



تأثیر استفاده از پرخوران برقی بر عملکرد موتور ملی پرخوران

ابوالفضل محمدابراهیم^{۱*}؛ محمدعلی احترام^۲؛ محمدحسین سلیمیان^۳؛ وحید خرمی راد^۴

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، m.ebrahim@arakut.ac.ir

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، m_ehteram@sbu.ac.ir

^۳ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران، hosein.salimian@gmail.com

^۴ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران، v.khorrami@yahoo.com

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۹ اسفند ۱۳۹۴

پذیرش: ۵ تیر ۱۳۹۵

کلیدواژه‌ها:

پرخوران برقی

تأخیر پرخوران

GT-Power

چکیده

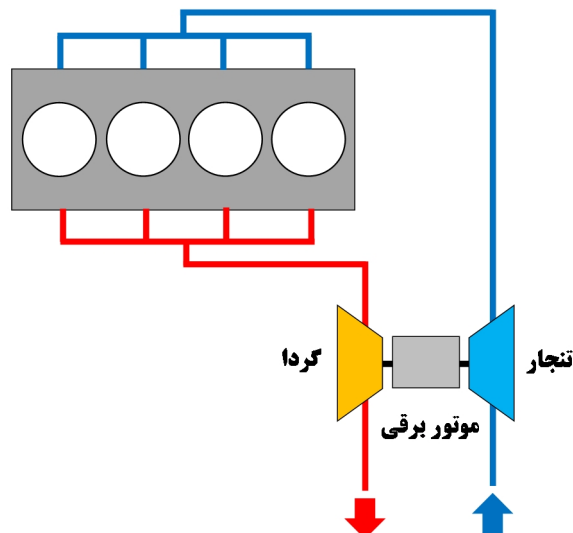
پرخورانی موتورهای درونسوز به کوچک‌سازی موتور با حفظ گشتاور و توان خروجی قبلی کمک می‌کند اما به‌کارگیری این فناوری با مشکلاتی همچون تأخیر در عملکرد گذرای موتور در دوره‌های کند و افزایش فشار راهگاه دود همراه است. استفاده از پرخوران برقی در کنار پرخوران مکانیکی راه‌حلی برای فائق آمدن بر این مشکلات است. در این مقاله تأثیر استفاده از پرخوران برقی بر موتور اشتعال جرقه‌ای چهار استوانه‌ای پرخوران بررسی شده است. بدین منظور، ابتدا با استفاده از شبیه‌سازی موتور در نرم‌افزار GT-Power مکان بهینه پرخوران برقی در راهگاه هوا بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از برتری عملکرد موتور هنگام قرارگیری پرخوران برقی در بالادست پرخوران مکانیکی است. در مرحله بعد مقایسه‌ای میان عملکرد موتور شبیه‌سازی شده با موتور پرخوران عادی انجام گرفته است. نتایج نشان داد استفاده از پرخوران برقی موجب بهبود چشمگیری در عملکرد گذرا و پایای موتور در دوره‌های کند می‌شود.



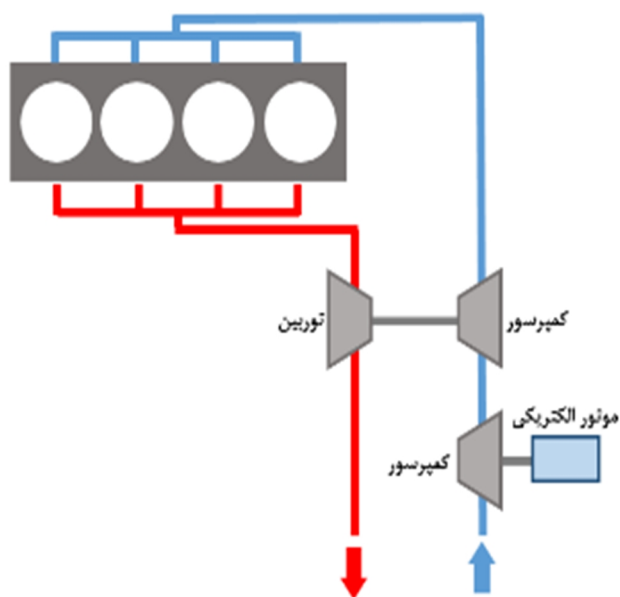
تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

طراحی غیر یکپارچه معمولاً منجر به ایجاد نسبت فشار نهایی بیشتری در مقایسه با طراحی یکپارچه می‌شود. در شکل‌های (۱) و (۲) شمای از این دو نوع طراحی نشان داده شده است:



