

تأثیر ترکیبات گازهای طبیعی موجود در ایران بر عملکرد و آلاینده‌گی موتور گازسوز 135 Ti

آیدین زرگر^۱، سید اسماعیل رضوی^۲، وهاب پیروزپناه^۳

تاریخ دریافت مقاله:

۸۸/۱/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله:

۸۸/۳/۳۰

چکیده:

با توجه به منابع سرشار و سودمند سوخت گاز طبیعی در ایران و شرایط جایگزینی مناسب، گاز طبیعی سوخت جانشین موتورهای درونسوز شده است. این مقاله به مدلسازی عددی سوخت گاز طبیعی پنج حوزه متفاوت در ایران از نظر عملکرد و آلاینده‌گی آلاینده NO_x در یک موتور اشتعال جرقه ای صد در صد گازسوز می پردازد. اغلب تحقیقات انجام شده برای گاز سوز نمودن خودروها و تمام نرم افزارهای مهندسی موجود، گاز طبیعی را که قسمت عمده آن متان است متان خالص فرض نموده و سایر ترکیبات گاز طبیعی نادیده گرفته می شوند، در حالی که در مقاله حاضر گاز طبیعی به صورت یک مخلوط گازی لحاظ شده است. برای مدلسازی احتراق مخلوطهای گاز طبیعی از مدل دو منطقه ای استفاده شده و موتور به صورت سیکل بسته است. سایر تحقیقات انجام شده در این مقاله عبارت از بررسی و محاسبه دمای شعله آدیاباتیک و عدد اکتان حوزه های گازی ایران است. برای محاسبه دمای شعله آدیاباتیک از مدل احتراق تک منطقه ای استفاده شده و احتراق در موتور در نظر گرفته نمی شود. مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج عملی دیگری که تا کنون در این زمینه انجام شده است تطابق خوبی را نشان می دهند نتایج تحقیق حاضر نشان می دهند که احتراق حوزه گاز ورودی تهران باعث ایجاد بالاترین آلاینده اکسید ازت می شود.

کلمات کلیدی:

موتور صددرصد گازسوز،
مدل احتراق دو منطقه‌ای،
ترکیبات گاز طبیعی، دمای
شعله آدیاباتیک، عدد اکتان،
موتور 135Ti

مقدمه

ترکیب عمده گاز طبیعی، گاز متان (CH_4) است. گاز طبیعی علاوه بر متان دارای هیدروکربنهای سنگین تر همانند اتان، پروپان و بوتان و سایر هیدروکربنهای سنگین تر و ناخالصیهایی گوگرد، در مقادیر متفاوت می باشد، گاز طبیعی همچنین دارای مقادیری از دی اکسید کربن، نیتروژن، هلیوم و سولفید هیدروژن و آب است ترکیبات شیمیایی پنج نوع ترکیب گاز طبیعی ایران در جدول ۱ آورده شده است [۱] در این تحقیق احتراق این ترکیبات در یک موتور دیزلی به نام 135Ti که با ایجاد تغییراتی به یک موتور صد در صد گاز سوز تبدیل شده است بررسی شد.

