

شبیه‌سازی یک بعدی احتراق ترکیب‌های مختلف گاز طبیعی غنی شده با هیدروژن

احسان بهمنی^۱، کیومرث مظاهری^{۱*}، علیرضا علی‌پور^۲

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۸-۱۲

بازنگری: ۱۳۹۷-۱۰-۲۲

پذیرش: ۱۳۹۷-۱۲-۲۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۴-۰۲

کلمات کلیدی:

توربین گازی زمینی

تزریق هیدروژن

سینتیک جی آر آی ۳

سینتیک آرامکومک ۳/۱

تأثیر فشار بر محدوده شعله‌وری

خلاصه: توربین‌های گازی زمینی یکی از پرکاربردترین توربین‌ها می‌باشند که سوخت اصلی آن‌ها گاز طبیعی است. به دلیل تغییر ترکیب گاز طبیعی تولید شده در پالایشگاه‌ها در زمان‌ها و مکان‌های مختلف، و همچنین تغییر ترکیب سوخت در خطوط گازرسانی به نیروگاه‌ها، خواص احتراقی ترکیب‌های مختلف، تغییر کرده و در بعضی اوقات، تأثیرات مضر را برجای می‌گذارد. به همین دلیل، روش‌هایی پیشنهاد شده است که تأثیرات منفی احتراق نامطلوب ایجاد شده در سوخت‌های هیدروکربنی به حداقل برسد که یکی از این روش‌ها، تزریق هیدروژن است. هیدروژن به دلیل دارا بودن خواصی همچون انرژی اشتعال پایین، واکنش‌پذیری بالا، قدرت نفوذ بالا و سرعت سوزش بالا، یک افزودنی خوب برای بهبود احتراق سوخت‌های هیدروکربنی به شمار می‌رود. در این پژوهش نیز سعی شده است که تأثیر دو سینتیک شیمیایی مختلف، تأثیر تغییر ترکیب سوخت گاز طبیعی و همچنین افزودن هیدروژن به منظور بهبود احتراق ترکیب‌های مختلف سوخت و تأثیر فشار بر مشخصه‌های احتراقی بررسی شود. مشاهده شده است که در شرایط کاری در نظر گرفته شده در این پژوهش، سینتیک جی آر آی ۳ عملکرد بهتری نسبت به سینتیک آرامکومک ۱/۳ دارد. همچنین افزودن ۱۰ درصد هیدروژن، باعث بهبود خواص احتراقی مورد بررسی از جمله بازه پایداری احتراق، شده است. با افزایش فشار نیز می‌توان به مقادیر بالاتری از دما و سرعت سوزش آرام دست پیدا کرد و بازه پایداری احتراق را گسترش داد.

۱- مقدمه

می‌یابد [۲]. همچنین در سوخت گاز طبیعی که سوخت اصلی توربین‌های گازی می‌باشد، به دلیل تغییر ترکیب گاز طبیعی تولید شده در پالایشگاه‌ها در زمان‌ها و مکان‌های مختلف، و همچنین تغییر ترکیب سوخت در خطوط گازرسانی به نیروگاه‌ها، خواص احتراقی ترکیب‌های مختلف، متفاوت می‌باشد که در بعضی اوقات، تأثیرات مضر را برجای می‌گذارد. ایجاد تغییر در ترکیب سوخت، می‌تواند مشکلات زیادی از جمله مشکل در طراحی مشعل و محفظه احتراق ایجاد کند. همچنین تغییر در ترکیب سوخت، می‌تواند باعث تغییر در مشخصات بنیادی احتراق^۲ از جمله سرعت سوزش، برگشت شعله،

با افزایش نیاز به انرژی و وجود نگرانی حفاظت از محیط زیست، تحقیقات به سمت احتراق‌هایی با راندمان بالا و آلاینده‌گی پایین متمرکز شده‌اند. در شرایطی که احتراق پیش آمیخته وجود دارد، مخلوط‌های رقیق‌سوز پتانسیل بالایی در رسیدن به راندمان‌های حرارتی بالا و انتشار پایین آلاینده‌ها دارند [۱]. این در حالی است که در حدود شعله‌وری خیلی رقیق، در سوخت‌های هیدروکربنی، دستیابی به احتراق پایدار^۱ مشکل می‌شود که این موضوع در گاز طبیعی شدت

1 Stable combustion

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: kiumars@modares.ac.ir

2 Fundamental combustion characteristics



احتراق رقیق سوز و استوکیومتری، کمتر از مقدار واقعی آن پیش‌بینی می‌کند. وانگ و همکاران [۸] به بررسی اثر افزودن هیدروژن در مخلوط رقیق گاز طبیعی - هوا در پرداختند. نتایج ایشان نشان‌دهنده بهبود مشخصه‌های احتراق در دو رژیم آرام و آشفته است. سینتیک مورد استفاده در این مقاله نیز سینتیک جی آر آی ۳ می‌باشد. در پژوهش دیگر، قره‌قانی و همکاران [۹] با استفاده از سینتیک جی آر آی ۳ تأثیر افزودن هیدروژن به گاز طبیعی را در موتورهای اشتعال جرقه‌ای بررسی نمودند که نتایج بیانگر افزایش محدوده کاری موتور با افزودن هیدروژن بود.

با بررسی پژوهش‌ها و مطالعات انجام شده مشاهده می‌شود که تأثیر به کارگیری سینتیک شیمیایی به منظور بررسی مشخصه‌های احتراقی قابل توجه و حائز اهمیت می‌باشد. یکی از سینتیک‌های اصلی که در اکثر کارها به منظور بررسی مشخصه‌های احتراق استفاده شده است، سینتیک جی آر آی ۳ می‌باشد. در پژوهش حاضر، برای ترکیب معینی از سوخت گاز طبیعی با تزریق درصد‌های متفاوت هیدروژن، نتایج مربوط به دو سینتیک شیمیایی جی آر آی ۳ و آرامکومک ۱/۳ با یکدیگر مقایسه شده‌اند تا سینتیکی که مناسب‌تر بوده، تعیین گردد. سپس با انتخاب سینتیک مناسب‌تر، مشخصه‌های احتراقی مربوط به ترکیبات گاز طبیعی مربوط به چند پالایشگاه بررسی و با یکدیگر مقایسه شده و سپس با تزریق درصد‌های مشخصی از هیدروژن، بار دیگر مشخصه‌های احتراقی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است تا مشخص گردد که با استفاده از ترکیبات گاز طبیعی متفاوت، چه مقداری از درصد تزریق هیدروژن برای رسیدن به احتراق یکنواخت‌تر، مناسب است. در نهایت نیز مشخصه‌های احتراقی گاز طبیعی معینی با درصد هیدروژن مشخص، در فشار بالا مورد بررسی قرار گرفته و با مشخصه‌های احتراقی در فشار پایین مقایسه شده است.