شکل ۱: ساختار یکپارچه در قرارگیری موتور برقی در پرخوران



شکل ۲: ساختار غیر یکپارچه در قرارگیری موتور برقی در پرخوران

بحث برای مشکلات پیشرو برای استفاده از پرخوران برقی به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند:

- ۱- سامانه برق‌رسانی
- ۲- موتور برقی

هم‌زمان با پیشرفت دانش و فناوری در زمینه طراحی موتورهای احتراق داخلی، مطرح شدن مباحثی همچون بهینه‌سازی مصرف انرژی و همچنین قوانین حفظ محیط زیست، توجه خودروسازان را به سمت کوچک‌سازی موتور و تلاش برای کاهش مقدار آلاینده‌های حاصل از خودرو معطوف نموده است.

کوچک‌سازی یا کاهش حجم موتور در کنار حفظ گشتاور و توان، موضوع استفاده از پرخوران را پررنگ می‌کند، اما استفاده از پرخوران در موتورهای کم حجم سه مشکل اساسی به همراه دارد که عبارت‌اند از:

- تأخیر پاسخ موتور در حالت گذرا (تأخیر پرخوران)^۱، مسائلی نظیر حجم دود ورودی به گردا^۲ و لختی پرخوران باعث تأخیر پاسخ موتور در حالت گذرا می‌شود [۱].
- افت گشتاور در دورهای کند موتور. نرخ شار خروجی از موتور و در نتیجه انرژی داده شده به گردا در دورهای کند برای ایجاد فشار مناسب در راهگاه ورودی کافی نبوده و باعث افت محسوس گشتاور می‌شود [۲].
- افزایش فشار در راهگاه خروجی. دود حاصل از احتراق برای خروج باید از گردا عبور کرده و این عمل باعث افزایش فشار قبل از گردا می‌شود. این افزایش فشار در راهگاه خروجی، کار سنبه^۳ برای خروج دود را افزایش می‌دهد که نتیجه آن افزایش مصرف سوخت خواهد بود [۳].

راه‌حل‌های مختلفی نظیر استفاده از پرخوران دومرحله‌ای، پرخوران برقی، تغییر در لختی پرخوران، طراحی مناسب هندسه راهگاه‌های ورودی و خروجی و همچنین وجود دریچه هدر رو^۴ در قسمت گردای پرخوران، از جمله راه‌های غلبه بر این مشکلات است. همان‌طور که اشاره شد استفاده از پرخوران برقی در سامانه پرخورانی راه‌حلی برای رفع برخی از این مشکلات است.

پرخوران برقی در حقیقت متشکل از موتور برقی دور سریعی است که به تنجار متصل شده است و به افزایش مقدار هوای ورودی به استوانه کمک می‌نماید.

این موتور می‌تواند به صورت یکپارچه^۵ به مجموعه پرخوران اضافه گردد و یا به صورت غیر یکپارچه^۶ به تنجار دومی متصل شود. در شرایطی که گردا قادر به رساندن دور تنجار به دور مطلوب در بازه زمانی معین نباشد، با استفاده از پرخوران برقی با طراحی یکپارچه، موتور برقی وارد مدار شده و کمبود توان گردا را جبران می‌کند. از سوی دیگر با استفاده از پرخوران برقی با طراحی غیر یکپارچه، تنجار متصل به موتور برقی در مرحله‌ای جداگانه به افزایش فشار جریان راهگاه هوا می‌پردازد؛ بنابراین

4 Waste Gate
5 Integrated
6 Non-integrated

1 Turbo lag
2 Turbine
3 Piston

برایان ریچاردز^{۱۹} و همکاران در شرکت ایریستک^{۲۰} به همراه اولیور و همکاران در شرکت ریکاردو به بررسی استفاده از پرخوران برقی بر روی یک موتور بنزینی ۲ لیتری پرخوران پرداختند. پرخوران برقی استفاده شده دارای قابلیت تقویت فشار^{۲۱} ۲,۲ بار در کمتر از ۵۰۰ میلی ثانیه و دارای توان ۵ کیلووات بوده است.