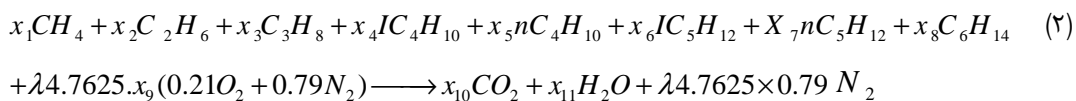
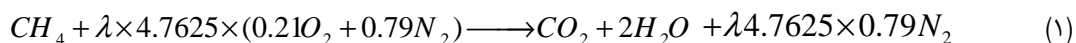
عده ای از محققان به گونه تجربی، اثرات کیفیت گاز طبیعی را بررسی کرده اند. کایلول و همکارانش [۲] مقایسه چند کیفیت گاز را با متان توسط الگوی تک منطقه‌ای سینتیک به همراه آزمایش موتور تک سیلندر روی لگام ترمز انجام داده اند. آنها مشاهده کردند که مخلوطهای رقیق تر در گشتاور اثر بیشتری دارند، همچنین ملاحظه شد که آهنگ سوختن گازهای طبیعی با درصد اتان بالاتر سریعتر است. از نظر آلاینده‌گی برای هیدروکربن نسوخته و دی اکسید کربن بیشینه اختلاف در مخلوط غنی تر مشاهده شده است. در این تحقیق مشاهده شده که ترکیب ۹۰ درصد متان و ۱۰ درصد اتان در مخلوط رقیق ($\Phi = 0.6$) می تواند ۳۵ درصد گشتاور بیشتر نسبت به متان خالص تولید کند. همچنین وجود بوتان و پروپان در مخلوطهای رقیق سرعت سوختن را افزایش می دهد. آگاروال و همکارانش [۳] یک تحقیق نظری بر روی تاثیر ترکیب گاز طبیعی بر مرحله تاخیر در اشتعال انجام دادند و نتیجه گرفتند که ترکیب گاز طبیعی تاثیر مهمی در مرحله تاخیر در اشتعال دارد و متان خالص دارای بالاترین میزان تاخیر در اشتعال است که با افزایش درصد هیدروکربنهای سنگین تر این میزان کاهش می یابد. نایگل [۴] تاثیرات مخلوطهای گازی را بر روی پارامترهای موتور بررسی کرده و شاخص Wobbe را به عنوان پارامتر مهمی در بررسی ترکیب گاز معرفی نمود. همچنین یک تحقیق نظری نیز در این زمینه در ایران انجام شده است [۵]. مرجع مذکور مدلسازی موتور را به صورت دو منطقه ای و سیکل بسته و معادلات حاکم را با قانون اول حل نموده است.

تفاوتهای مقاله حاضر با مرجع [۵] عبارتند از: ۱- در مقاله مذکور از انتقال گرما صرف نظر شده (تحول آدیباتیک فرض شده است) و دمای شعله آدیباتیک برای مناطق سوخته و نسوخته و مقادیر انتقال گرما با استفاده از مدل آناند محاسبه شده است. ۲- در مرجع [۵] سیکل مکش مدل نشده و برای تخمین خواص بار سیلندر از دیاگرام تجربی استفاده شده است، در حالی که در این مقاله سیکل مکش به دقت مدل شده است ۳- در مرجع [۵] گازهای باقیمانده از سیکل قبلی در مدل لحاظ نشده است، ولی در مقاله گازهای باقیمانده نیز لحاظ شده است ۴- مرجع مذکور سوخت گاز طبیعی را بصورت هیدروکربن چند مولفه‌ای فرض نموده و مقاله حاضر هر یک از اجزای گاز طبیعی را به صورت کاملاً مستقل در نظر گرفته

است. هـ- مرجع مذکور ترکیبات حوزه های گاز طبیعی را در سه ناحیه جنوب و جنوب غربی، شمال و شمال شرقی و حوزه مرکزی در نظر گرفته است، ولی مقاله حاضر پنج حوزه گاز کنگان، خانگیران، سرخون، بیدلند و ورودی گاز شهر تهران را در نظر گرفته است. نتایج تحقیق حاضر با مرجع [۵] تطابق خوبی دارد چنانچه بیشینه فشار در مقاله مذکور در تمام ترکیبات نسبت به متان خالص افزایش نشان داده است. (این افزایش در حوزه جنوب و جنوب غربی که در آن مقدار متان کم، هیدروکربن سنگین زیاد و نیتروژن بسیار کم می باشد بالاترین مقدار را دارد) همچنین آلاینده اکسید ازت در حوزه جنوب و جنوب غربی نیز بالاترین مقدار را دارا می باشد.

