

## تغییر ترکیبات سوخت بر عملکرد کوره ریفرمر بخار

محمد قلی پور<sup>۱</sup>، سعیده حمودی<sup>۲</sup>، آزاده میروکیلی<sup>۳\*</sup>

۱-سرپرست پژوهش های کاربردی پتروشیمی زاگرس، عسلویه، gholipour.mo@gmail.com

۲- کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، saeedeh.hamoudi@gmail.com

۳- استادیار، مهندسی شیمی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، mirvakili96@gmail.com

\* نویسنده مخاطب

### چکیده

ریفرمر بخارمتان، یکی از واحدهای مهم به منظور تولید هیدروژن در صنعت می باشد. ریفرمر شامل یک محفظه احتراق است که در آن لوله هایی مملو از کاتالیزر نیکل بر پایه آلومینا وجود دارد، که واکنش ریفرمینگ با بخار گاز متان در آن انجام می شود. این واکنش ها گرماگیر هستند و به همین علت به منظور تامین گرمای مورد نیاز واکنش در محفظه احتراق مشعل هایی در کوره وجود دارد که سوخت و هوا در مشعل ها می سوزد و گرما تولید مورد نیاز را تامین می کند. به منظور تولید هیدروژن بیشتر در لوله های ریفرمر، دمای پوسته ی خارجی لوله ها و دمای گاز های حاصل از احتراق در کوره در یک محدوده مشخصی قرار گیرد تا میزان تولید هیدروژن به حداکثر برسد. یکی از عوامل مهم در این کار، نوع و ترکیبات سوخت در مشعل ریفرمر می باشد، ترکیباتی از قبیل هیدروژن و متان سهم به سزایی در تامین گرمای مورد نیاز واکنش، دمای ماکزیمم شعله و دمای گازهای حاصل از احتراق در کوره می گذارد، در این مطالعه با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به بررسی تاثیر میزان متان و هیدروژن در سوخت و میزان بازدهی کوره ریفرمر پرداخته شده است، سپس داده های شبیه سازی و با داده های عملیاتی اعتبار سنجی شده است.

کلمات کلیدی: کوره ریفرمر، سوخت، احتراق، دینامیک سیالات محاسباتی

### مقدمه

در صنعت پتروشیمی برای تولید گاز سنتز از واحد ریفرمر بخار متان استفاده می شود، کوره ریفرمر شامل یک محفظه احتراق، لوله های مملو از کاتالیست نیکل بر پایه آلومینا و تونل هایست که گاز حاصل از احتراق را به سمت بیرون محفظه احتراق و سپس به بخش همرفت هدایت می کند، در محفظه احتراق کوره، مشعل هایی در سقف کوره وجود دارد که در آنجا جریان سوخت و هوا با هم مخلوط و شروع به سوختن می کنند، در اثر سوختن محصولات از قبیل کربن دی اکسید، بخار آب، کربن منواکسید و مقدار قابل توجهی گرما تولید می کند.

در کوره ریفرمر بیش از ۹۵ درصد انتقال حرارت، از نوع تابشی می باشد، شعله های که احتراق هوا و سوخت ایجاد می شود، گرما را به صورت تابشی به لوله ها و درون کوره منتقل می کند، بنابراین شعله های ایجاد شده تاثیر زیادی بر روی دمای سطح لوله و درون کوره می گذارد. بخش اعظم سوخت مورد استفاده در مشعل ها، ترکیباتی از قبیل هیدروژن، متان، بخار آب، کربن دی اکسید و کربن دی اکسید را شامل می شود.

Wu و همکاران [۱] در سال ۲۰۱۵ به بررسی تاثیر افزایش میزان هیدروژن در سوخت، بر روی شعله پرداختند. آنها دریافتند که افزایش هیدروژن سبب افزایش انرژی کل تولیدی می شود، و از طرفی باعث کاهش طول شعله و انتقال حرارت به صورت تابشی و افزایش دمای ماکزیمم شعله و انتقال حرارت به صورت همرفت می شود. با اینکه انرژی کل تولیدی افزایش پیدا کرده است، اما میزان انرژی تابشی کاهش و انرژی همرفت افزایش می یابد. Francis و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۱ نشان دادند که با افزایش هیدروژن شعله کوتاه تر و آبی رنگ می شود. آنها در این مطالعه بر میزان

