



نسبت هم‌ارزی بر کوبش یافتند که غنی‌سازی سوخت تأثیر دوگانه‌ای بر شدت کوبش دارد. در شرایط تنفس طبیعی، افزایش مقدار سوخت ابتدا شدت کوبش را افزایش می‌دهد، اما با غنی‌تر شدن مخلوط، اثر خنک‌کنندگی منجر به کاهش شدت کوبش می‌شود. موری‌کاوا [۸] تأثیر نسبت تراکم بر عملکرد و آلایندگی موتورهای احتراق داخلی را بررسی کرد و نشان داد که افزایش نسبت تراکم از ۱۲ به ۱۳/۷ باعث بهبود ۲ تا ۴ درصدی بازده گرمایی در شرایط بار موثر متوسط می‌شود. این بهبود به دلیل افزایش فشار و دمای اوج احتراق است که احتراق کامل‌تری را ایجاد می‌کند. همچنین، افزایش نسبت تراکم احتمال کوبش را افزایش می‌دهد. آلگر [۹] تأثیر استفاده از سیستم EGR سرد شده بر عملکرد، کوبش و آلایندگی موتورهای توربوشارژ را بررسی کرد و نشان داد که استفاده از EGR سرد شده، به ویژه در نرخ‌های بالا تا ۲۵ درصد، به طور قابل توجهی کوبش را کاهش داده و به موتور اجازه می‌دهد که فاز احتراق را بهینه‌تر کند. تحقیقات انجام‌شده توسط ژانگ و همکاران [۱۰] نشان داد که تزریق آب به همراه سوخت با کاهش دما و افزایش رقیق‌سازی مخلوط سوخت و هوا می‌تواند به کاهش دمای احتراق و بهبود بازده گرمایی موتور کمک کند، به طوری که این بهبود در موتورهایی که تحت بارهای سنگین کار می‌کنند، بیشترین تأثیر را دارد. در مطالعه‌ای دیگر سالک و همکاران [۱۱] نشان دادند که با تزریق آب و کاهش دمای محفظه احتراق به جلوگیری از خوداشتعالی و در نتیجه کاهش احتمال کوبش کمک می‌کند.

با توجه به کاربرد گسترده موتور ROTAX در صنایع هوایی و کمبود سوخت‌های با عدد اکتان بالا، هدف از انجام این پروژه بررسی عددی تأثیر عدد اکتان سوخت بر پارامترهای عملکردی موتور و همچنین بکارگیری روش‌های جلوگیری از وقوع پدیده کوبش می‌باشد. نوآوری در این مقاله در بررسی مقایسه‌ای استراتژی‌های کاهش کوبش به صورت هم‌زمان است که اثرات کاهش فشار و دما با افزایش ارتفاع در نظر گرفته شده است. در بسیاری از مواقع استفاده از سوخت اکتان بالا در دسترس یا مقرون به صرفه نیست و بنابراین امکان‌سنجی و مطالعه تأثیرات استفاده از سوخت‌های اکتان پایین بر عملکرد موتور و جلوگیری از پدیده کوبش لازم و ضروری به نظر می‌رسد.

## ۲- شبیه سازی موتور

### ۲-۱- مدل سازی احتراق و انتقال گرما

برای مدل‌سازی فرآیند احتراق، از مدل دو ناحیه‌ای استفاده شده است. مناطق گاز سوخته و نسوخته در محفظه احتراق به طور جداگانه تقسیم شده و دمای گاز برای هر منطقه محاسبه می‌شود [۱۲]. با اعمال قانون اول ترمودینامیک برای هر ناحیه، معادلات زیر به دست می‌آید [۱۳]:

$$\frac{dm_b u_b}{d\theta} = -p_c \frac{dV_b}{d\theta} + \frac{dV Q_F}{d\theta} - \sum \frac{dQ_{Wb}}{d\theta} + h_u \frac{dm_b}{d\theta} - h_{BB,u} \frac{dm_{BB,u}}{d\theta} \quad (1)$$

$$\frac{dm_u u_u}{d\theta} = -p_c \frac{dV_u}{d\theta} - \sum \frac{dQ_{Wu}}{d\theta} + h_u \frac{dm_b}{d\theta} - h_{BB,u} \frac{dm_{BB,u}}{d\theta} \quad (2)$$

که در آن پارامترهای  $\frac{dQ_{Wb}}{d\theta}$ ،  $\frac{dQ_{Wu}}{d\theta}$ ،  $\frac{dV_b}{d\theta}$ ،  $\frac{dV_u}{d\theta}$ ،  $p_c$  و  $h_u \frac{dm_b}{d\theta}$  به ترتیب تغییرات انرژی داخلی درون سیلندر، کار پیستون، انرژی ورودی سوخت، اتلاف گرمای دیواره، جریان آنتالپی از

ناحیه نسوخته به سوخته، و آنتالپی ناشی از نشتی ناخواسته است. معادلات تغییرات حجم هر ناحیه می‌تواند به صورت زیر بیان شود [۱۳]:

$$\frac{dV_b}{d\theta} + \frac{dV_u}{d\theta} = \frac{dV}{d\theta} \quad (3)$$

$$V_b + V_u = V \quad (4)$$

در مدل دو ناحیه ای، کسر جرمی سوخت سوخته شده x در طول زمان احتراق به صورت معادله زیر بیان می‌شود [۱۳]:

$$x = 1 - \exp \left[ -a \left( \frac{\alpha - SOC}{BDUR} \right)^{m+1} \right] \quad (5)$$

که در آن  $\alpha$ ،  $m$  و  $a$  به ترتیب زاویه شروع احتراق، زاویه طول احتراق، زاویه چرخش میل لنگ، ضریب شکل و توان وایب است. در مدل انتقال گرمای وشنی [۱۴]، برای مدل‌سازی انتقال گرما بین گاز و دیواره‌های سیلندر فرآیند تبادل گرمای واقعی به ضریب انتقال گرمای مربوطه تبدیل می‌شود تا تلفات گرمایی را شبیه‌سازی و محاسبه کند. انتقال گرما به دیواره‌های محفظه احتراق، یعنی سرسیلندر، پیستون و آستر سیلندر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_{wi} = A_i \alpha_w (T_c - T_{wi}) \quad (6)$$

که در آن  $Q_{wi}$ ،  $A_i$ ،  $\alpha_w$ ،  $T_c$  و  $T_{wi}$  جریان گرمای دیواره، مساحت سطح، ضریب انتقال گرما، دمای گاز داخل سیلندر و دمای دیواره است. پارامتر  $\alpha_w$  نیز ضریب انتقال گرما است که تابع پارامترهای هندسی، شرایط عملکردی و نحوه پاشش سوخت است.

