

کاهش مصرف انرژی در موتورهای احتراق جرقه‌ای رفت و برگشتی با ارائه و تحلیل یک مکانیزم لنگ و لغزنده متقارن

رضا بول تنگری*

کارشناسی ارشد

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول

pooltangari@iaud.ac.ir

مصطفی صفدری شادلو^۲

کارشناسی ارشد

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

safdari@mech.sharif.edu

چکیده

در این مقاله نوعی مکانیزم لنگ و لغزنده ارائه و بررسی گردیده و مقایسه‌ای میان عملکرد آن نسبت به نوع مرسوم برای یک موتور چهار زمانه احتراق جرقه‌ای انجام شده است. در این مقایسه از مدلسازی فرآیندهای ترمودینامیکی و نیروهای لرزشی و درونی استفاده شده و در نهایت، مزایا و معایب مکانیزم پیشنهادی عنوان گردیده است. پارامترهای مورد استفاده در این قیاس شامل، اصطکاک بدنه پیستون، نوع روانکار، تعداد رینگها، نوع، مقدار و بازه زمانی احتراق سوخت، آوانس جرقه، جرم قطعات، نسبت تراکم و سرعت زاویه‌ای لنگ، خصوصیات ترمودینامیکی هوای ورودی و دمای بدنه سیلندر می‌باشد. مکانیزم پیشنهادی از دیدگاههای ترمودینامیکی، اصطکاک داخلی، ابعادی و همچنین آلودگی صوتی و شیمیایی محیط زیست بر مکانیزم مرسوم چیرگی داشته و ضمن بهبود گشتاور و توان خروجی، باعث کاهش مقادیر قابل توجهی در مصرف سوخت خواهد بود. در عین حال از نظر پیچیدگی ها و تعدد قطعات و فرآیندهای ساخت و مونتاژ دارای معایبی می‌باشد.

کلمات کلیدی: لنگ و لغزنده، ترمودینامیک، راندمان اصطکاکی، اصطکاک داخلی، موتورهای احتراق جرقه‌ای.

۱- مقدمه

اهمیت مساله انرژی و بحران آن در سراسر جهان در سالهای اخیر بر هیچکس پوشیده نیست. بر همین اساس، دانشمندان در سراسر جهان برای ارتقاء وسایل مبدل انرژی، بی وقفه تلاش می‌کنند. در این میان موتورهای احتراق داخلی و مخصوصا موتورهای احتراق جرقه‌ای یا *SI* به علت وسعت کاربرد آنها، در کانون توجهات بوده و تلاشهای زیادی برای اصلاح و بهبود کارایی آنها در دهه اخیر صورت پذیرفته است. لزوم اصلاح شیوه کار این وسایل تا آنجاست که حتی برخی راه‌حلهایی که در گذشته توجیه اقتصادی نداشته‌اند، اکنون بازنگری شده و چه بسا مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مثلا گسترش مطالعات، برای جایگزینی سوخته‌های جدید و گران قیمت مانند هیدروژن، بجای سوخته‌های فسیلی، (۱)، و کاربرد انرژی‌های پاشش مستقیم و تحقیقات گسترده برای ارتقاء عملکرد آنها (۲) تا (۴) از مهمترین دلایل این مساله هستند. به همین ترتیب گسترش تحقیقات برای استفاده از مواد گرانتیمت هوشمند مانند مواد تابعی با *FGM* و کامپوزیتی که بحث روز محافل علمی و مکانیکی می‌باشند (۵) و (۶)، همگی نشان از ارزش مساله دارند.

به همین ترتیب برای کاهش ارتعاشات و اصطکاک داخلی این وسایل نیز، پژوهشگران به بررسی مکانیزمهای بسیار پیچیده رو آورده‌اند و مکانیزمهای بسیار

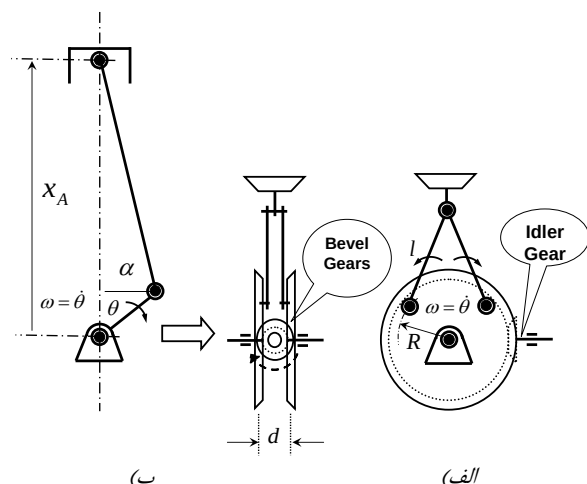
متنوعی در این راستا ارائه می‌شود (۷) تا (۱۲). در همین زمینه اقدامات پژوهشگران برای کاهش هرچه بیشتر آلودگی صوتی حاصل از انحراف پیستون در سیلندر، که به واسطه عدم تقارن مکانیزم لنگ و لغزنده پدیدار می‌شود، جالب توجه بوده و در این راستا می‌توان به کارهای (۱۳) تا (۱۷) اشاره کرد.

پیرامون مدلسازی فرایند های احتراقی واقعی در موتورهای *SI* نیز کارهای متعددی انجام شده است (۱۸) تا (۲۳). با توجه به مساله انتقال حرارت و اصطکاک در این موتورها، چه و همکاران (۱۸)، اقدام به شبیه سازی سیکل هوای استاندارد برای چرخه میلر نمودند. همچنین ابو ندا و همکاران (۱۹) به مدل سازی فرایند های ترمودینامیکی در موتورهای *SI*، منطبق بر نتایج آزمایشگاهی و مدلهای احتراقی مانند مدل وشنی پرداختند. به همین ترتیب به جهت بهبود تقریبهایی که در مدلسازیهای فوق پیرامون شرط مرزی حرارتی در درون محفظه سیلندر انجام می‌گیرد، اصفهانیان و همکاران (۲۰) به تحلیل حرارتی انواع شرط مرزی واقع شده بر روی پیستونهای موتورهای *SI* اهتمام ورزیدند. همچنین جهت کاهش انرژی حرارتی تلف شده در موتورهای *SI* و بهبود راندمان اندیکه در این موتورها می‌توان به کارهای یامین و همکاران (۲۱) و کاتلر و همکاران (۲۲) در سالهای اخیر توجه کرد. در میان تحقیقات انجام گرفته پیرامون راندمان اصطکاکی موتورهای *SI*، باز هم ابو ندا و همکاران (۲۳) با احتساب اثرات اصطکاکی بدنه پیستون و رینگهای فشاری آن در مدلسازی ترمودینامیکی فرایند های موتور، توانستند اثرات اصطکاکی روان کارهای مختلف بررسی نمایند.

از جمله موضوعاتی که در حوزه موتورهای احتراق داخلی ارزشمند بوده و برطرف کردن آن می‌تواند منجر به افزایش قابل توجه راندمان اصطکاکی موتور در سرعتهای زاویه‌ای بالای لنگ گردد، مساله اصطکاک ناشی از فشار جانبی پیستون و رینگهای فشاری و صدمات حاصل از آنها بر موتور می‌باشد. از جمله کارها و تلاشهای انجام شده در این زمینه در سالهای اخیر می‌توان به مراجع (۲۴) تا (۲۷) توجه نمود.

یکی دیگر از مسائل مطرح در عالم موتورهای *SI*، مسئله ضربه و خود سوزی است که مانع اصلی افزایش نسبت تراکم و راندمان اندیکه در این موتورها می‌باشد و از سالیان دور تا کنون موضوع تحقیقات دانشمندان قرار داشته است. این مساله در دهه ۴۰ و ۵۰ میلادی با تحقیقات وسیع *NACA* و عکسبرداریهای فوق سریع این مجموعه از ضربه، اوج گرفته (۲۸) و (۲۹) و تا کنون نیز ادامه دارد (کارهای (۳۰) تا (۳۳)).

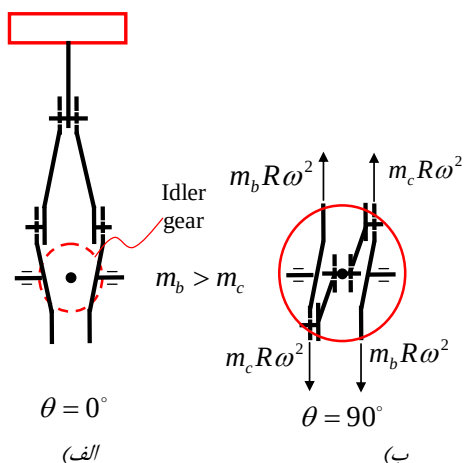
مکانیزم‌های کاربردی ارائه شده برای کاهش اثرات اصطکاکی فشار جانبی در موتورهای دیزلی سنگین که بیش از ۱۰۰۰ کیلو وات بر هر سیلندر، توان تولید می‌نمایند، به دلیل ساختار خود، علاوه بر اینکه باعث بزرگتر شدن ابعاد موتور می‌شوند، با توجه به آثار اینرسی اتصالات سنگین متصل به پیستون و شاتون،



شکل (۱) نمایه کلی مکانیزم‌ها- (الف) مکانیزم پیشنهادی (ب) مکانیزم مرسوم

برای درک بهتر عملکرد ترکیب جدید، نمایه‌ای از مکانیزم توصیف شده در شکل (۳) دیده می‌شود. در ردیف اول، نمایه‌های مختلف مکانیزم به نمایش در آمده و در آن مخروطهای گام ترسیم شده مربوط به چرخنده‌های مخروطی و هرز گرد هستند. با توجه به کوتاه بودن طول شاتونها و میله رابط بین پیستون و شاتونها و در نتیجه ایمن تر بودن این اعضا از کمانش (نسبت به ترکیب مرسوم)، ضخامت عرضی کوچکی برای آنها در نظر گرفته شده است. در شکل (۴)، برای مشاهده نحوه عملکرد درونی مکانیزم و چگونگی حرکت متقارن لنگها، دنده مخروطی چپ برداشته شده است.