معادلات حاکم بر دمای شعله آدیاباتیک

معادله واکنش برای متان به صورت رابطه (۱) است



که در آن λ ضریب هوای اضافی و $x_1 \dots x_8$ ضرایب مولی ترکیبات تشکیل دهنده گاز طبیعی هستند. روابط حاکم دمای شعله آدیاباتیک قانون اول ترمودینامیک است که به صورت رابطه (۳) است [۶]

$$\sum_R n_R (\bar{h}_f^o + \Delta \bar{h})_R)_{T_{in}} = \sum_P n_P (\bar{h}_f + \Delta \bar{h})_P)_{T_{flame}} \quad (3)$$

که در آن n_R مقادیر مولی گونه های شرکت کننده در واکنش (قبل از احتراق) و n_P مقادیر مولی گونه های محصولات واکنش (پس از احتراق) هستند. \bar{h}_f^o آنتالپی تشکیل در دمای مرجع و $\Delta \bar{h}$ تغییرات آنتالپی در دمای T از یک دمای مرجع T_{ref} است فرضها به صورت زیر لحاظ شده اند:

الف- گازها حقیقی فرض می شوند (یعنی به دما و ترکیب مخلوط بستگی ندارند).

ب- احتراق کامل در نظر گرفته می شود (محصولات احتراق فقط شامل دی اکسید کربن، آب و مولکول ازت هستند).

پ- احتراق به صورت مدل تک منطقه ای در نظر گرفته می شود.

معادلات حاکم بر عملکرد و آلاینده‌گی موتور گازسوز (135 Ti)

برای شبیه سازی سیکل موتور، در هر مرحله از چرخه های موتور و همچنین مرحله احتراق، قانون اول ترمودینامیک حل می شود.

$$dE = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (4)$$

$$E = C_p.(T_2 - T_1) \quad (5)$$

$$dQ + dW = dE \quad (6)$$

$$f(E) = E(T_2) - E(T_1) + \delta W - \delta Q \quad (7)$$

مرحله مکش

شرایط مرزی:

$$E(T_1) = C_p(T_1)R_{mol}T_1 \quad E(T_2) = C_p(T_2)R_{mol}T_2 \quad dW = V_c(P_1 - P_e) \quad (8)$$

شرایط اولیه: (در مرحله مکش از انتقال حرارت صرف نظر می شود)

$$dQ = 0 \quad (9)$$

مرحله تراکم

شرایط مرزی:

$$E(T_1) = C_v(T_1)R_{mol}T_1 \quad E(T_2) = C_v(T_2)R_{mol}T_2 \quad (10)$$

$$dW = \left(\frac{P_1 + P_2}{2}\right)(V_2 - V_1) \quad (11)$$

مرحله اشتعال

شرایط مرزی:

$$E(T_2) = C_v(T_2)R_{mol}T_2 + E_0 \quad E(T_1) = C_v(T_1)R_{mol}T_1 + E_0 \quad (12)$$

$$dW_u = \left(\frac{P_1 + P_2}{2}\right)(V_{u2} - V_{u1}) \quad (13)$$

$$dW_b = \left(\frac{P_1 + P_2}{2}\right)(V_{b2} - V_{b1}) \quad (14)$$

مرحله انبساط

شرایط مرزی:

$$E(T_2) = C_v(T_2)R_{mol}T_2 \quad E(T_1) = C_v(T_1)R_{mol}T_1 \quad (15)$$

$$dW = \left(\frac{P_1 + P_2}{2}\right)(V_2 - V_1) \quad (16)$$

در این مدل انتشار شعله به صورت کروی فرض شده که در هنگام احتراق محفظه سیلندر، توسط جبهه شعله به دو ناحیه سوخته (b) و نسوخته (u) تقسیم می‌شود [۷].

پیش فرض‌ها

الف- محصولات احتراق شامل ۱۳ گونه هستند.

ب- مرحله مکش، به علت ناچیز بودن تبادل گرما بین دیواره سیلندر و بار داخل سیلندر آدیاباتیک است.

پ- سیکل بسته (یعنی مراحل تراکم، احتراق و انبساط) و گازهای داخل سیلندر حقیقی (یعنی C_p, C_v بستگی به دما و ترکیب مخلوط دارند) در نظر گرفته خواهد شد.

ت- در فرآیند مربوط به سیکل بسته انتقال گرما بین مخلوط و دیواره سیلندر در نظر گرفته خواهد شد.

ث- در طول مرحله مکش از تغییر فشار و انرژی صرف نظر خواهد شد.

ج- انرژی داخلی تابعی از دما و ترکیبات است.