### ۲-۲- مدل سازی کوبش

برای پیش‌بینی وقوع کوبش روش بر پایه مدل آرنیوس (انتگرال کوبشی) به دلیل زمان محاسباتی سریعتر و دارا بودن پتانسیل مطالعه مسائل واقعی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۵-۱۷]. مفهوم تأخیر در اشتعال به معنی فاصله ی زمانی بین انتهای تراکم و شروع خود اشتعالی است. روش معمول برای مدل کردن زمان تأخیر در اشتعال، استفاده از رابطه ی آرنیوس است که با داده‌های تجربی تطبیق می‌یابد [۱۸]:

$$\tau = 17.68 \left( \frac{ON}{100} \right)^{3.402} P^{-1.7} \exp \left( \frac{3800}{T} \right) \quad (7)$$

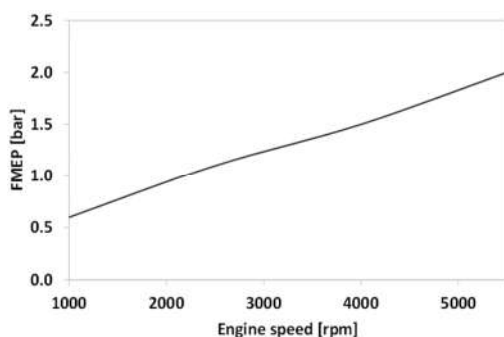
که در آن  $\tau$  زمان تأخیر اشتعال در دما و فشار لحظه ای مخلوط بر حسب میلی ثانیه،  $P$  فشار مطلق بر حسب اتمسفر و  $T$  بر حسب کلوین است،  $ON$  نیز عدد اکتان سوخت است. لیونگود روشی با عنوان انتگرال کوبشی ارائه کردند که با استفاده از رابطه تأخیر در اشتعال بتوان زاویه لنگ وقوع کوبش را تعیین کرد [۱۹]. انتگرال کوبش به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\int_{t=0}^{t=t_i} \frac{dt}{\tau} = 1 \quad (8)$$

که  $t$  زمان سپری شده از شروع فرآیند فشرده سازی گاز نهایی ( $t=0$ ) و  $t_i$  زمان خوداشتعالی است. بنابراین اگر تاریخچه زمانی دما و فشار گاز نهایی در طول یک چرخه مشخص باشد، از معادلات اخیر می‌توان برای تعیین اینکه آیا خوداشتعالی قبل از انتشار معمولی شعله، گاز نهایی را مصرف می‌کند اتفاق می‌افتد یا خیر، استفاده کرد.

نمایانگر منیفولدهای ورودی است انشعابات آن به سیلندرها متصل می-شود و در نهایت محصولات حاصل از احتراق از طریق مجموعه لوله اگزوز به خارج از موتور تخلیه می-شوند. سوخت مورد استفاده RON95 با ارزش گرمایی ۴۳/۵ مگاژول بر کیلوگرم در نظر گرفته شد. شرایط اولیه لازم برای انجام محاسبات در بخش کنترل شبیه سازی نرم افزار به صورت فشار اولیه ۱ بار و دمای هوای ۲۵ درجه سانتی گراد و تست‌های شبیه‌سازی نیز در طول ۲۵۰ چرخه کاری در نظر گرفته شد. در مدل حاضر سیلندرها مطابق با داده‌های کارخانه سازنده مدل‌سازی شده‌اند و با توجه به اینکه همه سیلندرها پارامترهای یکسانی دارند از خاصیت سیلندر متشابه در نرم افزار استفاده شده است. همچنین ترتیب احتراق موتور به صورت ۱-۴-۲-۳ در نظر گرفته شده است [۲۲].

شکل ۲ تغییرات میانگین فشار موثر حاصل از اصطکاک (FEMP) را بر حسب دور موتور در موتور ROTAX 912 ULS نشان می‌دهد [۲۳].



شکل ۲- نمودار تغییرات FEMP بر حسب دور موتور

زمان بندی درجه‌های ورودی و خروجی برای موتور مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده‌است [۲۲].

| جدول ۲- زمان بندی سوپاپ‌های موتور ROTAX 912 ULS |                      |
|-------------------------------------------------|----------------------|
| زمان‌بندی                                       | پدیده دریچه          |
| نقطه مرگ بالا                                   | باز شدن دریچه ورودی  |
| ۴۸° بعد از نقطه مرگ پایین                       | بسته شدن دریچه ورودی |
| ۴۸° قبل از نقطه مرگ پایین                       | باز شدن دریچه خروجی  |
| نقطه مرگ بالا                                   | بسته شدن دریچه خروجی |

شکل ۳ و ۴ به ترتیب توان و گشتاور موثر موتور را برحسب دور موتور، برای داده‌های حاصل از کاتالوگ سازنده و شبیه سازی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود داده‌های حاصل از شبیه سازی با دقت مناسبی داده‌های تجربی را پوشش می‌دهد، به طوری که بیشینه خطای نسبی به ازای توان و گشتاور موثر به ترتیب ۲/۳۵٪ و ۲/۹۵٪ است. این موضوع توانمندی مدل‌سازی حاضر را در پیش بینی عملکرد موتور نشان می‌دهد که در ادامه به کمک آن اهداف تحقیقاتی خود را دنبال می‌کنیم.

## ۳-۲- مدل‌سازی اثرات ارتفاع از سطح زمین

به منظور مدل‌سازی دما و فشار محیط در ارتفاعات مختلف از روابط ۹ و ۱۰ استفاده می‌شود [۲۰]:

$$T = T_0 - 0.0065\Delta Z \quad (9)$$

$$P = P_0 \left( \frac{T_0 - 0.0065\Delta Z}{T_0} \right)^{\frac{5.256}{0.0001579 T_0 + 4.617}} \quad (10)$$

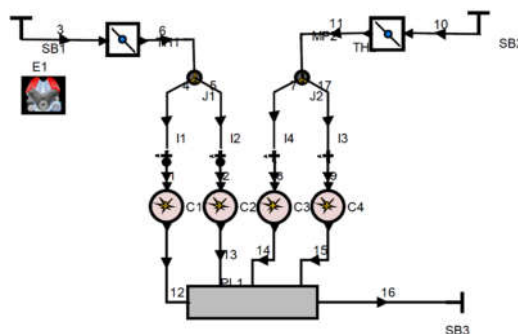
در آن  $P$  فشار محیط بر حسب بار،  $T$  دمای محیط بر حسب کلون،  $P_0$  فشار مرجع سطح دریا برابر با ۱۰۱۳۲۵ بار،  $T_0$  دمای مرجع و برابر با ۲۸۸/۱۵ کلون،  $\Delta Z$  ارتفاع از سطح دریا بر حسب متر،  $g$  شتاب جاذبه زمین بر حسب  $\frac{m}{s^2}$  و  $R$  ثابت گازی هوا بر حسب  $\frac{J}{kg.K}$  می‌باشد. با افزایش ارتفاع از سطح دریا، دما و فشار به ترتیب به صورت‌های خطی و نمایی رفتار کاهشی را نشان می‌دهند که در رابطه تاخیر در اشتعال آرنیوس، این پارامتر مستقیماً تحت تاثیر دما و فشار است، لذا با تغییرات ارتفاع رفتار متفاوتی برای پدیده‌ی کوبش در مقایسه با شرایط سطح زمین بوجود خواهد آمد.

## ۴-۲- اعتبار سنجی

جدول ۱ مشخصات کلی موتور مورد مطالعه، و هم چنین شکل ۱ مدل‌سازی آن را در نرم افزار AVL Boost نشان می‌دهد [۲۱].

جدول ۱- داده‌های فنی موتور ROTAX 912 ULS

| مقدار               | مشخصه                  |
|---------------------|------------------------|
| ۱۳۵۲ سانتی‌متر مکعب | حجم جابجایی            |
| ۴ سیلندر متقابل     | تعداد و آرایش سیلندرها |
| ۶۱ سانتی‌متر        | کورس                   |
| ۸۴ سانتی‌متر        | قطر سیلندر             |
| ۱۰/۸                | نسبت تراکم             |

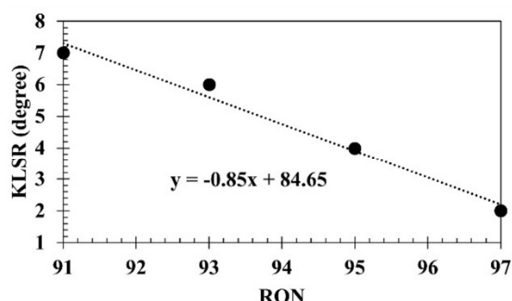


شکل ۱- طرحواره مدل‌سازی موتور ROTAX 912 ULS در نرم افزار AVL Boost

عناصر استفاده شده در طرحواره مدل بالا شامل موتور (E)، مرز سیستم (SB)، اتصالات (J)، دسته گاز (TH)، تزریق کننده سوخت (I)، سیلندرها (C) و پلنیوم (PL) می‌شود.

