



بررسی و مقایسه عوامل موثر در عملکرد و بازده های موتور اشتعال جرقه ای

محسن قاضی خانی^۱، محمدجواد اکبری نوقابی^۲، محمدرضا غلامی^۳

^۱دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد/ m_ghazikhani@yahoo.com

^۲دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد/ mja.mech@yahoo.com

^۳دانشجوی دکترا مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری/ mrgholami@yandex.com

چکیده

از مسائل اساسی در ارتقا عملکرد موتورهای اشتعال جرقه ای، شناخت عوامل موثر بر بازده های موتور است. این عوامل شامل پارامترهای عملکردی و پارامترهای هندسی موتور می شود. در این مقاله علاوه بر معرفی و بررسی عوامل مهم موثر بر بازده های موتور- که بر پایه تحقیقات گذشته انجام گرفته است- به مقایسه آنها بر اساس استاندارد های موجود پرداخته شده است. نتایج نشان می دهد پارامترهای هندسی همچون نسبت قطر به جابجایی در درجه اول و سپس پارامترهای عملکردی همچون انتقال حرارت و زمان بندی سوپاپها نقش بسزایی را بر بازده های موتور، ایفا می کنند. در انتها نیز تأثیر عوامل محیطی همچون دما و فشار هوا نیز بر عملکرد موتور بررسی شده است.

توان ترمزی: $f(\eta_m, \eta_t, \eta_v, \dots)$

مصرف سوخت ویژه ترمزی: $f(\eta_m, \eta_t, \dots)$

پس می توان با بررسی هر کدام از این بازده ها به صورت جداگانه و همچنین عوامل موثر بر آنها، پارامترهای تأثیرگذار را تعیین نمود [۱]. از سال ۱۹۷۰ تا کنون تحقیقات فراوانی در این زمینه به صورت تجربی و آزمایشگاهی صورت گرفته است؛ اما برای قابل مقایسه بودن نتایج، موتورها را در یک بازه حجمی محدود (۰/۵ تا ۰/۷ لیتر بر سیلندر) انتخاب می کنیم. همچنین بر اساس استاندارد اس ای ای شماره جی ۱۳۴۹^۱ که نشان می دهد نتایج در شرایط غیر یکسان محیط متفاوت است، از آزمایش هایی که در شرایط مرجع تست شده اند، استفاده می کنیم. در ادامه به بیان تحقیقات پایه و نتایج آنها خواهیم پرداخت.

بازده حجمی

این بازده اثربخشی موتور را در مکش سیال به داخل سیلندر نشان می دهد که می توان به صورت زیر نشان داد.

$$\eta_v = \frac{\text{حجمی جریان هوا در شرایط استاندارد}}{\text{درخ حجم جابجایی پیستون}} \quad (1)$$

برای افزایش و رسیدن به حداکثر بازده حجمی موتور می بایست هوای ورودی به موتور افزایش یابد. این کار زمانی امکان پذیر است که افت فشار ناشی از اصطکاک حداقل گردد. از مهم ترین پارامترهایی که در بازده حجمی اثر می گذارند موارد زیر است؛ اصطکاک جریان در سیستم مکشی، اصطکاک جریان در سوپاپ ورودی، خفگی جریان، انتقال حرارت و زمان بندی سوپاپها.

اصطکاک جریان در سیستم مکشی

در طول فرآیند مکش، افت فشار اصولاً به دلیل تأثیرات ویسکوزیته سیال در کناره های دیواره های جریان ورودی است. همچنین جدایش جریان و انقطاع در پروفیل سرعت، سبب افت فشار است. دنیل^۲ و همکارش در شکل ۱ نتایج تحقیق خود را در این زمینه نشان

واژه های کلیدی

عوامل موثر، بازده، پارامتر عملکردی، موتور اشتعال جرقه ای

مقدمه

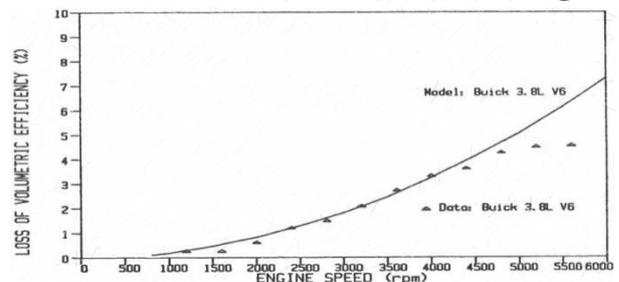
تولیدکنندگان و طراحان موتورهای اشتعال جرقه ای، از ابتدا در تلاش بودند تا با بهینه سازی موتور، بازده آن را افزایش و از طرفی مصرف سوخت آن را کاهش دهند. اولین موضوع برای رسیدن به این هدف مهم، شناخت پارامترهای تأثیرگذار طراحی و عملکردی موتور است. پس از آن می بایست میزان نقش هر کدام از آنها را در بازده موتور به صورت مجزا مشخص کرد. در انتها نیز برای بکار گیری نتایج می بایست به صورت کلی این پارامترها با یکدیگر مقایسه کرد و عوامل با تأثیرگذاری بالاتر مورد توجه قرار گیرد. از این رو در ادامه به بررسی این عوامل، بر اساس تحقیقات صورت گرفته در سال های گذشته بر روی موتورهای بنزینی، خواهیم پرداخت.

