

## تخمین هوای اضافی سوخت (گازی) جایگزین با هدف تولید دمای متناسب با سوخت مایع در کوره های دوار

حسین سخایی نیا<sup>۱</sup>، محمدعلی تورنگی<sup>۲\*</sup>، عبدالحمید قره خانی

<sup>۱</sup> دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات سمنان، سمنان، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گلستان، گلستان، ایران

دریافت: ۹۳/۱۱/۱۱ پذیرش: ۹۴/۶/۲۰

### چکیده

امروزه تغییر سوخت مصرفی کوره‌های دوار از سوخت‌های مایع به سوخت گاز طبیعی، مدیریت انرژی و بهینه سازی این نوع کوره‌ها و مشعل‌های آن، یکی از چالش‌های اساسی صنعت است. در بررسی‌های صورت گرفته در صنایعی که با کوره‌های دوار همراه بوده و منبع حرارتی (مشعل) آن از سوخت مایع به سوخت گازی تبدیل شده و یا بصورت دوگانه سوز هستند، به دلیل عدم کنترل صحیح دمای کوره دچار مشکل می‌باشند. این مشکل در کیفیت محصولات، میزان مصرف انرژی، هزینه مصرفی مواد اولیه، هزینه تعمیر و نگهداری و ... تاثیر نامطلوب می‌گذارد. با استفاده از روش محاسبه هوای اضافی سوخت جایگزین (گاز طبیعی) و برنامه رایانه‌ای ارائه شده در این تحقیق، می‌توان محدوده میزان هوای اضافی مورد نیاز احتراق انواع سوخت را پیش‌بینی کرد. تخمین و تعیین این محدوده می‌تواند در کنترل صحیح دمای کوره‌های دوار مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

**کلمات کلیدی:** مشعل، سوخت جایگزین، هوای اضافی، دمای آدیاباتیک شعله، کوره‌های دوار

### مقدمه

رشد روزافزون صنایع مشکلات متعدد زیست‌محیطی از جمله آلودگی هوا، گرم‌شدن جو کره زمین و تخریب لایه‌ازن را در پی داشته، به طوری که این مهم در دهه‌های اخیر توجه خاص مجامع علمی و سیاست‌گذاری را به خود جلب نموده‌است. تمامی این تلاش‌ها در کنفرانس‌های ریو، مونترال و کنوانسیون تغییرات آب‌وهوا متبلور شده که کشورهای جهان به خصوص کشورهای صنعتی را ملزم به اجرای برنامه‌های کنترل آلودگی-های زیست‌محیطی می‌نماید.

\* mtorangi@yahoo.com



از طرفی در سال‌های اخیر نوسانات قیمت نفت خام بسیار زیاد بوده و در بعضی مواقع از پیش‌بینی‌های کارشناسان اقتصادی بازارنفت فراتر رفته‌است [۱]. هرچندکه با افزایش قیمت نفت خام، قیمت سایر حامل‌های انرژی نیز به تناسب افزایش می‌یابد، لیکن وجود مقادیر متنابه‌ای از ذخایر تثبیت شده گاز طبیعی همچنین ارزان و تمیزتر بودن آن برای سوخت، محققان را تشویق به یافتن راه‌های بهتر و مناسب‌تری برای استفاده از این منابع عظیم خدادادی نموده است.

