استوکس در ادامه بیان می شوند.

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (1)$$

در این رابطه،  $\phi'$  بیانگر متغیر کلی<sup>۶</sup> و پارامترهای  $\bar{\phi}$  و  $\phi'$  به ترتیب بیانگر متغیر های متوسط و نوسانی می باشند.

### معادله پیوستگی

$$\nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (2)$$

### معادله حرکت

$$\nabla \cdot (\rho v_i v_j) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[ \mu \left( v_i + v_j - \frac{2}{3} \delta_{ij} v_k \right) - \rho \overline{v_i v_j} \right] \quad (3)$$

معادلات (۲) و (۳) بیانگر معادلات ناویر-استوکس در حالت RANS می باشند، که  $p$  و  $v$  به ترتیب متغیرهای کلی بیانگر فشار و سرعت و  $\rho$  و  $\mu$  به ترتیب دانسیته و ویسکوزیته سیال می باشند.  $\delta_{ij}$  تابع دلتای کرونگر<sup>۷</sup> بوده و شاخص های  $i, j, k$  مقادیر ۱، ۲، ۳ را با توجه به راستا های حرکت سیال اتخاذ میکنند  $\rho \overline{v_i v_j}$  عبارت تنش رینولدز<sup>۸</sup> می باشد و بیانگر تاثیر اغتشاش در جریان است.

### معادله انرژی

$$\nabla \cdot [v(\rho E + P)] = \nabla \cdot (K_{eff} T + v_i (\tau_{ij})_{eff}) + S_h \quad (4)$$

در رابطه انرژی،  $E$  انرژی کل و  $T$  متغیر دما می باشد،  $K_{eff}$  ضریب موثر نفوذ حرارتی،  $(\tau_{ij})_{eff}$  تانسور تنش انحرافی<sup>۹</sup> و  $S_h$  منبع تولید انرژی می باشد.

### معادله بقای جرم برای گونه ها

$$\nabla \cdot (\rho v Y_i) = -\nabla J_i + R_i + S_i \quad (5)$$

در این معادله  $Y_i$  و  $J_i$  به ترتیب بیانگر کسر جرمی و فلاکس نفوذ جرمی توربولانسی گونه  $i$  بوده و همچنین  $R_i$  و  $S_i$  به ترتیب میزان تولید این جز توسط واکنش و منبع دیگری می باشند [۱۳].

### معادله دوده

در مدل دو مرحله ای تنسر مقدار هسته ی رادیکالی پیش بینی می شود و سپس مقدار دوده تشکیل شده بر روی این هسته ها محاسبه می گردد. بنابراین در این دو مدل معادله انتقال جداگانه برای دو متغیر غلظت هسته رادیکالی و کسر جرمی دوده حل می گردد.

$$\frac{\partial y}{\partial t} (\rho b_{nuc}^*) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} b_{nuc}^*) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_{nuc}} \nabla b_{nuc}^* \right) + R_{nuc}^* \quad (6)$$

در این روابط،  $b_{nuc}^*$  غلظت هسته های رادیکالی ( بر حسب تعداد ذرات  $\times 10^{-15}$  بر کیلو گرم) می باشد.  $\sigma_{nuc}$  عدد پرانتل<sup>۱۰</sup> آشفته برای انتقال هسته می باشد.  $R_{nuc}^*$  نرخ خالص تولید هسته می باشد.

### بازده احتراق

راندمان برج سوزا، همان راندمان فرآیند احتراق برج سوزا است. در شرایط ایده آل، هیدروکربن های گازی با اکسیژن اتمسفر در نوک برج سوزا واکنش داده و دی اکسید کربن و آب تشکیل می دهند. در عمل، با واکنش احتراق، برخی اجزاء پایدار میانی فرار نیز تشکیل می شوند که با گازهای خروجی به اتمسفر تخلیه می گردند. تمرکز بازده احتراق بر روی تمام محصولات اکسید شده احتراق با هدف اکسید کردن کامل سوخت است. بازده احتراق  $\eta_c$  در این پژوهش بدین صورت تعریف می شود که دبی جرمی کربن دی اکسید تولید شده توسط شعله تقسیم بر دبی جرمی کربن موجود در ترکیبات هیدروکربنی موجود در سوخت است. برای توصیف یک سوخت هیدروکربنی یا مخلوط سوخت این کارایی مبتنی بر جرم عبارت است از:

$$\eta_c = \frac{\text{mass flow Rate of Carbon in } CO_2 \text{ Product by Flame}}{\text{mass flow Rate of Carbon in } C_x H_y \text{ in the Fule Gas Stream}}$$