در شکل‌های (۴-ب) و (۴-پ) که در حوالی نقطه مرگ پایین رخ می‌دهند، با وجود زاویه انحراف ۴۵ درجه لنگ، جابجایی پیستون بسیار کم بوده و برعکس در شکل‌های (۴-الف) و (۴-ب) که در حوالی نقطه مرگ بالا واقع می‌گردد، به ازای ۴۵ درجه انحراف لنگ، می‌توان شاهد جابجایی زیاد پیستون بود. این مسئله در مکانیزم مرسوم صادق نیست و لذا یکی از نقاط قوت ترمودینامیکی ترکیب پیشنهادی در اینجا شکل می‌گیرد. از طرفی این تغییرات فاحش، ضرورت تحلیل نیروهای درونی مکانیزم پیشنهادی را بارزتر می‌نماید.



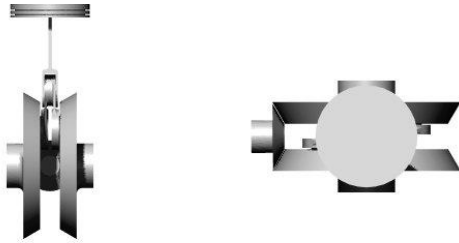
شکل (۲) نحوه توازن کامل گشتاورها در مکانیزم پیشنهادی در نمایه‌های (الف) روبرو (ب) بالا

نمی‌توانند برای سرعت‌های زاویه‌ای بالای لنگ به کار روند و همچنین باز هم اثر بار جانبی در آنها کاملاً مهار نشده و در نسبت‌های طول شاتون به لنگ کوچکتر، مشکل ساز خواهد شد [۳۱]، [۳۴] و [۳۵]. ایده استفاده از دو شاتون برای هر پیستون، به جهت خنثی سازی بار جانبی و بالانس بهتر، برای اولین بار توسط لنچستر در سال ۱۸۹۷ ارائه گردید [۳۷]. اما این طرح بنا به وزن بالای اعضای رفت و برگشتی و در نتیجه نیروهای درونی و دینامیکی زیاد صرفاً محدود به کاربرد در موتورهای احتراق تراکمی گردیده و نتوانست توجیه اقتصادی برای استفاده عمومی پیدا نماید.

در مقاله حاضر به ارائه و شبیه سازی فرآیندها و عملکرد نوعی مکانیزم لنگ و لغزنده در موتورهای SI پرداخته شده که علیرغم پیچیدگی نسبی آن، دارای مزایای چندگانه‌ای نسبت به مکانیزم لنگ و لغزنده مرسوم می‌باشد. بر این اساس مکانیزم پیشنهادی و نحوه عملکرد آن معرفی گردیده و سپس به بررسی مزایای آن، از دیدگاه شبیه سازی، پرداخته می‌شود. در شبیه سازی صورت گرفته ابتدا اثرات مثبت ترمودینامیکی کاهش نسبت طول شاتون به لنگ در یک موتور احتراق جرقه‌ای معین بحث شده و سپس ویژگیهای ترمودینامیکی و اصطکاکی ترکیب لنگ و لغزنده پیشنهادی و مرسوم مقایسه شده است. همچنین رفتار نیروهای دینامیکی و فشار ناشی از احتراق، وارده بر شاتونها در دو مکانیزم تحلیل گردیده و چگونگی توازن نیروهای لرزاننده موتور ارائه شده است. در نهایت به نتیجه گیری کلی این مقاله پرداخته شده و مزایای مکانیزم پیشنهادی از جهات مختلف مورد بحث قرار گرفته است.

۲- معرفی مکانیزم لنگ و لغزنده پیشنهادی

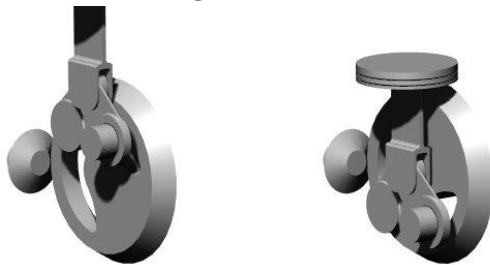
نمایی از مکانیزم لنگ و لغزنده پیشنهادی در مقایسه با نوع متداول، در شکل (۱-الف) مشاهده می‌گردد. در مکانیزم جدید دو عدد شاتون بکار رفته و در این میان بدنه دنده‌ها، خود همزمان به عنوان لنگ نیز استفاده شده‌اند. با توجه به شکل حرکت، بصورت متقارن از هر دو شاتون و از طریق ترکیب دنده‌های مخروطی نشان داده شده، توان انتقال می‌یابد. هر دو شاتون از طریق یک گزینین و یک رابط به پیستون مرتبط شده و از طرف دیگر هر کدام بصورت جداگانه به بدنه چرخنده‌های مخروطی متصل می‌گردند. در این شرایط دو دنده مخروطی متصل به شاتونها بصورت قرینه روبروی هم بوده و خلاف جهت یکدیگر دوران می‌کنند. یک هرزگرد حرکت دورانی قرینه دو چرخنده مخروطی را تضمین می‌کند. این هرز گرد در شرایط توان گیری از یکی از دو دنده مخروطی می‌تواند انتقال دهنده قدرت به طرف مقابل مکانیزم باشد. همچنین امکان حذف کامل تماس پیستون با بدنه سیلندر در خلال بازه حرکت (بجز تماس رینگها) با توجه به تقارن ترکیب در یک نما، وجود دارد. به این ترتیب محدودیت نسبت طول شاتون به لنگ یا L/R (که محدود به فشار جانبی پیستون بوده است) برداشته خواهد شد و فقط بنا به نتایج معادلات قید ترکیب، جهت جلوگیری از قفل شدن مکانیزم در خلال حرکت باید L/R را بزرگتر از واحد برگزید. همچنین مزیت عمده دیگر این ترکیب، جلوگیری از انحراف پیستون در درون سیلندر در خلال دوران لنگ امکانپذیر است. از آنجایی که برای بالانس اجرام رفت و برگشتی، باید جرمهای خارج از مرکز به هر دو چرخنده با دوران معکوس متصل گردد، در نمای بالای مکانیزم، کوپل پیچشی نابالانس پدید خواهد آمد. با کمک خارج از صفحه کردن اجرام توازن و متناسب با مقادیر آنها، می‌توان این گشتاورها را کاملاً بالانس نمود (شکل (۲))



(پ)

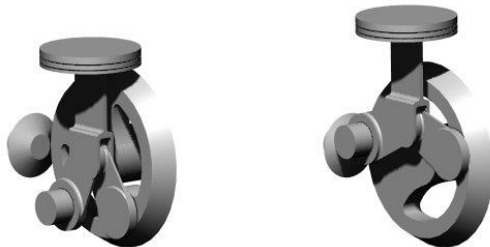
(ت)

شکل ۳) تصاویر کلی مکانیزم و چگونگی عملکرد آن از نماهای الف) ایزو (ب) روبرو (پ) جانبی (ت) بالا



(الف)

(ب)



(پ)

(ت)

شکل ۴) چگونگی عملکرد درونی مکانیزم و چگونگی حرکت متقارن لنگها، دنده مخروطی چپ برداشته شده است. الف) پیستون در حوالی نقطه مرگ بالا و جهت حرکت به سمت پایین (ب) پیستون در حوالی نقطه مرگ پایین و جهت حرکت به سمت پایین (پ) پیستون در حوالی نقطه مرگ پایین و جهت حرکت به سمت بالا (ت) پیستون در حوالی نقطه مرگ بالا و جهت حرکت به سمت بالا

در شکل (۶) کاهش مختصری در دمای ماکسیمم گازها در مکانیزم جدید مشاهده می‌شود، و به این ترتیب با توجه به مراجع [۲۹] و [۳۳]، امکان افزایش بیش از یک واحد دیگر به نسبت تراکم مثال فوق در مکانیزم پیشنهادی قابل پیشبینی بوده و در این صورت، راندمان این مکانیزم نسبت به مکانیزم مرسوم، بصورت چشمگیری افزایش خواهد یافت. یکی دیگر از تغییرات قابل بیش بینی در فرایند های ترمودینامیکی مکانیزم پیشنهادی در شکل (۶)، کاهش قابل ملاحظه دمای گازهای خروجی در مقایسه با مکانیزم مرسوم است و می‌تواند دلیلی بر کاهش آلودگی تولید شده در مکانیزم پیشنهادی نسبت به مکانیزم مرسوم به سبب انجام کاملتر واکنشهای شیمیایی حاصله از احتراق باشد.

۳- بررسی اهمیت پارامتر "نسبت طول شاتون به طول لنگ" L/R در فرآیندهای ترمودینامیکی

در این قسمت به بررسی پارامتر L/R و تاثیر این پارامتر در بهبود فرایندهای ترمودینامیکی موتور پرداخته خواهد شد. برای بررسی مطلب فوق نیاز به پاره‌ای تحلیل‌های سینماتیکی است. برای این مقصود، با توجه به نامگذاری شکل (۱)- الف)، با استفاده از معادلات قید، می‌توان نوشت:

$$x_A = l \sin \alpha + R \cos \theta \quad (۱)$$

$$\dot{x}_A = l \dot{\alpha} \cos \alpha - R \dot{\theta} \sin \theta \quad (۲)$$

$$x = (l + R) - (l \sin \alpha + R \cos \theta) \quad (۳)$$

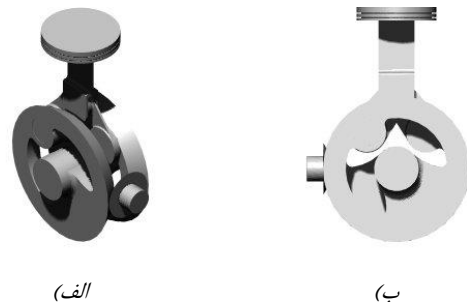
از طرفی داریم

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{R}{L} \sin \theta \right) \quad (۴)$$

$$\Rightarrow \dot{\alpha} = \frac{-R \dot{\theta} \cos \theta}{(l^2 - R^2 \sin^2 \theta)} \quad (۵)$$

با فرض اینکه میل لنگ با سرعت زاویه‌ای ثابت $\dot{\theta} = 1500 \text{ rpm}$ دوران نماید، به ازای $R = 0.0418$ و $l = 3.4R$ (در ترکیب معمول) و $l = 1.1R$ (در مکانیزم پیشنهادی) نمودار تغییرات سرعت لغزنده بر حسب درجه لنگ بصورت شکل (۵) آمده است. همچنین قرار داد می‌شود که در تمامی نمودارها، علامت N به معنای مکانیزم پیشنهادی و علامت U به معنای مکانیزم مرسوم است.