تولید OH و مکانیسم سوختن هیدروژن با مقادیر مختلف کار کردند و دریافتند با افزایش میزان هیدروژن حداکثر دمای شعله افزایش می یابد و آب بیشتر و گاز کربن دی اکسید کمتری را تولید می کند و از آنجایی که گازهای کربن دی اکسید و آب جزء گازهای خاکستری محسوب می شوند، افزایش میزان تولیدی آنها، میزان انتقال حرارت به صورت تابشی را افزایش می دهند. El-Ghfour و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۰ در آزمایشگاه به بررسی سوخت متان و هیدروژن در شعله توربولنت پرداختند. آنها دریافتند که اضافه کردن هیدروژن در زمان های ابتدایی سبب افزایش طول شعله و سپس سبب کاهش طول آن میگردد و با افزایش ۵۰ درصدی هیدروژن به مخلوط سوخت، سبب کاهش ۳۰ درصدی تولید کربن دی اکسید می شود اما تاثیری بر تولید NO و CO ندارد.

بنابراین با تحقیقات صورت گرفته در زمینه افزودن هیدروژن به سوخت به این نتیجه رسیدند که افزایش هیدروژن طول شعله و میزان انرژی تابشی را کاهش می دهد ولی دمای ماکزیمم شعله افزایش می یابد.

### مدل هندسه و شبکه

ریفرمر مورد مطالعه، شامل ۱۸۴ لوله، ۷۰ مشعل و ۵ تونل می باشد، که در هر ردیف ۱۴ مشعل و ۴۶ لوله را شامل می شود. به دلیل تقارن در هر دو سمت کوره، تنها نیمی از کوره ریفرمر شبیه سازی شده است، برای طراحی سه بعدی هندسه کوره ریفرمر از نرم افزار دیزاین مدلر<sup>۱</sup> و برای ایجاد شبکه از نرم افزار انسیس فلونت<sup>۲</sup> استفاده شده است، که سه نوع شبکه متفاوت برای این هندسه ایجاد شده است، که در جدول (۱) تعداد سلول های شبکه مورد استفاده نشان داده شده است.

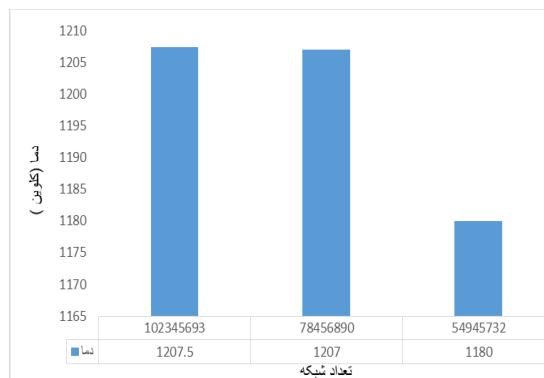
جدول ۱: تعداد سلول های ریفرمر

| نوع | سلول ریفرمر |
|-----|-------------|
| ۱   | ۵۴۹۴۵۷۳۲    |
| ۲   | ۷۸۴۵۶۸۹۰    |
| ۳   | ۱۰۲۳۴۵۶۹۳   |

با توجه به شکل (۱) و نتایج دمای خروجی از کوره ریفرمر که در حالت طراحی ۱۲۰۸ کلوین می باشد، شبکه نوع دوم نتایج مناسبی را ارائه کرده است. به همین منظور از شبکه نوع دوم برای شبیه سازی استفاده شده است.

جدول ۲: مقایسه شدت جریان مولی حالت‌های مختلف

| شدت جریان مولی (Kmol/hr) | عملیاتی ۹۹/۱۰/۱ | حالت ۱      | حالت ۲ | حالت ۳ | حالت ۴      |
|--------------------------|-----------------|-------------|--------|--------|-------------|
| گاز طبیعی                | ۱۹۰,۳۱<br>۶     | ۱۴۸,۰۲<br>۳ | ۱۰۰    | ۱۴۱    | ۸۰          |
| گاز پرج                  | ۷۶۱,۲۶<br>۴     | ۶۷۳         | ۶۴۰    | -      | -           |
| گاز Expansion gas        | -               | ۱۲۶,۸۷<br>۷ | ۲۱۱,۵  | -      | ۱۲۶,۸۷<br>۷ |
| گاز Off Off              | -               | -           | -      | ۷۶۱    | ۷۵۵         |
| هوا                      | ۴۷۳۰            | ۳۹۵۰        | ۳۶۸۰   | ۳۶۶۰   | ۳۲۷۰        |
| مجموع                    | ۵۶۸۱,۵<br>۸     | ۴۸۹۷,۹      | ۴۶۳۱,۵ | ۴۵۶    | ۴۲۳۱,۸<br>۷ |