۲- معادلات حاکم و فرآیند عددی

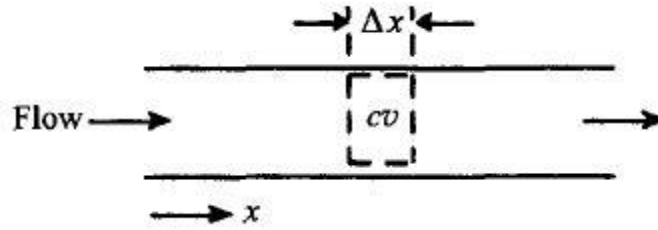
در حلگر شعله آزاد، حل به صورت یک بعدی انجام شده که به این معناست که در جهت عمود بر جریان، خواص یکنواخت هستند. در شکل ۱، نمایی از هندسه جریان آمده است و معادلات مربوطه نیز به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{d}{dx}(\rho v_x A) = 0; \quad \text{معادله بقای جرم، (۱)}$$

خود اشتعالی، دینامیک احتراق و غیره، شود که از جمله مهم‌ترین آن‌ها سرعت سوزش^۱ شعله آرام می‌باشد زیرا که به طور مستقیم با ویژگی‌های مهم شعله و احتراق هم‌چون پایداری^۲، برگشت شعله^۳ و محدوده خاموشی^۴ در ارتباط بوده و روی آن‌ها تأثیرگذار است. ترکیب اصلی در گاز طبیعی، متان بوده و به دلیل ساختار شیمیایی ویژه آن دارای خواص احتراقی ویژه نظیر دمای اشتعال بالا^۵ و سرعت پایین انتشار شعله^۶ می‌باشد [۳].

یکی از راهکارهای پیشنهادی به منظور بهبود عملکرد احتراق استفاده از هیدروژن و تزریق آن به درون سوخت اصلی می‌باشد. هیدروژن بدلیل دارا بودن خواصی همچون انرژی فعال‌سازی^۷ پایین، واکنش‌پذیری^۸ بالا، قدرت نفوذ^۹ بالا و سرعت سوزش بالا، یک افزودنی خوب برای بهبود احتراق سوخت‌های هیدروکربنی به شمار می‌رود [۴ و ۵]. تحقیقات زیادی در زمینه بررسی احتراق گاز طبیعی غنی شده با هیدروژن انجام شده است. دونوهو و همکاران [۶] ترکیب‌های مختلف گاز طبیعی و هیدروژن را در فشارهای بالا بررسی کردند. نتایج تجربی ایشان نشان می‌دهند که با افزایش دما، فشار و درصد سوخت هیدروژن، زمان تأخیر در اشتعال کاهش می‌یابد. به منظور شبیه‌سازی احتراق در این کار از سینتیک شیمیایی آرامکومک ۱/۳^{۱۰} استفاده شد که تطابق خوبی با نتایج تجربی داشت. ایشان مقادیر سرعت سوزش آرام را در فشارهای ۱ و ۵ اتمسفر و دماهای اولیه ۳۰۰ و ۴۵۰ کلوین و درصد حجمی تزریق هیدروژن ۳۰ تا ۹۰ درصد محاسبه نمودند، پیر و همکاران [۷] به بررسی تأثیر حضور هیدروکربن‌های و C_۳ در گاز طبیعی، بر تشکیل آلاندگی نیتروژن مونواکسید پرداختند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که با جایگزینی اتان و یا پروپان به ازای مقادیر کم (تا ۱۰٪) به جای متان، میزان تشکیل نیتروژن مونواکسید تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. سینتیک مورد استفاده در این مقاله، سینتیک جی آر آی ۱۱۳^{۱۱} بوده و مقایسه‌ها نشان می‌دهد که این سینتیک، گونه نیتروژن مونواکسید^{۱۲} را در محدوده

- 1 Burning velocity
- 2 Stability
- 3 Flashback
- 4 Extinction limit
- 5 High ignition temperature
- 6 Low flame propagation speed
- 7 Ignition energy
- 8 Reactivity
- 9 Diffusivity
- 10 AramcoMech1.3
- 11 GRI3.0
- 12 NO



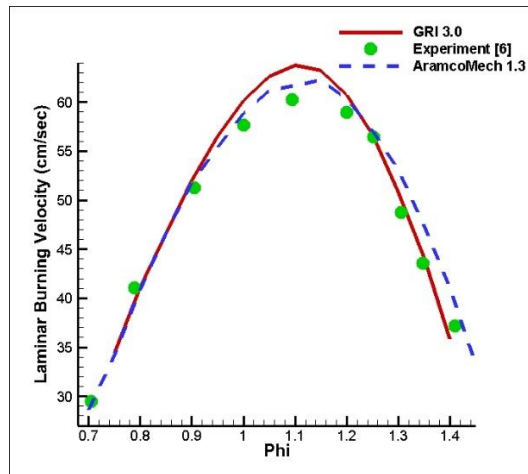
شکل ۱. نمایی از هندسه جریان یک بعدی در حلگر شعله آزاد

Fig. 1. Scheme of one dimensional flow geometry in flame_speed_freely_propagating solver

جدول ۱. بیشینه‌ی خطای مطلق و بیشینه‌ی درصد خطای نسبی مربوط به نتایج صحت‌سنجی دو سینتیک جی آر آی ۳ و آرامکومک ۱/۳

Table 1. Maximum absolute and relative errors for GRI3.0 and AramcoMech1.3 kinetics validation

بیشینه خطا		سینتیک‌های مختلف
درصد خطای نسبی	خطای مطلق	
۵٪/۴۶	۳/۴۷۷۴۶	سینتیک جی آر آی ۳
۲٪/۲۶	۱/۳۹۳۶	سینتیک آرامکومک ۱/۳



شکل ۲. صحت‌سنجی شبیه‌سازی یک بعدی با حلگر شعله آزاد

Fig. 2. One dimensional simulation validation with flame_speed_freely_propagating solver

به کار تجربی، فشار و دما در مقادیر ۱ اتمسفر و ۳۰۰ کلوین تنظیم گردید. همچنین لازم به ذکر است که ترکیب سوخت مورد بررسی برای صحت‌سنجی، از ۵۰٪ حجمی متان و ۵۰٪ حجمی هیدروژن تشکیل شده است. با توجه به نتایج حاصل از صحت‌سنجی و مطابق جدول ۱، مشاهده می‌شود که بیشترین اختلاف بین کار تجربی و شبیه‌سازی، معادل ۵/۴۱۶٪ می‌باشد.

نتایج با استفاده از نرم‌افزار انسیس-کمکین^۱ نسخه ۱۷/۲ به

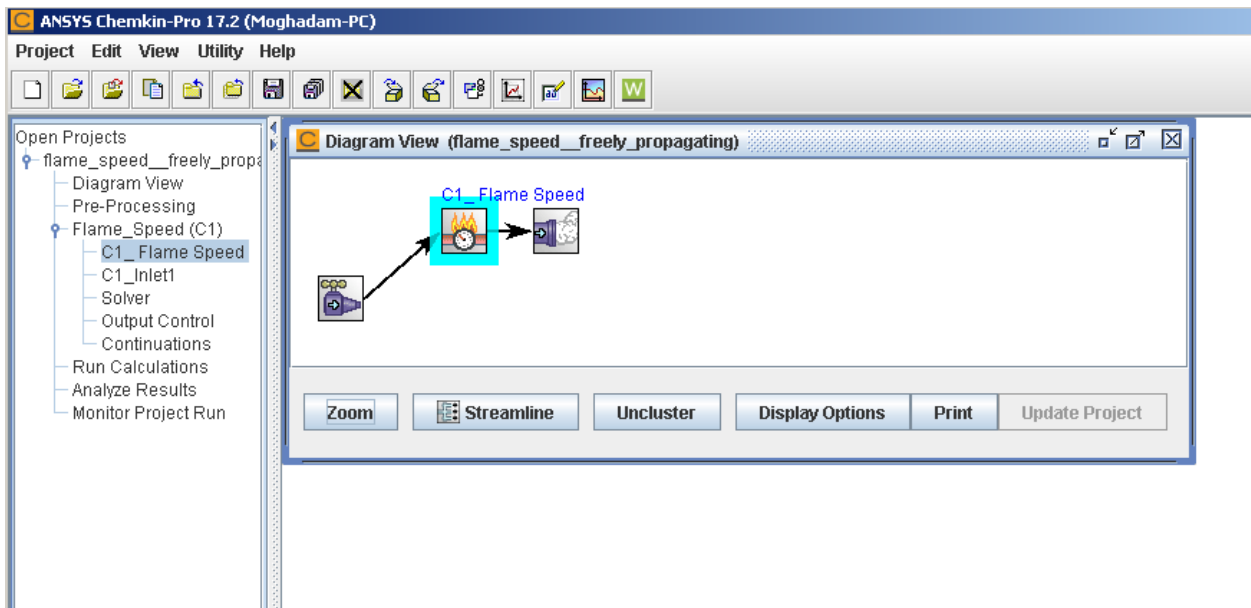
$$\frac{dP}{dx} + \rho v_x \frac{dv_x}{dx} = 0; \quad (2) \quad \text{معادله بقای ممنتوم در راستای } x,$$