چون آهنگ تولید انرژی در ناحیه گازهای سوخته خیلی سریع است بدین جهت این گازها نزدیک به حالت تعادل ترمودینامیکی و شیمیایی خواهند بود. فرض می‌شود که فشار و دمای منطقه گازهای سوخته می‌توانند از روابط تعادل ترمودینامیکی و شیمیایی محاسبه شوند. از مکانیزم توسعه یافته زلدوویچ برای محاسبه کسر مولی اکسید نیتروژن سینتیکی استفاده شده است [۸].

ب- محاسبه عدد اکتان

برای محاسبه اعداد اکتان از روابط (۱۷) استفاده می‌شود که در آن (MON) عدد اکتان موتور و (RON) عدد اکتان تحقیقی و x ضریب مولی اجزای تشکیل دهنده گاز طبیعی است. تفاوت این دو عدد به علت اندازه گیری عدد اکتان در شرایط متفاوت است. چنانچه در روش MON دما و دور موتور بالاتر از روش RON است.



$$MON)_{TOTAL} = x_{ch_4} (MON)_{ch_4} + x_{c_2h_6} (MON)_{c_2h_6} + x_{c_3h_8} (MON)_{c_3h_8} + x_{c_4h_{10}} (MON)_{c_4h_{10}} + \dots \quad (17)$$

$$RON)_{TOTAL} = x_{ch_4} (RON)_{ch_4} + x_{c_2h_6} (RON)_{c_2h_6} + x_{c_3h_8} (RON)_{c_3h_8} + x_{c_4h_{10}} (RON)_{c_4h_{10}} + \dots$$

جدول ۱: ترکیبات تشکیل دهنده حوزه های گاز ایران بر حسب درصد [۱]

| کنگان | بید بلند | خانگیان | سرخون | تهران | ترکیبات | فرمول |
|-------|----------|---------|--------|-------|----------------|--------------------------------|
| ۸۸/۰۲ | ۸۴/۱۵۷ | ۹۸/۵۴۸ | ۸۸/۰۸۹ | ۸۷/۷ | Methane | CH ₄ |
| ۴/۱۳ | ۹/۵ | ۰/۶۴۷ | ۳/۴۲۰ | ۴/۷ | Ethane | C ₂ H ₆ |
| ۱/۲۹ | ۳/۷۴۴ | ۰/۰۶۹ | ۱/۲۷۰ | ۱/۷۴ | Propane | C ₃ H ₈ |
| ۰/۲۸ | ۰/۴۱۳ | ۰/۰۱۸ | ۰/۲۹۰ | ۰/۳۷ | Iso-Butane | C ₄ H ₁₀ |
| ۰/۳۸ | ۰/۷۶۸ | ۰/۰۳۹ | ۰/۳۷۰ | ۰/۴۲ | n-Butane | C ₄ H ₁₀ |
| ۰/۱۶ | ۰/۱۲۵ | ۰/۰۱۸ | ۰/۱۲۰ | ۰/۱۳ | Iso-pentane | C ₅ H ₁₂ |
| ۰/۱۰ | ۰/۱۰۱ | ۰/۰۲۱ | ۰/۰۷۰ | ۰/۱۰ | n-pentane | C ₅ H ₁₂ |
| ۰/۱۹ | ۰/۰۱۶ | ۰/۱۴۰ | ۰/۰۹۰ | ۰/۰۸ | Hexane | C ₆ H ₁₄ |
| ۵/۴۵ | ۰/۷۱۵ | ۰/۵ | ۵/۷۵۰ | ۴/۷ | Nitrogen | N ₂ |
| ۰/۰ | ۰/۴۱۲ | ۰/۰ | ۰/۵۳۰ | ۰/۰۵ | Carbon dioxide | CO ₂ |