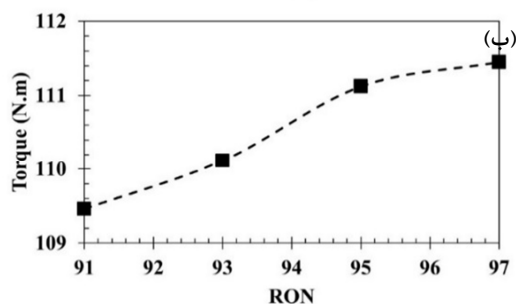
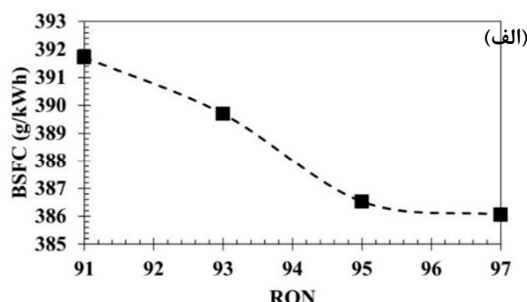
در ابتدا عبور جریان هوا از طریق لوله‌ها و سپس کاربراتورها شبیه سازی می‌شود. کاربراتورها با استفاده مازول کاربراتور و نازل‌های تزریق سوخت به صورت تزریق پیوسته و با استفاده از مازول‌های متناظر موجود در نرم افزار مدل شده اند. مجرای خروجی از کاربراتورها

KLSR را بر حسب RON در دور موتور ۳۰۰۰ و شرایط فشار و دمای سطح زمین نشان می‌دهد. به ازای کاهش هر واحد RON نیازمند تاخیری در جرقه معادل با حدود ۱ درجه است.



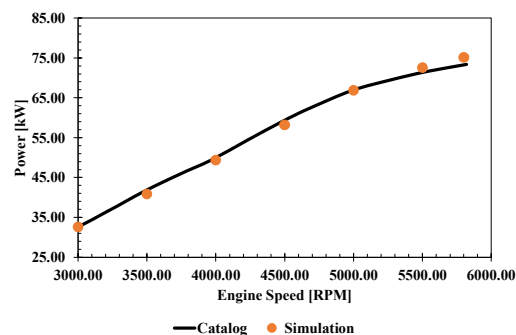
شکل ۵- نمودار تغییرات KLSR بر حسب عدد اکتان سوخت در شرایط سطح زمین

شکل ۶ تغییر پارامترهای گشتاور موثر و مصرف سوخت ویژه ترمزی موتور را بر حسب عدد اکتان با اعمال آوانس جرقه نشان می‌دهد. سوخت‌های با اعداد اکتان بالاتر، با کاهش مصرف سوخت ویژه ترمزی و افزایش گشتاور موثر عملکرد مناسب‌تری را نشان می‌دهند. به طوری که با افزایش عدد اکتان سوخت از ۹۱ به ۹۷، مصرف سوخت ویژه ترمزی و گشتاور موثر به ترتیب ۱/۴۵٪ کاهش و ۱/۸۲٪ افزایش می‌یابد. و این موضوع نشان می‌دهد که در صورت استفاده از سوخت با عدد اکتان پایین‌تر، با تغییر زمانبندی جرقه و تحمیل کاهش جزئی در عملکرد کلی موتور می‌توان از پدیده مخرب کوبش جلوگیری کرد.

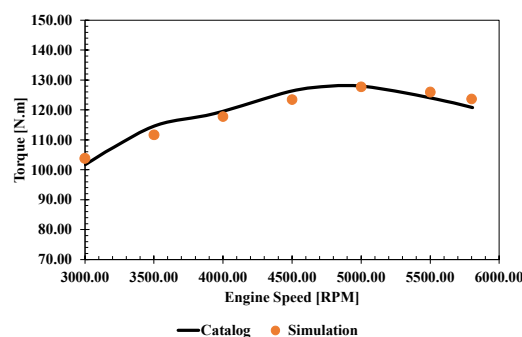


شکل ۶- نمودار پارامترهای عملکردی موتور بر حسب RON سوخت. (الف) مصرف سوخت ویژه ترمزی، (ب) گشتاور موثر

شکل ۷ تغییرات KLSR را بر حسب ارتفاع از سطح زمین نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در یک بنزین خاص با عدد اکتان ثابت، هر چه ارتفاع افزایش یابد، تمایل به کوبش و در نتیجه تاخیر مورد



شکل ۳- داده‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی و کاتالوگ سازنده موتور برای پارامتر توان موثر



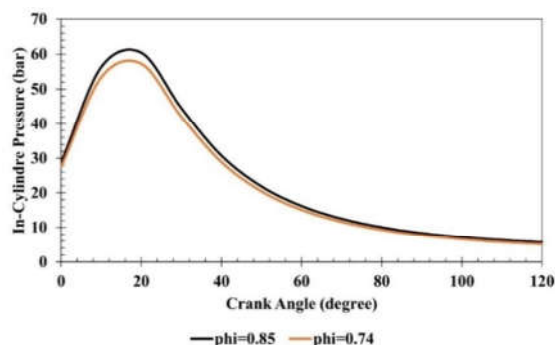
شکل ۴- داده‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی و کاتالوگ سازنده موتور برای پارامتر گشتاور موثر

## ۳- نتایج

### ۳-۱- عدد اکتان و آوانس جرقه

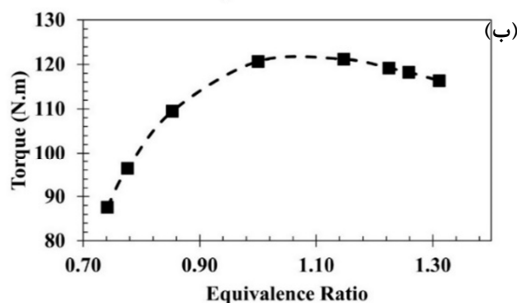
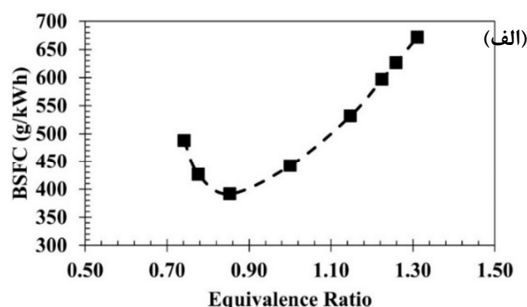
بهترین مقدار زمان بندی جرقه، مقداری است که بهترین گشتاور خروجی را نتیجه دهد. در عدد اکتان های پایین، کاهش مقدار آوانس جرقه بهترین پارامتری است که کوبش را از بین می برد. در بازه ای از تایمینگ که جرقه کوبش رخ می‌دهد، به مقادیر اولیه این بازه که با اعمال آنها به موتور کوبش آغاز می شود، آوانس جرقه آستانه یا مرز KLSR گفته می شود. به دلیل تأثیر به‌سزای آوانس جرقه بر زمان و شدت کوبش، برای بررسی چگونگی تأثیر پارامترهای مختلف بر کوبش، می توان اثر تغییر هر پارامتر را بر آوانس جرقه آستانه کوبش مورد بررسی قرار داد. سوخته‌های رایج و قابل دسترس (که عدد اکتان تحقیقی آنها بین ۹۱ تا ۹۷ است) که نسبت تراکم موتورهای موجود را محدود می کند.