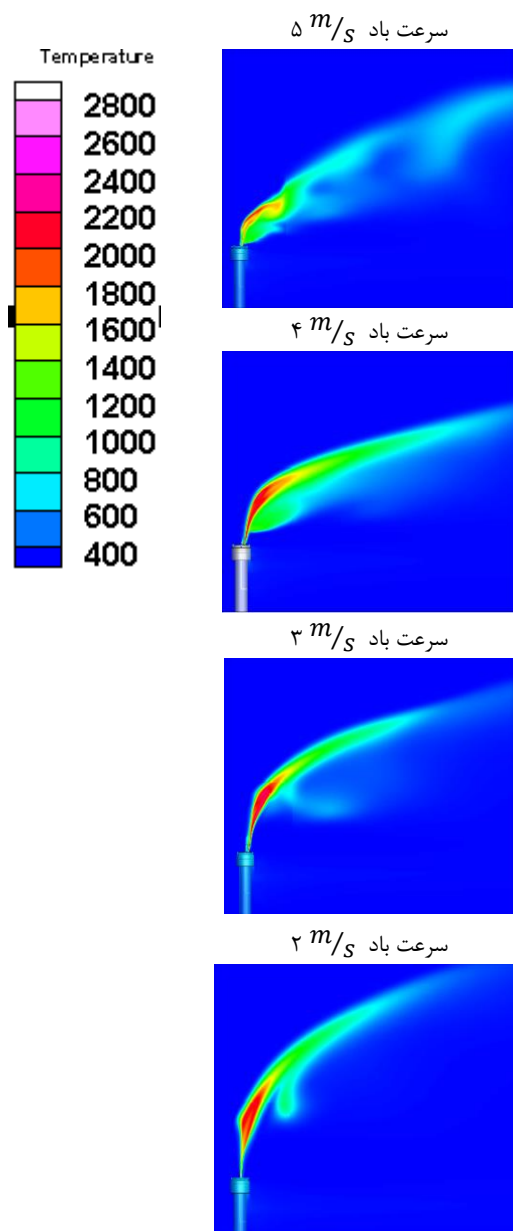
### شبیه سازی

شبیه سازی سه بعدی برای یک برج سوزا LP انجام شد. گاز ارسال به برج سوزا از استوانه ای به قطر ۷۶۲mm وارد می شود. و بخار نیز به صورت جریانی هم جهت از نازلی به قطر ۱۴/۳ mm خارج میشود. که این برج دارای یک استوانه بخار به همراه سه جت بخار می باشد. که با زاویه های ۱۲۰° جت ها از هم قرار گرفته اند. هندسه ارائه شده در شکل ۱ شماتیک طراحی تیپ برج سوزا LP است. مشخصات ساختاری برج سوزا و مشخصات گاز ارسال به برج سوزا به ترتیب در جداول ۱ و ۲ آمده است.

6 Ensemble Averaged  
7 Kronecker Delta Function  
8 Reynolds Stress Term  
9 Deviatoric Stress Tensor  
10 Prandtl Number