عطاپور و هرمزی در مقاله‌ای برای کوره‌دوار گچ مدل ریاضی ارائه دادند [۲]. فرهادی و حیدری با استفاده از روش تحلیلی معکوس، چگونگی تعیین عمق بستر مواد در کوره‌های دوار را مورد بررسی قرار دادند [۳]. افروخته بازیافت حرارت اتلافی از دیواره کوره دوار توسط جذب‌کننده تشعشعی و استفاده آن در سیستم گرمایشی ساختمان‌ها و آب صنعتی را مورد بررسی قرارداد [۴]. راناد<sup>۱</sup> و همکارش یک مدل ریاضی برای شبیه سازی فرایندهای کلیدی در بستر جامد کوره‌های دوار صنعت سیمان ارائه دادند [۵]. پاتریک<sup>۲</sup> و همکارانش طی تحقیق تجربی متوجه شدند که پروفیل سرعت گاز در انتقال حرارت کوره‌های دوار تاثیر حیاتی دارد و این مطلب را با کمک دینامیک سیالات محاسباتی اثبات کردند [۶]. یی- چون شی<sup>۳</sup> و همکارانش عمق بستر جامد مواد در انتهای خروجی کوره‌های دوار را برای جرم‌های مختلف جریان، سرعت دوران و زاویه تمایل در دو نوع کوره آزمایشی با اندازه‌های متفاوت، به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند [۷]. کالیونگ<sup>۴</sup> و همکارانش به جهت افزایش بازده حرارتی، کوره‌های دوار را با استفاده از دینامیک محاسباتی مورد مطالعه قرار دادند [۸]. صادقیان<sup>۵</sup> و همکارش با استفاده از سیستم غیرخطی و بر اساس ورودی و خروجی معین به پیش‌بینی و تشخیص روند خطا در کوره‌های دوار سیمان پرداختند [۹].

گرچه تحقیقاتی وسیعی در زمینه افزایش بهره‌وری کوره‌های دوار صورت گرفته‌است؛ لیکن برخی پارامترهای موثر مثل میزان مصرف هوای اضافی و تاثیر آن در دمای احتراق با تنظیم دامنه‌ی هوای اضافی مشعل در این‌گونه کوره‌ها در مقایسه با بدنه و عمق بستر مواد در کوره‌های دوار، اطلاعات کم‌تری موجود است. لذا کنترل صحیح دما با تعیین میزان هوای اضافی احتراق، جهت کنترل کیفیت محصولات در کوره‌های دوار لازم و ضروری می‌باشد.

### بهینه سازی با جایگزینی سوخت گازی

مهم‌ترین بخش کوره‌های دوار، منبع حرارتی یا سامانه گرمایشی آن یعنی مشعل می‌باشد. شعله مشعل‌های با سوخت مایع خصوصاً گازوییل و مازوت که در کوره‌های دوار مورد استفاده قرار می‌گیرد، به شدت تشعشعی و احیایی بوده و بزرگترین ضعف این نوع مشعل‌ها، کیفیت نامناسب احتراق است، که عمدتاً به علت پودرشدن نامناسب سوخت می‌باشد. محتوای مواد آلاینده مثل گوگرد که در سوخت‌های مایع

<sup>1</sup> Ranade

<sup>2</sup> Patrick

<sup>3</sup> Yi-chun shi

<sup>4</sup> Ka-Leung

<sup>5</sup> Sadeghian

مخصوصاً مازوت در مواردی تا ۴ درصد نیز می‌رسد، اما میزان گوگرد در گاز طبیعی ناچیز است. با توجه به محدودیت‌های نقطه شبنم اسیدی‌گاز در محصولات احتراق، در شرایطی که سوخت مایع از درصد قابل توجهی گوگرد برخوردار باشد؛ مشکلات بروز خوردگی برای قطعات و سایر ملحقات سیستم احتراق و بدنه کوره‌های دوار را به‌وجود می‌آورد. در حالی که استفاده از گاز طبیعی به دلیل یکنواختی شعله و حذف ترکیبات گوگردی، افزایش عمر مفید کوره‌های دوار را در بر دارد [۱۰].

در حالی که برای سوخت‌های مایع در بسیاری از موارد به دلیل سنتی بودن تجهیزات پودرساز سوخت، احتراق از کیفیت مناسبی برخوردار نمی‌باشد و در بسیاری از موارد نیز حتی با مراعات تمامی جوانب، با کم‌ترین اهمال در تعمیر و نگهداری، ایجاد مشکلاتی مثل کک‌زدن، لجن‌ساختن و بسته شدن نازل اتفاق می‌افتد. علاوه بر این مازوت برای احتراق مناسب، نیاز به پیش‌گرم شدن نیز دارد.

از طرفی بزرگ‌ترین مشکل سوخت‌های مایع نظیر گازوییل و مازوت، افزایش آلاینده‌های زیست محیطی بوده که میزان این آلاینده‌ها در مقایسه با گاز طبیعی مقدار قابل ملاحظه‌ای می‌باشد.