نتایج نشان داد در حالت تمام بار در دوره‌های ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ برتیب ۲۰ و ۲ و ۳ درصد افزایش گشتاور حاصل شد. دلیل اختلاف چشمگیر افزایش گشتاور در دور ۱۵۰۰ برای عملکرد نامناسب پرخوران مکانیکی در این دور است. هنگامی که از پرخوران برقی در کنار پرخوران مکانیکی استفاده شده است، پرخوران برقی این عملکرد نامناسب را جبران و افزایش گشتاور چشمگیری را حاصل کرده است؛ اما در دوره‌های تندتر عملکرد پرخوران مکانیکی بهتر و افزایش گشتاور با پرخوران برقی کم‌رنگ‌تر شده است. همچنین زمان رسیدن به ۹۰ درصد بیشینه گشتاور در دور ۱۲۰۰ از ۱,۵ به ۱ ثانیه و در دور ۱۵۰۰ از ۱,۲۵ به ۰,۵۵ ثانیه کاهش یافت [۱۰].

شرکت فورد با کوچک‌سازی یک نمونه موتور تنفس طبیعی^{۲۲} از حجم ۲ لیتر به ۱ لیتر، با به‌کارگیری پرخوران برقی در کنار پرخوران مکانیکی موفق شد زمان شتاب‌گیری خودرو در بازه ۰-۱۰۰ کیلومتر بر ساعت را بر روی ۹,۲ ثانیه ثابت نگه دارد. در این موتور از پرخوران برقی ساخته شده توسط شرکت ولتو استفاده شده است که توانی معادل ۳,۳ کیلووات دارد [۱۱].

در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی یک‌بعدی محل قرارگیری پرخوران مکانیکی و پرخوران برقی بر روی موتور ملی پرخوران انجام و شاخصه‌های عملکردی در هر یک از این چینش‌ها بررسی شده است. سپس با استفاده از چینش برگزیده در راهگاه هوا، مقایسه‌ای میان موتور ملی در سه نوع تنفس طبیعی، دارای پرخوران مکانیکی و موتور مجهز به پرخوران برقی (علاوه بر پرخوران مکانیکی)، انجام می‌شود.

۲- معادلات حاکم

در فرآیند حل شبیه‌سازی یک‌بعدی ارائه شده، ابتدا با استفاده از شرایط مرزی اولیه مانند فشار و دما در راهگاه ورودی و خروجی و همچنین سرعت اولیه محور پرخوران، نسبت فشار تنجار و گردا تخمین زده می‌شود. سپس از روی اطلاعات نقشه، شار جرمی و بازده فراخوانی و در معادلات استفاده می‌شوند. برای به‌دست آوردن توان مصرفی و دمای خروجی، از معادلات حاکم بر گردا و تنجار استفاده می‌شود:

۳- هماهنگ‌سازی پرخوران برقی، پرخوران مکانیکی و موتور با یکدیگر برای دستیابی به عملکرد بهینه موتور و کاهش تلفات انرژی

بررسی مشکلات دسته اول و دوم خارج از حیطه این مقاله است. به همین سبب در اینجا تنها به ذکر تعدادی از تحقیقات در این زمینه‌ها بسنده شده است.

در خصوص طراحی موتور برقی برای پرخوران برقی، استفان بیورسی^۷ و همکاران در شرکت تحقیقاتی ام.ام.تی^۸ موفق به ساخت موتور برقی دی‌سی بدون جاروبک^۹ سه و شش پیچه‌ای شدند که توانست با اتصال به تنجار ۲۵ میلیمتری شرکت گرت^{۱۰} در کمتر از ۳۰۰ میلی‌ثانیه نسبت فشار ۱,۳ بار را در ۸۰۰۰۰ د.د.د (دور در دقیقه) ایجاد کند [۴ و ۵]. انرژی برقی درخواستی از سوی موتور برقی در بازه زمانی کوتاه منتج به جریان بالا در سامانه برق رسانی می‌شود. این موضوع محققان را به سمت استفاده از ولتاژ بزرگ در سامانه برق رسانی پرخوران برقی سوق داده است. به‌طور مثال شرکت اف.ای.وی^{۱۱} با جایگزینی سامانه برق رسانی ۴۸ ولتی به‌جای ۱۲ ولتی مرسوم، جریان عبوری در مدار را تا ۵۰ درصد کاهش داد [۶]. در ادامه به شرح برخی پژوهش‌های انجام شده در خصوص دسته سوم مشکلات پرداخته می‌شود.