1 Continuity  
2 Motion  
3 Reynolds Average Navier Stokes(RANS)  
4 Mean  
5 Fluctuating

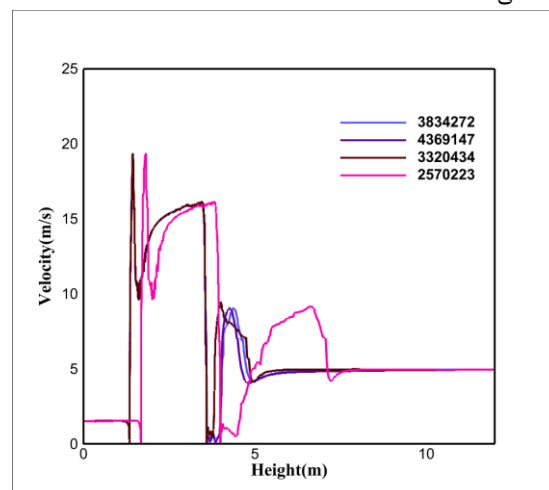




شکل ۶: پروفایل دمایی در سرعت های مختلف وزش باد

به طور کلی مشاهده می گردد که با افزایش سرعت وزش باد، مشخصه های جریان ( میدان جریان) نیز بتدریج دستخوش تغییر می شود که در شکل ۶ بردارهای سرعت جریان (بزرگی و جهت) برای دو نمونه سرعت ۵ و ۲ متر بر ثانیه ترسیم شده است. با توجه به بردارهای ترسیم شده در شکل ۶ به وضوح یک ناحیه چرخشی در نزدیکی خروجی مشعل دیده می شود، به طوری که جریان در این ناحیه به صورت وارونه می باشد و بخشی از جریان به داخل شعله بر می گردد. این ناحیه چرخشی با افزایش سرعت جریان باد بزرگ تر می شود. از این رو، در سرعت های بالای جریان وزش باد، بخش بزرگی از گاز های نسوخته به سمت پایین تر شعله در نزدیکی سرتیپ برج سوزا کشیده می شود در نتیجه با ایجاد گردابه هایی در این محل به اختلاط سوخت و هوا که منجر به نفوذ اکسیژن اضافی به این منطقه می شود که سبب تکمیل فرایند احتراق شده و هیدروکربن های نسوخته در نزدیکی که در اثر سرعت وزش باد بالا وارد فرایند احتراق نشده اند سوخته میشوند و دمای شعله در این محل بالاتر رفته به طوریکه هرچه سرعت وزش باد بالاتر

برای بررسی ارزیابی مش بندی طراحی شده، این مش بندی با اندازه های مختلف در دامنه محاسباتی اجرا و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش چهار مش بندی با تعداد ۲،۵۷۰،۲۲۳؛ ۳،۳۲۰،۴۳۴؛ ۳،۸۳۴،۲۷۲ و ۴،۳۶۹،۱۴۷ سلول (حجم کنترلی) استفاده شد که در نهایت نتایج حاصله برای بررسی استقلال نتایج مدل سازی از مش بندی بهره گرفته شد. شکل ۵ سرعت جریان پیش بینی شده توسط مش بندی های مختلف را مقایسه می کند.



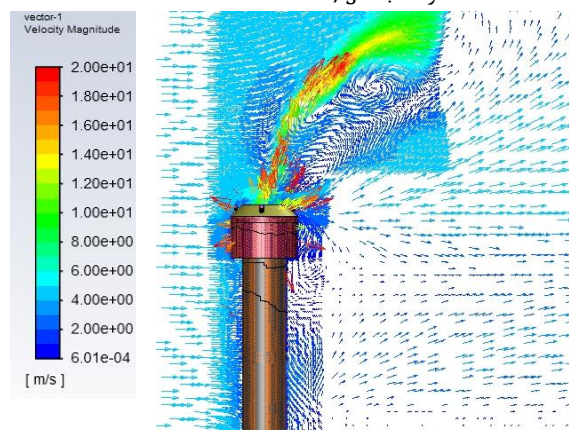
شکل ۵: تغییرات سرعت های پیش بینی شده جریان گاز در امتداد خط افقی برج سوزا LP بر حسب ارتفاع، برای مش بندی های مختلف توسعه یافته