جدول ۲: مشخصات فنی موتور گازسوز ¹³⁵Ti [۹]

| نوع سوخت | نوع احتراق | قطر سیلندر | کورس پیستون | حداکثر قدرت | حداکثر گشتاور |
|-----------------|------------------------------|--------------|--------------|-------------------|----------------------------|
| (CNG) گاز طبیعی | چهارمانه / اشتغال جرقه ای | ۱۰۰ میلی متر | ۱۲۸ میلی متر | ۲۴۰ اسب بخار | ۴۴۰ نیوتن متر |
| تعداد سیلندر | نسبت تراکم | طول شاتون | حجم جابجایی | حداکثر دور موتور | زاویه جرقه زنی |
| ۴ | ۱۱ | ۲۸۰ میلی متر | ۱۱/۵۸ لیتر | ۲۶۰۰ دور بر دقیقه | ۲۰ درجه قبل از مرگ بالا |

نتایج عددی

دمای شعله آدیاباتیک ترکیبات تشکیل دهنده گاز طبیعی

از شکل (۱) ملاحظه می شود که دمای شعله آدیاباتیک متان کمترین و هگزان بیشترین مقدار را دارد. همچنین نتایج نشان می دهند که وجود مقادیر CO_2 ، H_2O و N_2 باعث کاهش دمای شعله می گردد. میزان کاهش دما برای CO_2 بیشترین، H_2O متوسط و N_2 کمترین مقدار می باشد. از سوی دیگر میزان کاهش دمای شعله برای متان بیشترین مقدار را داراست در حالی که با سنگین تر شدن هیدروکربنها میزان کاهش دمای شعله نیز کاهش می یابد. در میان حوزه های گاز ایران، حوزه گاز بید بلند دارای بالاترین مقدار دمای شعله آدیاباتیک و حوزه گاز سرخون دارای پایین ترین مقدار است. از سوی دیگر نتایج شکل (۲) نشان می دهد که دمای شعله آدیاباتیک حوزه سرخون به علت وجود مقادیر زیاد نیتروژن و دی اکسید کربن و مقادیر کم هیدروکربنهای سنگین از متان خالص پایین تر است.

منحنی های مربوط به عملکرد و آلایندگی موتور گازسوز

شکل (۳) منحنی $P - \theta$ را در موتور گازسوز، برای حوزه های گاز مختلف ایران نشان می دهد. حوزه گاز خانگیران با $98/5\%$ متان نزدیکترین تشابه را با متان خالص دارد و حوزه گاز بید بلند با 84% متان، دورترین ترکیب گاز را با متان خالص دارد. شکل (۴) نشان دهنده نمودار $T - \theta$ در موتور گازسوز است و شکل (۵) نشان می دهد که گاز ورودی شهر تهران دارای بیشترین آلایندگی NO_x و متان خالص کمترین مقدار را دارا می باشد. بالا بودن آلایندگی گاز ورودی تهران به علت دلایل زیر است:

مقدار کمتر متان، وجود مقادیر زیادتر نیتروژن، وجود مقدار نسبتاً زیاد هیدروکربنهای سنگین تر که باعث افزایش دما و ازدیاد آلایندگی می باشد.

مقادیر عدد اکتان

مقادیر اعداد اکتان حوزه های گاز طبیعی در شکل (۶) نشان داده شده اند چنانچه ملاحظه می شود عدد اکتان متان خالص و حوزه خانگیران دارای بالاترین مقدار است.

نتیجه گیری

اگر خواص انتخابی سوخت مورد نظر برای یک موتور اشتعال جرقه ای گازسوز را شامل چهار خاصیت عدد اکتان، دمای شعله آدیاباتیک، عملکرد موتور و آلایندگی در نظر بگیریم، در این صورت باید مشخصات حوزه های سوخت گاز طبیعی ایران را به سه دسته کلی تقسیم کنیم

الف - مقدار متان: متان هیدروکربنی است که دارای بالاترین عدد اکتان می باشد [۱۰] ب - مقدار هیدروکربنهای سنگین: وجود هیدروکربنهای سنگین تر عدد اکتان را کاهش و از نظر عملکرد موتور نیز فشار و دما را افزایش می دهد.

در عین حال باعث افزایش دمای شعله آدیباتیک می گردد. اکسیدهای ازت نیز به علت بالا رفتن دما افزایش می یابند. پ - وجود نیتروژن : باعث کاهش عدد اکتان، کاهش دمای شعله آدیباتیک و کاهش دما، فشار پیک موتور و افزایش آلاینده NO_x می گردد.