عملکرد موتور بنزینی را می توان با توجه به خروجی های موتور همچون توان ترمزی و مصرف سوخت ویژه ترمزی، مورد بررسی قرارداد. این پارامترها را به طور مجزا می توان به صورت تابعی از بازده های حجمی (η_v)، حرارتی (η_t) و مکانیکی (η_m) موتور بیان نمود.

¹ SAE J1349

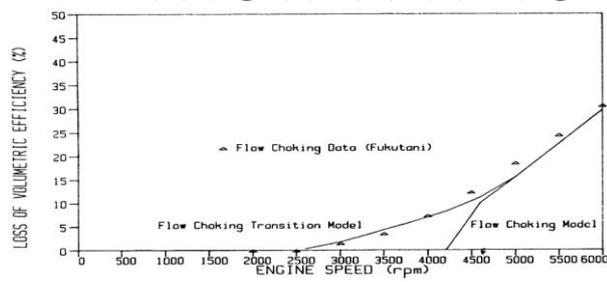
² Daniel

دادند [۲]. این شکل نشان‌دهنده افزایش بودن میزان اتلاف بازده حجمی با افزایش دور موتور تا حداکثر ۷٪ است.



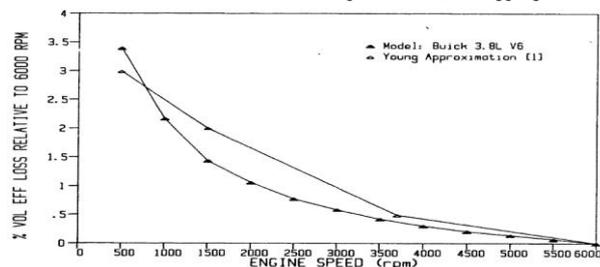
شکل ۱: تأثیرات اصطکاک سیستم مکشی بر بازده حجمی [۲]

گرمای موجود در سیستم مکش تأثیرات مخربی بر روی بازده حجمی دارد، دلیل آن هم کم شدن چگالی هوا بر اثر دمای بالاست.



شکل ۳: تأثیرات خفگی جریان بر بازده حجمی [۴]

گرمای داخل اتاق احتراق نیز، مقداری از سیال ورودی را هنگامی که سوپاپ ورود باز است، بر اثر انبساط صورت گرفته، به خارج از سیلندر هدایت می‌کند و بر بازده حجمی تأثیر منفی دارد. یانگ^۴ با انجام مدل‌سازی‌ها و آزمایش‌هایی بر روی یک نمونه موتور، تأثیرات فوق را به‌صورتی که در شکل ۴ آورده شده است نشان داد [۵]. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، از آن‌جا که زمان انتقال حرارت در سرعت‌های پایین موتور بیشتر است (به دلیل وجود زمان کافی)، اتلاف بیشتری نیز خواهیم داشت. این اتلاف در حداکثر حالت، در دور 5000 rpm حدود ۳٪ است.



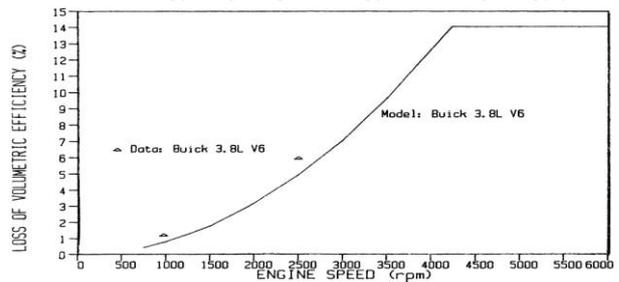
شکل ۴: اتلافات بازده حجمی بر اثر انتقال حرارت [۵]

زمان‌بندی سوپاپ‌ها بر اساس تجربیات مسلم است که زمان‌بندی سوپاپ در اندازه‌گیری بازده حجمی، نقش بسزایی دارد و می‌تواند تأثیرات زیادی در عملکرد موتور در حالت‌های تمام بار^۵، نیمه بار^۶ و درجا داشته باشد. در حقیقت زمان‌بندی سوپاپ‌ها می‌تواند به تنهایی، مهم‌ترین عامل موثر در بازده حجمی باشد؛ بنابراین می‌بایست زمان‌بندی سوپاپ‌ها به‌طور ویژه مورد توجه قرار گیرد. باز و بسته شدن سوپاپ‌های ورود و خروج تأثیرات متمایزی بر روی بازده حجمی دارند؛ این تأثیرات گاهی قابل توجه و گاهی قابل صرف‌نظر هستند.