نیومن^{۱۲} و همکاران در شرکت جگوار لندروور^{۱۳} با همکاری اسمیت^{۱۴} و همکاران در شرکت خودروسازی لوتوس^{۱۵} و همچنین ریچاردز^{۱۶} و همکاران در شرکت ولتو^{۱۷} محل قرارگیری پرخوران برقی و پرخوران مکانیکی در طراحی غیر یکپارچه را بررسی کردند. این بررسی برای موتور دیزلی چهار استوانه با حجم ۲ لیتر انجام شد. نتایج بررسی شاخصه‌های عملکردی موتور و پرخوران برای هر یک از چینش‌ها نشان داد هنگامی که پرخوران برقی در بالادست پرخوران مکانیکی قرار می‌گیرد، عملکرد گذرای موتور در دوره‌های کند با بهبود بیشتری همراه است، اما متوسط دمای جریان خروجی از پرخوران مکانیکی حدود ۵۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر از حالتی است که پرخوران برقی در پایین دست پرخوران مکانیکی قرار گیرد [۷].

شرکت میتسوبیشی^{۱۸} با استفاده از موتور برقی دور تند ۲ کیلوواتی، توانست نسبت فشار ۱,۳۲ را در مدت زمان ۱ ثانیه ایجاد کند. تنجار استفاده شده این نسبت فشار را در ۱۴۰۰۰۰ د.د.د.د ایجاد کرده است [۸]. مشکلات ساخت طراحی یکپارچه و همچنین دستیابی به نسبت فشار نهایی بیشتر در طراحی غیر یکپارچه، بیشتر خودروسازان را به سمت استفاده از طراحی غیر یکپارچه سوق داده است [۹].

¹⁵ Lotus

¹⁶ C.Richards

¹⁷ Valeo

¹⁸ Mitsubishi

¹⁹ Bryn Richards

²⁰ Aeristech

²¹ Boosting

²² Ford Focus Durated

⁷ STEPHAN BIWERSI

⁸ MMT

⁹ DC Brushless

¹⁰ Garret

¹¹ FEV

¹² P.Newman

¹³ Jagaur Land Rover

¹⁴ T.smith

۲. با توجه به نسبت فشار مطلوب و شار حجمی و به کمک نقشه تنجارهای منتخب، یک عدد منطقی برای بازده تنجار تخمین زده می‌شود، لازم به ذکر است همواره انتخاب بزرگترین بازده از میان نقشه‌های منتخب، مناسب نیست و در تخمین بازده باید حاشیه امنی با توجه به خط نوسان شدید^{۲۳} در نظر گرفته شود.

۳. با توجه به بازده تخمینی و معادله (۱۰) دمای سیال ورودی به موتور (خروجی از تنجار) تعیین خواهد شد و همچنین فشار ورودی به موتور نیز با توجه به فشار هوای محیط و نسبت فشار مطلوب محاسبه می‌شود.

$$T_{02} = T_{01} \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_c} \left[\left(\frac{p_{02}}{p_{01}} \right)^{\frac{k_a-1}{k_a}} - 1 \right] \right\} \quad (10)$$

۴. با استفاده از دما و فشار سیال ورودی به موتور و روابط (۱۱) و (۱۲)، شار جرمی ورودی به موتور تعیین می‌شود.

$$m_a = \left(\frac{N}{2} \right) \rho_3 V_{sw} \eta_{vol} \quad (11)$$

$$\rho_3 \cong \frac{p_{03}}{RT_{03}} \quad (12)$$

۵. در این مرحله متغیر شار جرمی تنجار $m_a \sqrt{T_{01}/P_{01}}$ و نسبت فشار مطلوب، یک نقطه مشخص بر روی نقشه تنجار به دست می‌دهد که این نقطه دارای بازده مشخصی است.

۶. از میان تنجارهای منتخب، تنجاری که در این نقطه، بازده آن طبق نقشه به بازده تخمینی، نزدیک‌تر باشد انتخاب شده و اگر بازده تخمینی با تقریب خوبی با بازده نقشه برابر باشد یعنی تنجار به درستی انتخاب شده است ولی در غیر این صورت بازده نقشه باید جایگزین بازده تخمینی شده و محاسبات از ابتدا انجام شود تا جایی که بازده تخمینی با بازده نقشه برابر شود.

۷. سرعت تنجار در این نقطه، سرعتی است که باید با موتور برقی در این دور موتور ایجاد شود.

۴- شبیه‌سازی

شبیه‌سازی بر پایه موتور ملی پرخوران دارای چهار استوانه، حجم ۱۷۰۰ سی‌سی و حداکثر توان ۱۵۰ اسب بخار (در سرعت موتور ۵۵۰۰ د.د.د.) انجام شده است.