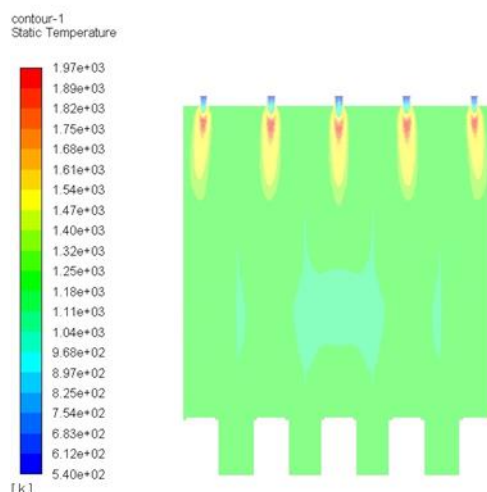
شکل ۱: نتایج دمای خروجی با تعداد شبکه مختلف

### بحث بر روی نتایج

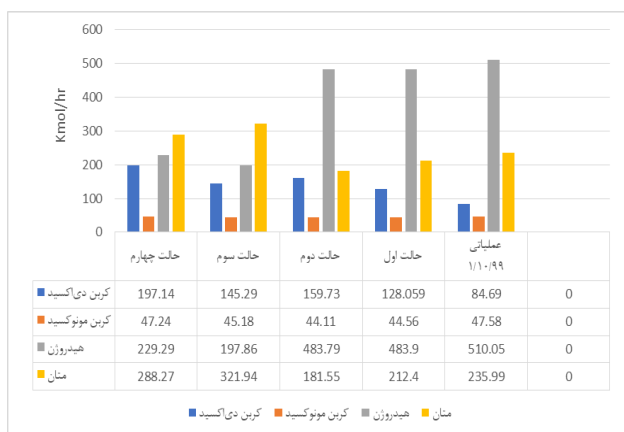
فرایند احتراق به محض خروج گاز از مشعل رخ می‌دهد، که دما شعله ناگهان تا حدود ۱۴۵۰ کلوین افزایش می‌یابد و پس از آن مجدداً دما در شعله به حداکثر خود تا حدود ۱۹۷۰ کلوین میرسد و سپس به تدریج کاهش می‌یابد تا در انتهای شعله دما به حدود ۱۴۰۰ کلوین برسد. در شکل (۲) کانتور دما را نشان می‌دهد، که شعله‌های ایجاد شده و ماکزیمم دما را نشان داده است.

جدول ۳: جزء مولی بخش‌های مختلف سوخت

| گاز طبیعی     | پرج    | Expansion gas | Off gas |
|---------------|--------|---------------|---------|
| کربن دی‌اکسید | ۰,۰۰۴۶ | ۰,۴۲۲۶        | ۰,۱۸۱۹  |
| کربن مونوکسید | ۰,۰۰۰۲ | ۰,۰۲۱۰        | ۰,۰۵۸۶  |
| هیدروژن       | -      | ۰,۲۶۴۸۰,۱     | ۰,۲۵۷۷  |
| متان          | ۰,۸۸   | ۰,۱۷۱۱        | ۰,۲۶۱۶  |
| C2            | ۰,۰۴۳  | -             | -       |
| C3            | ۰,۰۱۷۲ | -             | -       |
| C4            | ۰,۰۰۴  | -             | -       |
| نیتروژن       | ۰,۰۳۴۵ | ۰,۷۴۶۵        | ۰,۲۲۱۶  |



شکل ۲: کانتور دما



شکل ۳: مقایسه ترکیبات مهم سوخت

در شکل (۳) نشان می‌دهد، که حالت عملیاتی در تاریخ ۹۹/۱۰/۱ دارای بیشترین میزان هیدروژن و حالت سوم دارای کمترین میزان هیدروژن و بیشترین میزان متان را است. که با انجام شبیه‌سازی به بررسی تاثیر میزان متان و سوخت بر روی عملکرد حرارتی کوره ریفرمر پرداخته شده است. در جدول (۴) مقایسه نتایج شبیه‌سازی حالت ۱ تا ۴ با حالت عملیاتی ۹۹/۱۰/۱ را نشان می‌دهد، که در بین این ۵ حالت، کمترین دمای دود

در این پژوهش ۵ نمونه سوخت مختلف مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفته است، تا تاثیر سوخت‌ها و ترکیبات مختلف سوخت را بر روی دمای گاز خروجی از کوره ریفرمر، دمای سطح لوله‌های ریفرمر، میزان انرژی تابشی آزاد شده، طول شعله و دمای ماکزیمم شعله با هم مورد مقایسه و بررسی قرار گیرد.