بر اساس تحقیقات آسموس^۷ باز شدن سوپاپ ورود و خروج تأثیر فراوانی بر بازده حجمی ندارند و می‌توان از آنها صرف‌نظر کرد [۶]. اما بسته شدن سوپاپ ورودی تأثیرات قابل توجهی در بازده حجمی دارد که در اینجا به بررسی آن می‌پردازیم. این زمان‌بندی معمولاً بین ۴۰ تا ۱۰۰ درجه بعد از نقطه مرگ پایین^۸ رخ می‌دهد و اجازه

اصطکاک جریان در سوپاپ ورودی

مساحت انتهایی سوپاپ ورودی (محل ورود جریان به سیلندر) مهم‌ترین مانع ورود جریان به‌طور معمول است. یک مفهوم کاربردی در بحث اندازه‌گیری میزان جریان واقعی به موتور، سطح موثر جریان سوپاپ است. سطح موثر به‌صورت سطح خروجی فرضی یک اوریفیس بدون اصطکاک که جریان اندازه‌گیری شده از آن عبور می‌کند، تعریف می‌گردد. دلیل و همکارش تغییرات اصطکاک جریان سوپاپ را با تغییرات سرعت موتور هم به‌صورت مدل و هم به‌صورت عملی برای یک موتور خاص، به‌دست آوردند که در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲: تأثیرات اصطکاک جریان سوپاپ بر بازده حجمی [۲]

همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، با افزایش سرعت تا حدود 4000 rpm ، اتلاف بازده حجمی تا ۱۴٪ افزایش می‌یابد و از آن به بعد به دلیل پدیده خفگی این روند ثابت می‌ماند.

خفگی جریان

تیلور^۱ نشان داد که با مساوی یا بیشتر شدن ماخ ورودی از ۰/۵، بازده حجمی به‌سرعت کاهش می‌یابد. این کاهش در بازده به دلیل پدیده خفگی^۲ است. این پدیده با محدود کردن سرعت در اطراف سوپاپ، از پدیده اصطکاک جریان در سوپاپ قابل تشخیص است [۳]. فوکواتانی^۳ و همکارش در تحقیق دیگری تغییرات در بازده را بر اثر خفگی جریان را به‌دست آورد که در شکل ۳ قابل مشاهده است [۴]. با توجه به نتیجه این شکل، پدیده خفگی از سرعت موتور ۲۵۰۰ تا ۴۰۰۰ دور بر دقیقه شروع می‌شود و در دور 6000 rpm سبب بیشترین اتلاف در بازده حجمی یعنی حدود ۳۰٪ می‌شود.

انتقال حرارت در سیستم مکشی و اتاق احتراق

⁴ Young

⁵ Wide Open Throttle

⁶ Part load

⁷ Asmus

⁸ Bottom Dead Center

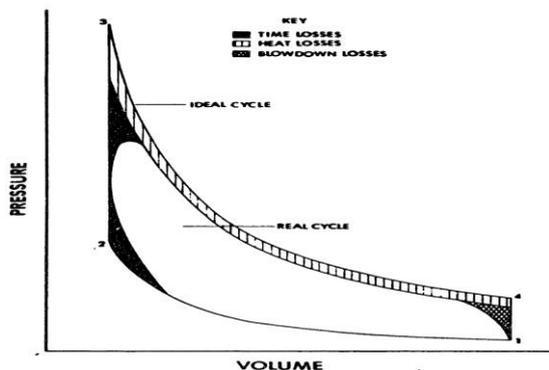
¹ Taylor

² Choking

³ Fukutani

که بر بازده حرارتی تأثیرگذارند شامل مراحل تراکم، احتراق و انبساط می‌شود.

پارامترهای موتور نظیر نسبت تراکم، قطر و طول جابجایی پیستون، شکل اتاق احتراق، چرخش^۳ هوای ورودی، زاویه بسته شدن سوپاپ اگزوز، دمای خنک کاری و ... بر بازده حرارتی تأثیرگذارند که بیشتر آن‌ها بررسی خواهند شد. متغیرهای موتور می‌توانند بر روی بازده حرارتی، به صورت اتلافات ترمودینامیکی مربوط به زمان احتراق، انتقال حرارت و خروج با فشار گاز تأثیر بگذارند. این اتلافات در شکل ۷ آورده شده است.



شکل ۷: مقایسه بین سیکل ایده آل و واقعی موتور اشتعال جرقه‌ای [۱۰]

اتلافات زمانی

این اتلاف به زمان مورد نیاز شدن مرحله احتراق مربوط می‌شود. در موتورهای حقیقی احتراق در زمان کوتاهی (میلی‌ثانیه یا ۳۰ تا ۸۰ درجه میل‌لنگ) اتفاق می‌افتد.

متغیرهای موتور همچون زمان‌بندی جرقه، نسبت هم‌ارزی، بازگرداندن گازهای اگزوز^۴، کسر باقیمانده و بار، بر روی این اتلاف زمانی موثر هستند. همچنین عامل‌هایی مانند قطر، ارتفاع جا به جایی و شکل اتاق احتراق که بر طول دوره سوختن تأثیر دارند، در این اتلاف زمانی سهیم هستند.