در این شبیه‌سازی دو هدف کلی را دنبال خواهیم کرد: ۱. دستیابی به یک حالت بهینه در محل قرارگیری پرخوران برقی در راهگاه ورودی از

$$h_{out} = h_{in} + \frac{\Delta h_{s,c}}{\eta_{s,c}} \quad (1)$$

$$h_{out} = h_{in} + \Delta h_s \eta_{s,t} \quad (2)$$

که در آن $\eta_{s,c}$ بازده هم‌آنتروپی و $\Delta h_{s,c}$ کار هم‌آنتروپی تنجار و $\eta_{s,t}$ بازده هم‌آنتروپی و $\Delta h_{s,t}$ کار هم‌آنتروپی گردا هستند که بدین صورت تعریف می‌شوند:

$$\eta_{s,c} = \frac{h_{out_s} - h_{in}}{h_{out} - h_{in}} \quad (3)$$

$$\Delta h_{s,c} = C_p T_{total,in} \left(PR^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} - 1 \right) \quad (4)$$

$$\eta_{s,t} = \frac{h_{out} - h_{in}}{h_{out_s} - h_{in}} \quad (5)$$

$$\Delta h_{s,t} = C_p T_{total,in} \left(1 - PR^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right) \quad (6)$$

در معادله (۴) و (۶) نسبت فشار ایستای خروجی به ورودی و $T_{total,in}$ دمای سکون ورودی است که از معادله (۷) محاسبه می‌شود:

$$T_{total,in} = T_{in} + \frac{u_{in}^2}{2C_p} \quad (7)$$

در نهایت برای توان و دمای خروجی بدین شکل محاسبه می‌شوند:

$$P = \dot{m} (h_{in} - h_{out}) \quad (8)$$

به‌منظور شبیه‌سازی دوران محور پرخوران از معادله (۹) استفاده شده است:

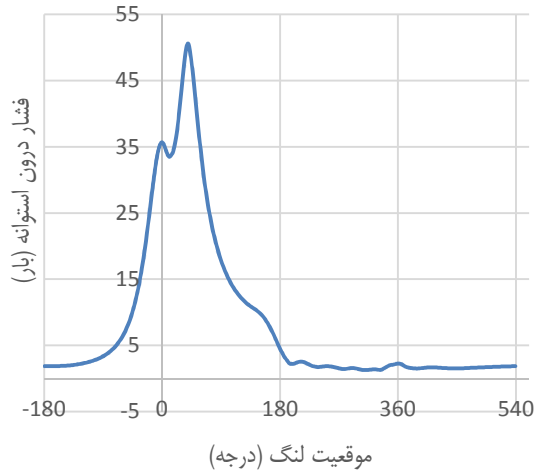
$$\Delta \omega = \frac{\Delta t (T_{turbine} - T_{compressor} - T_{friction})}{I} \quad (9)$$

که در آن T گشتاور و I گشتاور لختی محور پرخوران مکانیکی است.

۳- فرایند انتخاب تنجار برای پرخوران برقی

اولین و مهم‌ترین قدم در مجهز کردن یک موتور پرخوران به پرخوران برقی انتخاب تنجار متناسب با عملکرد موتور است. فرایند انتخاب تنجار مناسب شامل مراحل بدین شرح است [۱۲]:

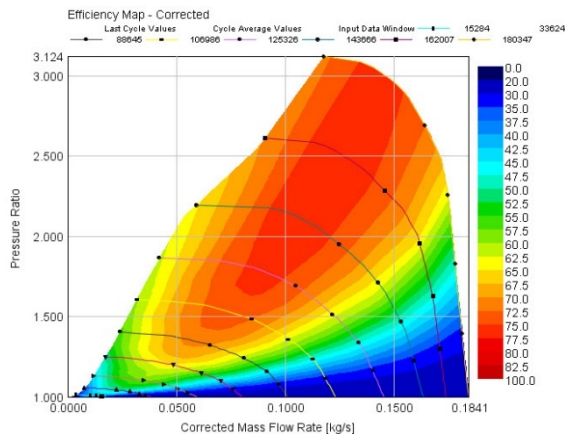
۱. در هر دور موتور ابتدا شار حجمی ورودی به موتور محاسبه شده و از میان تنجارهای موجود، تنجارهایی که این شار حجمی، در محدوده عملکردی آنها قرار دارد، انتخاب می‌شود.