### بحث بر روی نتایج

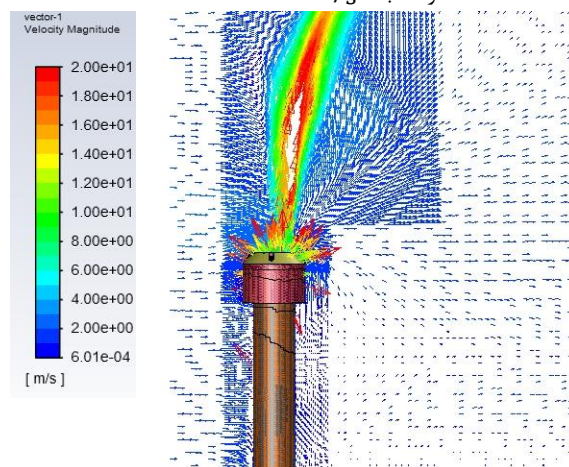
برج های سوزا سامانه های احتراقی باز هستند که وزش باد بر روی شکل و اندازه شعله و بازده احتراق تاثیر می گذارند. به طور کلی برج های سوزایی که ارتفاع ۱۰ تا ۱۰۰ متر دارند. وزش باد در ارتفاعات بالا نزدیک به نوک برج سوزا خیلی قوی تر و شدید تر از وزش باد در ارتفاعات پایین نزدیک به سطح زمین است. به منظور مطالعه وزش باد بر روی شعله، کانتورهای دمایی مورد بررسی قرار گرفتند. چهار حالت وزش باد برای این شبیه سازی در نظر گرفته شده است. (برای سرعت های ۲ تا ۵  $m/s$ ) توزیع دما در شکل ۶ نشان داده شده است. به دلیل اثرات متقابل نیروهای شناوری و وزش باد بر شعله، با افزایش سرعت باد محور شعله از راستای قائم منحرف شده و به سمت افق متمایل می شود. این موضوع، یکی از عوامل مهم تاثیر گذار در بازده احتراق می باشد. زیرا با افزایش سرعت باد دمای بیشینه شعله کاهش می یابد. مقدار بیشینه دما، برای وزش باد با سرعت ۲،۴،۵ و ۳ متر بر ثانیه به ترتیب برابر ۳۱۰۹، ۲۶۴۷، ۲۶۴۰ و ۲۶۲۲ کلوین است.

رود این گردابه‌های تشکیل شده بزرگتر و قدرتمندتر عمل کرده و بیشینه دمای احتراق را با افزایش سرعت وزش باد بالاتر می‌برد.

سرعت باد  $5 \text{ m/s}$



سرعت باد  $2 \text{ m/s}$

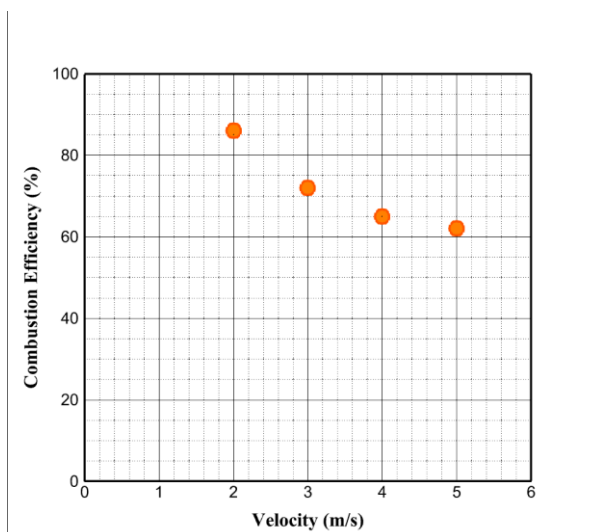


شکل ۷: بردارهای سرعت جریان برای دو سرعت ۵ و ۲ متر بر ثانیه

برای تعیین بازده احتراق شعله، موازنه مواد برای دامنه شعله با محاسبه شار جرمی گونه‌های محاسبه شده در فرمول بازده احتراق به کارگرفته شد. همانطور که در جدول ۳ و شکل ۸ مشاهده می‌شود با افزایش سرعت وزش باد، بازده احتراق نیز کاهش یافته است. در سرعت های پایین وزش باد،  $2 \text{ m/s}$  شعله در تبدیل سوخت به  $\text{CO}_2$  بسیار کارآمد است. اما در سرعت وزش باد  $5 \text{ m/s}$  در اثر افزایش سرعت وزش باد، افزایش هیدروکربن های نسوخته افزایش می یابد و بخش بیشتری از متان در درون سوخت به اتمسفر وارد می شود و بازده احتراق پایین می آید که به دلیل وجود احتراق ناقص در سرعت های بالا می باشد.