از آن‌جا که گاز طبیعی تمیز می‌سوزد از خود مواد زاید مثل دوده، خاکستر و بخارات مسموم و نامطبوع به‌جا نمی‌گذارد. تولید مواد زاید مثل دوده در سوخت‌های فسیلی علاوه بر آلودگی محیط‌زیستی در کیفیت محصولات تولیدی کوره‌های دوار نیز موثر است. با استفاده از گاز طبیعی، می‌توان کیفیت محصولات تولیدی را افزایش داد. از طرفی گاز طبیعی بر خلاف سوخت‌های مایع (وحتی گاز مایع) نیاز به مخازن ذخیره‌سازی ندارد، بنابراین علاوه بر حذف هزینه‌های نسبتاً بالا، از ایجاد خطرات آلودگی زیست محیطی ناشی از نشست مواد و همچنین آتش‌سوزی و غیره جلوگیری می‌شود.

بررسی‌های صورت گرفته در این تحقیق نشان می‌دهد که هر چند جایگزینی سوخت گازی در کوره‌های دوار مزایایی داشته، ولی عدم کنترل صحیح دمای کوره‌های دواری که به صورت دوگانه سوز مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، این صنعت را در تولید محصول با کیفیت، هزینه‌های انرژی، تعمیر و نگهداری و ... دچار مشکل کرده‌است. کنترل صحیح دما با تعیین میزان هوای اضافی در احتراق سوخت، جهت حل این مشکل لازم و ضروری می‌باشد.

### روابط تئوری استفاده شده

رفتار کمی فرایند احتراق نیاز به درک بعضی مفاهیم و تعاریف اساسی دارد. برای تحلیل مناسب از خواص ترمودینامیکی مخلوط گازها (یا سوخت مایع در حالت بخار)، در این تحقیق گاز، ایده‌آل و تابع الگوی دالتون فرض شده‌است. سوخت‌های مورد بحث این تحقیق مخلوطی از هیدروکربن‌ها و برخی گازهای دیگر می‌باشد که به عنوان اجزاء سوخت، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این الگو علاوه بر اعمال فرض گاز ایده‌آل بر مخلوط، اجزای گازی نیز ایده‌آل فرض می‌شوند. اهمیت الگوی دالتون در آن است که می‌تواند خواص ترمودینامیکی مخلوط گازهای ایده‌آل را به صورت مجموع خواص اجزاء آن بیان نمود.

یکی از کارآمدترین این روش‌ها استفاده از فرمت چند جمله‌ای‌های ناسا است که در آن خواص ترمودینامیکی گرمای ویژه مولی، آنتالپی ویژه مولی و انتروپی ویژه مولی در فشار مرجع به صورت چند



جمله‌ای‌هایی که تابع دمای مطلق هستند ارائه شده است. فرم عمومی چندجمله‌ای گرمای ویژه مولی به صورت زیر است [۱۱]:

$$\frac{C_{pk}^o}{R} = \sum_{n=1}^N a_{nk} T_k^{(n-1)} \quad (1)$$

ضرایب ظرفیت حرارتی گازهای حاصل از احتراق به صورت تابعی از دما بیان می‌شود که رابطه آن بدین صورت است.

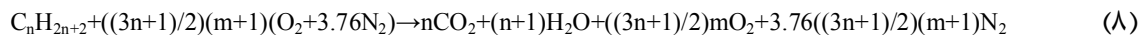
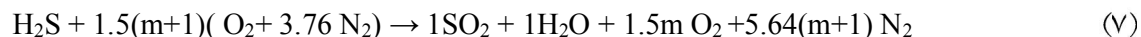
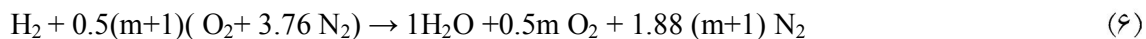
$$\frac{C_{pig}}{R} = A + BT + CT^2 + DT^{-2} \quad (T: Kelvin) \quad (2)$$

$$c_{pH}^o = \sum n_i c_{p_i}^o = R \left[ \sum n_i A_i + \sum n_i B_i T + \sum n_i C_i T^2 + \sum n_i D_i T^{-2} \right] \quad (3)$$

$$\Delta H_{298}^o + \Delta H_p^o = 0 \quad (4)$$

$$-\Delta H_{298}^o = \Delta H_p^o = \int_{298.15}^{T_{Flame}} c_{pH}^o dT \quad (5)$$