احتمال وقوع پدیده کوبش در دور موتور های متوسط و کم بیشتر است که می‌تواند تاثیرات مخربی بر سیستم داشته باشد. زمان ماند محتویات داخل محفظه احتراق متأثر از دور موتور است و در دور موتورهای پایین احتمال اینکه مخلوط در مقابل جبهه شعله از زمان تاخیر خوداشتعالی فراتر روند وجود دارد. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام گرفته پدیده کوبش در دور موتورهای بالا برای RON در محدوده ۹۱ تا ۹۷ اتفاق نمی افتد. همچنین در دور موتورهای پایین و برای سوخت‌های اکتان پایین، عملکرد موتور توسط کوبش محدود می‌شود و نمی‌توان از آوانس‌های جرقه بزرگ بهره برد. شکل ۵ نمودار تغییرات



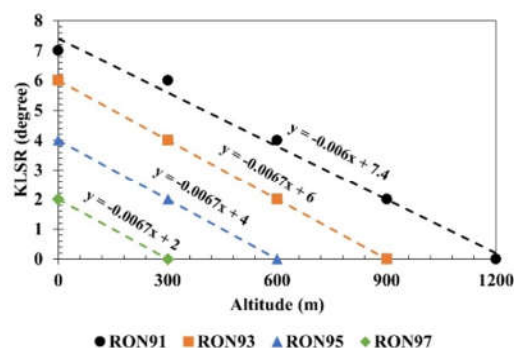
شکل ۸- تغییرات فشار داخلی سیلندر بر حسب زاویه لنگ برای دو نسبت هم ارزی متفاوت در شرایط سطح زمین و RON91

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود با افزایش  $\phi$  تا محدوده‌ای نزدیک به ۱/۱، به دلیل احتراق کامل‌تر و افزایش انرژی آزاد شده از سوخت، گشتاور افزایش می‌یابد. در این شرایط میزان کافی اکسیژن برای سوخت وجود دارد و احتراق بهینه رخ می‌دهد. با افزایش بیشتر  $\phi$  اکسیژن در دسترس برای فرآیند احتراق کاهش می‌یابد و احتراق ناقص و تجمع کربن بیشتر رخ می‌دهد و گشتاور کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که BSFC در نزدیکی  $\phi=1$  حداقل است، زیرا موتور در بالاترین راندمان گرمایی کار می‌کند. برای مخلوط‌های بسیار غنی با بسیار رقیق، BSFC افزایش می‌یابد؛ در مخلوط‌های غنی به دلیل مصرف اضافی سوخت و در مخلوط‌های رقیق به دلیل کاهش کارایی احتراق.



شکل ۹- نمودار پارامترهای عملکردی موتور بر حسب نسبت هم ارزی. الف) مصرف سوخت ویژه ترمزی، ب) گشتاور موثر

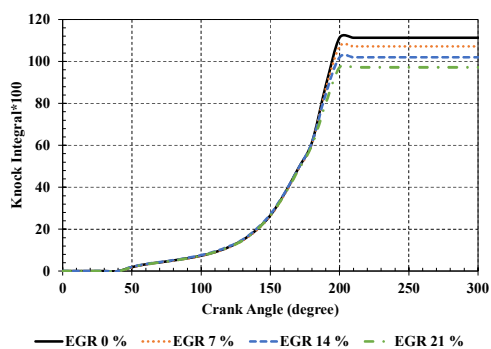
نیاز در جرعه نیز کاهش می‌یابد، به طوری که با هر ۱۵۰ متر افزایش ارتفاع، برای جلوگیری از پدیده کوبش تقریباً تاخیری معادل با ۱ درجه در جرعه مورد نیاز خواهد بود. همانطور که اشاره شد تاخیر در اشتعال مستقیماً تحت تأثیر پارامترهای دما و فشار و کیفیت سوخت است. با توجه به رابطه آرنیوس برای تاخیر در اشتعال، با افزایش ارتفاع و در نتیجه کاهش همزمان دما و فشار، تاخیر در اشتعال افزایش یافته و در نتیجه با افزایش ارتفاع، رفته رفته تمایل به کوبش کاهش می‌یابد، به طوری برای یک بنزین خاص با عدد اکتان مشخص، از یک ارتفاع خاص به بعد تمایل به کوبش به صورت کامل از بین می‌رود. نکته قابل توجه دیگر کاهش ارتفاع از بین رفتن تمایل به کوبش با افزایش RON سوخت است. به این معنی که پرند پس از عبور از ارتفاع حد کوبش کوچکتر، می‌تواند در ارتفاعات بیشتری بدون تغییر در زمان جرعه پرواز کند که یکی دیگر از مزیت‌های سوخت‌های با اعداد اکتان بالاتر را نشان می‌دهد. زیرا همانطور که مشاهده شد تغییر در زمانبندی جرعه همزمان با کاهش میل به کوبش منجر به کاهش توان عملیاتی خواهد شد.



شکل ۷- تغییرات KLSR مورد نیاز بر حسب ارتفاع و در حالت استفاده از سوخت با اعداد اکتان مختلف

## ۲-۳- تنظیم نسبت هم ارزی

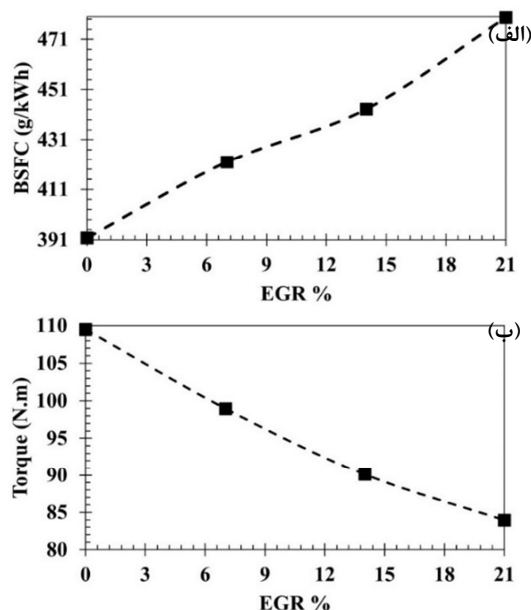
نسبت هم ارزی ( $\phi$ ) ترکیب سوخت و هوا را نسبت به ترکیب استوکیومتری تعیین می‌کند. شکل ۸ تغییرات فشار داخلی سیلندر را بر حسب زاویه میل لنگ، در دو نسبت هم ارزی مختلف نشان می‌دهد. در نسبت‌های هم ارزی پایین ( $\phi < 1$ )، مخلوط رقیق و دمای احتراق پایین‌تر است که احتمال کوبش را کاهش می‌دهد و بیشترین احتمال وقوع کوبش در نسبت‌های نزدیک به استوکیومتری ( $\phi \approx 1$ ) که دمای احتراق و فشار به حداکثر می‌رسد، اتفاق می‌افتد. در شرایط رقیق، فشار و دما کاهش می‌یابد زیرا جرم سوخت کمتری برای تولید انرژی موجود است. همچنین در شرایط غنی ( $\phi > 1$ )، اگرچه سوخت بیشتری وجود دارد، اما فشار و دما به دلیل احتراق ناقص کمتر افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱- نمودار انتگرال کوبشی برحسب زاویه میل لنگ برای سوخت RON 91، در شرایط سطح زمین و برای نرخ‌های مختلف EGR

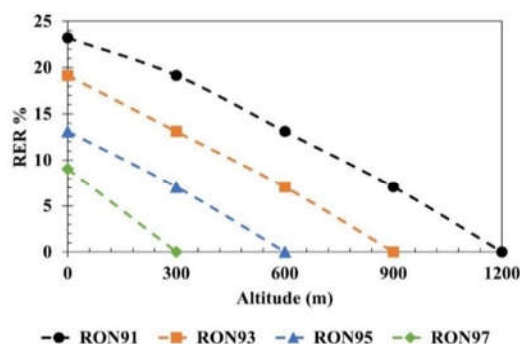
اما این کاهش تمایل به کوبش به صورت طبیعی منجر به تحمیل جریمه به سیستم می‌شود و فشار درون سیلندر تحت تاثیر EGR کاهش می‌یابد که در نتیجه منجر به کاهش توان عملیاتی نهایی خواهد شد. زیرا EGR با بازخورانی گازهای حاصل از احتراق میزان اکسیژن قابل دسترس برای ترکیب شدن سوخت را کاهش می‌دهد که به معنی کاهش بازده تنفسی موتور است، که در نهایت منجر به کاهش نرخ آزاد سازی انرژی و در نتیجه توان عملیاتی موثر خواهد شد.