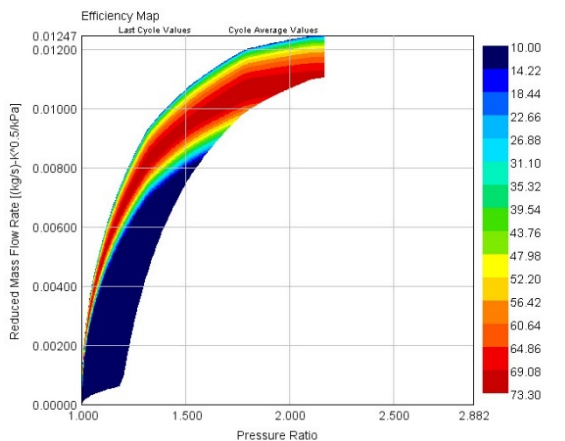
شکل ۴: فشار استوانه بر حسب درجه لنگ در سرعت موتور ۲۵۰۰ د.د.د.

۲. پرخوران مکانیکی

پرخوران استفاده شده بر روی موتور ملی دارای تنجاری با قطر نوک پره ۴۴٫۲ میلی‌متر و گردایی با قطر ۳۹٫۹ میلی‌متر است که به‌وسیله یک محور با لختی ۰٫۰۰۰۰۲ کیلوگرم. مترمربع به یکدیگر متصل شده‌اند. در شکل (۵) و (۶) بترتیب نقشه تنجار و گردای موتور ملی پرخوران ارائه شده است.

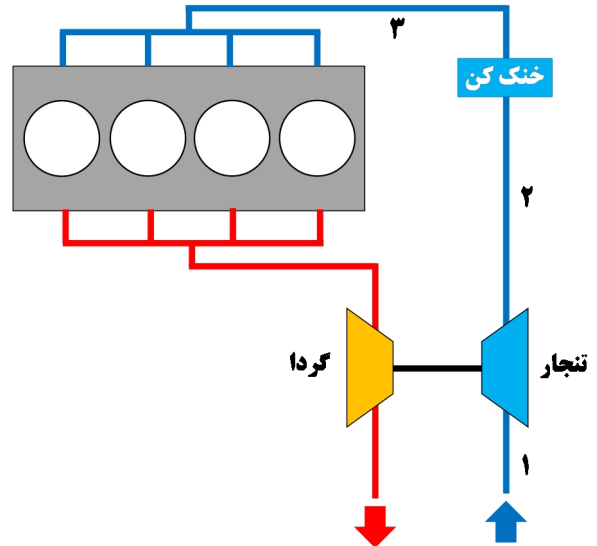


شکل ۵: نقشه تنجار موتور ملی پرخوران



شکل ۶: نقشه گردای موتور ملی پرخوران

لحاظ گشتاور تولیدی موتور در حالت گذرا، دمای هوای ورودی به موتور و بار حرارتی بر روی تنجار پرخوران برقی. (مکان‌های ۱، ۲ و ۳ در شکل (۳)). ۲. مقایسه میان موتور ملی در سه نوع تنفس طبیعی، دارای پرخوران مکانیکی و موتور مجهز به پرخوران برقی



شکل ۳: نقاط آزمایشی قرارگیری پرخوران برقی

مشخصات اجزا شبیه‌سازی شده:

۱. موتور

مشخصات موتور ملی در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات موتور ملی

تعداد استوانه	۴
قطر استوانه	۷۸٫۶ میلی‌متر
طول مسیر سمبه	۸۵ میلی‌متر
طول دسته سمبه	۱۳۴ میلی‌متر
نسبت تراکم	۱۰٫۸
ظرفیت موتور	۱۶۴۹ سی‌سی

به‌منظور شبیه‌سازی دقیق فرایند احتراق در نرم‌افزار، اطلاعات فشار درون استوانه در هر دور موتور در حالت تمام بار به عنوان تابعی از درجه لنگ در آزمایشگاه و با حسگرهای فشار تعبیه شده در محفظه احتراق، اندازه‌گیری و به عنوان ورودی به نرم‌افزار داده شده است. به عنوان مثال فشار درون استوانه در سرعت موتور ۲۵۰۰ د.د.د در حالت تمام بار در سوخت و هوا تا نقطه مکث بالا، فشار استوانه تا ۳۵ بار افزایش پیدا کرده است و پس از آن با افزایش درجه لنگ به مقدار ۱۰ درجه، فشار درون استوانه تا مقدار ۳۳ بار افت می‌کند (این کاهش جزئی فشار ناشی از افزایش حجم مخلوط است). سپس مخلوط سوخت و هوا با جرقه شمع محترق شده و موجب افزایش فشار استوانه تا حدود ۵۰ بار شده است.