بدلیل اینکه معمولاً در مرحله قدرت، بیشتر بازه احتراق و در نتیجه تشکیل گرادیان شدید حرارتی در فاصله $25^\circ < \theta < 70^\circ$ اتفاق می‌افتد (شکل (۶)) و در نتیجه افزایش سرعت خطی پیستون در این بازه، می‌تواند مقدار انرژی تلف شده بشکل حرارت از دیواره‌ها را کاهش دهد و فرایند انبساط گازهای سوخته را بیشتر به فرایندهای آیزنتروپیک نزدیک نماید. می‌توان نتیجه گرفت که در $l = 1.1R$ در موتور پیشنهادی، کار اندیکه بدست آمده بیشتر از نظیر آن در ترکیب مرسوم با نسبت $l = 3.4R$ می‌باشد. نتایج حاصله از محاسبات، نشان می‌دهد که این فرونی، بسته به سرعت زاویه‌ای لنگ، بین ۸ تا ۱۴ درصد، است.



(الف)

(ب)

برای شبیه سازی فرایندهای ترمودینامیکی مکانیزم ارائه شده و مقایسه آن با عملکرد ترکیب متداول با کمک مراجع [۱۹]، [۲۳] و [۳۶] از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$\delta Q - \delta W = dU \quad (6)$$

که بر اساس مفاهیم انرژی و کار در یک موتور احتراقی می توان قانون اول را بشکل زیر آورد:

$$(\delta Q_{in} - \delta Q_{loss}) - (PdV - \delta W_{irrev}) = dU \quad (7)$$

در ادامه تک تک عبارتهای فوق در فرایندهای یک موتور احتراقی تشریح می شود. تغییرات انرژی درونی یک گاز ایده آل با حرارت مخصوص ثابت بصورت زیر است

$$dU = mC_v dT_g \quad (8)$$

با دیفرانسیل گرفتن از معادله حالت یک گاز ایده آل داریم

$$PdV + VdP = mR_g dT_g \quad (9)$$

که از ترکیب معادلات (۸) و (۹) داریم

$$dU = \frac{C_v}{R_g} (PdV + VdP) \quad (10)$$

برای تعیین مشخصات جزء کار بازگشت ناپذیر، با در نظر گرفتن اثرات اصطکاک بدنه و رینگها می توان نوشت:

$$\delta W_{irrev} = \left(\mu \frac{du}{dy} \right)_{skirt} L_{skirt} \pi D dx + \left(\mu \frac{du}{dy} \right)_{ring} L_{ring} \pi D dx \quad (11)$$

که با توجه به معادله (۲) و $U_p(\theta) = \dot{x}_A(\theta)$ می توان معادله (۱۱) را به فرم زیر درآورد

$$\delta W_{irrev} = \mu \pi D dx U_p(\theta) \left(\frac{L_{skirt}}{C} + \frac{L_{ring}}{\varepsilon} \right) \quad (12)$$

که در معادله (۱۲)، ε ضخامت فیلم روغن میان رینگ فشار و بدنه سیلندر بوده و C ضخامت فیلم روغن میان پیستون و بدنه سیلندر می باشد و از نتایج تجربی تعیین می گردند [۲۳].

همچنین در معادله (۷)، برای محاسبه δQ_{in} ، کل مقدار حرارت آزاد شده از جرم سوخت معین m_f عبارت است از

$$Q_{in} = m_f LHV \quad (13)$$

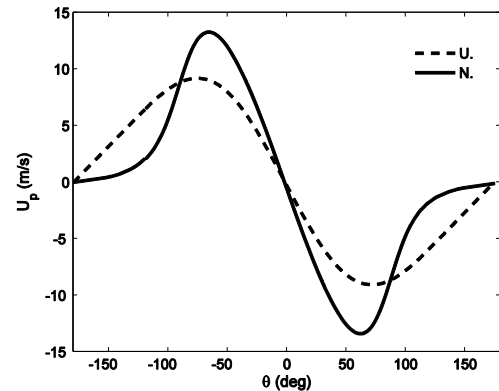
و مقدار انرژی آزاد شده متغیر با زاویه لنگ از معادله زیر بدست می آید

$$\delta Q_{in}(\theta) = Q_{in} dx_b \quad (14)$$

که x_b به عنوان تابع نرخ احتراق سوخت [۲۳] عبارت است از

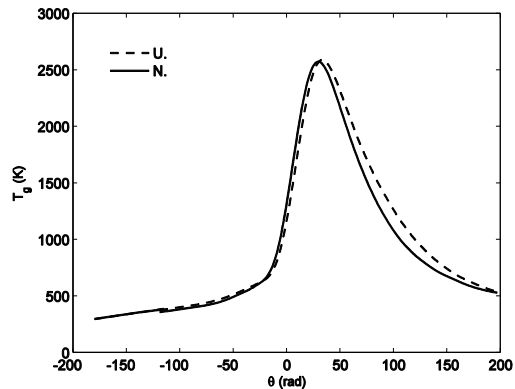
$$x_b = 1 - \exp \left(-5 \left(\frac{\theta - \theta_s}{\Delta \theta} \right)^3 \right) \quad (15)$$

که در معادله فوق $\Delta \theta$ کل بازه انجام احتراق است. در نهایت جزء مقدار حرارت تلف شده با کمک معادلات جابجایی و متناسب با سطوح فرار حرارت بشکل زیر بدست می آید:



شکل ۵) نمودار تغییرات سرعت پیستون در بازه ۳۶۰ درجه چرخش میل لنگ در مکانیزمهای مرسوم و پیشنهادی

یکی از اصلی ترین عللی که مانع از تحقق آرزوی کاهش نسبت طول شاتون به طول لنگ در مکانیزم متداول می باشد، اثر فشار جانبی لغزنده است. با کاهش این نسبت، بسته به سرعت زاویه ای لنگ و فشار سیلندر، این فشار بصورت فزاینده ای افزایش می یابد و در نتیجه اتلافات بزرگی را پدید می آورد. همچنین در مقادیر $l = 3.4R$ که معمولاً در موتورهای SI مرسوم بکار می رود، هرچند، اثر فشار جانبی کمتر می باشد، ولی کماکان حدود ۲۵٪ از کل اصطکاک داخلی موتور را شامل می شود [۳] و [۳۶]. یکی از قابلیت های مکانیزم جدید، حذف کامل این فشار به دلیل تقارن آن در هر نسبت L/R می باشد.



شکل ۶) نمودار تغییرات دمای گازهای درون سیلندر (با استفاده از نتایج بخش ۴) در مکانیزمهای مرسوم و پیشنهادی

یکی از مشکلاتی که در طرح حاضر حائز اهمیت است، نیروی پدید آمده در اعضای تشکیل دهنده مکانیزم است. با کاهش L/R ، بسته به سرعت زاویه ای موتور، نیروی اینرسی پدید آمده در بین اعضا بشکل مضاعف بالا می رود که این امر سرعت زاویه ای ماکسیمم موتور را محدود می نماید. در این میان در مقادیر کوچکتر L/R ، نرخ افزایش راندمان حرارتی اندیکه کاهش می یابد. لذا برای دستیابی به راندمانهای بالاتر، لازم است L/R بهینه ای انتخاب شود.

۴- شبیه سازی فرایندهای ترمودینامیکی مکانیزم در یک موتور SI چهارزمانه:

فشار نظیر درون سیلندر به ازای تغییرات لنگ بوده که در شرایط بدون احتراق رخ می‌دهد. عبارتهای C_1 و C_2 ، مقادیری ثابت هستند که در هنگام تراکم و بدون انجام احتراق برابر $C_1 = 2.28$ و $C_2 = 0$ بوده و در شرایط احتراق و انبساط برابر $C_1 = 2.28$ و $C_2 = 0.0324$ می‌باشند.