شکل ۱۲ نمودار مصرف سوخت ویژه ترمزی و گشتاور موثر را بر حسب نرخ EGR برای سوخت RON91 و در شرایط سطح زمین نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش نرخ EGR از ۰ به ۲۱٪، مصرف سوخت ویژه ترمزی و گشتاور موثر به ترتیب ۲۲/۴۶٪ و ۲۳/۳۲٪ افزایش و کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲- نمودار پارامترهای عملکردی موتور بر حسب نسبت نرخ EGR. الف) مصرف سوخت ویژه ترمزی، ب) گشتاور موثر

شکل ۱۰ نمودار نرخ کاهش نسبت هم‌ارزی مورد نیاز برای رسیدن به آستانه کوبش را برحسب ارتفاع از سطح زمین نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، هرچه ارتفاع بیشتر باشد، برای جلوگیری از کوبش، نیاز به کاهش کمتری در نسبت هم‌ارزی وجود دارد. این موضوع به دلیل کاهش خودبخودی احتمال وقوع کوبش به دلیل کاهش فشار داخلی سیلندر ناشی از کاهش فشار جو در ارتفاعات بالاتر است. همچنین مشاهده می‌شود که برای سوخت‌هایی با عدد اکتان پایین‌تر، نیاز به کاهش بیشتر در نسبت هم‌ارزی وجود دارد، زیرا سوخت‌های با عدد اکتان پایین‌تر تمایل دارند در شرایط مشابه دمایی و فشار، بیشتر از سوخت‌های با عدد اکتان بالا، خود به خود مشتعل شوند. به طوری که برای مثال برای سوخت RON91 و RON97 در شرایط سطح زمین، برای جلوگیری از وقوع کوبش، به ترتیب ۲۳/۲ درصد و ۹/۰۵ درصد کاهش در نسبت هم‌ارزی اولیه مورد نیاز است. همچنین تمایل به کوبش برای سوخت RON91 در ارتفاع ۱۲۰۰ متری به دلایل محیطی به از بین می‌رود، در حالی که این ارتفاع برای سوخت RON97 حدود ۳۰۰ متر است.

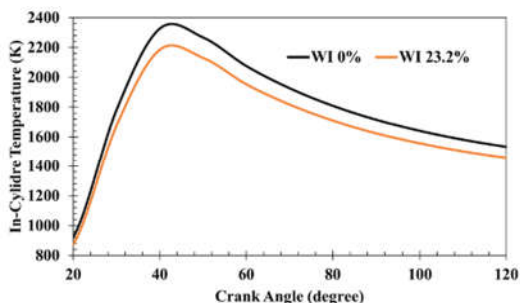


شکل ۱۰- تغییرات کاهش مورد نیاز در نسبت هم‌ارزی برحسب ارتفاع و در حالت استفاده از سوخت با اعداد اکتان مختلف

### ۳-۳- تاثیر نرخ EGR

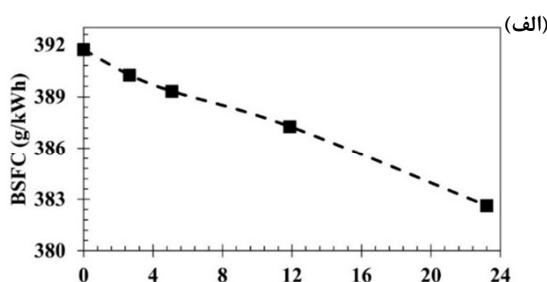
در موتورهای اشتعال جرقه بنزینی، تکنیک بازخورانی گاز خروجی EGR می‌تواند احتراق خود به خودی گاز انتهایی را با تحمیل از دست رفتن بخشی از توان قابل دستیابی، سرکوب کند. مشخص شده است که کوبش موتور با استفاده از نرخ EGR تا حدود ۲۵ درصد سرکوب می‌شود. نکته قابل توجه، لزوم استفاده از یک خنک کننده EGR قبل از بازخورانی گازهای خروجی است. زیرا در صورت عدم خنک کاری، دمای بالای گازهای خروجی منجر به افزایش دمای هوای منیفولد ورودی و در نتیجه تشدید تمایل به کوبش خواهد شد. کسر جرمی EGR به عنوان نسبت جرمی جرمی گاز خروجی بازخورانی شده به کل جریان جرمی وارد شده به موتور از طریق درگاه ورودی تعریف می‌شود. شکل ۱۱ نمودار انتگرال کوبشی را برحسب زاویه میل لنگ برای سوخت RON 91، در شرایط سطح زمین و برای نرخ‌های EGR بین ۰ تا ۲۱ درصد نشان می‌دهد. با افزایش نرخ EGR مقدار انتگرال کوبشی و در نتیجه شدت و احتمال پدیده کوبش کاهش می‌یابد به طوری که برای نرخ‌های EGR حدود ۲۱ درصد، انتظار عدم وقوع پدیده کوبش را داریم.

شدن مخلوط گاز، کندتر می‌شود که در مجموع به سرکوب تمایلات وقوع پدیده ضربه کمک می‌کند.



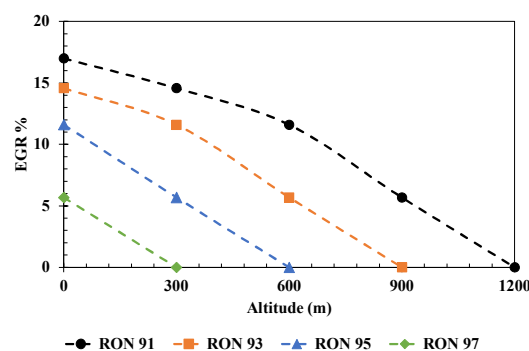
شکل ۱۴- نمودار تغییرات دمای داخلی سیلندر بر حسب زاویه میل لنگ با استفاده از سیستم تزریق آب برای سوخت RON91 و شرایط سطح زمین

شکل ۱۵ نمودار مصرف سوخت ویژه ترمزی و گشتاور موثر را بر حسب درصد پاشش آب را برای سوخت RON91 و در شرایط سطح زمین نشان می‌دهد. آب تبخیر شده باعث رقیق‌تر شدن مخلوط سوخت شده و غلظت واکنش دهنده و سرعت واکنش را کاهش می‌دهد. با تزریق آب، مقاومت در برابر ضربه بهبود یافته، فرآیند احتراق کلی را پیش می‌اندازد و به طور قابل توجهی پایداری احتراق را افزایش می‌دهد. به طور کلی در تکنیک WI با کاهش دمای داخل سیلندر توسط تبخیر آب، فشار مراحل پایانی کورس تراکم نیز کاهش می‌یابد. از این رو، استفاده از WI کار فشرده سازی را کاهش می‌دهد که کارایی موتور را بهبود می‌بخشد. چراکه انرژی کمتری برای فشرده سازی هوای ورودی مورد نیاز است. در نتیجه با وجود کاهش دمای احتراق، ولی افزایش چگالی مخلوط وارد شده به داخل سیلندر گشتاور همچنان افزایش می‌یابد. این مزیت خصوصا در نسبت تراکم‌های بالا به دلیل افزایش فشار درون سیلندر در مرحله آخر کورس تراکم قابل توجه است. تزریق آب در مقادیر بهینه می‌تواند دمای احتراق را تنظیم کند و از پدیده کوبش جلوگیری کند که به افزایش جزئی راندمان و تولید گشتاور بیشتر منجر می‌شود. اما با افزایش بیش از حد تزریق آب، دمای احتراق بیش از حد کاهش می‌یابد و منجر به احتراق ناقص می‌شود و گشتاور کاهش می‌یابد.