$$\frac{d}{dx} \left(h + \frac{v_x^2}{2} \right) + \frac{\dot{Q}'' P}{\dot{m}} = 0; \quad (3) \quad \text{معادله بقای انرژی،}$$

$$\frac{dY_i}{dx} - \frac{\dot{\omega}_i MW_i}{\rho v_x} = 0; \quad (4) \quad \text{معادله بقای گونه‌ها،}$$

به منظور ارزیابی نتایج کار حاضر از نتایج مربوط به پژوهش دونوهو و همکاران [۶] استفاده شده است. با توجه به نتایج مربوط

1 Ansys-Chemkin



شکل ۳. نمایی کلی از حلگر شعله آزاد در نرم‌افزار انسیس-کمکین
Fig. 3. General scheme of flame_speed_freely_propagating solver in Ansys-Chemkin software

این پژوهش که در جدول ۲ آمده است، این مقدار برای سینتیک آرامکومک ۱/۳، بین ۶ تا ۱۸ برابر مدت زمان حل برای سینتیک جی آرآی ۳ می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

در ادامه، مشخصه‌های احتراق یکی از ترکیب‌های سوخت گاز طبیعی اعلام شده توسط اتحادیه گاز^۳ کشور آمریکا، بررسی شده است و با مشخصه‌های احتراقی سوخت با ترکیب ۱۰۰٪ متان مقایسه شده است. ترکیب شیمیایی اجزاء سوخت اعلام شده توسط اتحادیه گاز آمریکا، مطابق جدول ۲ می‌باشد. سپس سوخت هیدروژن، به طور جداگانه و در مقادیر مختلف ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد به گاز طبیعی مورد بررسی، اضافه شده و مجدداً مشخصه‌های احتراقی آن‌ها بررسی شد. شرایط اولیه شامل دمای مخلوط اولیه ۶۰۰ کلوین، فشار ۱ اتمسفر، دمای محیط ۲۹۸ کلوین، سرعت ورودی ۴۰ سانتی‌متر بر ثانیه و سینتیک‌های مورد استفاده، سینتیک جی آرآی ۳ و آرامکومک ۱/۳ می‌باشد.

در مرحله بعد، مشخصه‌های احتراقی ترکیبات مختلف گاز طبیعی که توسط شرکت پاکمن در تاریخ ۵ فوریه ۲۰۱۸ اعلام شده است [۱۰] و مربوط به پالایشگاه‌های تهران، سرخون، خانگیران، بیدبلند و کنگان

دست آمده و حلگر مورد استفاده، به منظور بدست آوردن نتایج مربوط به سرعت سوزش آرام، حلگر شعله آزاد^۱ می‌باشد زیرا که در حلگر شعله پیش‌آمیخته پایدار شده^۲، خروجی سرعت سوزش آرام را بدست نمی‌دهد. نمایی کلی از حلگر شعله آزاد که در نرم‌افزار انسیس-کمکین مورد استفاده قرار گرفته است، در شکل ۳ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که به ازای تمام بازه نسبت هم‌ارزی ذکر شده، حل همگرا نشد، به همین دلیل نمودارها در بازه‌ای از نسبت هم‌ارزی که حل همگرا شده است، رسم شده‌اند که با توجه به نمودارها، بازه‌های همگرایی کاملاً مشخص است که با فیزیک مسئله هم مطابقت دارد. به این معنی که با افزایش درصد هیدروژن در ترکیب سوخت، بازه نسبت هم‌ارزی که حل مسئله در آن همگرا می‌شود، افزایش می‌یابد.

دو سینتیک شیمیایی مورد بررسی در این پژوهش، سینتیک‌های جی آرآی ۳ و آرامکومک ۱/۳ می‌باشد. سینتیک جی آرآی ۳ دارای ۵۳ گونه و ۳۲۵ واکنش می‌باشد، در حالی که سینتیک آرامکومک ۱/۳ دارای ۲۵۳ گونه و ۱۵۴۲ واکنش می‌باشد. به همین دلیل، مدت زمان حل مسئله برای سینتیک جی آرآی ۳ بسیار کمتر از سینتیک آرامکومک ۱/۳ می‌باشد و برای حل ترکیبات سوخت ذکر شده در

1 flame_speed_freely_propagating
 2 Premixed_Stabilized_Burner_flame

جدول ۲. مقادیر نمونه اجزاء سوخت گاز طبیعی بر اساس اعلام پالایشگاه‌های مختلف
Table 2. Natural gas components typical values based on different refineries announce

مقادیر نمونه (% مول) برای هر پالایشگاه						اجزاء سوخت
کنگان	بیدبند	خانگیران	سرخون	تهران	اتحادیه گاز	
۸۸	۸۴/۱۵۷	۹۸/۵۴۸	۸۸/۰۸۹	۸۷/۷	۹۳/۹	متان
۴/۱۳	۹/۵	۰/۶۴۷	۳/۴۲	۴/۷	۴/۲	اتان
۱/۲۹	۳/۷۴۴	۰/۰۶۹	۱/۲۷	۱/۷۴	۰/۳	پروپان
۰/۲۸	۰/۴۱۳	۰/۰۱۸	۰/۳۹	۰/۳۷	۰/۰۳	ایزوبوتان
۰/۳۸	۰/۷۶۸	۰/۰۳۹	۰/۳۷	۰/۴۲	۰/۰۳	نرمال بوتان
۰/۱۶	۰/۱۲۵	۰/۰۱۸	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۰۱	ایزوپنتان
۰/۱	۰/۱۰۱	۰/۰۲۱	۰/۰۷	۰/۱	۰/۰۱	نرمال پنتان
۰/۱۹	۰/۰۱۶	۰/۱۴	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۱	هگزان و هیدروکربن‌های سنگین‌تر
۵/۴۵	۰/۷۱۵	۰/۵	۵/۷۵	۴/۷	۱	نیتروژن
۰	۰/۴۱۲	۰	۰/۵۳	۰/۰۵	۰/۵	کربن دی‌اکسید
—	—	—	—	—	۰/۰۱	اکسیژن
—	—	—	—	—	مقادیر ناچیز	هیدروژن

جدول ۳. بازه‌های همگرایی نسبت هم‌ارزی به ازای دو سینتیک جی آر آی ۳ و آرامکومک ۱/۳
Table 3. Converged equivalence ratio ranges for GRI3.0 and AramcoMech1.3 kinetics