با حل معادله (۱۰) به روش سعی و خطا مقدار دمای شعله برای سوخت مورد نظر در کوره به دست می‌آید. روابط احتراق عبارتند از:



در معادلات فوق  $m$  مقدار هوای اضافی<sup>۱</sup> و  $n$  اندیس هیدروکربن موجود در سوخت می‌باشد. در این تحقیق با توجه به گستردگی محاسبات و دقت لازم، ضرایب مورد نیاز برای معادلات سوخت‌های مختلف با میزان درصد هوای اضافی متفاوت با استفاده از نرم افزار اکسل<sup>۲</sup> به دست آمده است.

<sup>1</sup> Excess Air

<sup>2</sup> Excel

## سوخت‌های مایع و گازی کوره های دوار

سوخت‌های مایع مورد بررسی در این تحقیق طبق جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱. آنالیز هیدروکربنی سوخت‌های مایع مورد بررسی در این تحقیق

مازوت		گازوئیل	
درصد موجود	نوع هیدروکربن	درصد موجود	نوع هیدروکربن
۰/۲۳	C <sub>7</sub>	۴/۱۸	C <sub>22</sub>
۱/۲۸	C <sub>8</sub>	۵/۲۳	C <sub>23</sub>
۴/۸۸	C <sub>9</sub>	۵/۶۴	C <sub>24</sub>
۵/۲۵	C <sub>10</sub>	۶/۲۱	C <sub>25</sub>
۵/۹۵	C <sub>11</sub>	۸/۳۳	C <sub>26</sub>
۲۰/۸۰	C <sub>12</sub>	۱۰/۴۴	C <sub>27</sub>
۲۰/۹۰	C <sub>13</sub>	۱۱/۱۵	C <sub>28</sub>
۸/۷۷	C <sub>14</sub>	۱۲/۲۶	C <sub>29</sub>
۶/۵۶	C <sub>15</sub>	۹/۵۶	C <sub>30</sub>
۶/۸۶	C <sub>16</sub>	۷/۶۶	C <sub>31</sub>
۴/۹۴	C <sub>17</sub>	۶/۴۵	C <sub>32</sub>
۴/۰۷	C <sub>18</sub>	۵/۲۰	C <sub>33</sub>
۳/۳۶	C <sub>19</sub>	۴/۲۵	C <sub>34</sub>
۲/۴۱	C <sub>20</sub>	۳/۳۹	C <sub>35</sub>
۱/۷۴	C <sub>21</sub>	-	-
۱/۳۳	C <sub>22</sub>	-	-
۰/۸۷	C <sub>23</sub>	-	-
۰/۵۲	C <sub>24</sub>	-	-
۰/۰۴	C <sub>25</sub>	-	-

سوخت گازی مورد بررسی طبق جدول ۲ می‌باشد.

## مدل سازی روابط دمای آدیاباتیک شعله در کوره دوار

با استفاده از روابط ترمودینامیکی، سوخت‌های مورد بررسی به صورت زیر مدل سازی شده‌است.

$$H_g = (19351.1 + 16878.6m) + (4.150205 + 2.890998m) \times T + (-54366447 - 8094896.5m) \times T^{-2} \quad (9)$$

معادله (۹) برای سوخت گازوئیل نوشته و محاسبه شده است، m درصد هوای اضافی در احتراق می‌باشد.

$$H_{ma} = (27848.15 + 24309m) + (5.949899 + 4.163691m)T + (-80361584.2 - 11658481.7m) \times T^{-2} \quad (10)$$

معادله (۱۰) برای مازوت نوشته و محاسبه شده است،  $m$  درصد هوای اضافی در احتراق می باشد.

$$H_{gas} = (3886.97 + 3365.05m) + (0.873381 + 0.576536m) \times T + (-6917861.8 - 1584631.8m) \times T^{-2} \quad (11)$$