(الف)

شکل ۱۳ نمودار نرخ EGR مورد نیاز برای رسیدن به آستانه کوبش را برحسب ارتفاع از سطح زمین نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در یک سوخت با RON خاص با افزایش ارتفاع، نرخ EGR مورد نیاز کاهش می‌یابد، زیرا در ارتفاع‌های بالاتر با کاهش دما و فشار، تمایل به کوبش به خودی خود نسبت به شرایط سطح زمین کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه دیگر از بین رفتن تمایل به کوبش و در نتیجه عدم نیاز به بازخورانی گاز خروجی از یک ارتفاع معین به بعد برای بنزین‌های مورد بررسی است. به طور مشابه با نتایج قبل، در اینجا نیز مشاهده می‌شود این ارتفاع معین با افزایش کیفیت سوخت کاهش می‌یابد. بدین معنی که در صورت استفاده از بنزین با کیفیت بالاتر، پرنده تا زمان رسیدن به ارتفاع معین عدم کوبش، مجبور به تحمل نرخ EGR کمتر و همچنین در مدت زمان کمتر خواهد بود، که این به معنی تحمیل کاهش توان عملیاتی کمتر است. زیرا همانطور که استنتاج شد، تکنیک EGR همزمان با کاهش تمایل به کوبش توان عملیاتی را کاهش می‌دهد.

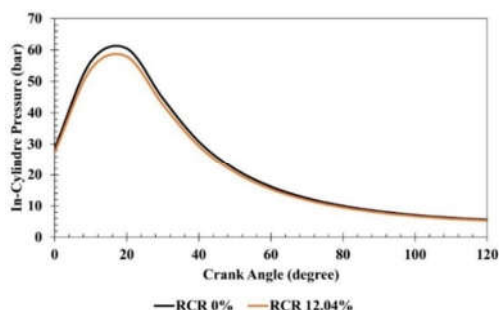


شکل ۱۳- تغییرات نرخ EGR مورد نیاز برحسب ارتفاع و در حالت استفاده از سوخت با اعداد اکتان مختلف

### ۳-۴- تاثیر تزریق آب

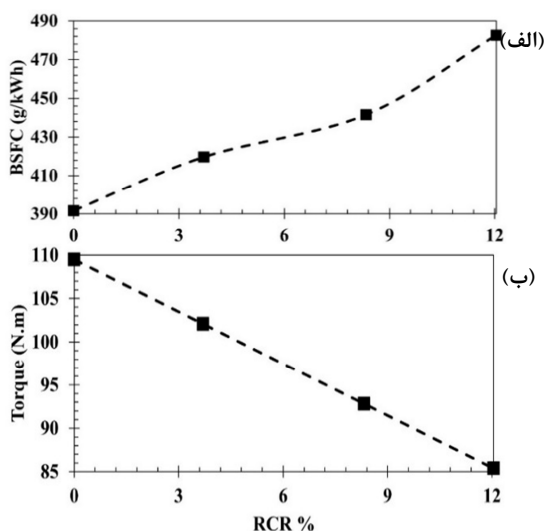
یکی دیگر از روش‌های کاهش فشار و دمای سیلندر برای به تأخیر انداختن کوبش تزریق آب در درگاه‌های ورودی است. در این حالت، از دو افشانه تزریق ابعاد در درگاه‌های ورودی استفاده شده است که امکان پاشش یکنواخت آب و همچنین تغییر نرخ پاشش آب را فراهم می‌کند. آب موجود در مخلوط سوخت و هوا، با توجه به گرماگیر بودن فرآیند تبخیر، منجر به مصرف بخشی از انرژی داخلی مخلوط و همچنین کاهش دمای کلی مخلوط خواهد شد. درصد تزریق آب را به عنوان نسبت دبی آب تزریق شده در درگاه ورودی به دبی سوخت تزریق شده به موتور تعریف می‌شود. شکل ۱۴ نمودار دمای داخلی سیلندر را برای دو حالت بدون تزریق آب و تزریق آب با نرخ ۲۳/۲ درصد برای سوخت RON91 و در شرایط سطح زمین نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود دمای داخلی سیلندر تحت تاثیر تزریق آب در درگاه ورودی قرار گرفته است به طوری که بیشینه دمای داخلی سیلندر ۶/۰۶ درصد کاهش یافته است. در این فرآیند، تغییر فاز آب مایع به بخار، مقدار زیادی گرما را جذب می‌کند و دمای مخلوط درون سیلندر را کاهش می‌دهد. همچنین دمای احتراق اولیه در پایان مرحله تراکم کاهش می‌یابد. از این رو، سرعت کلی افزایش دما در حین احتراق، با سردتر

داخل سیلندر شده است. این کاهش فشار منجر به کاهش دمای مخلوط سوخت و هوا در هنگام احتراق می‌شود که احتمال وقوع پدیده کوبش را کاهش می‌دهد. از آنجاکه کوبش زمانی رخ می‌دهد که دمای مخلوط سوخت و هوا در سیلندر به حدی بالا می‌رود که به صورت خودبه‌خودی مشتعل شود، کاهش دما و فشار در اثر کاهش نسبت تراکم باعث کاهش احتمال وقوع این پدیده مخرب خواهد شد.

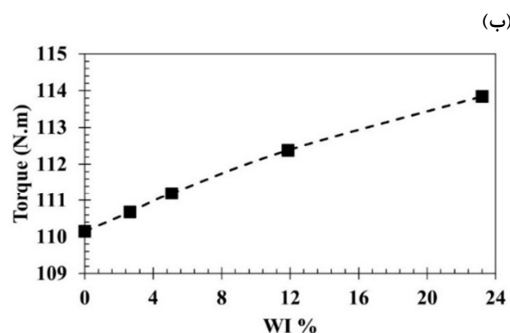


شکل ۱۷- نمودار تغییرات فشار داخلی سیلندر بر حسب زاویه میل لنگ در حالت کاهش نسبت تراکم برای سوخت RON91

همانطور که از شکل ۱۸ نتیجه می‌شود با کاهش نسبت تراکم در موتورهای جرقه‌ای، فشار و دمای حداکثری داخل سیلندر کاهش می‌یابد، که کاهش توانایی موتور در تولید گشتاور را در بردارد. با افزایش درصد میزان کاهش در نسبت تراکم، به دلیل کاهش انرژی گرمایی قابل استفاده در زمان احتراق، گشتاور به طور پیوسته کاهش می‌یابد که منجر به کاهش بازده ترمودینامیکی و در نتیجه کاهش گشتاور می‌شود. از طرفی، مصرف سوخت ویژه ترمزی با افزایش RCR بیشتر می‌شود. چراکه برای جبران کاهش گشتاور و توان خروجی موتور، نیاز به سوخت بیشتری است تا موتور بتواند همان مقدار انرژی را تولید کند. این موضوع منجر به افزایش BSFC می‌شود که نشان‌دهنده کارایی پایین‌تر در موتور با نسبت تراکم کاهش‌یافته است.