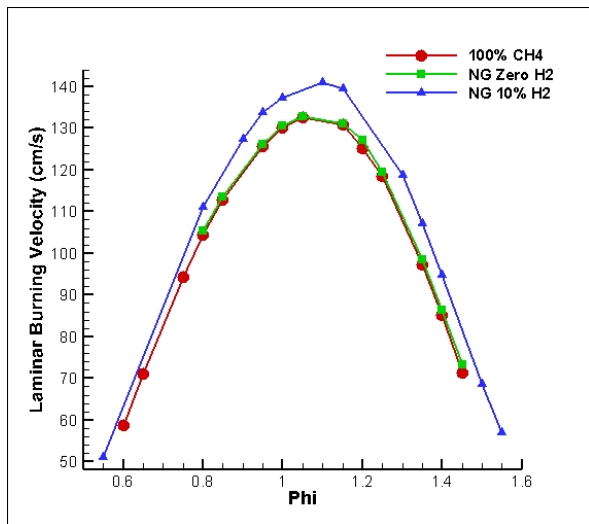
بازه نسبت هم‌ارزی همگرا شده		ترکیب‌های مختلف سوخت
جی آر آی ۳	آرامکومک ۱/۳	
۰/۶ - ۱/۵	۰/۶ - ۱/۴۵	۱۰۰٪ متان
۰/۵۵ - ۱/۵۵	۰/۸ - ۱/۴۵	ترکیب گاز طبیعی اتحادیه گاز بدون تزریق هیدروژن
۰/۵۵ - ۱/۵۵	۰/۵۵ - ۱/۵۵	ترکیب گاز طبیعی اتحادیه گاز با تزریق ۱۰٪ هیدروژن
۰/۵۵ - ۱/۶	حل واگرا شده است	ترکیب گاز طبیعی اتحادیه گاز با تزریق ۲۰٪ هیدروژن
۰/۵۵ - ۱/۶۵	حل واگرا شده است	ترکیب گاز طبیعی اتحادیه گاز با تزریق ۳۰٪ هیدروژن
۰/۵۵ - ۱/۷	حل واگرا شده است	ترکیب گاز طبیعی اتحادیه گاز با تزریق ۴۰٪ هیدروژن

احتراقی ترکیب سوخت‌های یکسان در فشار ۱ اتمسفر مقایسه شده است. به دلیل نتایج بهتر سینتیک جی آر آی ۳ در مقایسه با سینتیک آرامکومک ۱/۳ در شرایط کاری ذکر شده در این پژوهش، که در قسمت اول نتایج بیان شده است، سینتیک مورد استفاده در قسمت‌های بعدی نتایج نیز، سینتیک جی آر آی ۳ می‌باشد.

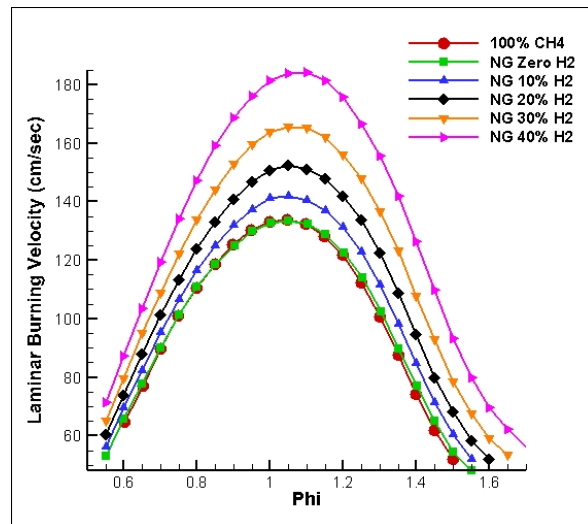
در این قسمت به ارائه نتایج اصلی و نمودارهای مربوطه پرداخته می‌شود. در ابتدا به بیان محدوده شعله‌وری برای ترکیبات مختلف سوخت‌های مورد بررسی، که در جدول ۳ به آن اشاره شده است، برای

می‌باشد، بررسی شده و بار دیگر با افزودن ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد هیدروژن به هر یک از این ترکیبات گاز طبیعی، مجدداً مشخصه‌های احتراقی آن‌ها بررسی می‌شود. ترکیب شیمیایی اجزاء سوخت‌های مختلف گاز طبیعی مذکور، در جدول ۲ آمده است. شرایط اولیه، مطابق شرایط اولیه در قسمت قبل می‌باشد.

نهایتاً نیز مشخصه‌های احتراقی سوخت گاز طبیعی اعلام شده توسط اتحادیه گاز، با افزودن هیدروژن به مقدار ۳۰ و ۴۰ درصد حجمی، در فشار ۱۰ اتمسفر، بررسی شده و با نتایج مشخصه‌های



(ب)



(الف)

شکل ۴. تغییرات سرعت سوزش آرام بر حسب تغییر نسبت هم‌ارزی در سینتیک‌های شیمیایی جی آر آی ۳ (الف) و آرامکومک ۱/۳ (ب)
Fig. 4. Laminar burning velocity at various equivalence ratios for a) GRI3.0 and b) AramcoMech1.3 kinetics

سرعت سوزش آرام نیز افزایش می‌یابد. هم‌چنین سرعت سوزش آرام سوخت گاز طبیعی مورد مطالعه در مقایسه با سوخت با ترکیب ۱۰۰٪ متان، در نسبت‌های هم‌ارزی کوچکتر از یک، تقریباً با هم مساوی بوده و در نسبت‌های هم‌ارزی بزرگتر از یک، اندکی از سوخت ۱۰۰٪ متان بیشتر است.

۳-۱-۲- دما

مطابق شکل ۵، مشاهده می‌شود که با تغییر ترکیب سوخت، تغییرات دما نیز روندی مشابه با روند تغییر سرعت سوزش آرام را دارد.

۳-۱-۳- انتشار ناکس^۱

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، برای نسبت‌های هم‌ارزی کوچکتر از یک، با افزایش درصد تزریق هیدروژن، اندکی انتشار آلاینده نیتروژن مونواکسید کاهش یافته است که این موضوع در مورد نسبت‌های هم‌ارزی بزرگتر از یک، به طور کلی صادق نبوده و میزان انتشار نیتروژن مونواکسید برای سوخت‌های با درصد هیدروژن بالاتر نسبت به دیگر سوخت‌ها، در برخی از بازه‌ها نسبت به هم، دچار کاهش و افزایش می‌شود. روند تغییرات در مورد میزان انتشار ناکس نیز مشابه روند تغییر انتشار نیتروژن مونواکسید بوده و تنها در بازه

مقایسه دو سینتیک جی آر آی ۳ و آرامکومک ۱/۳ پرداخته می‌شود. مشاهده می‌شود که در شرایط کاری ذکر شده و در فشار ۱ اتمسفر، سینتیک جی آر آی ۳ نتایج بهتری می‌دهد.