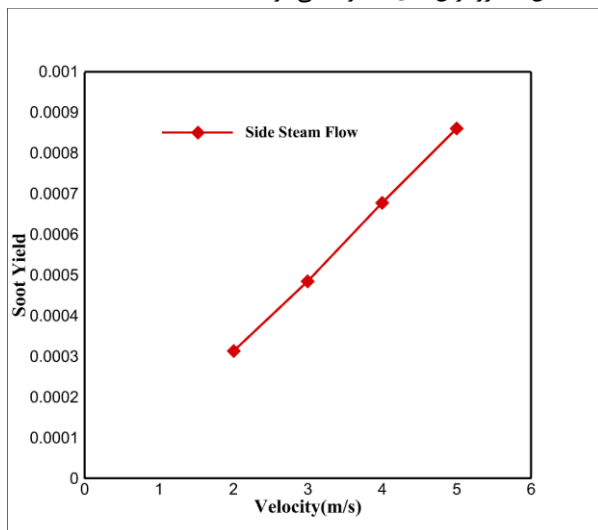
جدول ۳: جریان جرمی گونه های محاسبه شده و بازده احتراق حاصل برای مقادیر مختلف سرعت باد عرضی (مقادیر  $\text{CO}_2$  و  $\text{CH}_4$  ورودی به ترتیب برابر  $0.009$  و  $0.011$  کیلوگرم بر ثانیه)

$\eta_c \%$	$\text{CH}_4 \text{ out}$ $\text{kg/s}$ $\times 10^{-5}$	$\text{CO}_2 \text{ out}$ $\text{kg/s}$	$\text{U m/s}$
۶۲	۵/۴۵	۰/۰۰۲۳	۵
۶۵	۵/۷۸	۰/۰۰۲۷	۴
۷۲	۵/۲۰	۰/۰۰۲۸	۳
۸۶	۷/۷۳	۰/۰۰۲۵	۲



شکل ۸: بازده احتراق برای سرعت های متفاوت وزش باد

بازده تولید دوده برابر نسبت آلاینده‌ها در خروجی به مقدار نسبت ورودی سوخت می‌باشد. بازده دوده تولیدی در سرعت های مختلف محاسبه شد و نتایج آن در شکل ۹ گزارش شده است. همانطور که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود میزان دوده تشکیل شده به ازای افزایش وزش باد از  $2 \text{ m/s}$  تا  $5 \text{ m/s}$ ، بازده تولید دوده از مقدار  $3/13 \times 10^{-4}$  تا  $8/6 \times 10^{-4}$ ٪ افزایش می‌یابد که با افزایش سرعت وزش باد بازده دوده تولیدی نیز بیشتر میشود به این دلیل هر چه قدر سرعت باد افزایش می‌یابد شعله را ناپایدارتر کرده و احتراق ناقص تر به دلیل عدم شرکت بسیاری از هیدروکربن‌های سوخت در فرایند احتراق و تبدیل این هیدروکربن های به دوده می‌شود.