۵- تحلیل نیروهای لرزشی

با استفاده از معادله (۲) برای تحلیل شتاب پیستون داریم

$$\ddot{x}_A = l\ddot{\alpha}\cos\alpha - l\dot{\alpha}^2\sin\alpha - R\ddot{\theta}\sin\theta - R\dot{\theta}^2\cos\theta \quad (25)$$

$$\ddot{\alpha} = \frac{(R\dot{\theta}^2\sin\theta - R\ddot{\theta}\cos\theta)(l^2 - R^2\sin^2\theta)}{(l^2 - R^2\sin^2\theta)^{\frac{3}{2}}} - \frac{(R^3\dot{\theta}^2\sin\theta\cos^2\theta)}{(l^2 - R^2\sin^2\theta)^{\frac{3}{2}}} \quad (26)$$

چنانچه جرم پیستون با m_p (که شامل جرم پیستون، رینگها، گژن پین و جرم معادل شاتون است) و جرم معادل لنگ، با m_c (که معادل جرم لنگ و جرم معادل شاتون در سمت لنگ است) نمایش داده شود (شکل (۷))، بر اساس مرجع [۳۷]، نیروی لرزشی وارده بر پایه در یک مکانیزم مرسوم بصورت ذیل بدست می‌آید

$$f_{ub} = (f_p^2 + f_c^2 + 2f_c f_p \cos\theta)^{0.5} \quad (27)$$

که در آن

$$f_p = m_p \ddot{x}_A \quad (28)$$

$$f_c = m_c (R\dot{\theta}^2) \quad (29)$$

و مطابق با مرجع [۳۷]، پس از انجام بالانس، نیروی وارده به پایه برابر با

$$f_b = (f_p^2 + (f_c - f_{am})^2 + 2(f_c - f_{am})f_p \cos\theta)^{0.5} \quad (30)$$

که در آن نیروی حاصل از جرم اضافه شده در طرف مقابل لنگ برابر با

$$f_{am} = m_a (R\dot{\theta}^2) \quad (31)$$

اما در مکانیزم جدید، نیروی منتقل شده به پایه، با توجه به تقارن حرکت مکانیزم، فقط در راستای حرکت پیستون مولفه خواهد داشت و مولفه های عمود بر جهت حرکت پیستون، صرفاً باعث پدید آمدن کوپل ارتعاشی در راستای حرکت پیستون خواهند شد. لذا با کمک معادله (۳۰) نیروها و گشتاورهای ارتعاشی مکانیزم جدید برابر

$$f_{newb} = f_b \cos\gamma \quad (32)$$

$$M_{newb} = f_b d \sin\gamma \quad (33)$$

می‌باشد که در آن γ زاویه بین نیروی لرزشی و امتداد قائم نسبت به شکل (۱)-الف می‌باشد و برابر است با

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{(f_c - f_b)\sin\theta}{(f_c - f_b)\cos\theta - f_p} \right) \quad (34)$$

و d فاصله میان مراکز دو بخش جرم m_a است که به دو لنگ مکانیزم اضافه شده‌اند و در شکل (۱)-الف نشان داده شده است.

$$\delta Q_{loss} = \frac{h_{cg} A_h}{\dot{\theta}} (T_g - T_w) d\theta \quad (16)$$

به این ترتیب با جایگذاری معادلات (۱۰)، (۱۲)، (۱۴) و (۱۶) در معادله (۶) و تنظیم معادله بر حسب dP داریم

$$dP = \frac{k-1}{V} \left(Q_{in} dx_b - \frac{h_{cg} A_h}{\dot{\theta}} (T_g - T_w) d\theta \right) - \frac{k}{V} PdV + \frac{k-1}{V} \left(\mu\pi DU_p \left(\frac{L_{skirt}}{C} + \frac{L_{ring}}{\varepsilon} \right) \right) dx \quad (17)$$

و با برآورد تغییرات معادله (۱۷) نسبت به زاویه لنگ خواهیم داشت

$$\frac{dP}{d\theta} = \frac{k-1}{V} \left(Q_{in} \frac{dx_b}{d\theta} - \frac{h_{cg} A_h}{\dot{\theta}} (T_g - T_w) \right) - \frac{k}{V} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{k-1}{V} \left(\mu\pi DU_p \left(\frac{L_{skirt}}{C} + \frac{L_{ring}}{\varepsilon} \right) \right) \frac{dx}{d\theta} \quad (18)$$

که در معادله فوق حجم سیلندر در زاویه θ عبارت است از

$$V(\theta) = V_c + \frac{\pi D^2}{4} x(\theta) \quad (19)$$

و سطح انتقال حرارت عبارت است از

$$A_h(\theta) \cong \frac{\pi D^2}{2} + \pi D x(\theta) \quad (20)$$

همچنین با توجه به رابطه ظرفیت گرمایی در حجم ثابت و فشار ثابت و ثابت گازها ($k(T_g) = C_p(T_g)/C_v(T_g)$ و $C_v(T_g) = C_p(T_g) - R_g$) می‌توان برای برآورد تغییرات خواص ظرفیت گرمایی هوا در بازه دمایی ۳۰۰ تا ۳۵۰۰ کلوین و به ازای ترکیب ۷۸،۱٪ نیتروژن، ۲۰،۹۵٪ اکسیژن ۰،۹۲٪ آرگون و ۰،۰۳٪ دی اکسید کربن [۱۹] از برازش زیر استفاده کرد

$$C_p = 2.506 \times 10^{-11} T_g^2 + 1.454 \times 10^{-7} T_g^{1.5} - 4.246 \times 10^{-7} T_g + 3.162 \times 10^{-5} T_g^{0.5} + 1.3303 - 1.512 \times 10^4 T_g^{-1.5} + 3.063 \times 10^5 T_g^{-2} - 2.212 \times 10^7 T_g^{-3} \quad (21)$$

به همین ترتیب برای تعیین تغییرات دمایی گازهای درون سیلندر از معادله حالت داریم

$$T_g = \frac{P(\theta)V(\theta)}{mR_g} \quad (22)$$

تغییرات ضریب جابجایی حرارتی بر حسب تغییرات زاویه لنگ، طبق مدل وُشنی [۳۶] و [۲۳] بصورت زیر توصیف می‌شود

$$h_{cg} = 3.26D^{-0.2} P^{0.8} T_g^{-0.55} w^{0.8} \quad (23)$$

که در آن w سرعت احتراق بوده و از معادله زیر، محاسبه می‌گردد

$$w(\theta) = \left(C_1(4R\omega) + C_2 \frac{V_d T_{gr}}{P_r V_r} (P(\theta) - P_m) \right) \quad (24)$$

که در معادله فوق، T_{gr} ، V_r ، P_r به ترتیب فشار و حجم و دمای گازهای مکیده شده در سیلندر بلافاصله پس از بسته شدن سوپاپ هوا، می‌باشند و P_m

-تحلیل نیروهای وارده بر مکانیزم

با توجه به اهمیت بارهای محوری و مساله کمناش در شاتونها، در اینجا فرض ساده کننده شاتون به عنوان عضو دو نیرویی به کار می رود (با صرف نظر از اثرات اینرسی مرکز جرم آن) و همچنین با فرض اینکه اثرات اصطکاک رینگ و بدنه پیستون بصورت F_f در خلاف جهت حرکت پیستون لحاظ شود، از رابطه زیر

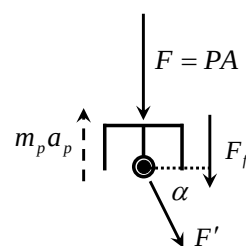
داریم

$$F_f = \frac{\delta W_{irrev}}{dx_A} \quad (۳۵)$$

$$\sum F_y = m_p a_p \quad (۳۶)$$

$$\Rightarrow -F' \sin \alpha - F \pm F_f = m_p a_p \quad (۳۷)$$

$$\Rightarrow F' = -\frac{m_p a_p + F \pm F_f}{\sin \alpha} \times \xi \quad (۳۸)$$



شکل ۷) تقریب نیروهای وارده بر یک پیستون

از آنجا که در مکانیزم جدید نیروی وارده از پیستون بر روی دو شاتون تقسیم می گردد، لذا مقدار ξ در مکانیزم مرسوم، ۱ و در مکانیزم جدید ۰.۵ خواهد بود. به این ترتیب می توان مقدار کل گشتاور منتقل شده به لنگ از سوی شاتون را با رابطه زیر محاسبه نمود

$$T = F'R \cos(\theta - \alpha) \quad (۳۹)$$

در نهایت، نیروهای وارده بر شافت لنگ همان نیروهای بالانس در معادلات (۳۰) و (۳۲) (بترتیب در مکانیزمهای معمول و جدید) خواهند بود و کل نیروها و گشتاورهای وارده بر لنگ علاوه بر نیروهای بالانس و نیروهای وارده از سوی شاتون، اثرات خمشی و پیچشی این نیروها می باشند که بستگی به نوع اتصالات و هندسه آنها دارد.

۶- نتایج حاصل از شبیه سازی

۶-۱- تحلیل پدیده احتراق

با حل معادله (۱۸) در بازه $-180 \leq \theta \leq 180$ و با انتخاب گام تغییرات مناسب (۱ درجه)، می توان تغییرات فشار درون سیلندر را محاسبه کرد. با توجه به اینکه در حل فوق، T_g ، P ، k ، h_{eg} همگی با هم کوپل هستند، لذا در گام اول ابتدا با دانستن فشار گازها در TDC ، برای حدس تغییرات فشار به ازای تغییرات $\Delta\theta$ ، با جای گذاری معادله زیر

$$\frac{dP}{d\theta} = \frac{P(\theta) - P(\theta - \Delta\theta)}{\Delta\theta} \quad (۴۰)$$

در معادله (۱۸) و حل هم زمان آن با معادلات شامل T_g ، P ، k ، h_{eg} و با روش تقریب و تکرار [38]، می توان، بسته به دقت تعیین شده حل، به مقدار $P(\theta)$ دست یافت. اما برای گام های بعد از تقریب دقیقتر زیر، بجای معادله (۴۰) بهره گرفته شده است و توزیع فشار $P(\theta)$ حاصل گردیده

$$\frac{dP}{d\theta} = \frac{3P(\theta) - 4P(\theta - \Delta\theta) + P(\theta - 2\Delta\theta)}{2\Delta\theta} \quad (۴۱)$$

همچنین، پارامتر Q_{in} بعد از جرقه شمع در θ_s وارد می گردد و تا بازه احتراق θ_d ادامه می یابد. به همین ترتیب، راندمان حرارتی اندیکه و راندمان حرارتی مکانیزم با اعمال اثرات اصطکاک به ترتیب، بصورت ذیل حاصل می گردد

$$W_i = \oint PdV \quad (۴۲)$$

$$\eta_i = \frac{W_i}{Q_{in}} \quad (۴۳)$$

$$\eta = \frac{W_i - W_{irrev}}{Q_{in}} \quad (۴۴)$$

و در نهایت روابط حاکم بر گشتاور متوسط ترمزی، مصرف ویژه سوخت ترمزی و توان خروجی (همگی فقط تحت تاثیر اصطکاک لزجی پیستون) برای یک موتور چهار زمانه احتراق جرقه ای عبارتند از

$$T_{ave} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} T d\theta \quad (۴۵)$$

$$BSFC = \frac{m_f}{W_i - W_{irrev}} \quad (۴۶)$$

$$H = T_{ave} \cdot \omega \quad (۴۷)$$

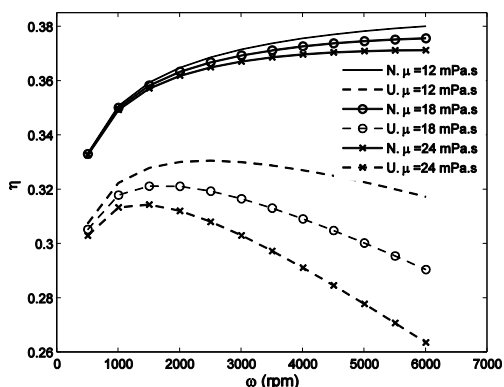
برای بررسی عملکرد مکانیزم اخیر در فرآیندهای ترمودینامیکی، مثال زیر ارائه می شود و اثر تغییر پارامترهای مختلف در خلال آن بررسی خواهد شد. برای بررسی بیشتر ترکیب لنگ و لغزنده ای با ابعاد و ویژگیهای جدول (۱) را در نظر بگیرید.