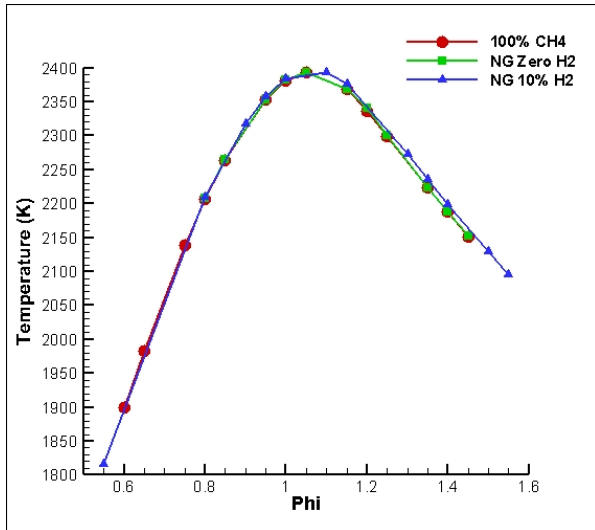
۳-۱-۳- بررسی تأثیر سینتیک شیمیایی

در این بخش نتایج مربوط به دو سینتیک جی آر آی ۳ و آرامکومک ۱/۳ را در شرایط کاری ذکر شده در پژوهش حاضر بررسی گردید. به همین منظور، در این قسمت، برای هر یک از پارامترهای مورد بررسی، نتایج مربوط به هر دو سینتیک شیمیایی مورد بررسی جی آر آی ۳ و آرامکومک ۱/۳ در کنار هم آورده می‌شود و تأثیر تغییر ترکیب سوخت و افزودن هیدروژن در مقادیر مختلف، مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده در جدول ۳، و با توجه به نمودارهای به دست آمده در این بخش، مشاهده می‌شود که محدوده همگرایی در هر نمودار و برای ترکیب‌های سوخت مختلف، به وضوح تغییر می‌کند و در برخی از موارد و برای برخی از سوخت‌ها، حل به طور کامل واگرا می‌شود. به همین دلیل در برخی از نمودارها، منحنی مربوط به بعضی از ترکیب سوخت‌ها موجود نمی‌باشد که این امر، حاکی از واگرایی حل برای آن ترکیب سوخت مشخص است.

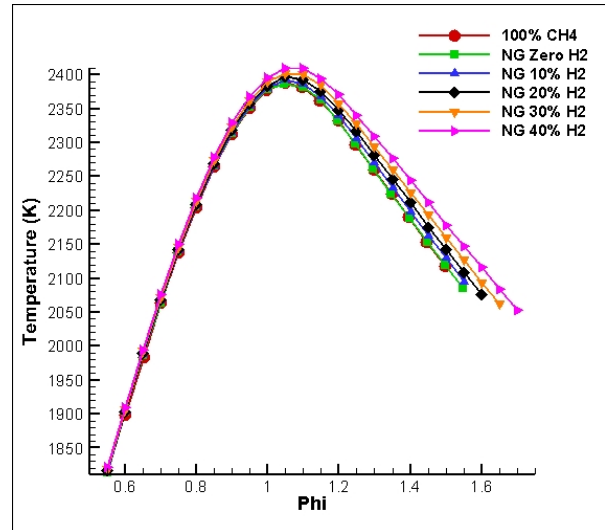
۳-۱-۳- سرعت سوزش آرام

مطابق شکل ۴، مشاهده می‌شود با افزایش درصد هیدروژن،

1 NO_x

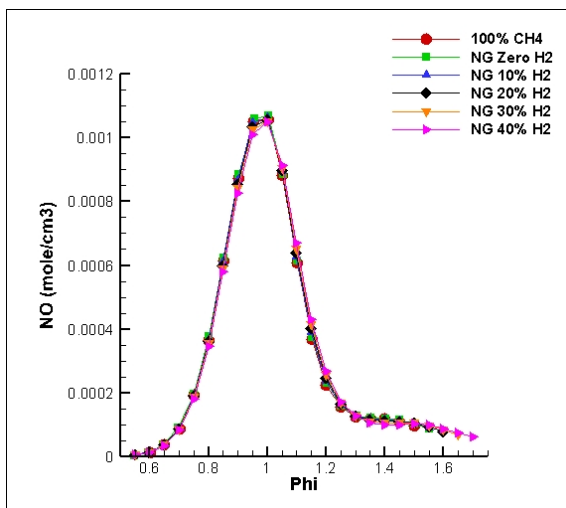


(ب)

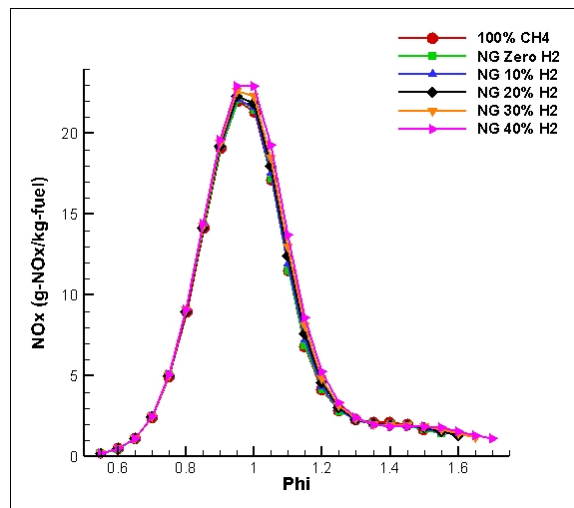


(الف)

شکل ۵. تغییرات دما برحسب تغییر نسبت هم‌آزری در سینتیک‌های شیمیایی جی آر آی ۳ (الف) و آرامکومک ۱/۳ (ب)
 Fig. 5. Temperature at various equivalence ratios for a) GRI3.0 and b) AramcoMech1.3 kinetics



(ب)



(الف)

شکل ۶. تغییرات انتشار ناکس (الف) و نیتروژن مونواکسید (ب) برحسب تغییر نسبت هم‌آزری در سینتیک جی آر آی ۳
 Fig. 6. a) NO_x and b) NO emissions at various equivalence ratios with GRI3.0 kinetic

ناکس، با سینتیک مذکور قابل پیش‌بینی نیست. لذا روند تغییرات گونه نیتروژن مونواکسید و انتشار ناکس تنها با سینتیک جی آر آی ۳ بررسی شده است.

در نهایت و با توجه به نتایج به دست آمده، این نکته قابل توجه است که سینتیک آرامکومک ۱/۳ در شرایط کاری ذکر شده در این پژوهش، عملکرد خوبی نداشته و این امر با توجه به جدول ۳ و نمودارهای به دست آمده، قابل ملاحظه است. اما روند کلی نمودارهای

نسبت‌های هم‌آزری بزرگتر از یک، تغییراتی که برای انتشار نیتروژن مونواکسید وجود داشت، در مورد میزان انتشار ناکس به شدت کمتر شده است. لذا با توجه به افزایش دما، با افزایش درصد تزریق هیدروژن، این انتظار می‌رود که میزان تولید ناکس نیز با افزایش درصد تزریق هیدروژن، افزایش پیدا کند که در شکل ۶، این امر مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که به دلیل نبودن گونه نیتروژن مونواکسید در سینتیک آرامکومک ۱/۳، رفتار این گونه و همچنین روند انتشار

جدول ۴. بازه‌های همگرایی نسبت هم‌ارزی برای ترکیب‌های مختلف گاز طبیعی

Table 4. Converged equivalence ratio ranges for natural gas different compositions