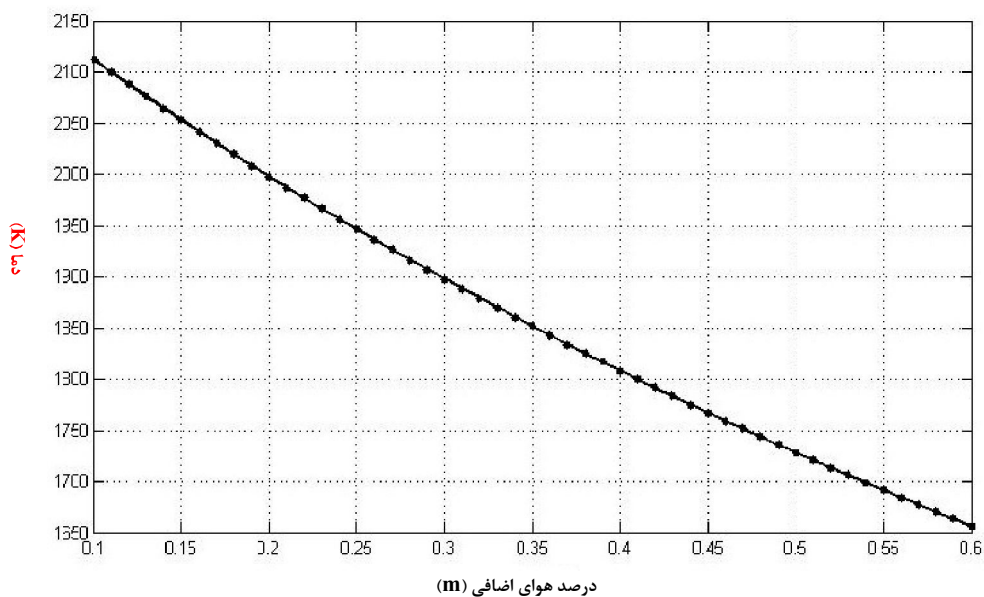
معادله (۱۱) برای گاز طبیعی نوشته و محاسبه شده است،  $m$  درصد هوای اضافی در احتراق می باشد.

جدول ۲. آنالیز هیدروکربنی گاز طبیعی پالایشگاه پارس جنوبی

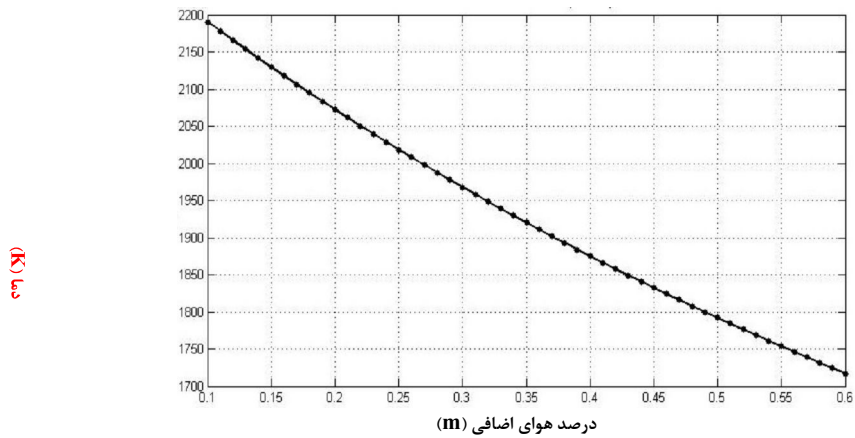
درصد مولی موجود (در ۱۰۰ مول) گاز طبیعی	فرمول	مواد تشکیل دهنده
۸۵/۲۱	CH <sub>4</sub>	متان
۵/۵۴	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	اتان
۱/۹۹	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	پروپان
۰/۳۴	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	ایزو بوتان
۰/۵۲	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	بوتان نرمال
۳/۴۸	N <sub>2</sub>	نیترژن
۱/۸۳	CO <sub>2</sub>	دی اکسید کربن
۰/۶۹	H <sub>2</sub> S	سولفید هیدروژن