جدول (۳) خواص حوزه های گاز ایران را به صورت ترکیبی از عوامل فوق نشان می دهد. به عنوان مثال حوزه خانگیران با ۹۸/۵٪ متان و مقادیر هیدرو کربنهای سنگین بسیار کم و نیتروژن کم دارای بالاترین عدد اکتان و دمای شعله آدیباتیک متوسط و کمترین مقدار بیشینه فشار و دما و پایین ترین مقدار اکسیدهای ازت می باشد. حوزه گاز بید بلند به علت وجود مقادیر کم متان و مقادیر زیاد هیدرو کربنهای سنگین و مقادیر کم نیتروژن دارای عدد اکتان کم و بیشترین پیک فشار و دما و مقادیر اکسید ازت نسبتا زیاد می باشد. ورودی گاز تهران به علت وجود مقدار کم متان و مقادیر زیاد هیدرو کربنهای سنگین و مقادیر زیاد نیتروژن دارای بیشترین مقدار آلاینده می باشد. مقادیر زیاد این آلاینده باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی برای انسانها و کشتهای کشاورزی و ایلاف مصنوعی می شود.

جدول ۳ : مقایسه خواص سوخت گاز حوزه های مختلف ایران

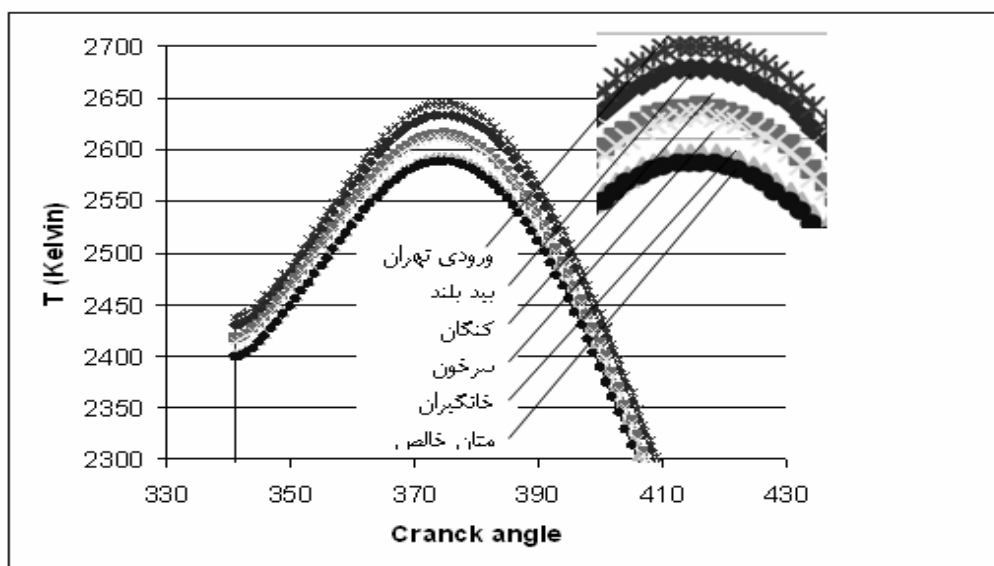
| نام حوزه | عدد اکتان | دمای شعله آدیباتیک | ایپک فشار و دما | آلاینده NO_x |
|-------------|-----------|--------------------|-----------------|----------------|
| کنگان | متوسط | متوسط | متوسط | متوسط |
| بید بلند | بسیار خوب | بالاترین | پالا | بالا |
| خانگیران | عالی | متوسط | کم | کم |
| سرخون | متوسط | کم | متوسط | متوسط |
| ورودی تهران | خوب | بالا | متوسط | بالاترین |
| متان خالص | بهترین | متوسط | کم | کم |