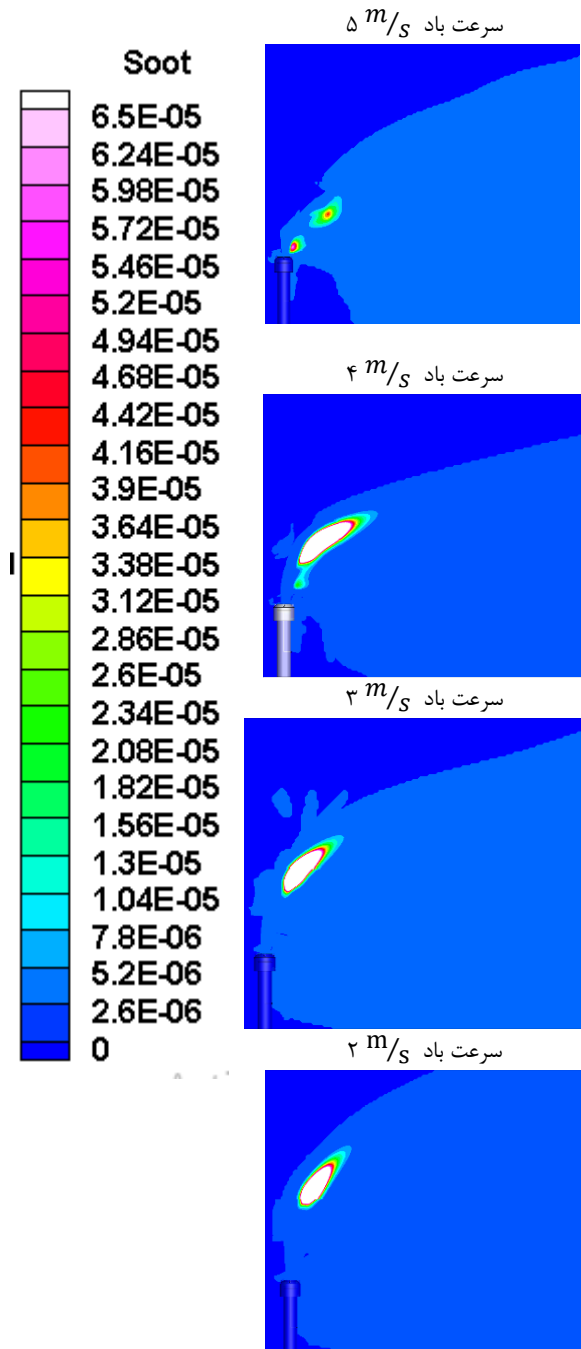


شکل ۹: بازده دوده در سرعت های مختلف وزش باد

نمودار کسر جرمی دوده تا ارتفاع ۲۰ متری در سرعت های مختلف باد از سطح نوک برج سوزا برای بررسی چگونگی پخش دوده خروجی در شکل ۱۰ ارائه شده است. در یک نگاه کلی می توان دریافت که بیشترین غلظت دوده برج سوزا در سرعت باد ۵ متر بر ثانیه در بین ارتفاع ۴ تا ۸ متری، در سرعت باد  $4 \text{ m/s}$  تا  $6 \text{ m/s}$  بین ارتفاع ۶ تا ۹ متری، در سرعت باد  $3 \text{ m/s}$  در بین ارتفاع ۸ تا ۱۰ متری و در سرعت باد  $2 \text{ m/s}$  در بین ارتفاع ۸ تا ۱۲ متری از تیپ برج سوزا اتفاق می افتد. همچنین با افزایش وزش باد از  $2 \text{ m/s}$  تا  $5 \text{ m/s}$  میزان دوده تولید نیز