### نمودار و تحلیل نتایج برنامه رایانه‌ای

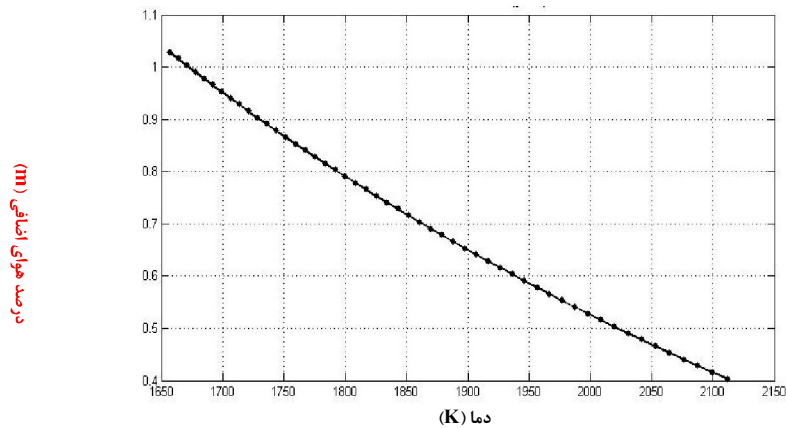
خروجی حاصل از اجراء برنامه رایانه‌ای آرایه شده در شکل های ۱ تا ۶ آورده شده است.



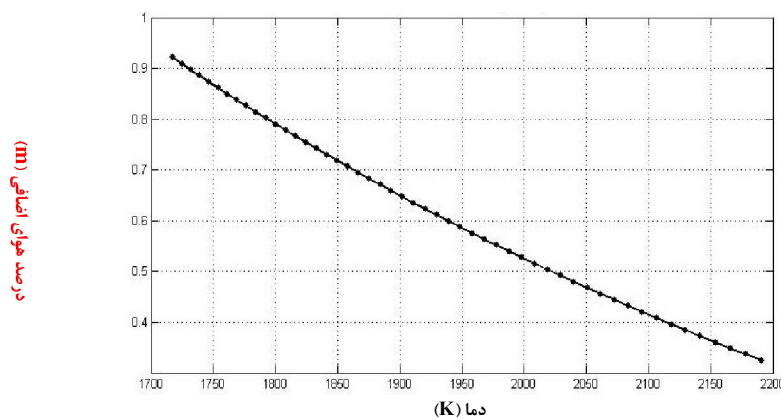
شکل ۱. نمودار دمای آدیاباتیک شعله گازوییل بر مبنای درصد هوای اضافی



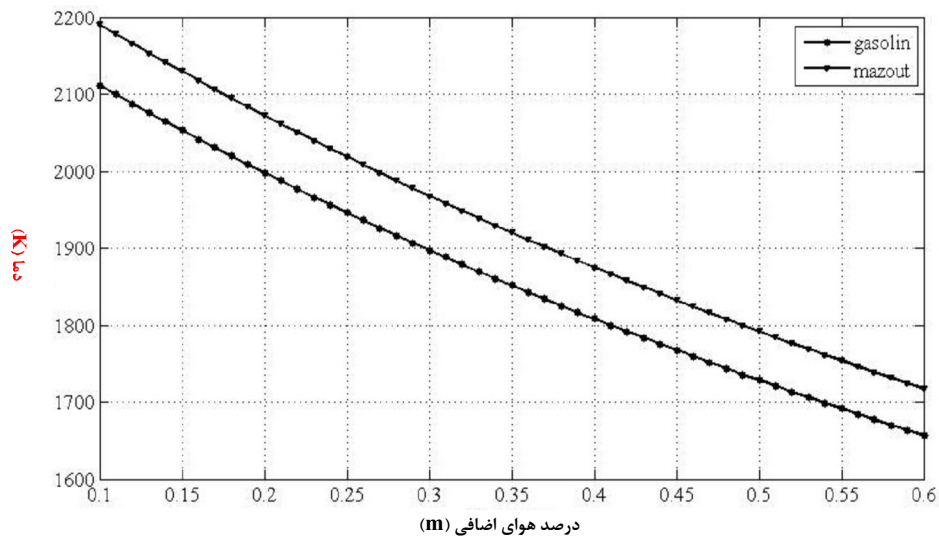
شکل ۲. نمودار دمای آدیاباتیک شعله مازوت بر مبنای درصد هوای اضافی