در جدول (۲) شدت جریان مولی در شرایط عملیاتی مربوط به تاریخ ۹۹/۱۰/۱ مورد استفاده در کوره ریفرمر پتروشیمی زاگرس با چهار حالت متفاوت از سوخت‌ها را نشان می‌دهد، شرایط عملیاتی ۹۹/۱۰/۱ شامل گازهای طبیعی و پرج است، اما در ۴ حالت دیگر شامل جریان‌های گازهای طبیعی، پرج، Expansion gas و Off gas استفاده شده است. در حالت Expansion gas میزان جزء مولی متان نسبت به هیدروژن کمتر است، اما در حالت Off gas میزان جزء مولی متان نسبت به هیدروژن بیشتر می‌باشد. ترکیبات گازهای مختلف استفاده شده در هر سوخت در جدول ۳ نشان داده شده است. در شکل ۳ مقایسه ترکیبات مهم حالت‌های مختلف با شرایط عملیاتی مورخ ۹۹/۱۰/۱ نشان داده شده است.

و نسبت به حالت عملیاتی افزایش ۴ درصدی انتقال حرارت تابشی مشاهده می‌شود.

جدول ۵: مقایسه میزان انرژی حالت‌های مختلف

| حالت چهارم | حالت سوم | حالت دوم | حالت اول | عملیاتی ۹۹/۱۰/۱ |   |
|------------|----------|----------|----------|-----------------|---|
| ۴۸,۷       | ۴۹,۵     | ۴۴,۷۳    | ۴۵,۳۰۵   | ۴۷,۹۷۱          | انرژی کل لوله‌ها (KW/m <sup>2</sup> )               |
| ۴۵,۱۳      | ۴۵,۹۶    | ۴۲,۲۴    | ۴۰,۸۲    | ۴۳,۴۱           | انرژی تشعشی تابیده شده لوله‌ها (KW/m <sup>2</sup> ) |
| ۳۴,۰۳      | ۳۵,۸۷    | ۳۳,۷۴    | ۳۰,۱۱    | ۳۲,۰۵۵          | انرژی تشعشی جذب شده لوله‌ها (KW/m <sup>2</sup> )    |
| ۰,۹۳       | ۰,۹۴     | ۰,۹۲     | ۰,۹      | ۰,۹             | نسبت انرژی تابشی به کل انرژی                        |

جدول ۶: مقایسه دمای سطح لوله های ردیف اول

| شماره لوله    | دمای عملیاتی (C°) ۹۹/۱۰/۱ | حالت ۱  | حالت ۲  | حالت ۳  | حالت ۴  |
|---------------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|
| شماره لوله ۴۴ | ۹۰,۹۵۴                    | ۹۰,۶۶۰۷ | ۹۰,۵۳۰  | ۹۱۲,۸۳  | ۹۱۰,۲۷  |
| شماره لوله ۳۸ | ۹۱۰,۳۱                    | ۹۰,۷۶۳  | ۹۰,۵۶۰۱ | ۹۱۳,۶۸۶ | ۹۱۰,۵۷  |
| شماره لوله ۳۳ | ۹۱۰,۱۵                    | ۹۰,۷۴۶۳ | ۹۰,۵۴۳  | ۹۱۳,۵۳  | ۹۱۰,۱۴  |
| شماره لوله ۲۸ | ۹۰,۹۱۶                    | ۹۰,۶۲۱۴ | ۹۰,۴۷۵  | ۹۱۳,۵۴  | ۹۱۰,۶۱۲ |
| شماره لوله ۲۳ | ۹۰,۸۷۳                    | ۹۰,۵۵۱  | ۹۰,۵۱۳  | ۹۱۳,۶۶۹ | ۹۱۰,۱۵  |
| شماره لوله ۱۸ | ۹۱۰,۰۷                    | ۹۰,۷۵۵  | ۹۰,۵۴۲  | ۹۱۳,۵۷  | ۹۱۰,۵۳  |
| شماره لوله ۱۳ | ۹۱۰,۴۹                    | ۹۰,۷۶۱۳ | ۹۰,۵۴۲  | ۹۱۳,۵۹۶ | ۹۱۰,۱۴  |
| شماره لوله ۸  | ۹۰,۹۴۹                    | ۹۰,۷۰۱  | ۹۰,۴۹۶۳ | ۹۱۳,۹۶  | ۹۱۰,۴۸  |
| شماره لوله ۳  | ۹۰,۸۶۶                    | ۹۰,۶۱۸۷ | ۹۰,۴۴۹  | ۹۱۳,۰۸  | ۹۱۰,۷۳  |