روند شبیه‌سازی

روند شبیه‌سازی موتور در نرم‌افزار GT-Power شامل چهار مرحله کلی است. ۱. انتخاب اجزا مورد نیاز شبیه‌سازی ۲. مقدار دهی به متغیرهای هر جز ۳. اتصال اجزا ۴. صحت‌سنجی نتایج نرم‌افزار GT-Suite یک نرم‌افزار صنعتی برای شبیه‌سازی خودرو است. این نرم‌افزار شامل کتابخانه‌ای کامل متشکل از تمام اجزا مورد نیاز برای شبیه‌سازی فرایندهای انجام شده در یک خودرو است که از جمله آنها می‌توان به شبیه‌سازی جریان سیال و انتقال حرارت، شبیه‌سازی مکانیکی، برقی، مدیریتی و شیمیایی اشاره نمود. همچنین در نگاه کلی‌تر این نرم‌افزار قابلیت شبیه‌سازی فیزیک انواع وسایل نقلیه، موتور خودرو، سامانه انتقال قدرت، سامانه ترمز، تجهیزات پایش آلایندگی و . . را دارد.

در شبیه‌سازی انجام شده از نرم‌افزار GT-Power استفاده شده است. GT-Power یکی از زیرمجموعه‌های GT-Suite است که موتور را تحلیل می‌کند. یکی از نکات قابل توجه در استفاده از نرم‌افزار، قابلیت آن در دریافت اطلاعات حاصل از آزمایشات تجربی به عنوان ورودی است که این ویژگی به نزدیک شدن هرچه بیشتر شبیه‌سازی به نمونه واقعی کمک می‌کند.

حل معادلات سیالاتی در این نرم‌افزار بر اساس دینامیک سیالات یک بعدی است که برای شبیه‌سازی جریان سیال و انتقال حرارت داخل راهگاه‌ها و دیگر اجزا شامل جریان سیال استفاده می‌شود.

مراحل شبیه‌سازی

در قدم اول تمام اجزا مورد نیاز شبیه‌سازی شامل (راهگاه‌ها، استوانه‌ها، دریچه‌ها، سامانه پاشش سوخت، سامانه‌های مدیریتی و...) انتخاب شده و متغیرهای هر جزء با توجه به مشخصات موتور (مانند هندسه اجزا، مواد به کار رفته و . . .)، نحوه عملکرد هر جزء (مانند سامانه‌های مدیریتی) و ویژگی‌های سیال ورودی، مقداردهی می‌شوند، سپس این اجزاء به هم متصل شده و شکل نهایی حاصل می‌گردد. پس از شبیه‌سازی و گرفتن خروجی از نرم‌افزار، مهم‌ترین مرحله، صحت‌سنجی اطلاعات خروجی از نرم‌افزار است. بدین ترتیب که نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی نظیر گشتاور، قدرت، دما و... با اطلاعات تجربی حاصل از آزمایش موتور مقایسه و در صورت عدم تطابق کامل اطلاعات، فرایند شبیه‌سازی باید بازبینی شود.

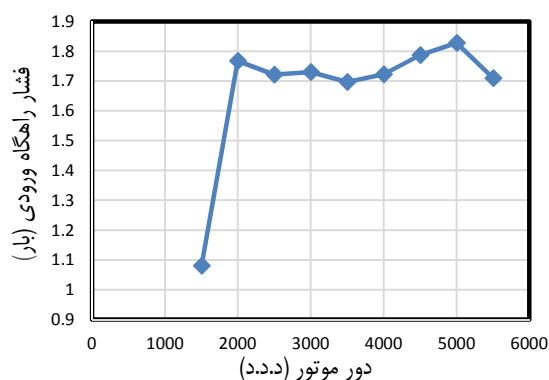
فرایند شبیه‌سازی موتور ملی تنفس طبیعی و پرخوران با جزئیات کامل انجام گرفته (شکل ۹) و نتایج حاصل با آزمایش‌های تجربی انجام شده در اتاق آزمون موتور، صحت‌سنجی شده است. به عنوان مثال در شکل (۱۰) مقایسه‌ای میان گشتاور خروجی حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی برای موتور پرخوران انجام شده است. با توجه به شکل، میانگین درصد خطای شبیه‌سازی ۲,۳ درصد بوده است که نشان از نزدیکی نتایج شبیه‌سازی به نتایج آزمایش دارد.