بازه نسبت هم‌ارزی همگرا شده				ترکیب‌های مختلف گاز طبیعی
با تزریق ۳۰٪ هیدروژن	با تزریق ۲۰٪ هیدروژن	با تزریق ۱۰٪ هیدروژن	بدون تزریق هیدروژن	
۰/۵۵ - ۱/۶۵	۰/۵۵ - ۱/۶	۰/۵۵ - ۱/۵۵	۰/۵۵ - ۱/۵۵	تهران
۰/۵۵ - ۱/۶۵	۰/۵۵ - ۱/۶	۰/۵۵ - ۱/۵۵	۰/۵۵ - ۱/۵	سرخون
۰/۵۵ - ۱/۶	۰/۵۵ - ۱/۵۵	۰/۵۵ - ۱/۵۵	۰/۶ - ۱/۵	خانگیران
۰/۵۵ - ۱/۷	۰/۵۵ - ۱/۶۵	۰/۵۵ - ۱/۶	۰/۵۵ - ۱/۶	بید بلند
۰/۵۵ - ۱/۶۵	۰/۵۵ - ۱/۶	۰/۵۵ - ۱/۵۵	۰/۵۵ - ۱/۵۵	کنگان
۰/۵۵ - ۱/۶۵	۰/۵۵ - ۱/۶	۰/۵۵ - ۱/۵۵	۰/۵۵ - ۱/۵۵	اتحادیه گاز

سوخت‌های مختلف مورد بررسی از حدود ۸۴٪ تا ۹۸٪ متغیر است که با تغییر ترکیب سوخت به این مقدار در یک توربین گاز، احتراقی کاملاً متفاوت وجود خواهد داشت که موجب آسیب رساندن به توربین گاز می‌شود. مشاهده شد که با تزریق ۱۰٪ هیدروژن می‌توان مضرات ناشی از این تغییرات را رفع کرد و به احتراقی تقریباً یکسان دست یافت. هم‌چنین با توجه به جدول ۴ مشاهده می‌شود که افزایش درصد هیدروژن به مقادیر ۲۰ و ۳۰ درصد، تغییرات بیشتری در پایداری احتراق نسبت به تزریق ۱۰٪ هیدروژن، را موجب می‌شود که به معنی آن است تزریق ۱۰٪ هیدروژن نسبت به حالت‌های تزریق ۲۰ و ۳۰ درصد هیدروژن، احتراق یکسان‌تری را به دست می‌دهد.

با توجه به شکل ۷، مشاهده می‌شود که با تزریق ۱۰٪ هیدروژن، سرعت سوزش آرام نیز افزایش یافته و هم‌چنین بیشینه اختلاف بین دو ترکیب سوخت، با تزریق هیدروژن کاهش یافته است. بیشینه اختلاف که مربوط به دو ترکیب سوخت بید بلند و سرخون می‌باشد، با تزریق ۱۰٪ هیدروژن نسبت به حالت بدون تزریق هیدروژن، از ۳/۳۰۴۸٪ به ۱/۵۹۹٪ کاهش پیدا کرده است که نشان‌دهنده یکنواخت‌تر شدن مشخصه‌های احتراقی ترکیب‌های مختلف گاز طبیعی، با تزریق ۱۰٪ هیدروژن است.

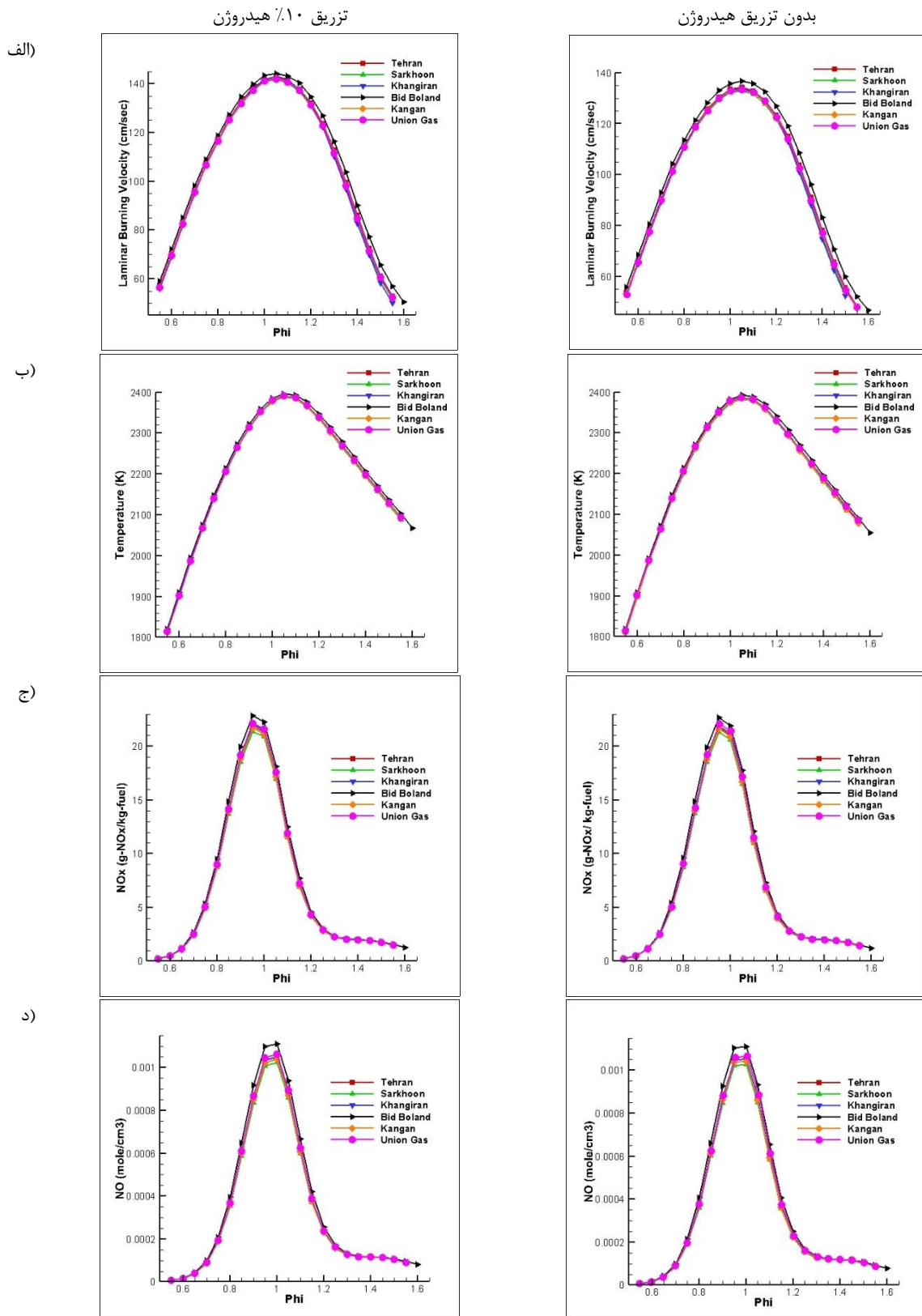
با بررسی تغییرات دما در شکل ۷، مشاهده می‌شود که با تزریق ۱۰٪ هیدروژن، افزایش قابل ملاحظه‌ای در دما ملاحظه نمی‌شود. البته این موضوع، به دلیل شرایط اولیه و فشار پایین مورد استفاده برای احتراق است. در قسمت بعد، مشخصه‌های احتراقی در فشار بالا نیز مورد بررسی قرار گرفته است که تأثیر تزریق هیدروژن را

مربوط به سینتیک آرامکومک ۱/۳ تقریباً مطابق با نتایج مربوط به سینتیک جی آر‌آی ۳ است.