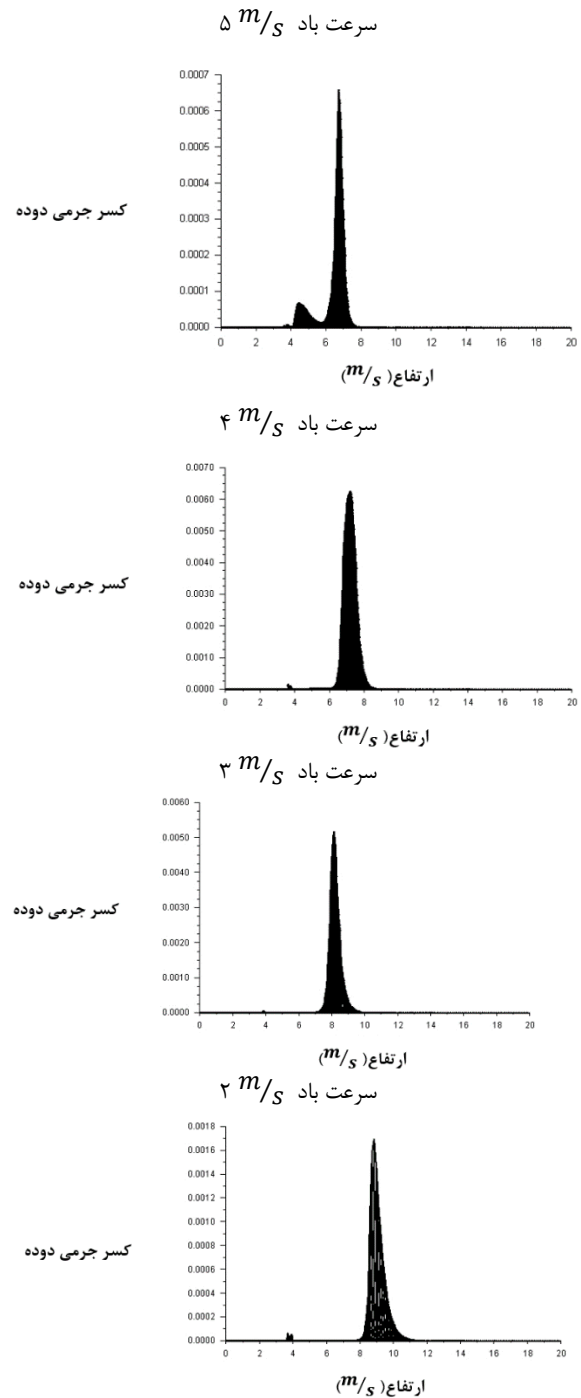


توزیع‌های غلظت دوده در اطراف برج سوزا در سرعت های مختلف باد در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود غلظت دوده تولیدی وابسته به سرعت باد می‌باشد. هرچه قدر سرعت باد را افزایش یابد میزان غلظت دوده تولیدی کمتر شده و دوده به سر تیپ برج سوزا نزدیکتر می‌شود. علت این موضوع این است که در سرعت بالای وزش باد، سرعت ۵ متر بر ثانیه و خم شدگی شعله در جهت مسیر باد تمام سوخت گازی وارد واکنش احتراقی نمی‌شوند و مقداری از هیدروکربن‌های سوخت به صورت واکنش نداده در اطراف سر تیپ برج سوزا باقی می‌مانند پس دوده تولید در سرعت های بالاتر از ۲ متر بر ثانیه نزدیک تر به سر تیپ برج سوزا تشکیل می‌شود.



شکل ۱۱: توزیع غلظت دوده در نوک برج سوزا در جهت وزش باد.

افزایش یافت. بر این اساس بیشینه کسر جرمی دوده متعلق به سرعت وزش باد ۵ متر بر ثانیه در ارتفاع ۷ متری برج سوزا است. همچنین دبی جرمی دوده ورودی به اتمسفر در سرعت های وزش باد ۴،۳،۲ و ۵ متر بر ثانیه مقادیر ۰،۹۵/۱، ۰،۴۸/۱، ۰،۷۲/۲ و ۰،۶۳/۲ کیلوگرم بر ساعت بدلیل احتراق ناقص هیدروکربن های خروجی برج سوزا وارد اتمسفر می شود.



شکل ۱۰: نمودار کسر جرمی دوده بر حسب ارتفاع برج سوزا در سرعت های مختلف باد

## نتیجه گیری

در مطالعه حاضر به بررسی عددی مشخصه‌های احتراقی برج سوزا کم فشار پالایشگاه پارس جنوبی پرداخته شده است. اثر عامل محیطی وزش باد، بر عملکرد برج سوزا (توزیع دما، توزیع محصولات حاصل از احتراق) و همچنین بازده تشکیل دوده بررسی شده است. یک مدل محاسباتی شامل پدیده‌های هیدرودینامیکی، انتقال حرارت، واکنش‌های احتراق، آشفستگی و تابش در دامنه محاسباتی در ابعاد صنعتی توسعه یافته است. نتایج حاصل از مدل محاسباتی نشان می‌دهد که با افزایش سرعت وزش باد از ۲ تا ۵ متر بر ثانیه گردابه‌های هیدروکربن‌های نسوخته در اثر سرعت وزش باد بزرگتر شده و با نفوذ اکسیژن بیشتر به درون شعله بیشینه دما را افزایش داده است و شعله را به سمت سرتیپ برج سوزا نزدیک‌تر می‌کند. همچنین بازده احتراق با افزایش سرعت وزش باد و به دلیل احتراق ناقص هیدروکربن‌ها کاهش می‌یابد و احتراق ناقص هیدروکربن‌ها منجر به افزایش دوده تولیدی بیشتر می‌شود و بازده تولید دوده را افزایش می‌دهد.