اتلاف حرارتی

اتلاف حرارتی به سبب جریان گرما از گازهای ورودی به پیستون، دیواره‌های سیلندر و سرسیلندر است.

اتلاف خروج با فشار

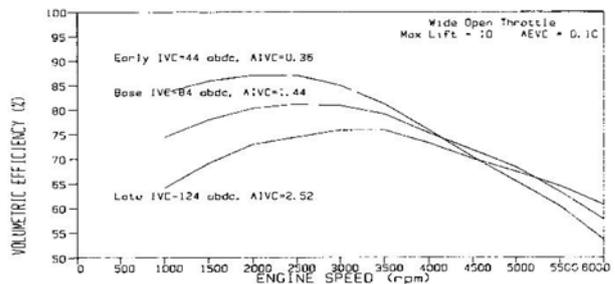
این اتلاف به دلیل کاهش در نسبت انبساط، بر اثر زود باز شدن سوپاپ خروجی قبل از نقطه مرگ پایین است. در کنار اثرات این اتلافات، بعضی از متغیرهای موتور قادرند با افزایش مساحت نمودار $P-V$ بازده را افزایش دهند. این متغیرها شامل بار و نسبت تراکم هستند.

مدل واتس^۵ تأثیر پارامترهای اساسی بر بازده حرارتی را به دست آورد آورد که در شکل‌های ۸ تا ۱۱ نشان داده شده است [۷].

در شکل ۸ دیده می‌شود که با افزایش انتقال حرارت حداکثر تا

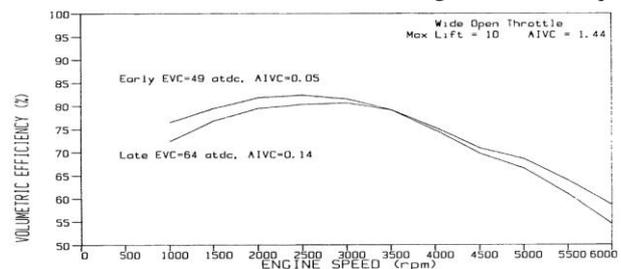
می‌دهد تا شارژ ورودی به دلیل وجود اینرسی، به حرکت خود به داخل سیلندر ادامه دهد. این مفهوم مخصوصاً در سرعت‌های بالای موتور بسیار اهمیت دارد که به آن اثر قوچ^۱ گویند.

درحالی‌که اثر قوچ، بازده حجمی را در سرعت‌های بالا بهبود می‌بخشد، چون در سرعت‌های پایین اینرسی، قادر به غلبه بر انرژی سیال بر اثر بالا آمدن پیستون نیست، لذا جریان ورودی، از پورت ورود امکان برگشت را دارد و مانع افزایش بازده می‌شود (شکل ۵). با توجه به شکل ۵، دیر بسته شدن سوپاپ ورود از دورهای کم تا حدود 4000 rpm ، تأثیر منفی بر بازده حجمی دارد و در دور 8000 rpm ، حدود ۲۰٪ است. همچنین در دور بالای 5500 rpm زود باز شدن سوپاپ ورود تا حداکثر ۷٪ اتلاف بازده حجمی را به همراه خواهد داشت.



شکل ۵: تغییرات بازده حجمی بر اثر بسته شدن سوپاپ ورود [۶]

بسته شدن سوپاپ خروجی پایان مرحله همپوشانی^۲ را تعیین می‌کند؛ بنابراین تأثیر مهمی را بر مقدار مواد باقیمانده حاصل از احتراق در طول پروسه مکش در سیلندر، دارد. برای مدل کردن بازده حجمی، در نظر گرفتن بسته شدن سوپاپ خروجی بسیار مهم است. در موتورهای معمولی این زمان‌بندی بین ۸ تا ۶۵ درجه بعد از نقطه مرگ بالا است (شکل ۶).



شکل ۶: تغییرات بازده حجمی بر اثر بسته شدن سوپاپ خروج [۶]

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، در سرعت‌های پایین موتور، دیر بسته شدن سوپاپ خروجی حداکثر ۵٪ سبب کاهش بازده حجمی می‌شود؛ اما در سرعت‌های بالا (6000 rpm)، دیر بسته شدن سوپاپ خروجی ۵٪ بازده حجمی را کاهش می‌دهد.