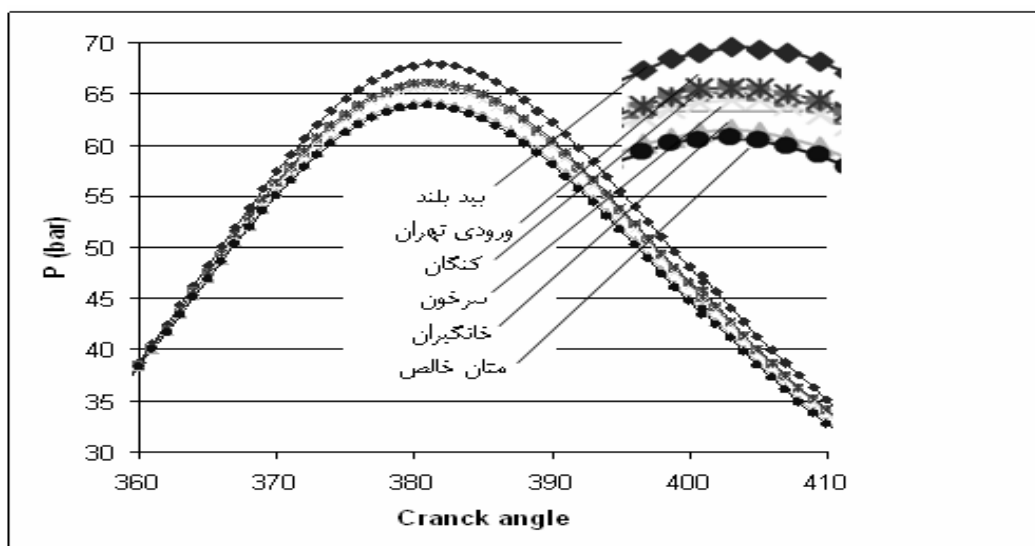
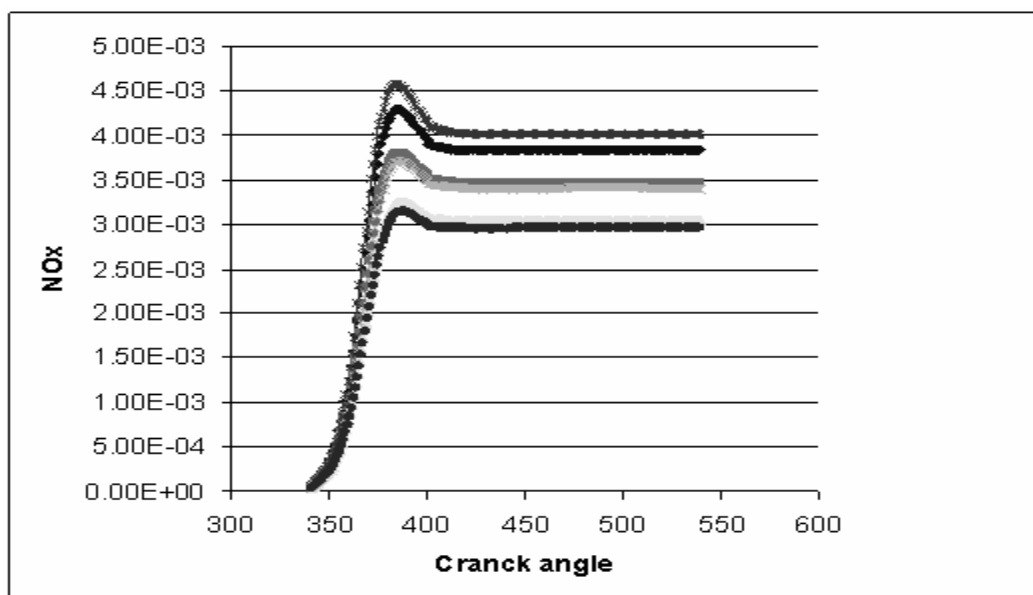
شکل ۱: مقایسه دمای شعله آدیباتیک گازهای تشکیل دهنده گاز طبیعی