جدول (۱) ابعاد و ویژگیهای ترکیب لنگ و لغزنده مورد بررسی

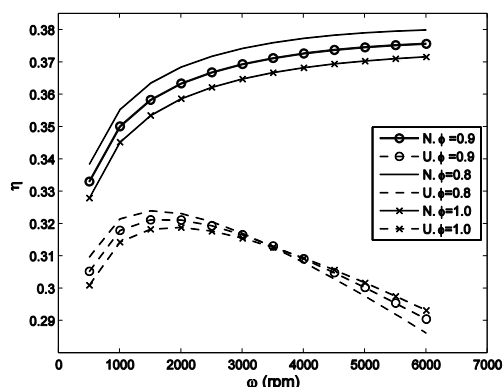
۱- قطر پیستون	$D = 0.071 \text{ m}$
۲- جرم معادل پیستون	$m_p = 0.485 \text{ kg}$
۳- لقی بدنه پیستون با دیواره سیلندر [۲۳]	$C = 23 \mu\text{m}$
۴- کورس	$2R = 0.0836 \text{ m}$
۵- دانسیته روغن	$\mu = 18 \text{ mPa.s}$
۶- طول شاتون مکانیزم مرسوم	$l = 3.4R$
۷- طول شاتون مکانیزم پیشنهادی	$l = 1.1R$
۸- تعداد رینگهای فشاری	2
۹- ضرایب لقی میان رینگ های پیستون و بدنه [۲۳]	$A = 1 \mu\text{m}, B = 6 \mu\text{m}$
۱۰- ضخامت هر رینگ	0.001 m
۱۱- طول بدنه پیستون	0.06 m
۱۲- سوخت	C_8H_{18}
۱۳- نسبت تعادل	$\phi = 0.9$

نتایج محاسبات، نشان‌دهنده برتری ۱۲ تا ۲۰ درصدی راندمان ترمزی در مکانیزم پیشنهادی نسبت به نوع مرسوم (بسته به سرعت زاویه‌ای لنگ) می‌باشد که این برتری به ازای ماکسیمم راندمان ترمزی در مکانیزم مرسوم و در محدوده $0 \leq \omega \leq 6000 \text{ rpm}$ در حدود ۱۵ درصد است.

اثر لزجت روغن بر راندمان اصطکاکی موتور در شکل (۱۰) نشان داده شده که نشان دهنده تاثیر پذیری بسیار زیاد راندمان اصطکاکی ترکیب مرسوم از لزجت روغن در مقایسه با نوع پیشنهادی است. که در شرایط کار سرد موتور و در سرعت های زاویه‌ای متوسط و بالای لنگ، به نسبت، راندمانهای بسیار پایین تری را باید از نوع رایج انتظار داشت، حال آنکه در نوع پیشنهادی این تغییرات بسیار کوچک می‌باشد. تاثیر پارامترهای نسبت سوخت به هوا و نسبت تراکم بر راندمان اصطکاکی مکانیزمهای مرسوم و پیشنهادی، به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) بررسی شده‌اند. از ترسیمه مربوطه می‌توان دریافت که پارامترهای نسبت سوخت به هوا و نسبت تراکم، نقش بسیار تعیین کننده‌ای را در راندمان اصطکاکی مکانیزمهای مرسوم و پیشنهادی بازی می‌کنند. مطابق شکل (۱۱) می‌توان موفقیت دو چندان عملکرد مکانیزم پیشنهادی نسبت به مکانیزم مرسوم را در احتراق رقیق‌تر ($\phi = 0.8$) نسبت به احتراق غنی‌تر ($\phi = 1.0$) دید.

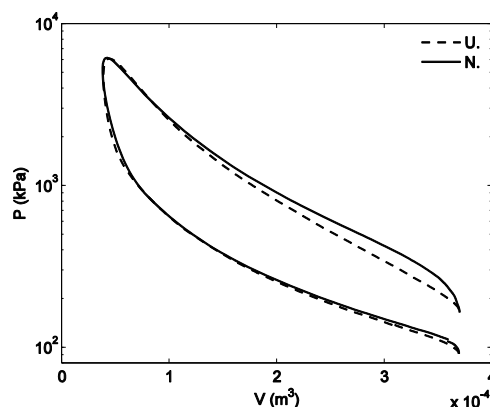


شکل ۱۰) نمودار راندمان-سرعت زاویه‌ای لنگ، در مکانیزمهای مرسوم و پیشنهادی و به ازای تغییرات لزجت روغن



شکل ۱۱) نمودار راندمان-سرعت زاویه‌ای لنگ، در مکانیزمهای مرسوم و پیشنهادی و به ازای تغییرات نسبت تعادل

$\theta_d = 70^\circ$	۱۴- متوسط بازه احتراق سوخت [۲۳]
$P_r = 92 \text{ kPa}$	۱۵- فشار هوای مرجع
$T_r = 300 \text{ K}$	۱۶- دمای هوای مرجع
$T_w = 400 \text{ K}$	۱۷- دمای متوسط دیواره سیلندر
$r = 9.7$	۱۸- نسبت تراکم
$m_c = 0.58 \text{ kg}$	۱۹- جرم معادل لنگ

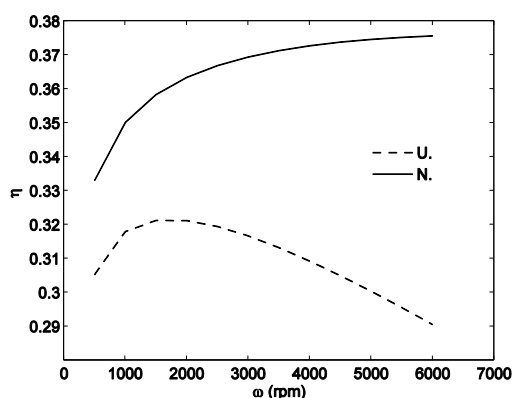


شکل ۸) نمودار تغییرات فشار سیلندر بر حسب حجم، در $\omega = \dot{\theta} = 1500 \text{ rpm}$ در مکانیزمهای مرسوم و پیشنهادی

شکل ۸) نشان دهنده نمودار لگاریتمی تغییرات فشار سیلندر بر حسب حجم سیلندر در آوانس بهینه جرقه شمع (بالاترین کار اندیکه) در سرعت زاویه‌ای $\omega = \dot{\theta} = 1500 \text{ rpm}$ برای هر دو ترکیب می‌باشد. با محاسبه مساحت سطح محصور هر دو نمودار می‌توان به برتری ۸ درصدی کار اندیکه ترکیب پیشنهادی نسبت به نوع مرسوم پی برد.

برای مقایسه بهتر عملکرد هر دو مکانیزم و بررسی اثرات اصطکاکی ناشی از کار بازگشت ناپذیر، نمودار تغییرات راندمان حرارتی (η)، به ازاء تغییرات سرعت زاویه‌ای لنگ در شکل (۹) ترسیم شده است. در این نمودارها، برای هر سرعت زاویه‌ای، آوانس بهینه جرقه لحاظ شده و همچنین در ترکیب جدید

$$L_{skirt} = 0 \text{ اعمال گردیده است.}$$



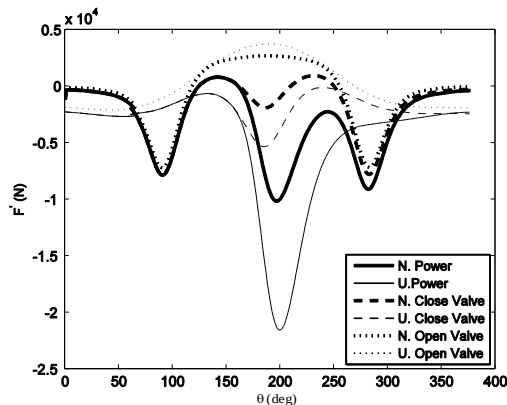
شکل ۹) نمودار راندمان-سرعت زاویه‌ای لنگ، در مکانیزمهای مرسوم و پیشنهادی

در نمودار شکل (۱۳) می‌توان افزایش حدود ۲۵ درصد در گشتاور، کاهش حدود ۲۰ درصد مصرف ویژه سوخت و در نهایت افزایش حدود ۲۵ درصد در توان خروجی را در دور بالای موتور (۶۰۰۰ دور بر دقیقه) را از مکانیزم جدید، نسبت به نوع مرسوم بصورت همزمان انتظار داشت. اما امکان رسیدن به چنین دورهایی در مکانیزم جدید مستلزم تحلیل نیروهای داخلی است که در بخش بعد محاسبه می‌شود.