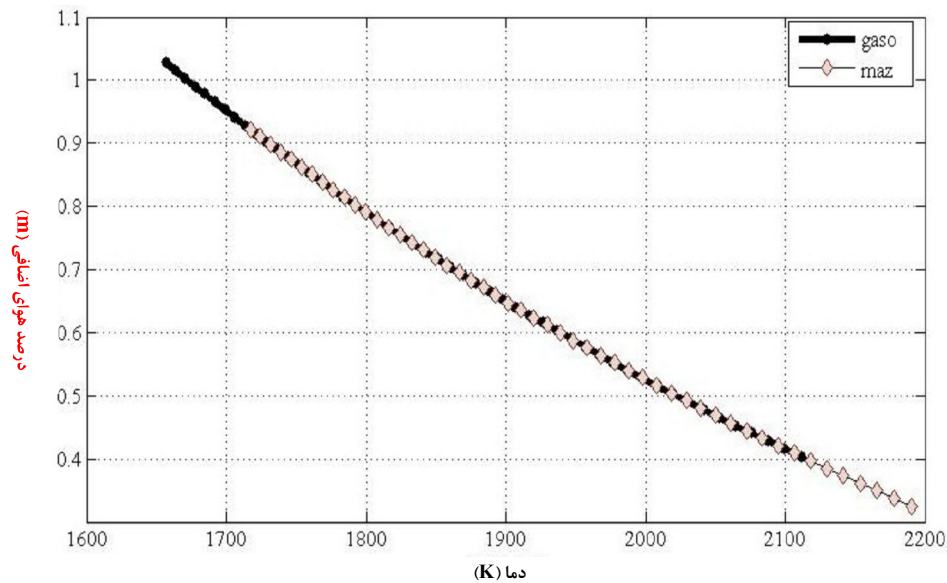
شکل ۳. نمودار هوای اضافی مورد نیاز در گاز طبیعی برای حصول دمای آدیاباتیک شعله گازوییل بر مبنای همان دما



شکل ۳. نمودار هوای اضافی مورد نیاز در گاز طبیعی برای حصول دمای آدیاباتیک شعله مازوت بر مبنای همان دما



شکل ۵. نمودار مقایسه‌ای دمای آدیباتیک شعله گازوئیل و مازوت بر مبنای درصد هوای اضافی



شکل ۶. نمودار مقایسه‌ای هوای اضافی مورد نیاز گاز طبیعی جهت حصول دمای آدیباتیک شعله گازوئیل و مازوت بر مبنای دماهای آدیباتیک شعله گازوئیل و مازوت

- نمودارهایی که نشان دهنده تغییرات دما در مقابل هوای اضافی می‌باشد، دارای شیب منطقی بوده و با افزایش مقدار هوای اضافی احتراق، دمای آدیباتیک شعله کاهش می‌یابد.
- مازوت بالاترین مقدار دمای آدیباتیک شعله را تولید می‌کند، که ناشی از ارزش حرارتی بالای آن نسبت به گازوئیل می‌باشد.



- با میزان هوای اضافی یکسان در سوخت‌های مایع، مازوت دمای بیش‌تری تولید می‌کند که ناشی از ارزش حرارتی بالای آن می‌باشد.
- جهت تولید دمای یکسان در سوخت‌های مایع، مازوت به مقدار هوای اضافی بیش‌تری نسبت به گازوییل نیاز دارد و علت آن وجود هیدروکربن‌ها سنگین‌تر می‌باشد.
- با توجه به این‌که محدوده تغییرات مقدار هوای اضافی در سوخت‌های مایع ۰/۱ تا ۰/۶ در نظر گرفته شده، محدوده به‌دست آمده برای گاز طبیعی ۰/۳ تا یک به‌دست آمده است.
- محدوده هوای اضافی به‌دست آمده در گاز طبیعی نشان می‌دهد، گاز طبیعی دارای محدوده تنظیم دمایی بزرگ‌تری نسبت به سوخت‌های مایع مورد بررسی دارد.
- برای تولید دمای متناسب با سوخت مایع، در گاز طبیعی نیاز به هوای اضافی بیش‌تری می‌باشد.