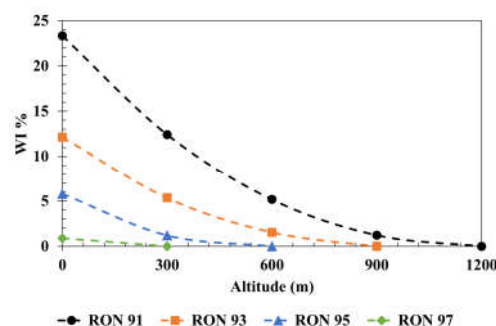


شکل ۱۸- نمودار پارامترهای عملکردی موتور بر حسب درصد کاهش نسبت تراکم موتور. (الف) مصرف سوخت ویژه ترمزی، (ب) گشتاور موثر



شکل ۱۵- نمودار پارامترهای عملکردی موتور بر حسب نرخ پاشش آب. (الف) مصرف سوخت ویژه ترمزی، (ب) گشتاور موثر

شکل ۱۶ نمودار نرخ پاشش آب مورد نیاز برای رسیدن به آستانه کوبش نشان می‌دهد. برای یک سوخت با عدد اکتان خاص، افزایش ارتفاع و در نتیجه کاهش دما و فشار هوای مورد تغذیه موتور که منجر به کاهش طبیعی تمایل به بروز پدیده کوبش می‌شود، کاهش درصد پاشش آب مورد نیاز جهت رساندن شرایط موتور به آستانه کوبش را در پی دارد. در اینجا نیز مانند قبل، از یک ارتفاع خاص به بعد تمایل به وقوع پدیده کوبش از بین می‌رود که این ارتفاع کاملاً تابع عدد اکتان سوخت است و با افزایش عدد اکتان سوخت کاهش می‌یابد.

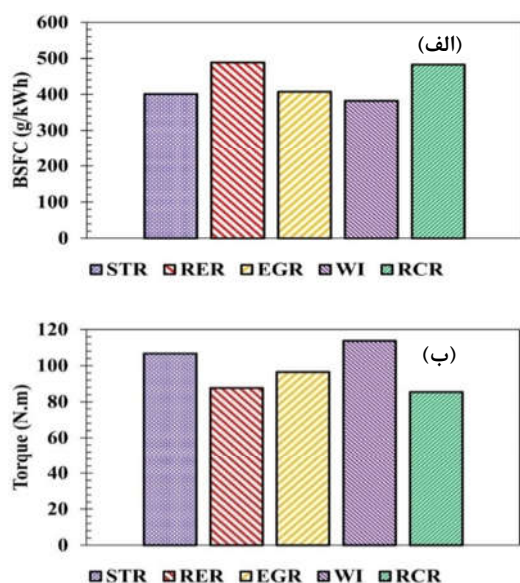


شکل ۱۶- تغییرات نرخ پاشش آب مورد نیاز بر حسب ارتفاع و در حالت استفاده از سوخت با اعداد اکتان مختلف

### ۳-۵- تاثیر کاهش نسبت تراکم

در موتورهای جرقه‌ای، نسبت تراکم بالاتر معمولاً منجر به بازدهی بالاتر می‌شود، چرا که بیشتر از انرژی گرمایی موجود در سوخت استفاده شود. اما نسبت تراکم بالاتر موجب افزایش فشار و دمای پیش از احتراق می‌شود که می‌تواند به وقوع پدیده کوبش منجر گردد. کاهش نسبت تراکم باعث کاهش فشار و دمای احتراق می‌شود که می‌تواند به طور مستقیم به کاهش احتمال کوبش در موتورهای جرقه‌ای کمک می‌کند و این موضوع به‌ویژه در موتورهایی که از سوخت‌های با کیفیت پایین استفاده می‌کنند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. شکل ۱۷ نمودار دمای داخلی سیلندر را برای دو نسبت تراکم اولیه و نسبت تراکم کاهش یافته با نرخ ۱۲/۰۴ درصد برای سوخت RON91 نشان می‌دهد. کاهش نسبت تراکم یکی از روش‌های مؤثر برای کاهش وقوع کوبش در موتورهای جرقه‌ای است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، کاهش ۱۲/۰۴ درصد در نسبت تراکم منجر به کاهش حداکثر فشار

سوخت ویژه ترمزی نسبت به روش تاخیر در زمان جرقه زنی شده است. روش تزریق آب با کمترین تاثیر منفی بر عملکرد موتور، نسبت به سایر روش‌ها برتری دارد.



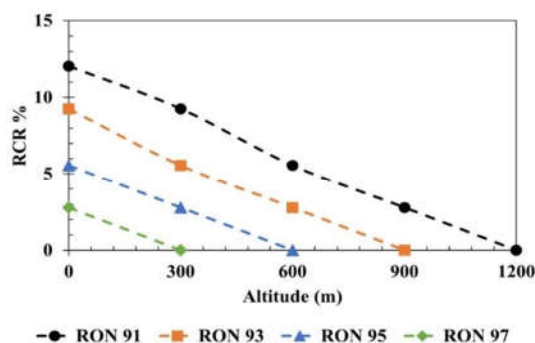
شکل ۲۰- تأثیر به کارگیری روش‌های مختلف مهار کوبش بر (الف) مصرف سوخت ویژه ترمزی، (ب) گشتاور موثر

#### ۴- نتیجه‌گیری

موتورهای ROTAX برای استفاده از سوخت‌های با عدد اکتان بالا طراحی شده است. با این حال، یافته‌های مطالعه حاضر نشان می‌دهد که امکان استفاده از بنزین‌های با اکتان پایین‌تر در شرایط خاص و با رعایت دستورالعمل‌های دقیق جهت جلوگیری از وقوع پدیده کوبش وجود دارد. مطالعه حاضر نشان می‌دهد که برای جلوگیری از کوبش، روش‌های متعددی وجود دارد که تأثیرات مثبت و منفی آن‌ها بر عملکرد موتور مورد مطالعه قرار گرفت.

بررسی‌ها نشان داد که با افزایش ارتفاع و کاهش فشار و دمای محیط، تمایل به کوبش کاهش می‌یابد و لذا موتورهای هواپیما یا وسایل نقلیه‌ای که در ارتفاعات بالا فعالیت می‌کنند، می‌توانند از مزایای شرایط محیطی، برای استفاده از سوخت‌های با اکتان پایین‌تر بهره‌مند شوند. همچنین عدد اکتان سوخت به عنوان یک پارامتر بسیار مهم در جلوگیری از پدیده کوبش همواره مطرح بوده است. افزایش عدد اکتان سوخت منجر به کاهش احتمال وقوع کوبش و بهبود پایداری احتراق می‌شود. با این حال باید به این نکته توجه داشت که در صورت عدم طراحی موتور برای استفاده از سوخت‌های با عدد اکتان بسیار بالا، کاهش جزئی در کارایی مشاهده می‌شود. در حالت استفاده از سوخت-های اکتان پایین روش‌های مهار کوبش مورد توجه قرار می‌گیرند که اساس کار تمامی این روش‌ها کاهش دما و فشار داخلی سیلندر است و هر کدام از این تکنیک‌ها به نحوی به این کاهش کمک می‌کنند. به طور کلی این تکنیک‌ها شامل کاهش نسبت تراکم، استفاده از احتراق رقیق سوز، تأخیر در زمان جرقه‌زنی و تزریق از گازهای خنثی است.

از شکل ۱۹ نتیجه می‌شود با افزایش ارتفاع، دما و فشار کاهش می‌یابند که کاهش فشار منجر به کاهش چگالی هوا در نتیجه کاهش حجمی اکسیژن موجود در هر سیلندر می‌شود. در ارتفاعات بالاتر، موتور کمتر در معرض خطر کوبش قرار دارد و نیاز به کاهش نسبت تراکم کمتر می‌شود. سوخت‌های با عدد اکتان بالاتر، نیاز کمتری به کاهش نسبت تراکم دارند و این موضوع با مفهوم پایداری سوخت در شرایط احتراق و خواص شیمیایی سوخت‌ها مرتبط است. سوخت‌هایی با عدد اکتان بالاتر، به دلیل زنجیره‌های مولکولی پیچیده‌تر و ساختارهای شیمیایی، پایداری بیشتری در برابر دما و فشار بالای سیلندر دارند و از بروز کوبش جلوگیری می‌کنند. برای مثال، در شرایط سطح زمین، سوخت RON 91 به کاهش بیشتری در نسبت تراکم نیاز دارد (حدود ۱۲٪) در حالی که سوخت RON 97 فقط به حدود ۲٪ کاهش نیاز دارد. این اختلاف به دلیل مقاومت بالاتر سوخت RON 97 در برابر کوبش است.