بازده حرارتی

بازده حرارتی اثربخشی تبدیل انرژی ذخیره‌شده در سیال عامل را به کار قابل‌استفاده، نشان می‌دهد. پروسه‌های موتور اشتعال جرقه‌ای

³ Swirl

⁴ EGR

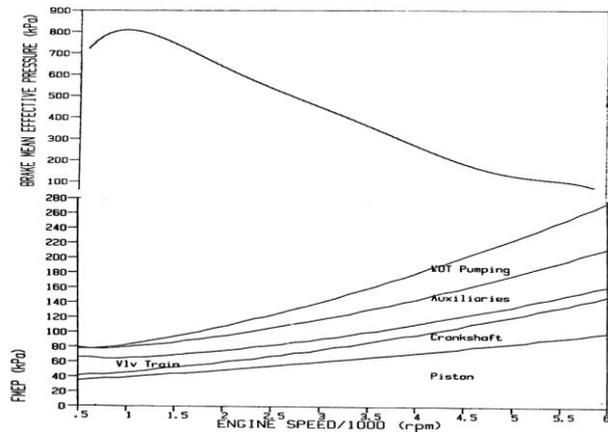
⁵ Watts

¹ Ram effect

² Overlap

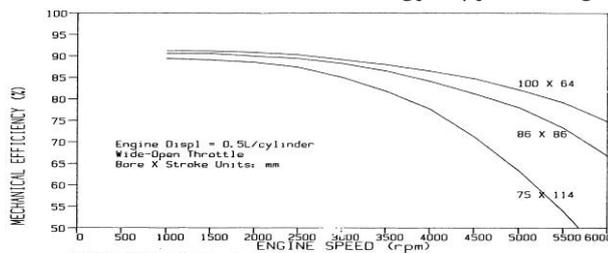
اصطکاک موتور به صورت مجموع اصطکاک های میل‌لنگ، پیستون، مجموعه سوپاپ، پمپ و ... مدل می‌شود. برای پیش‌بینی مقدار اتلافات اصطکاک در موتور اشتعال جرقه‌ای، منطقی‌ترین راه، بررسی هر کدام از منابع اصطکاک به صورت جداگانه است و سپس مقدار کل اصطکاک با جمع جبری این اتلافات، برابر می‌شود [۸].

بال^۲ و همکاری در آزمایش‌های خود بر روی یک موتور بنزینی، اصطکاک موتور و عوامل تأثیرگذار بر بازده مکانیکی را بررسی کردند که در شکل های ۱۲ تا ۱۶ آورده شده است [۸].



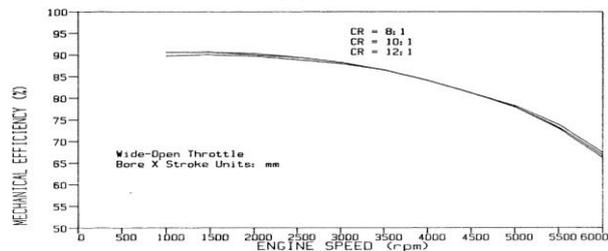
شکل ۱۲: اصطکاک تفکیکی اجزای موتور بر حسب سرعت موتور [۸]

با توجه به شکل ۱۲، در سرعت های پایین، اصطکاک حدود ۹٪ عملکرد موتور را کاهش می‌دهد. در این سرعت، اصطکاک سیستم سوپاپ و پیستون ۷۰٪ کل اصطکاک را شامل می‌شود. در سرعت های بالا (۵۵۰۰ rpm) اصطکاک، ۵۵٪ باعث کاهش عملکرد موتور می‌شود. در این سرعت، سهم دریچه گاز از کل اصطکاک ۲۵٪، میل‌لنگ ۲۰٪ و پیستون ۳۰٪ است.



شکل ۱۳: تأثیر نسبت قطر به جابجایی در بازده مکانیکی در حجم موتور

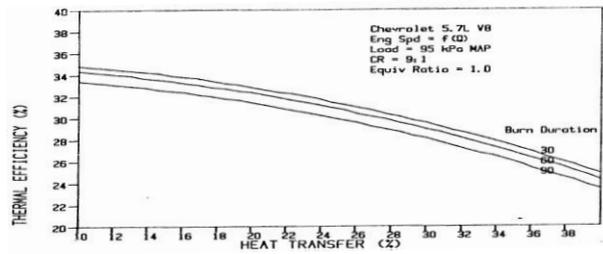
ثابت [۸]



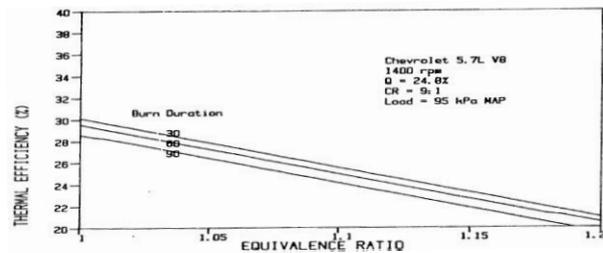
شکل ۱۴: تأثیر نسبت تراکم بر بازده مکانیکی [۸]

همان طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، در دور های کمتر از ۲۵۰۰ rpm کاهش نسبت قطر به جابجایی، حداکثر ۳٪ و در دور

۱۰٪ بازده حرارتی کاهش می‌یابد. همچنین افزایش طول احتراق تا ۲٪ بر افزایش اتلاف بازده حرارتی تأثیر می‌گذارد.