جدول (۶) مقایسه دمای سطح لوله‌های ردیف اول را نشان می‌دهد. دمای سطح لوله در این حالت سوم، حدود ۳ درجه سانتی گراد نسبت به حالت عملیاتی افزایش پیدا کرده است. که دلیل این افزایش دما، افزایش ۳۷ درصدی میزان متان و کاهش ۶۱ درصدی هیدروژن می‌باشد. افزایش متان میزان انرژی کل تولیدی را بالا برده است و کاهش هیدروژن میزان انتقال حرارت از نوع تابشی را افزایش داده است. می‌توان به این نتیجه رسید که حذف گاز پرج و افزودن Off gas به گاز طبیعی سبب افزایش انرژی تولیدی و افزایش انتقال حرارت تابشی میشود و نکته مهم دیگر اینکه میزان هوای کمتری در حالت سوم مورد نیاز است چرا که هیدروژن کاهش یافته است.

خروجی در حالت ۳ مشاهده می‌شود که ۶ درجه سانتی گراد دما، کمتر از دمای عملیاتی مورخ ۹۹/۱۰/۱ است. حالت سوم دارای سه جریان، گاز طبیعی، پرج و Off gas می‌باشد، که دارای کمترین میزان هیدروژن و بیشترین میزان متان را است، که کم بودن میزان هیدروژن سبب می‌شود تا آب کمتر و گاز کربن دی اکسید بیشتری تولید شود و از آنجایی که گازهای کربن دی اکسید و آب جزء گازهای خاکستری هستند میزان انرژی تابشی را افزایش می‌دهند. بنابراین بخش زیادی از گرما توسط دیواره‌های تونل، کوره و لوله جذب می‌شود و گرمای کمتری توسط گازهای احتراق جذب می‌شود، که خود سبب پایین آمدن دمای دود خروجی می‌شود. اما دمای دود خروجی در حالت اول دارای بیشترین دما است، با توجه به ترکیبات و شدت جریان کل در همه ی حالت‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که در حالت اول شامل سه جریان پرج، گاز طبیعی و Expansian gas می‌باشد، که شدت جریان کل آن نسبت به حالت اول، دوم و سوم بیشتر می‌باشد، بنابراین انتظار می‌رود انرژی حرارتی بیشتری را نسبت به سایر حالت‌ها تولید کند، که باعث افزایش دمای گاز خروجی شود. اما شدت جریان کل حالت سوم نسبت به حالت عملیاتی کمتر می‌باشد ولی با این وجود دارای دمای دود بیشتری نسبت به حالت عملیاتی است، دلیل این امر به خاطر افزودن Expansian gas به سوخت و کم کردن گاز طبیعی از محتوای سوخت می‌باشد، که سبب کاهش انرژی کل تولید و کاهش انرژی تابشی شده است.