۲-۶- تحلیل نیروی وارده بر شاتون

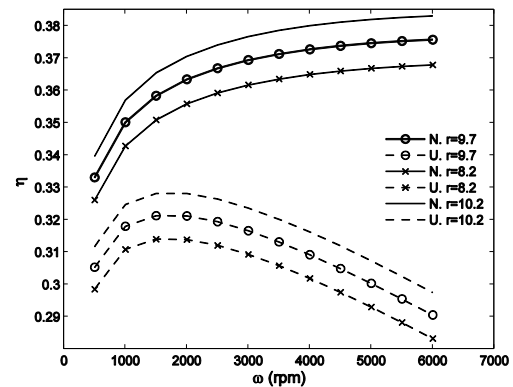
با کمک نتایج حاصل از مثال بخش قبل از تحلیل عملکرد ترمودینامیکی مکانیزمهای مرسوم و پیشنهادی در این قسمت، با کمک معادله‌های (۳۸) و (۳۹) و توزیع فشار روی پیستون در بخش قبل، می‌توان نیروی F' وارده بر شاتون را تحلیل نمود. در شکل (۱۴) نتایج نیروهای وارده بر شاتون به ازای مقادیر بکار رفته در مثال بخش قبل، ترسیم شده است. در این شکل سرعت زاویه‌ای لنگ $\omega = \dot{\theta} = 3500 \text{ rpm}$ در نظر گرفته شده، نیروی منفی نشانه فشاری بودن نیروی وارده بر شاتون و نیروی مثبت نشانه کششی بودن آن می‌باشد. خطوط پررنگ برای مکانیزم پیشنهادی ترسیم شده است که در شرایط مختلف (الف: انجام احتراق، ب: بدون احتراق با سوپاپ بسته و همچنین ج) بدون احتراق با سوپاپ باز، تحلیل شده است. برای نشان دادن اثر سرعت زاویه‌ای لنگ بر تغییرات نیروها در مکانیزم پیشنهادی و مرسوم، شکل (۱۵) با تغییر سرعت زاویه‌ای مثال قبل به $\omega = \dot{\theta} = 4500 \text{ rpm}$ ، ترسیم گردیده و در آن، رشد چشمگیر بارهای دینامیکی نسبت به شکل (۱۴) نمایان است. برای بررسی پارامتر نسبت طول شاتون به طول لنگ، برای مثال فوق با سرعت زاویه‌ای لنگ $\omega = \dot{\theta} = 3500 \text{ rpm}$ و با در نظر گرفتن طول شاتون $l = 1.05R$ ،

نیروهای وارده بر شاتون بصورت شکل (۱۶) بدست می‌آید. از آنجایی که یکی از نگرانی‌های عمده مربوط به مکانیزم پیشنهادی، نیروهای بین اعضاء می‌باشد. مطابق با نتایج شکل‌های (۱۵) و (۱۶) این مشکل قابل حل است. با وجودی که نیروهای دینامیکی مکانیزم جدید، که قله آنها در شاتون در حوالی ۹۰ و ۱۸۰ درجه میل لنگ پدید می‌آید، به نسبت قله احتراق در حوالی مرگ بالا، مقادیر متناهی را به خود اختصاص داده است، اما خوشبختانه با هم برآیند نشده و لذا محدودیت عمده‌ای را در سرعت موتور بوجود نمی‌آورند.



شکل ۱۴) نمودار نیروهای وارده بر شاتون-زاویه لنگ، در شرایط با احتراق و بدون احتراق با سوپاپ بسته و باز در مکانیزمهای مرسوم و پیشنهادی و به ازای $\omega = \dot{\theta} = 3500 \text{ rpm}$

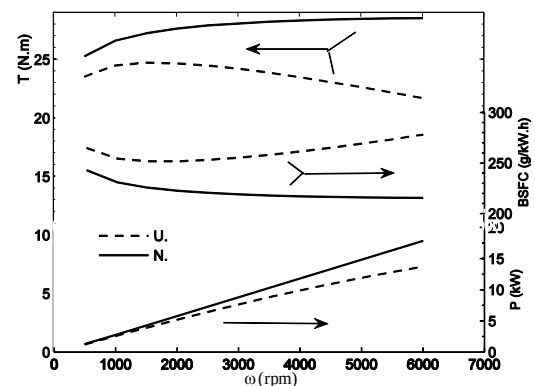
این مساله می‌تواند به خاطر کاهش بارز اصطکاک بدنه پیستون در طرح پیشنهادی از یک سو و از طرف دیگر بهبود راندمان حرارتی در اثر کاهش L/R در شرایط رقیق و Q_i کوچک رخ دهد. به همین ترتیب در شکل (۱۲) تاثیر افزایش نسبت تراکم، را در ترکیبهای معمول و پیشنهادی می‌توان یافت و نتایج بدست آمده نشان دهنده نرخ برابری از این تاثیرات در هر دو ترکیب دارد.



شکل ۱۲) نمودار راندمان-سرعت زاویه‌ای لنگ، در مکانیزمهای مرسوم و پیشنهادی و به ازای تغییرات نسبت تراکم

با توجه به مطالبی که پیرامون شکل (۶) ایراد گردید، بر طبق پیشبینی که می‌توان از طریق شبیه سازی انجام گرفته در این مقاله و نتایج حاصل در [۳۳] و [۲۹] انجام داد، می‌توان در شرایط احتراقی مشابه بین مکانیزمهای پیشنهادی و مرسوم طبق مثال، بالغ بر یک واحد به نسبت تراکم مکانیزم افزود. با اینکار و با کمک شکل (۱۲)، می‌توان نتیجه گرفت که در حوالی سرعت زاویه‌ای $\omega = \dot{\theta} = 4000 \text{ rpm}$ ، مکانیزم پیشنهادی نسبت به مکانیزم مرسوم، بیش از ۲۱٪ افزایش راندمان نشان می‌دهد که بسیار مطلوب است.

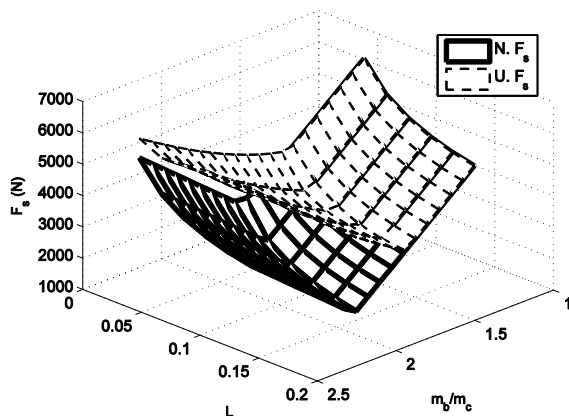
در شرایط جدول (۱) و با کمک معادله‌های (۴۵) تا (۴۷)، شکل (۱۳) حاصل می‌گردد که می‌تواند نمایش واضح عملکرد ترکیب جدید و مرسوم و در شرایط ترمودینامیکی ورودی مشابه باشد.



شکل ۱۳) نمودارهای تغییرات گشتاور ترمزی، مصرف ویژه سوخت ترمزی و توان خروجی ترکیبهای پیشنهادی و مرسوم

درصد بیشتری جرم بالانس، ماکسیم نیروی لرزشی کوچکتری را نمایش می‌دهد.

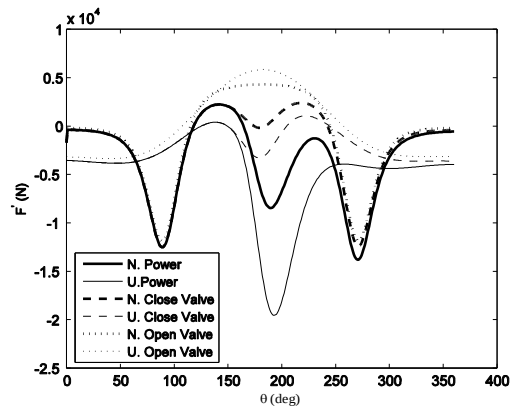
برای بررسی شرایط کمانش شاتون و طراحی مقطع آن در مکانیزم مرسوم و پیشنهادی، از آنجایی که بار بحرانی کمانش وارده بر شاتون، با مجذور طول شاتون نسبت عکس دارد، با فرض اینکه در مکانیزم پیشنهادی، طول شاتون $l = 1.15R$ انتخاب گردد و در مکانیزم مرسوم این نسبت $l = 3.4R$ باشد، با کمک رابطه کمانش $P_{cr} = \pi^2 EI / L_e^2$ ، می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط مشابه بار بحرانی برای دو مکانیزم و برای تحمل سرعت زاویه‌ای لنگ $\omega = \dot{\theta} = 3500 \text{ rpm}$ می‌توان ممان دوم سطح مقطع شاتونهای مکانیزم پیشنهادی را حداقل تا $1/18$ مکانیزم مرسوم کاهش داد. البته برای دستیابی به سرعت‌های زاویه‌ای بالاتر و در نتیجه افزایش بار وارده بر شاتونها، این نسبت افزایش خواهد یافت. با توجه به تحلیل فوق در مکانیزم پیشنهادی، مساله کمانش چندان مساله مهمی نمی‌تواند باشد.