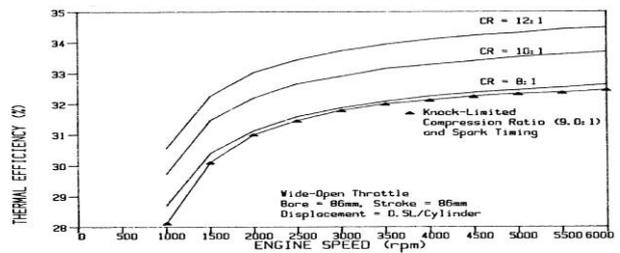


شکل ۸: تغییرات بازده حرارتی بر اثر انتقال حرارت و زمان احتراق [۷]



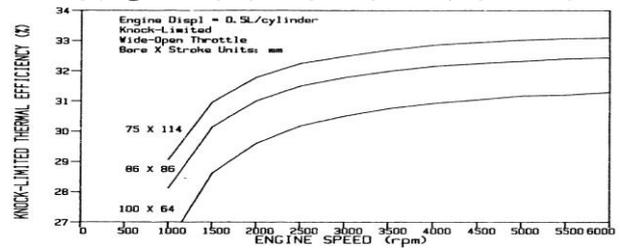
شکل ۹: تغییرات بازده حرارتی بر اثر نسبت هم ارزی و زمان احتراق [۷]

با توجه به شکل بالا با افزایش نسبت هم ارزی از ۱ تا ۱/۲، بازده حرارتی ۹٪ کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰: تغییرات بازده حرارتی بر اثر نسبت تراکم [۷]

همان طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، در تمام دورها کاهش نسبت تراکم، حداکثر ۳٪ در کاهش بازده حجمی موثر است.



شکل ۱۱: تأثیر نسبت قطر به جابجایی در بازده حرارتی در حجم موتور

ثابت [۷]

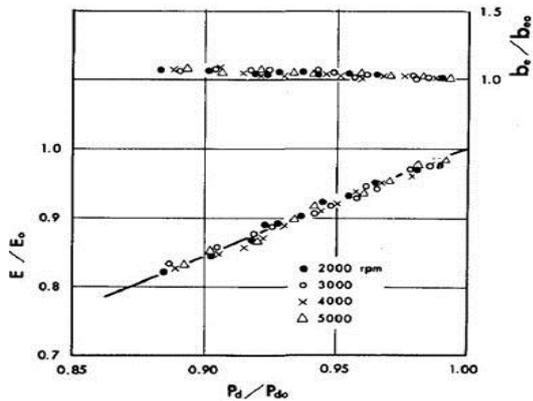
با مشاهده شکل ۱۱، نتیجه می‌شود که با افزایش نسبت قطر به جابجایی در تمام دورها، حدود ۲/۵٪ بازده حرارتی کاهش می‌یابد.

بازده مکانیکی

بازده مکانیکی اثربخشی تبدیل کار قابل استفاده موجود در سیلندر را به کار شفت، نشان می‌دهد. در این بخش به بررسی نتایج مدل‌هایی می‌پردازیم که میانگین توان موثر اصطکاک^۱ را برحسب پارامترهای مهم عملکردی و طراحی موتور پیش‌بینی می‌کند.

² Ball

¹ FMEP



شکل ۱۸: تغییرات عملکرد موتور بر اثر تغییر رطوبت هوا [۹]

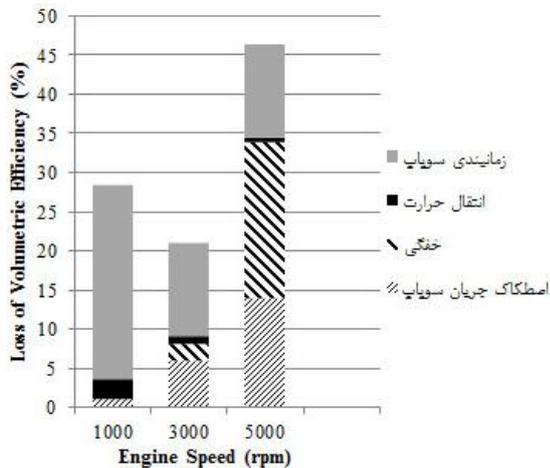
همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می شود، افزایش رطوبت فشار تا ۵۰٪ عملکرد موتور را بهبود می بخشد. همچنین با توجه به شکل ۱۷، افزایش دمای هوای جو تا ۲۰٪ بیشتر از حالت مرجع، حدود ۲۰٪ عملکرد موتور را کاهش می دهد. شکل ۱۸ نیز نشان می دهد که کاهش رطوبت، باعث کاهش حداکثر ۲۲ درصدی عملکرد موتور می شود. همچنین برای محاسبه بهترین عملکرد موتور در شرایط مختلف جو، نیچکه عبارت زیر را ارائه نمود [۱۰].