شکل ۱۹- تغییرات درصد کاهش موردنیاز در نسبت تراکم موتور برحسب ارتفاع و در حالت استفاده از سوخت با اعداد اکتان مختلف

#### ۳-۶- مقایسه روش‌های جلوگیری از وقوع پدیده کوبش

کاهش نسبت تراکم، استفاده از احتراق با نسبت هم‌ارزی کمتر (احتراق رقیق)، تأخیر در زمان جرقه‌زنی، و بازچرخانی گازهای خروجی و تزریق آب از راهکارهای جلوگیری از وقوع کوبش می‌باشند. شکل ۲۰ مقایسه‌ای بین تاثیر هر یک از این روش‌ها در شرایط سطح زمین و سوخت RON91 به عنوان بحرانی‌ترین حالت مطالعه نشان می‌دهد. کاهش نسبت تراکم و نسبت هم‌ارزی مخلوط اگرچه منجر به کاهش احتمال وقوع کوبش در موتور می‌شوند، با عملکرد نهایی موتور نتایج مطلوبی را در پی نخواهند داشت؛ این دو روش به ترتیب منجر به کاهشی معادل با ۱۷/۹۶٪ و ۲۰٪ در گشتاور موثر و همچنین افزایشی به ترتیب معادل با ۲۱/۸۴٪ و ۲۰/۴۶٪ در مصرف سوخت ویژه ترمزی، نسبت به روش تأخیر در زمان جرقه‌زنی شده‌اند. لذا، این دو راهبرد برای مهار کوبش کمتر مورد توجه قرار می‌گیرند. در مقابل روش بازخورانی گازهای خروجی و تزریق آب و همچنین تغییر زمانبندی جرقه اثرات نامطلوب کمتری را، بر موتور تحمیل می‌کنند. به طوری که روش بازخورانی گازهای خروجی، منجر به کاهش ۹/۵۷٪ در گشتاور موثر و افزایش ۱/۷۶ درصدی در مصرف سوخت ویژه ترمزی نسبت به روش تاخیر در زمان جرقه زنی شده است. در مقابل روش تزریق آب، منجر به افزایش ۶/۶۷٪ در گشتاور خروجی و کاهش ۴/۵٪ در مصرف

[14] Woschni GA. Universally Applicable Equation for the Instantaneous Heat Transfer Coefficient in the Internal Combustion Engine. SAE Technical Paper, SAE International: Warrendale, PA, USA, 1967.

[15] Douaud AM, Eyzat P. Four-Octane-Number Method for Predicting the Anti-Knock Behavior of Fuels and Engines. SAE 780080, 1978.

[16] Akihama K, Taki M, Takasu S, Ueda T, et al. Fuel Octane and Composition Effects on Efficiency and Emissions in a High Compression Ratio SIDI Engine. SAE Technical Paper, 2004-01-1950, 2004.

[17] Mirzapour M, Bayati M. Numerical Investigation of the effect of number of fins on the rate of heat channel transfer in the presence of non-Newtonian fluid. Journal of Mechanical engineering University of Tabriz. 2020;50(3):239-48.

[18] Elmqvist C, Kalghatgi G. Optimizing Engine Concepts by Using a Simple Model for Knock Prediction. SAE paper 2003-01-3123, 2003.

[19] Livengood JC, Wu PC. Correlation of Auto Ignition Phenomena in Internal Combustion Engines and Rapid Compression Machines. Fifth Symposium on Combustion, 1955;347-56.

[20] Mansouri H, Ommi F, Sharifi SA. Parametric study on the performance of a gasoline turbocharged aircraft engine at high altitudes using a one-dimensional model. Aerospace Mechanics Journal. 2020;16.

[21] Grabowski L, Siadkowska K, Skiba K. Simulation Research of Aircraft Piston Engine Rotax 912. MATEC Web Conference. 2019; 252. doi: 10.1051/mateconf/201925205007.

[22] Olufisayo OE, Inambao FL, Stopforth R. GT-Power for Internal Combustion Engine Simulation: A Review. Tuijin Jishu/Journal of Propulsion Technology. 2025;46(1).

[23] Otkur M. Altitude Performance and Fuel Consumption Modelling of Aircraft Piston Engine Rotax 912 S/ULS. Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology. 2021;23(1):18-25.

این روش‌ها، در مقابل اثرات مثبت در جلوگیری از بروز پدیده کوبش و کاهش دما و فشار داخلی سیلندر، منجر به کاهش توان عملیاتی و مصرف سوخت موتور خواهد شد و بسته به نوع تکنیک مورد استفاده، این تأثیرات منفی متفاوت خواهد بود. نتایج نشان داد که روش‌های بر پایه‌ی تزریق گاز خنثی و ایجاد تأخیر در زمان جرقه‌زنی به دلیل پتانسیل کمتر در کاهش گشتاور موثر و افزایش مصرف سوخت به عنوان روش‌های کارا و کاربردی خواهند بود.

## ۵- مراجع

[1] Stickers DE. Octane and the environment. The Science of The Total Environment. 2002;299:37-56. doi:10.1016/S0048-9697(02)00271-1.

[2] Rashid AK, Mansor A, Radzi M, Ghopa WAW, Harun Z, Mahmood WMFW. An experimental study of the performance and emissions of spark ignition gasoline engine. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. 2016;13(3).

[3] Hassan Abdellatif Osman. Experimental study the effect of octane number on performance of the spark ignition engine. International Journal of Engineering Science. 2016;3(6):53-61.

[4] Mohd Riduan AF, Tamalidin N, Mat Yamin AK. Engine performance testing using variable RON95 fuel brands available in Malaysia. MATEC Web of Conference. 2017;90.

[5] Haghgooe M. The Effect of Fuel Octane Number and Inlet Air Temperature on Knock Characteristics of a Single Cylinder Engine. SAE Paper 902134, 1990.

[6] Caris DF, Mitchell BJ, McDuffie AD, Wyczalek FA. Mechanical Octanes for Higher Efficiency. SAE Transaction. 1956;64(7):76-100.

[7] Singh E, Dibble R. Effectiveness of Fuel Enrichment on Knock Suppression in a Gasoline Spark-Ignited Engine. International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting. 2018;1-14.

[8] Morikawa K, Yoshimatsu A, Moriyoshi Y, Kuboyama T, Matsuura K. A Study of High Compression Ratio SI Engine Equipped with a Variable Piston Crank Mechanism for Knocking Mitigation. SAE Technical Paper, 2011-01-1874, 2011.

[9] Alger T, Gukelberger R, Gingrich J, Mangold B. The Impact of Cooled EGR on Peak Cylinder Pressure in a Turbocharged. Spark Ignited Engine. 2015;4-12. doi:10.4271/2015-01-0744.

[10] Zhang Q, Huang Z, Wang L, Lin G, Pan J. Experimental Study of Port Water Injection on GDI Engine. Fuel Economics and Emissions. 2024. doi:10.1021/acsomega.3c06859.

[11] Salek F, et al. The Effects of Port Water Injection on Spark Ignition Engine Performance and Emissions Fueled by Pure Gasoline, E5 and E10. processes MDPI Journal. 2020;8(1214):1-18.

[12] Lounici MS, Loubar K, Balistrout M, Tazerout M. Investigation on heat transfer evaluation for a more efficient two-zone combustion model in the case of natural gas SI engines. Applied Thermal Engineering. 2011;31:319-28.

[13] Jin W, Gan H, Cong Y, Li G. Performance Optimization and Knock Investigation of Marine Two-Stroke Pre-Mixed Dual-Fuel Engine Based on RSM and MOPSO. Journal of Marine Science and Engineering. 2022;10.