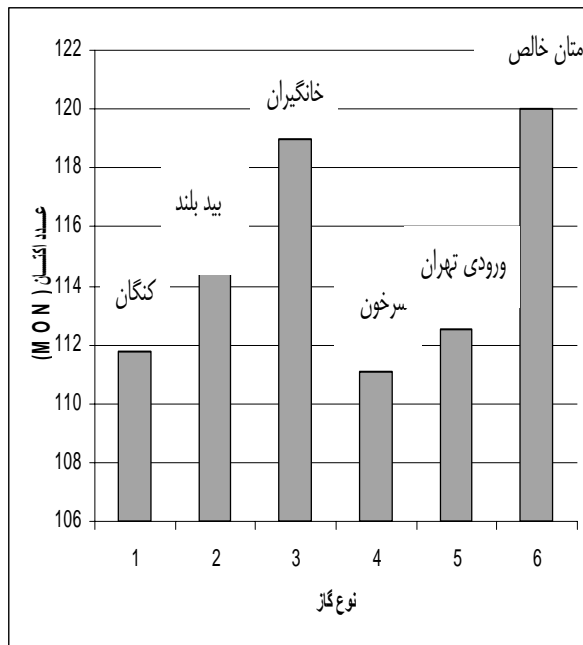


شکل ۲: مقایسه دمای شعله آدیاباتیک حوزه های گاز ایران (دما ۵۰ درجه و استوکیومتریک)



شکل ۳: نمودار نظری $(P - \theta)$ برای موتور ^{135}Ti

شکل ۴: نمودار نظری ($T - \theta$) برای موتور $135Ti$ شکل ۵: نمودار نظری آلاینده NO_x برای موتور $135Ti$ برای حوزه های گاز مختلف ایران (نسبت تراکم ۱۱ و $\lambda=1$)



| ردیف | حوزه گازی | عدد اکتان (MON) | عدد اکتان (RON) |
|------|-------------|-----------------|-----------------|
| ۱ | کنگان | ۱۱۱٫۸ | ۱۱۱٫۸ |
| ۲ | بید بلند | ۱۱۷٫۴ | ۱۱۷٫۴ |
| ۳ | خانگیران | ۱۱۹٫۲ | ۱۱۹٫۲ |
| ۴ | سرخون | ۱۱۱٫۸ | ۱۱۱٫۸ |
| ۵ | ورودی تهران | ۱۱۳٫۵ | ۱۱۳٫۵ |
| ۶ | متان خالص | ۱۲۰ | ۱۲۰ |

شکل ۶: مقادیر عدد اکتان برای حوزه های گاز مختلف ایران

منابع

- [۱] پژوهشگاه صنعت نفت، واحد تجزیه فیزیکی، شیمیائی و استاندارد آزمایشگاه گازها و سیالات نفتی، ۱۳۷۹
- [2] Caillol.C et al, " A combustion model for analyzing the effects of natural Gas Composition on the Operating of a Spark Ignition Engine", SAE paper 2002-01-2236.
- [3] poorva Agarwal – " Modeling the Effect of Natural Gas Composition on Ignition Delay Under Compression Ignition Conditions", SAE paper 971711,1997.
- [4] Nigel N. Clark, "Effect of Fuel Composition on the Operation of a Lean-Burn Natural Gas Engine", SAE paper 952560,2001.
- [۵] جزایری، سیدعلی. شبیه سازی موتورهای اشتعال جرقه ای با سوخت گاز طبیعی (NG) و مقایسه عملکرد انواع گاز طبیعی موجود در کشور، مجله تحقیقات موتور، زمستان و بهار ۸۴-۸۵.
- [۶] هیملبلاو، دیوید، اصول بنیانی و محاسبات در مهندسی شیمی، ترجمه مرتضی سهرابی، ۱۳۶۶.



- [۷] سالکی حاصل قویی، نوریه، بررسی تئوری و تجربی موازنه حرارتی موتور OM 355 در حالت صد در صد گازسوز و (OM355G-CNG) و مقایسه آن با موتور دیزلی پایه، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۱۳۸۰
- [۸] رستمی، محمدرضا. پایاننامه کارشناسی ارشد، مدل نشر آلاینده ها در موتورهای اشتعال جرقه ای (SI) با سیکل باز، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۱۳۷۸
- [۹] غفارزاده، سعید. بررسی پدیده پس زدن شعله در موتور گاز سوز Ti ۱۳۵، پایاننامه کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۱۳۸۲
- [10] Ferguson Coline and Allan, T Kirkpatrick Internal Combustion Engines Colorado state university, 2001.