$$E = (E_c + E_f) \frac{P_d}{P_{d0}} \sqrt{\frac{T}{T_0}} - E_f \quad (2)$$

نتیجه گیری و جمع بندی

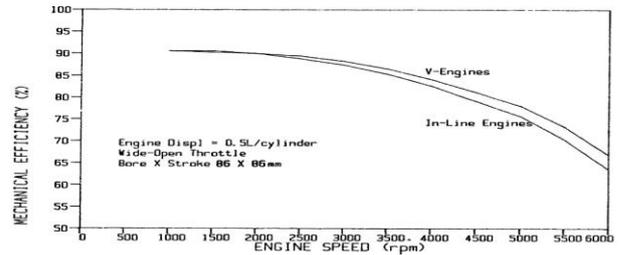
با توجه به اینکه تمامی تحقیقات بررسی شده، بر روی موتور های با حجم موتور ۰/۵ تا ۰/۷ لیتر بر سیلندر بوده است، می توان نتایج حاصل از آنها را با مقیاس بندی و مرجع قرار دادن حجم جابجایی ۰/۵ لیتر بر سیلندر، با یکدیگر مقایسه نمود.

در این بخش در سه سرعت متفاوت موتور، عوامل موثر بر بازده های موتور را نشان می دهیم. دلیل انتخاب ای سه سرعت این است که سرعت ۱۰۰۰ rpm حالت درجا، سرعت ۳۰۰۰ rpm حالت گشتاور گیری و سرعت ۵۰۰۰ rpm حالت توان گیری از موتور را نشان می دهد.



شکل ۲۱: مقایسه عوامل موثر بر بازده حجمی در سه سرعت موتور

حدود ۵۰۰۰ rpm، ۲۲٪ بازده مکانیکی را کاهش می دهد. شکل ۱۴ نیز تأثیر پارامتر هندسی نسبت تراکم بر بازده مکانیکی را نشان می دهد. تقریباً در تمام سرعت ها تغییر نسبت تراکم تا ۳٪ بازده مکانیکی را کاهش می دهد.

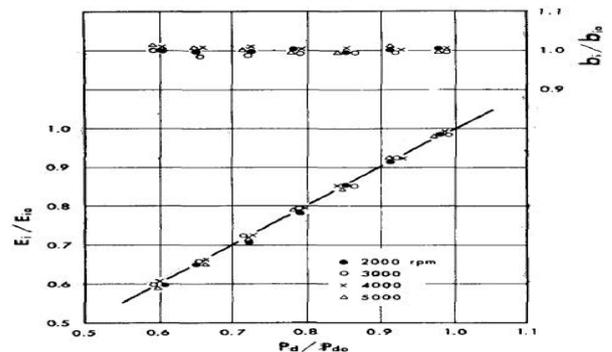


شکل ۱۵: تأثیر ساختار موتور بر بازده مکانیکی [۸]

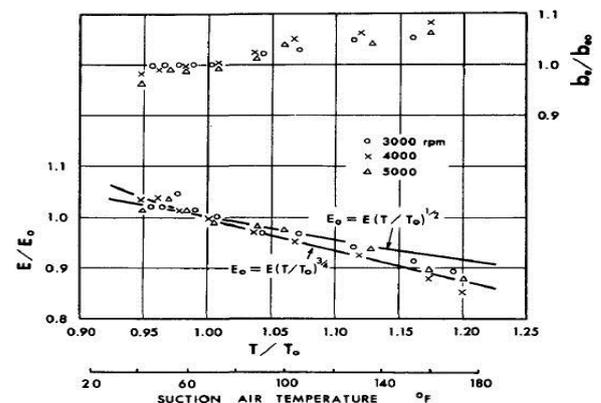
با توجه به شکل ۱۵ شکل قرارگیری سیلندرها نیز بر بازده حجمی تأثیر دارد. این اثر در دور های بالا حدود ۴٪ می شود.

تأثیرات شرایط محیط بر عملکرد موتور

در این بخش هدف تعیین تأثیرات شرایط محیط (فشار جو، دمای هوا و رطوبت هوا) بر عملکرد موتور است. این تحقیق توسط ناکاجیما^۱ و همکاران بر روی یک موتور چهار سیلندر به صورت آزمایشگاهی صورت گرفته است [۹]. شکل های ۱۸ تا ۲۰ نشان دهنده عملکرد موتور با تغییرات شرایط محیط از حالت استاندارد، است. در این نمودارها b مصرف سوخت ویژه، E گشتاور ترمزی، E_f اتلاف گشتاور اصطکاکی، P_d فشار جزیی هوای خشک، T دمای هوای ورودی و اندیس \circ نشان دهنده حالت مرجع است.