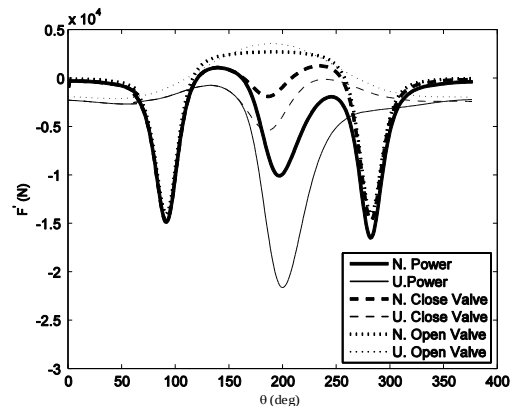
شکل ۱۷) رویه های ماکسیم نیروهای لرزشی وارده بر تکیه گاه به ازای مقادیر مختلف L/R و m_b/m_c در $\omega = \dot{\theta} = 4000 \text{ rpm}$ در مکانیزم های مرسوم و پیشنهادی

۷- نتیجه گیری

در مقاله اخیر گونه‌ای مکانیزم لنگ و لغزنده برای موتورهای احتراق جرقه‌ای ارائه گردیده و با نوع متداول مقایسه شده است. در جهت انجام مقایسه مربوطه اهمیت نسبت L/R و تاثیر بسزای آن در فرایندهای ترمودینامیکی بررسی شده و همچنین بر لزوم برطرف کردن اثر فشار جانبی پیستون تاکید گردید، که به عنوان یکی از عوامل اصلی عدم دستیابی مکانیزمهای مرسوم به راندمانهای اصطکاکی بالاتر و همچنین فرسایش و استهلاک زودرس موتورهای SI می‌باشد. مقایسه های انجام گرفته نشان میدهد که کاربرد مکانیزم پیشنهادی می‌تواند بهبود دهنده فرایند های احتراقی و در نتیجه سوخت مصرفی، نیروهای لرزشی و عکس العملهای داخلی باشد. در مکانیزم پیشنهادی، عملا دیگر سرعت زاویه‌ای لنگ (بدون احتساب اصطکاک پمپی)، محدودیتی برای راندمان اصطکاکی نبوده و فقط می‌تواند بواسطه نیروی پدید آمده در اعضا محدود شود. با برطرف شدن اثرات اصطکاکی فشار جانبی و امکان کوچکتر کردن L/R در مکانیزم پیشنهادی، افزایش چشمگیر راندمان اصطکاکی، بهبود عملکرد ترمودینامیکی و



شکل ۱۵) نمودار نیروهای وارده بر شاتون-زاویه لنگ، در شرایط با احتراق و بدون احتراق با سوپاپ بسته و باز در مکانیزمهای مرسوم و پیشنهادی و به ازای $\omega = \dot{\theta} = 4500 \text{ rpm}$



شکل ۱۶) نمودار نیروهای وارده بر شاتون-زاویه لنگ، در شرایط با احتراق و بدون احتراق با سوپاپ بسته و باز در مکانیزمهای مرسوم و پیشنهادی و به ازای $\omega = \dot{\theta} = 3500 \text{ rpm}$ و $l = 1.05R$

مساله کوچک بودن ماکسیم نیروها (حدود نصف) در ترکیب پیشنهادی نسبت به نوع مرسوم در سرعت‌های متداول نقش مهمی را در سبک تر شدن مکانیزم پیشنهادی و کمک به افزایش بیشتر محدوده بحرانی سرعت زاویه‌ای لنگ آن بازی می‌کند.

با توجه به مقایسه شکلهای (۱۴) و (۱۶) که فقط در L/R با یکدیگر تفاوت دارند، می‌توان مشاهده کرد که در نسبت های کوچک طول شاتون به لنگ، مقادیر بارهای دینامیکی وارده به صورتی مضاعف رشد می‌نماید. از آنجایی که این مساله از یک سو باعث رشد راندمان حرارتی اندیکه شده و از سوی دیگر باعث رشد فزاینده وزن مکانیزم می‌شود، نیاز است که با توجه به کاربرد مکانیزم مربوطه در موتورهای متحرک (موتور خودروها و ...) و ثابت (مولد برق و محرک پمپ و ...) و همچنین سرعت زاویه‌ای لنگ موتورهای مربوطه، محدوده بهینه‌ای برای L/R بدست آورد. با استفاده از معادله‌های (۳۰) و (۳۲) ماکسیم مقدار نیروهای لرزشی در ترکیبهای متداول و پیشنهادی، بصورت شکل (۱۷) ترسیم شده است. با کمک این شکل، در یک L/R مشخص، مکانیزم پیشنهادی، به ازای

۳- دشواری سرهم کردن قطعات در ترکیبهای تک سیلندر و چند سیلندر دانست.

فهرست علائم و اختصارات

a_p	شتاب پیستون (m/s^2)
A	ضریب معادله ضخامت لایه روغن (m)
A_h	سطح انتقال حرارت درونی سیلندر (m^2)
B	ضریب معادله ضخامت لایه روغن (m)
$BSFC$	مصرف ویژه سوخت ترمزی
C	لقی بدنه پیستون با جداره سیلندر (m)
C_1	ثابت سرعت احتراق (m/s)
C_2	ثابت سرعت احتراق ($m/K.s$)
C_p	ظرفیت گرمایی در فشار ثابت (kJ/kg)
C_v	ظرفیت گرمایی در حجم ثابت (kJ/kg)
D	قطر سیلندر (m)
E	مدول الاستیسیت (Pa)
f_{am}	نیروی حاصل از جرم بالانس اضافه شده به لنگ (N)
f_b	نیروی لرزشی بعد از بالانس (N)
f_c	نیروی وارده از سوی شاتون (N)
f_{newb}	نیروی لرزشی بعد از بالانس در مکانیزم پیشنهادی (N)
f_p	نیروی لرزشی وارده از سوی پیستون (N)
f_{ub}	نیروی لرزشی بدون انجام بالانس (N)
F	نیروی ناشی از فشار گازهای درون سیلندر (N)
F'	نیروی وارده بر شاتون با فرض دو نیرویی (N)
F_f	نیروی حاصل از اصطکاک بدنه (N)
h_{cg}	ضریب جابجایی گازهای درون سیلندر ($W/m^2 K$)
H	توان ترمزی
I	ممان اینرسی مقطع شاتون (m^4)
k	نسبت ضریب گرمایی (بی بعد)
L_e	طول موثر شاتون (m)
L_{ring}	ضخامت رینگ فشاری (m)
L_{skirt}	طول بدنه پیستون (m)
LHV	کمترین ارزش حرارتی سوخت (kJ/kg)
l	طول شاتون (m)
m	جرم محتویات درون سیلندر (kg)
m_a	جرم اضافه شده به لنگ برای بالانس (kg)
m_c	جرم معادل لنگ (kg)
m_f	جرم سوخت (kg)
m_p	جرم معادل پیستون (kg)

امکان بالاتر بردن نسبت تراکم و در نتیجه کاهش هرچه بیشتر مصرف سوخت و انرژی در این ترکیب حاصل خواهد شد. افزون بر این در مکانیزم پیشنهادی، در ریسک نزدیک شدن به شرایط ضربه‌ای مشابه با ترکیب مرسوم، می‌توان بهبود عملکرد موتور در زمینه آلودگیهای صوتی و شیمیایی و ارتقاء عمر مفید آن و همچنین افزایش چشمگیر گشتاور و توان خروجی را انتظار داشت.

همچنین کلیه نتایج فوق بر مبنای فرضیات و ساده سازیهای ذیل بدست آمده است:

نتایج حاصل، برای یک موتور چهار زمانه برنامه ریزی شده است و در آن بجز اصطکاک لزجی پیستون؛ هیچ اصطکاک دیگری وارد نگردیده. علاوه براین، فرض براین بوده که اصطکاک لزج در دو سیکل کامل دوران لنگ و در سراسر بازه حرکت پیستون وجود داشته و احتراق فقط در یک سیکل رفت و برگشت پیستون به مانند موتورهای چهار زمانه رخ داده باشد. همچنین در هر دو مکانیزم برخی پارامترها مانند بازه احتراق؛ سرعت زاویه‌ای لنگ؛ لقی بدنه پیستون و بدنه رینگها با جداره سیلندر و دمای بدنه سیلندر، ثابت فرض شده‌اند و جرم اعضاء رفت و برگشتی در دو مکانیزم مساوی لحاظ شده‌اند.

در مجموع مزایای عمده مکانیزم پیشنهادی در طرح حاضر را می‌توان

۱- حذف محدودیت کاهش L/R به واسطه اصطکاک بدنه پیستون

۲- امکان افزایش راندمان حرارتی اندیکه به سبب کاهش L/R و در نتیجه کاهش مصرف انرژی

۳- امکان افزایش بیشتر نسبت تراکم و در نتیجه افزایش راندمان حرارتی (بیش از یک واحد در مثال مقاله، به سبب کاهش دمای ماکسیمم گازها، در شرایط احتراقی مشابه و همچنین افزایش سرعت خطی پیستون در بازه احتراق) و در نتیجه کاهش بیشتر مصرف سوخت و افزایش توان خروجی

۴- حذف فشار جانبی پیستون و در نتیجه افزایش چشمگیر راندمان اصطکاک و باز هم بهبود مصرف انرژی و گشتاور خروجی موتور در سرعت های زاویه‌ای بالا و همچنین، افزایش عمر موتور به سبب کاهش فرسودگیهای حاصل از بار جانبی در پیستون و رینگهای فشاری

۵- کاهش ابعاد موتور به سبب کاهش وافر طول شاتون (تا ۳۰ درصد از ارتفاع موتور)

۶- کاهش سروصدای موتور در سرعت های زاویه‌ای بالا به دلیل عدم برخورد پیستون با جداره سیلندر و عدم انحراف آن در درون سیلندر در خلال دوران لنگ.

۷- پیشبینی بهبود عملکرد موتورهای دوزمانه به علت کاهش بیشتر سرعت خطی پیستون در BDC در طرح حاضر (با توجه به شکل (۴-الف)).

۸- کاهش آلودگی تولید شده توسط موتور، به سبب کاهش دمای گازهای خروجی در شرایط احتراقی مشابه (شکل (۴-ب)).

۹- حساسیت کمتر موتور نسبت به لزجت روغن به کار رفته (بخاطر حذف فشار جانبی پیستون) و لذا کاهش تاثیر دمای محیط بر تغییرات عملکرد اصطکاک و موتور.