## فهرست علائم

$E$	انرژی کل، J
$J_i$	شار جرمی، $kg/m^2.s$
$K_{eff}$	ضریب موثر نفوذ حرارتی، W/m.K
$v_i$	سرعت جریان سیال، m/s
$P$	فشار، Pa
$R$	نرخ تولید ماده، kg/s
$S_i$	منبع تولید انرژی
$T$	دما، K
$Y_i$	کسر جرمی گونه $i$
$b_{nuc}^*$	غلظت هسته رادیکالی
$R_{nuc}^*$	غلظت تولید هسته
فهرست علائم یونانی	
$\emptyset$	متغیر کلی
$\bar{\emptyset}$	متغیر متوسط
$\hat{\emptyset}$	متغیر نوسانی
$\rho$	چگالی سیال، $kg/m^3$
$\mu$	ویسکوزیته سیال، Pa.s
$\varepsilon$	نرخ اتلاف اغتشاش، J/s
$(\tau_{ij})_{eff}$	تانسور تنش انحرافی،
$\delta_{ij}$	تابع دلتای کرونگر
$\sigma_{nuc}$	عدد پرانتل
زیرنویس‌ها	
$i, j, k$	جهت حرکت سیال

## مراجع

- 1-M. Delichatsios, "Transition from momentum to buoyancy-controlled turbulent jet diffusion flames and flame height relationships", *Combustion and Flame*, vol. 92, no. 4, pp. 349-364, 1993.
- 2- D. C. Mussatti, R. Srivastava, P. M. Hemmer, and R. Strait, "EPA air pollution control cost manual," *Air Quality Strategies and Standards Division of the Office of Air Quality Planning and Standards, US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC*, vol. 27711, 2002.
- 3- T. Poinso and D. Veynante, *Theoretical and numerical combustion*. RT Edwards, Inc., 2005.

- 4- M. Soltanieh, A. Zohrabian, M. J. Gholipour, and E. Kalnay, "A review of global gas flaring and venting and impact on the environment: Case study of Iran", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 49, pp. 488-509, 2016.
- 5- S. R. Turns, *Introduction to combustion*. McGraw-Hill Companies New York, NY, USA, 1996.
- 6- D. Castineira and T. F. Edgar, "CFD for simulation of steam-assisted and air-assisted flare combustion systems," *Energy & Fuels*, vol. 20, no. 3, pp. 1044-1056, 2006.
- 7- D. Castiñeira and T. F. Edgar, "CFD for simulation of crosswind on the efficiency of high momentum jet turbulent combustion flames," *Journal of Environmental Engineering*, vol. 134, no. 7, pp. 561-571, ۲۰۰۸.
- 8- K. D. Singh T. Dabade, H. Vaid, P. Gangadharan, D. Chen, H. H. Lou, X. Li, K. Li and Christopher B. Martin., "Computational fluid dynamics modeling of industrial flares operated in stand-by mode," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 51, no. 39, pp. 12611-12620, 2012.
- 9- A. Patki, "On numerical simulation of black carbon (soot) emissions from non-premixed flames," *Journal of Geoscience and Environment Protection*, vol. 2, no. 04, p. 15, 2014.
- 10- A. A. Aboje, J. I. Erete, K. J. Hughes, L. Ma, M. Pourkashanian, and A. Williams, "An investigation of methane and propane vertical investigation of methane and propane vertical flares," *Journal of the Energy Institute*, vol. 89, no. 4, pp. 793-806, 2016.
- 11- Q. Guan, C. Guo, and S. Hou, "Numerical study of smoke emissions of an air-assisted elevated flare," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 146, no. 1: IOP Publishing, p. 012022.
- 12- S. S. Mostafayi and F. Rashidi, "Effect of dividing single flare tip into multiple tips on soot reduction," *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 22, pp. 1097-1108, 2020.
- 13- "ANSYS, Inc. ANSYS Fluent users guide, Release 18." (accessed).