شکل ۱۶: تغییرات عملکرد موتور بر اثر تغییر فشار جو [۹]



شکل ۱۷: تغییرات عملکرد موتور بر اثر تغییر دمای هوا [۹]

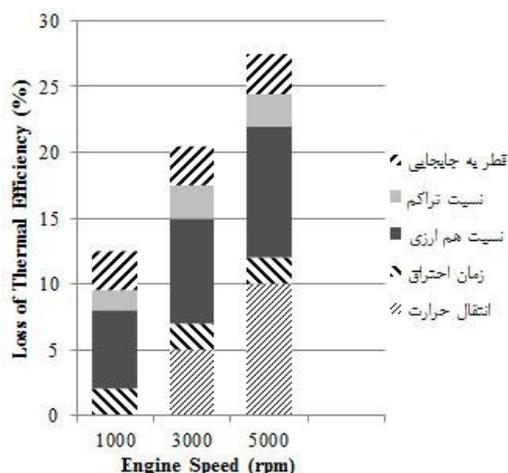
² Nitschke

¹ Nakajima

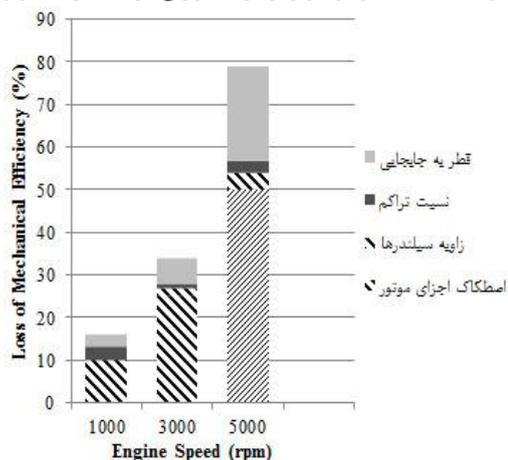
همچنین در بخش اثرات شرایط محیطی نیز مشاهده نمودیم که افزایش دما نسبت به حالت مرجع تأثیر منفی بر عملکرد موتور دارد؛ اما افزایش رطوبت و فشار نسبت به حالت مرجع بهبود عملکرد موتور را به همراه دارد. البته می بایست توجه داشت میزان حساسیت عملکرد موتور به تغییرات رطوبت جو به مراتب بالاتر از تغییرات فشار و دما است.

مراجع

- [1] Heywood, J.B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 1988. McGraw-Hill.
- [2] Daniel. W.A., Williams, T.J., and White. J.B., "Poppet Inlet Valve Characteristics and Their Influence on the Induction Process". *Institution of Mechanical Engineers Proceedings*, Vol. 178, Pt 1. No. 36. pp 955-978. 1993-94.
- [3] Taylor, C.F., *The Internal Combustion Engine in Theory and Practice*, The MIT Press, Cambridge, MA, 1976.
- [4] Fukutani, I., and Watanabe, E., "An Analysis of the Volumetric Efficiency Characteristics of 4-Stroke Cycle Engines Using the Mean Inlet Mach Number Him", *SAE Paper 790484*. 1999.
- [5] Young. M.B. ., "Relating Engine Performance to Valve Event Timing: An Analytical Study". *GM Research Report EN-180*. 1980.
- [6] Asmus, I.W., "Valve Events and Engine Operation". *SAE Paper 820749*. 2002.
- [7] Watts, P.A. ., and Heywood, J.B. ., "Simulation Studies of the Effects of Turbocharging and Reduced Heat Transfer on Spark Ignition Engine Operation". *SAE Paper 800289*, 1999.
- [8] Ball, W.F., Jackson, N.S., Pilley, A.D., and Porter, B.C., "The Friction of a 1.6l Automotive Engine-Gasoline and Diesel", *SAE Paper 860418*, 2000.
- [9] Nakajima, K., Shinoda, K., and Onoda, K., "Experiments on Effects of Atmospheric Conditions on the Performance", *SAE Paper 690166*, 2003.
- [10] Nitschke, R.G., "The effects of spark-ignition engine design parameters on performance and economy: a modelling". MS Thesis, University of Michigan. 1982.



شکل ۲۲: مقایسه عوامل موثر بر بازده حرارتی در سه سرعت موتور



شکل ۲۳: مقایسه عوامل موثر بر بازده مکانیکی در سه سرعت موتور

با توجه به شکل ۲۱ در حالت درجا، زمان بندی سوپاپها، در حالت گشتاورگیری از موتور، خفگی و زمان بندی سوپاپها و در حالت توان گیری، انتقال حرارت، زمان بندی سوپاپها و خفگی، نقش اصلی را در اتلاف بازده حرارتی دارند.

با توجه به شکل ۲۲ در حالت درجای موتور، نسبت هم ارزی و در حالت های حداکثر گشتاور و حداکثر توان، نسبت هم ارزی و انتقال حرارت از عوامل با تأثیرگذاری بیشتر بر بازده حرارتی هستند.

شکل ۲۳ نیز نشان می دهد که اصطکاک اجزا در تمام سرعتها و نسبت قطر به جابجایی در سرعت های بالا، مهم ترین عامل موثر بر بازده مکانیکی هستند.

علاوه بر اینها با مقایسه سه شکل نتیجه می شود، در حالت درجای موتور، اتلافات بازده حجمی مرتبه بالاتری در مقایسه با اتلافات بازده مکانیکی و حرارتی دارد. در حالت حداکثر گشتاور تقریباً میزان اتلافات دارای محدوده یکسانی هستند. در حالت حداکثر توان نیز، به ترتیب اتلاف بازده مکانیکی و سپس بازده حجمی دارای مرتبه بالاتری هستند.