از جمله مشکلات قابل پیشبینی در روند ساخت و تولید مکانیزم پیشنهاد شده را می‌توان در

۱- فزونی قطعات

۲- پیچیدگی نسبی مکانیزم (میل استفاده از ترکیب چرخنده بجای لنگ)

۶- مراجع

- [1]- Thiele, M., Warnatz, J., Driezler, A., Lindenmaier, S., Schiebl, R., Mass, U., Grant, A., and Ewart, P., 'Spark ignition Hydrogen/Air Mixture: Two Dimensional Detailed Modeling and Laser Based Diagnostics', Combustion and Flame, Vol. 128, pp. 74-87, 2002.
- [2]- Drake, M.C., Fansler, T.D., and Lippert, M., 'Stratified-Charge combustion: modeling and imagine of a spray-guided direct-injection spark-ignition engine', Proceeding of the Combustion Institute, Vol. 30, pp. 2683-2691, 2005.
- [3]- Heywood, J.B., and Sher, E., 'The two-stroke cycle engine; It's development, operation, and design', Taylor & Francis, 1999.
- [4]- Mohammadi, A., Shioji, M., Nakai, Y., Ishikura, W., and Tabo, E., 'Performance and combustion characteristics of a direct injection SI hydrogen engine', International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, pp. 296-304, 2007.
- [5]- Krzyzak, Z., and Pawlus, P., 'Zero-Wear' of piston skirt surface topography', Wear, Vol. 260, pp. 554-561, 2006.
- [6]- Szymczyk, W., 'Numerical simulation of composit surface coating as a functionally graded material', Material science & Engineering A, Vol. 412, pp. 61-65, 2005.
- [7]- Bradley, D., Kalghatgi, G.T., Glombok, M., and Yeo, J., 'Heat release rates due to autoignition, and their relationship to knock intensity in spark ignition engines', Symposium (International) on Combustion, Vol. 26, Issue 2, pp. 2653-2660, 1996.
- [8]- Arakeline, V.H., 'Shaking moment cancellation of self balance slider-crank mechanical systems by means of optimum mass redistribution', Mechanics Research Communications, Vol. 33, pp. 846-850, 2006.
- [9]- Erkaya, S., Su, Ş., and Uzmay, İ., 'Dynamic analysis of a slider-crank mechanism with eccentric connector and planetary gears', Mechanism and machine theory, Vol. 42, pp. 393-408, 2007.
- [10]- Kochev, I.S., 'General theory of complete shaking moment balancing of planar linkages: a critical review', Mechanism and Machine Theory, Vol. 35, pp. 1501-1514, 2000.
- [11]- Kutlar, O.A., Arslan, H., and Calik, A.T., 'Skip cycle system for spark ignition engines: An experimental investigation of a new type working strategy', Energy Conversion and Management, Vol. 48, pp. 370-379, 2007.
- [12]- Smith, J.E., Smith, J.C., McKisic, A.D., 'A comparison study of the stiller-smith slider-crank mechanisms for eight- cylinder internal combustion engine use', Journal of engineering for gas turbines and power, Vol. 113, pp. 350-358, 1991.
- [13]- Badaoui, M.El., Danière, J., Guillet, F., and Servièrè, C., 'Separation of combustion noise and piston-slab in diesel engine-Part I: Separation of combustion noise and piston-slab in diesel engine by cyclic Wiener filtering', Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 19, pp. 1209-1217, 2005.

M_{Newb}	گشتاور لرزشی در مکانیزم پیشنهادی پس از بالانس (N.m)
P	فشار درون سیلندر (kPa)
P_r	فشار مرجع (kPa)
P_m	فشار گازهای درون سیلندر بدون احتراق و در حالت سوپاپ بسته (kPa)
Q	انرژی حرارتی (kJ)
Q_{in}	انرژی حرارتی ورودی (kJ)
Q_{loss}	انرژی حرارتی تلف شده (kJ)
R	شعاع لنگ (m)
R_g	ثابت گازها (kJ/kg.K)
T_{ave}	گشتاور متوسط ترمزی (N.m)
T_g	دمای گازهای درون سیلندر (K)
T_r	دمای مرجع (K)
T_w	دمای بدنه سیلندر (K)
U	انرژی درونی (kJ)
U_p	سرعت خطی پیستون (m/s)
V	حجم سیلندر (m^3)
V_c	حجم محفظه احتراق (m^3)
V_d	حجم جابجایی (m^3)
x	فاصله پیستون از TDC (m)
x_A	فاصله پیستون از شافت لنگ (m)
x_b	نرخ احتراق سوخت (بی بعد)
W_i	کار اندیکه (kJ)
W_{irrev}	کار بازگشت ناپذیر (kJ)
α	زاویه شاتون با افق (deg)
w	سرعت متوسط احتراق گازهای درون سیلندر (m/s)
ω	سرعت زاویه ای لنگ (rpm)
ε	ضخامت لایه روغن (m)
θ	زاویه لنگ با راستای حرکت پیستون (deg)
θ_s	زاویه لنگ در هنگام جرقه شمع (deg)
θ_d	بازه احتراق (deg)
ζ	ثابت مکانیزم (بی بعد)
μ	لزجت روغن (mPa.s)
η	راندمان اصطکاکی (بی بعد)
η_i	راندمان اندیکه (بی بعد)

تقدیر و تشکر

با سپاس فراوان از راهنمایان و کمکهای ارزنده مهندس پیراسته و با تشکر فراوان از زحمات دکتر حیدری شیرازی، دکتر عساری، مهندس حداد سلیمانی، مهندس قمشی بزرگ و مهندس شاهرکینی.

- engine', Tribology International, Vol. 39, pp. 1643-1652, 2006.
- [28]- Miller, C.D., Olsen, H.L., Logan, W.O., and Osterstrom, G.E., 'Analysis of spark-ignition engine knock as seen in photographs taken at 200,000 frames per second', NACA Report No. 857, 1946.
- [29]- Taylor, E.S., Leary, W.A., and Diver, J., 'Effect of fuel-air ratio, inlet temperature, and exhaust pressure on detonation', NACA Report No. 699, 1939.
- [30]- Abu-qudais, M., 'Exhaust gas temperature for knock detection and control in spark ignition engine', Energy Conversion and Management, Vol. 37, Issue 9, pp. 1383-1392, 1996.
- [31]- Arakeline, V.H., and Smith, M.R., 'Complete shaking force and shaking moment balancing of linkages', Mechanism and Machine Theory, Vol. 34, pp. 1141-1153, 1999.
- [32]- Merola, S.S., and Vaglieco, B.M., 'Knock investigation by flame and radical species detection in spark ignition engine for different fuels', Energy Conversion and Management, Vol. 48, Issue 11, pp. 2897-2910, 2007.
- [33]- Noda, T., Hasegawa, K., and Kubo, M., 'Development of transient knock prediction technique by using a zero-dimensional knocking simulation with chemical kinetics', Society of Automotive Engineers Inc., No. 2004-01-0618, pp. 51-61, 2004.
- [34]- Taylor, C.F., 'The internal Combustion engine in theory and practice', The MIT Press, Vol I, 1972.
- [35]- Taylor, C.F., 'The internal Combustion engine in theory and practice', The MIT Press, Vol II, 1973.
- [36]- Ferguson, C.R., and Kirkpatrick, A.T., 'Internal Combustion Engines Applied Thermosciences', John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [37]- Norton, R.L., 'Design of machinery, an introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines', Mc Graw-Hill Higher education; 3rd Edition, 2003.
- [38]- Burden, R.L., Faires, J.D., 'Numerical analysis', (Fourth Edition), PWS-Kents Publishing Comp., 1989.
- [14]- Gerges, S.N., De Luca, J.C., and Lalor, N., 'The influence of cylinder lubrication on piston slap', Journal of sound and vibration, Vol. 257, Part 3, pp. 527-557, 2002.
- [15]- Liu, X., and Randall, R.B., 'Blind source separation of internal combustion engine piston slap from other measured vibration signals', Mechanical Systems and signal processing, Vol. 19, pp. 1196-1208, 2005.
- [16]- Prata, A.T., Fernandes, J.R.S., and Fagotti, F., 'Dynamic analysis of piston secondary motion for small reciprocating compressors', Journal of Tribology, Vol. 122, pp. 752-760, 2000.
- [17]- Servière, C., Lacoume, J.-L., Badaoui, M.El., 'Separation of combustion noise and piston-slab in diesel engine-Part II: Separation of combustion noise and piston-slab using blind source separation methods', Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 19, pp. 1218-1229, 2005.
- [18]- Ge, Y., Chen, L., Sun, F., and Wu, Ch., 'Effect of heat transfer and friction on the performance of an irreversible air-standard miller cycle', International Commu. in Heat and Mass Transfer, Vol. 32, pp. 1045-1056, 2005.
- [19]- Abu-Nada, E., Al-Hinti, I., Al-Sarkhi, A., and Akash, B., 'Thermodynamic modeling of spark ignition engine: Effect of temperature dependent specific heats', Int. Commu. in Heat and Mass Transfer, Vol. 33, pp. 1264-1272, 2006.
- [20]- Esfahanian, V., Javaheri, A., and Ghaffarpour, M., 'The influence of cylinder lubrication on piston slap', Applied Thermal Engineering, Vol. 26, pp. 277-287, 2006.
- [21]- Yamin, J.A., and Badran, O.O., 'Analytical study to minimise the heat losses from a propane powered 4-stroke spark ignition engine', Renewable Energy, Vol. 27, pp. 463-478, 2002.
- [22]- Kutlar, O.A., Arslan, H., and Calik, A.T., 'Method to improve efficiency of four stroke, spark ignition engines at part load', Energy Conversion and Management, Vol. 46, pp. 3202-3220, 2005.
- [23]- Abu-Nada, E., Al-Hinti, I., Al-Sarkhi, A., and Akash, B., 'Effect of Piston Friction on the Performance of SI Engine: A New Thermodynamic Approach', J. of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 130, pp. (022802) 1-8, 2008.
- [24]- Mufti, R.A., and Priest, M., 'Experimental evaluation of piston-assembly friction under motored and fired conditions in a gasoline engine', Journal of Tribology, Vol. 127, pp. 826-836, 2005.
- [25]- Silva, F.S., 'Fatigue on engine piston- A comparison of case studies', Engineering Failure Analysis, Vol. 13, pp. 480-492, 2006.
- [26]- Srivastava, D.K., Agarwal, A.K., and Kumar, J., 'Effect of liner surface properties on wear and friction in a non-firing engine simulator', Material & Design, Vol. 28, pp. 1632-1640, 2007.
- [27]- Tamminen, J., Sandström, C.E., and Andersson, P., 'Influence of load on the tribological condition in piston ring and cylinder liner contacts in a medium-speed diesel