جدول ۴: مقایسه نتایج شبیه سازی حالت ۱ تا ۴ با حالت عملیاتی ۹۹/۱۰/۱

| حالت چهارم | حالت سوم | حالت دوم | حالت اول | عملیاتی ۹۹/۱۰/۱ | دمای دود (K)     |
|------------|----------|----------|----------|-----------------|------------------|
| ۱۲۳۴,۲۷    | ۱۲۳۲,۱۵  | ۱۲۳۹,۵۶  | ۱۲۴۰,۱۲  | ۱۲۳۸,۴۸         | انتالیی (Gj/h)   |
| ۲۷۸,۱      | ۲۷۶,۶    | ۲۸۲,۲    | ۲۸۲,۵    | ۲۸۱             |                  |
| جزء مولی   |          |          |          |                 |                  |
| ۱,۷e-۱۰    | ۱,۷e-۱۰  | ۰,۱۷۷۴   | ۰,۱۵۶۷   | ۰,۳۲۰۱۴         | O <sub>2</sub>   |
| ۰,۱۲۱۴     | ۰,۱۰۱۴   | ۰,۹۱۹۴   | ۰,۸۶۲    | ۰,۶۹۹۶          | CO <sub>2</sub>  |
| ۰,۱۵۴      | ۰,۱۱۱۷   | ۴,۲۰e-۸  | ۳,۳۴e-۸  | ۲,۱۵e-۸         | CO               |
| ۰,۲۳۲      | ۰,۲۲۲۷   | ۰,۲۳۸۶   | ۰,۲۴۹۵۳  | ۰,۲۲۴۰۷         | H <sub>2</sub> O |
| ۰,۰۰۵۲۵    | ۰,۰۰۸۲۵  | ۰,۰۰۷۷۳  | ۰,۰۰۷۷۹  | ۰,۰۰۷۹۶         | Ar               |
| ۰,۶۷۴۵     | ۰,۶۵۲۸   | ۰,۶۴۳۹   | ۰,۶۴۰۷۸  | ۰,۶۶۵۹۸         | N <sub>2</sub>   |
| ۱,۰۵e-۸    | ۱,۵۵e-۶  | ۵,۱۵e-۱۳ | ۱e-۱۶    | ۲,۱۵e-۱۶        | H <sub>2</sub>   |
| ۰,۰۰۱۲۸    | ۰,۰۰۳۴۵  | ۲,۱۳e-۱۳ | ۶,۱e-۱۵  | ۱,۲۰e-۱۲        | CH <sub>4</sub>  |

در جدول (۵) مقایسه میزان انرژی حالت‌های مختلف سوخت را نشان می‌دهد. در حالت اول، دارای کمترین میزان انرژی تشعشی تابیده شده به لوله‌ها را دارد، به این معناست، که لوله انرژی تشعشی کمتری در اختیار داشته‌اند، بنابراین انرژی تشعشی کمتری را جذب کرده‌اند، همان‌طور که در ترکیبات سوخت عنوان شد، در حالت اول به دلیل بالا بودن میزان هیدروژن، انرژی تابشی کمتری را به محیط آزاد کرده‌اند. اما حالت سوم به دلیل کمتر بودن میزان هیدروژن، انرژی تشعشی بیشتری را در محیط آزاد کرده است، بنابراین لوله‌ها انرژی تابشی بیشتری را جذب می‌کنند.

میزان انرژی کل تولیدی در حالت ۳ نسبت به بقیه حالت‌ها بیشتر است و میزان انتقال حرارت از نوع تابشی نیز در این حالت بیشتر از دیگر حالت‌هاست

نسبت استوکیومتری هوا به سوخت برای هیدروژن ۳۴:۱ در حالی که این نسبت برای متان ۱۷:۱ است. بنابراین کاهش هیدروژن سبب کاهش هوای مورد نیاز سوخت میشود. با توجه به کاهش ضرائب انتشار کوره بهترین راه کم کردن محتوای هیدروژن از سوخت است که بیشترین محتوای هیدروژن در گاز پرج موجود است.

#### نتیجه گیری

با توجه به این که بیش ترین نوع انتقال حرارت در کوره ها از نوع تابشی می باشد، بنابراین باید شرایط و ترکیبات سوختی را مورد توجه قرار داد، که بتواند انتقال حرارت تابشی در کوره را افزایش داد، با بررسی های صورت گرفته، دو جزء مولی متان و هیدروژن سهم زیادی در انتقال حرارت تابشی دارد، به گونه ای که با کاهش میزان هیدروژن و افزایش میزان متان، باعث افزایش سهم انتقال حرارت به صورت تابشی می شود.

#### مراجع

- [1] L. Wu, N. Kobayashi, Z. Li, H. Huang, and J. Li, "Emission and heat transfer characteristics of methane-hydrogen hybrid fuel laminar diffusion flame," *international journal of hydrogen energy*, vol. 40, pp. 9579-9589, 2015.
- [2] K. A. Francis, R. Sreenivasan, and V. Raghavan, "Investigation of structures and reaction zones of methane-hydrogen laminar jet diffusion flames," *International journal of hydrogen energy*, vol. 36, pp. 11183-11194, 2011.
- [3] S. El-Ghafour, A. El-Dein, and A. Aref, "Combustion characteristics of natural gas-hydrogen hybrid fuel turbulent diffusion flame," *International journal of hydrogen energy*, vol. 35, pp. 2556-2565, 2010.