### نتیجه گیری

برنامه و مدل ارائه شده، بر پایه اصول ترمودینامیکی و احتراق و با به‌کار بردن روش‌های ریاضی، با ارایه روشی خاص، محاسبه دمای آدیاباتیک سوخت جایگزین (گاز طبیعی) صورت گرفته است. در این محاسبات مقادیر مولی، جنس محصولات احتراق و نوع سوخت، تاثیر به‌سزایی دارد.

برنامه کدنویسی شده، مقادیر دمای آدیاباتیک شعله سوخت مایع را با احتساب میزان هوای اضافی و همچنین میزان هوای اضافی مورد نظر سوخت جایگزین (گاز طبیعی) برای به‌دست آوردن همان دمای آدیاباتیک سوخت مایع را محاسبه می‌کند. در محاسبات برنامه محدوده هوای اضافی سوخت مایع بالاتر از محدوده واقعی و مورد استفاده در کوره‌های دوار در نظر گرفته شده است و تعیین میزان هوای اضافی در برنامه قابل تغییر می‌باشد.

با شیوه ارائه شده در برنامه رایانه‌ای دمای آدیاباتیک سوخت‌های مایع برای مقادیر مختلف هوای اضافی و هوای اضافی برای گاز طبیعی برای دمای مورد نظر محاسبه شده است.

با کمک برنامه رایانه‌ای یک ارتباط بین روابط ترمودینامیکی و احتراق سوخت‌ها (مورد بهره‌برداری در کوره‌های دوار) برقرار کرده و از آن در جهت بهینه‌سازی میزان هوای اضافی موثر استفاده کرده است.

### منابع

۱. کرمی‌نیا، غلامعلی، "ترازنامه انرژی سال ۱۳۸۹"، دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی وزارت نیرو، زمستان ۱۳۹۰، ص ۳۲۲-۳۲۴
۲. عطاپور، علی، هرمزی، فرامرزی، "مدل‌سازی کوره دوارگچ"، یازدهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ۷ الی ۹ آذرماه، ۱۳۸۵
۳. حیدری، محمدمهدی، فرهانی، بیژن، "مطالعه‌ی چگونگی تعیین عمق بستر مواد در کوره‌ی دوار با استفاده از روش تحلیل معکوس"، فصلنامه‌ی علمی و پژوهشی شریف، بهار ۱۳۸۶، سی و هفتم، ۱۱۸-۱۰۷.



۴. افروخته، بیژن، " استفاده از حرارت اتلافی از بدنه کوره‌های دوار سیمان جهت گرمایش و تامین آب گرم ساختمان‌ها"، ماهنامه علمی-تخصصی فن آوری سیمان، خرداد ۱۳۹۱، شماره ۵۱، صفحه ۶۹-۷۳
5. K.S. Mujumdar, V.V. Ranade, Simulation of Rotary Cement Kilns Using a One-Dimensional Model, Chemical Engineering Research and Design, March 2006, Issue 3, Volume 84, Pages 165-177
6. Patrick R. Davies, Michael J.S. Norton, D. Ian Wilson, John F. Davidson, David M. Scott, Gas flow in rotary kilns, December 2010, Issue 6, Volume 8, Pages 613-616
7. Eckehard Specht, Yi-Chun Shi, Herrmann Woche, Joern Knabbe, Uwe Sprinz, Experimental investigation of solid bed depth at the discharge end of rotary kilns, Powder Technology, 10 January 2010, Issues 1-2, Volume 197, Pages 17-24
8. Ka-Leung Lam, Adetoyese O. Oyedun, Chi-Wai Hui, CFD Study on the Application of Rotary Kiln in Pyrolysis, Computer Aided Chemical Engineering, 2011, Volume 29, Pages 71-75
9. Sadeghian, Masoud, Fatehi, Alireza, prediction and detection of the process fault in a cement rotary kiln by locally linear neuro-fuzzy technique, Journal of Process Control, 2011, 21, 302-308
۱۰. عادل، ایوب، ولی‌پور، سارا، "مشعل و سیستم گازسوز کوره‌های دوار ذوب چدن"، صنعت ریخته‌گری، شماره ۸۰، مهرماه ۱۳۹۰، صفحه ۸۳-۷۸
۱۱. ون نس، اسمیت، کلباسی، منصور، "ترمودینامیک مهندسی شیمی"، ۱۳۸۹، جهاد دانشگاهی امیر کبیر