۳-۲- بررسی تغییر ترکیب سوخت گاز طبیعی

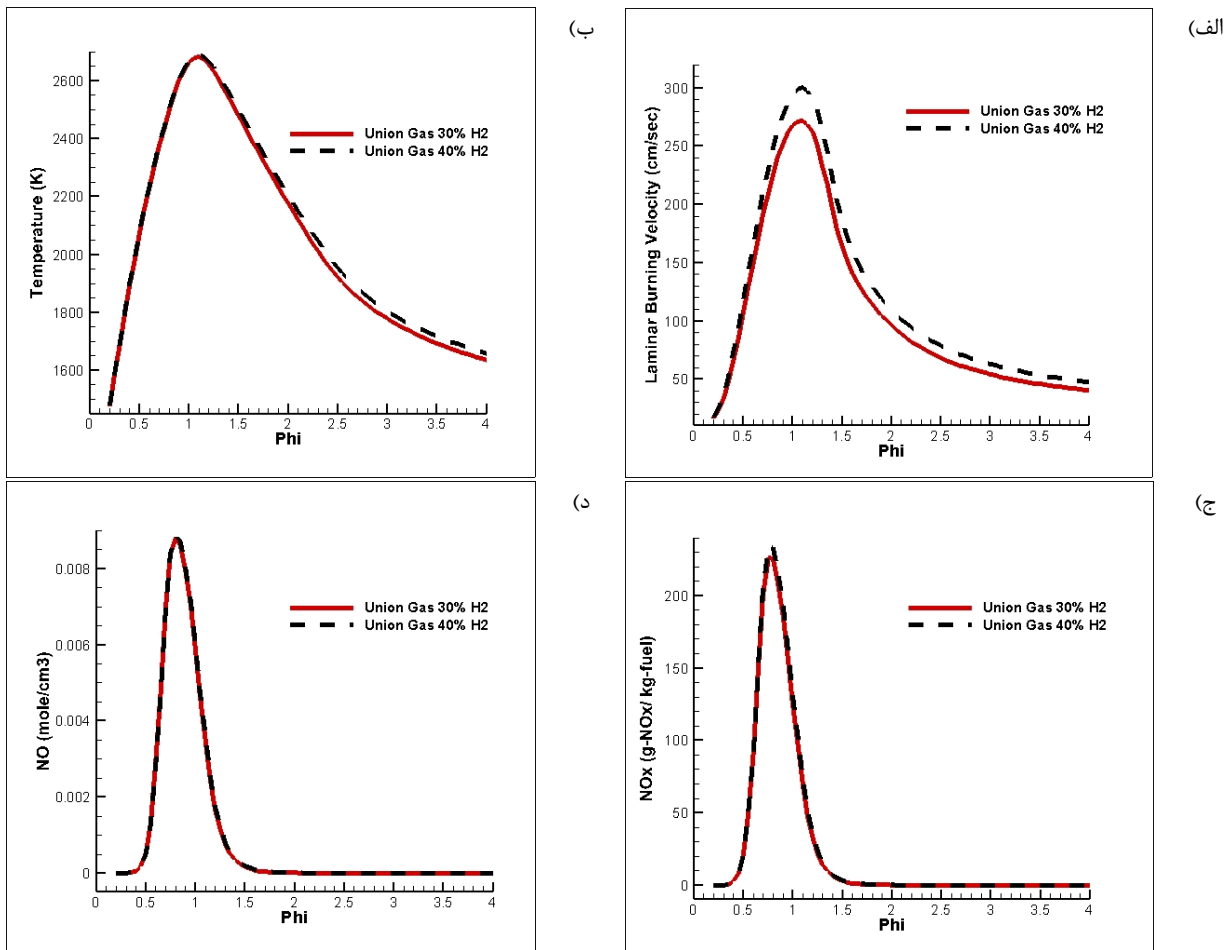
در این قسمت، به بررسی تغییر ترکیب سوخت گاز طبیعی پرداخته می‌شود. به این منظور به بررسی ترکیب سوخت مربوط به چند پالایشگاه که در جدول ۲ آمده است، پرداخته می‌شود. با توجه به نتایج قسمت قبل، به دلیل این که سینتیک جی آر‌آی ۳ نتایج بهتری نسبت به سینتیک آرامکومک ۱/۳ می‌دهد، در این قسمت نیز از سینتیک جی آر‌آی ۳ برای شبیه‌سازی و حل استفاده شده است. در این بخش نیز، هر یک از سوخت‌های مورد بررسی، یک بار بدون تزریق هیدروژن و یک بار با تزریق ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ حجمی هیدروژن، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ابتدا به بیان بازه‌های نسبت هم‌ارزی که حل همگرا شده است، پرداخته می‌شود که مطابق جدول ۴ است. مشاهده می‌شود که تزریق هرچه بیشتر هیدروژن باعث افزایش بازه همگرایی شده که به معنی افزایش بازه پایداری احتراق است؛ ولی بازه‌های همگرایی متفاوت برای ترکیب‌های مختلف گاز طبیعی و برای حالت‌های مختلف تزریق هیدروژن، با تزریق ۱۰٪ هیدروژن تقریباً به بازه همگرایی معین و ثابت و یکسان‌تری، گسترش یافته است. این به معنی آن است که برای ترکیب‌های سوخت مورد بررسی، با تزریق ۱۰٪ هیدروژن می‌توان به آن هدف مطلوب که رسیدن به احتراقی یکسان است، رسید.

همان‌طور که در جدول ۲ نیز مشاهده می‌شود، درصد متان در



شکل ۷. تغییرات سرعت سوزش آرام (ردیف الف)، دما (ردیف ب) و انتشار گونه‌های ناکس (ردیف ج) و نیتروژن مونواکسید (ردیف د) برای ترکیب‌های مختلف گاز طبیعی

Fig. 7. Laminar burning velocity (row a), temperature (row b), NO_x (row c) and NO (row d) emissions for natural gas different compositions



شکل ۸. تغییرات سرعت سوزش آرام (قسمت الف)، دما (قسمت ب) و انتشار گونه‌های ناکس (قسمت ج) و نیتروژن مونواکسید (قسمت د) در فشار ۱۰ اتمسفر

Fig. 8. Laminar burning velocity (section a), temperature (section b), NO_x (section c) and NO (section d) emissions at 10 atm

افزایش یافته است، اما بیشینه اختلاف مربوط به میزان انتشار ناکس از ۰.۱۹٪ به ۰.۱۷٪ کاهش پیدا کرده است.

۳-۳- بررسی تأثیر فشار بر مشخصه‌های احتراقی

در این قسمت به بررسی تأثیر افزایش فشار بر مشخصه‌های احتراقی پرداخته خواهد شد و به همین منظور، مشخصه‌های احتراقی با تزریق ۳۰ و ۴۰ درصد هیدروژن و در فشار ۱۰ اتمسفر بررسی شد. مشاهده شد که هم مقدار دما افزایش یافته است و هم بازه همگرایی نسبت هم‌ارزی آن افزایش یافته است. با توجه به بازه‌های نسبت هم‌ارزی مورد استفاده در پژوهش‌های تجربی، مشاهده شده است که در مواردی که از بیشترین مقادیر مجاز برای تزریق هیدروژن، که در حدود تزریق ۴۰ درصد هیدروژن است، استفاده شده است، بالاترین

نشان می‌دهد. بیشینه اختلاف در حالتی که هیدروژن تزریق نشده است، ۰.۴۱۵٪ و در حالتی که ۰.۱۰٪ هیدروژن تزریق شده است، برابر ۰.۳۶۴٪ می‌باشد. بنابراین مشاهده می‌شود که با تزریق هیدروژن، بیشینه اختلاف دمای بین دو ترکیب سوخت مربوط به بیدلند و سرخون کاهش یافته است.

هم‌چنین با توجه به اینکه تزریق هیدروژن به مقدار ۰.۱۰٪، تأثیر چشمگیری در افزایش دما نداشته است و با توجه به این که دما، یک عامل تاثیرگذار در تشکیل اکسیدهای نیتروژن از جمله نیتروژن مونواکسید می‌باشد، در شکل ۷ نیز مشاهده می‌شود که تزریق ۰.۱۰٪ هیدروژن نیز تأثیر چشمگیری در انتشار آلاینده نیتروژن مونواکسید و تغییر میزان ناکس ندارد. با تزریق ۰.۱۰٪ هیدروژن، بیشینه اختلاف مربوط به انتشار آلاینده نیتروژن مونواکسید، از ۰.۷۶۳٪ به ۰.۷۱۸۵٪

و شرایط کاری مشخص، می‌بایست درصد بهینه تزریق هیدروژن را استخراج کرد.

۳- با افزایش درصد نیتروژن سوخت، سرعت سوزش آرام، دما و بازه پایداری احتراق کاهش پیدا کرده است که چنین چیزی مطلوب نیست و با افزودن هیدروژن می‌بایست این مشکلات را برطرف کرد.

۴- با تغییر درصد متان در ترکیب‌های مختلف گاز طبیعی، مشاهده شد که بازه پایداری احتراق متفاوت است و تزریق ۱۰٪ هیدروژن، باعث گسترش بازه پایداری احتراق شده و تقریباً تمامی بازه‌ها را به یک مقدار معین و ثابت و یکسان گسترش می‌دهد که باعث ایجاد احتراق یکنواخت‌تری می‌شود و هدف اصلی از تزریق هیدروژن را برآورده کرده است.

۵- افزایش فشار، تأثیر چشمگیری در افزایش سرعت سوزش آرام، دما و بازه پایداری احتراق داشته است که البته بدلیل افزایش دما، انتشار بعضی از آلاینده‌ها همچون نیتروژن مونواکسید و کربن مونواکسید نیز بیشتر شده است.

مراجع

- [1] S.B. Shrestha, G.A. Karim, Hydrogen as an additive to methane for spark ignition engine applications, in: IECEC-97 Proceedings of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (Cat. No. 97CH6203), IEEE, 1997, pp. 910-915.
- [2] J. Wang, Z. Huang, J. Zheng, H. Miao, Effect of partially premixed and hydrogen addition on natural gas direct-injection lean combustion, international journal of hydrogen energy, 34(22) (2009) 9239-9247.
- [3] S. Turns, An Introduction to Combustion: Concepts and Applications, McGraw-Hill, Boston, (2000).
- [4] S.R. Bell, M. Gupta, Extension of the lean operating limit for natural gas fueling of a spark ignited engine using hydrogen blending, Combustion Science and Technology, 123(1-6) (1997) 23-48.
- [5] G.A. Karim, Hydrogen as a spark ignition engine fuel, International Journal of Hydrogen Energy, 28(5) (2003) 569-577.
- [6] N. Donohoe, A. Heufer, W.K. Metcalfe, H.J. Curran, M.L. Davis, O. Mathieu, D. Plichta, A. Morones, E.L. Petersen,

نسبت هم‌ارزی مورد بررسی، حدود نسبت هم‌ارزی ۴ بوده است و به همین دلیل، بازه ۰/۲ تا ۴ برای نسبت هم‌ارزی مورد بررسی قرار گرفت، که در تمامی این بازه، حل همگرا شد.

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با افزایش فشار، سرعت سوزش آرام و مقدار دما نیز با افزایش درصد هیدروژن افزایش یافته است. بنابراین با افزایش فشار، می‌توان به مقادیر بالاتری از سرعت سوزش آرام و دما دست یافت و حدود شعله‌وری را گسترش داد. همچنین با افزایش درصد تزریق هیدروژن، مطابق شکل ۸، مشاهده می‌شود که میزان انتشار نیتروژن مونواکسید و میزان تولید ناکس، در فشار ۱۰ اتمسفر در مقایسه با فشار ۱ اتمسفر افزایش یافته است. دلیل اصلی این افزایش نیز، افزایش دما می‌باشد که عامل اصلی تشکیل اکسیدهای نیتروژن است.

۴- نتیجه‌گیری

با بیشتر شدن الزام بکارگیری از احتراق‌هایی با راندمان بالا و آلاینده‌گی پایین، گرایش بسمت احتراق‌های پیش‌آمیخته و مخلوط‌های رقیق‌سوز که پتانسیل بالایی در رسیدن به راندمان‌های حرارتی بالا و انتشار پایین آلاینده‌ها دارند، بیشتر شده است. البته این نکته را باید در نظر داشت که در سوخت‌های هیدروکربنی از جمله گاز طبیعی که سوخت اصلی توربین‌های گازی می‌باشد، دستیابی به احتراق پایدار در حدود شعله‌وری خیلی رقیق، مشکل می‌شود. در سوخت گاز طبیعی به دلیل تغییر ترکیب گاز طبیعی تولید شده در پالایشگاه‌ها در زمان‌ها و مکان‌های مختلف، و همچنین تغییر ترکیب سوخت در خطوط گازرسانی به نیروگاه‌ها، خواص احتراقی ترکیب‌های مختلف، متفاوت می‌باشد که در بعضی اوقات، تأثیرات مضر را برجای می‌گذارد. یکی از راه‌های مقابله با تأثیرات مضر تغییر ترکیب سوخت، افزودن هیدروژن در سوخت اصلی است. برای بررسی ساده‌تر تأثیر تغییر ترکیب سوخت، به شبیه‌سازی یک بعدی احتراق پرداخته شد که موارد زیر استنتاج شد:

۱- در فشارهای پایین، در حدود ۱ اتمسفر، سینتیک جی آر‌آی ۳ نتایج بهتر و دقیق‌تری نسبت به سینتیک آرامکومیک ۱/۳ به دست می‌دهد.

۲- با افزایش درصد تزریق هیدروژن، سرعت سوزش آرام، دما و بازه پایداری احتراق بیشتر شده است که برای هر ترکیب سوخت

- addition on early flame growth of lean burn natural gas–air mixtures, international journal of hydrogen energy, 35(13) (2010) 7246-7252.
- [9] A. Gharehghani, R. Hosseini, M. Mirsalim, T.F. Yusaf, A computational study of operating range extension in a natural gas SI engine with the use of hydrogen, International Journal of Hydrogen Energy, 40(17) (2015) 5966-5975.
- [10] PackmanCompany, Iranian refineries different natural gas compositions in, Packman company official website, 2018.
- F. Güthe, Ignition delay times, laminar flame speeds, and mechanism validation for natural gas/hydrogen blends at elevated pressures, Combustion and Flame, 161(6) (2014) 1432-1443.
- [7] L. Pillier, A. El Bakali, X. Mercier, A. Rida, J.-F. Pauwels, P. Desgroux, Influence of C2 and C3 compounds of natural gas on NO formation: an experimental study based on LIF/CRDS coupling, Proceedings of the Combustion Institute, 30(1) (2005) 1183-1191.
- [8] J. Wang, Z. Huang, C. Tang, J. Zheng, Effect of hydrogen

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

E. Bahmani, K. Mazaheri, A. Alipoor, One-dimensional Combustion Simulation for Different Hydrogen-enriched Natural Gas Blends, Amirkabir J. Mech Eng., 53(1) (2021) 53-64.

DOI: [10.22060/mej.2019.15240.6071](https://doi.org/10.22060/mej.2019.15240.6071)