گردای پرخوران مکانیکی یک دریچه هدر رو دارد که مقدار باز شدن آن با یک تنظیم‌کننده و بر اساس فشار چند راهه ورودی به استوانه و فشار ورودی به تنجار مدیریت می‌شود.

بدین صورت که تنظیم‌کننده به وسیله حسگر فشار موجود در چندراهه ورودی، فشار را از این قسمت خوانده و مقدار باز شدن دریچه هدر رو را طوری تنظیم می‌کند که توان تولیدی گردا برای ایجاد فشار مطلوب در چندراهه ورودی کافی باشد.

فشار مطلوب بر اساس انتظارات طراح از توان خروجی موتور، ظرفیت مکانیکی و حرارتی موتور و دیگر عوامل تعیین می‌شود. در شکل (۷) فشار مطلق راهگاه ورودی موتور ملی پرخوران در دور موتورهای مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل در دور موتور ۱۵۰۰ د.د.د، مقدار پرخوران‌سازی در راهگاه هوا ناچیز است. علت این امر کمبود حجم دود برای عملکرد مناسب گردا و به تبع آن عملکرد مناسب تنجار است.

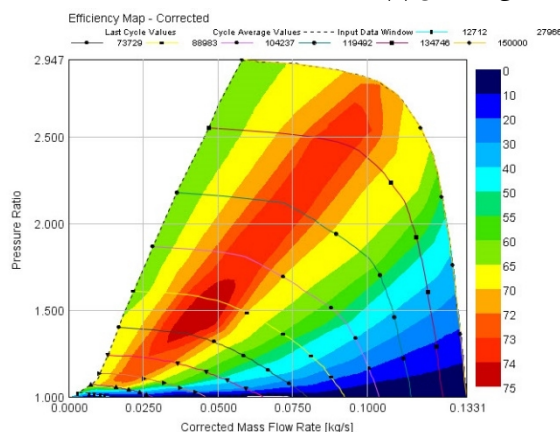
از سوی دیگر با توجه به نقشه عملکردی تنجار می‌توان دریافت، انتخاب پرخوران مکانیکی با طراحان موتور، با هدف بهینه بودن عملکرد پرخوران در دور موتورهای بزرگتر از ۲۰۰۰ د.د.د است.



شکل ۷: فشار مطلق چند راهه ورودی با تنظیم دریچه هدر رو

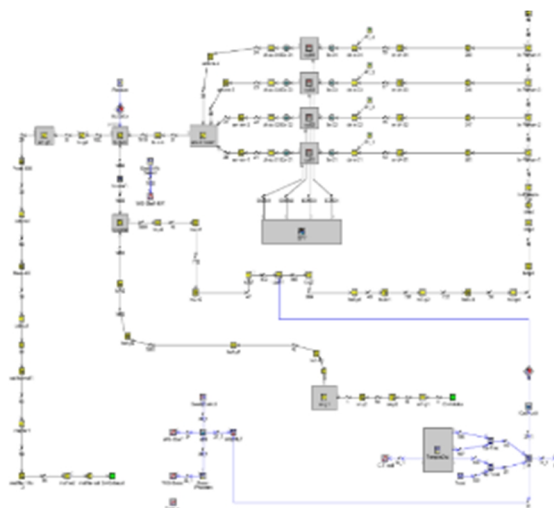
۳. پرخوران برقی

پرخوران برقی دارای تنجاری با قطر نوک پره ۵۶,۲۷ میلی‌متر است که نقشه آن در شکل (۸) ارائه شده است.

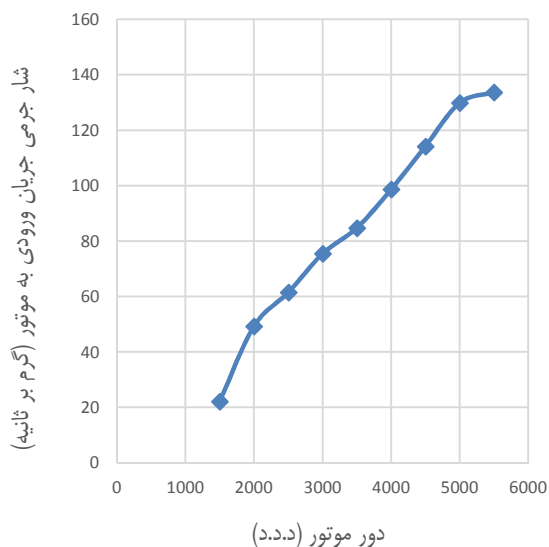


شکل ۸: نقشه تنجار استفاده شده برای پرخوران برقی

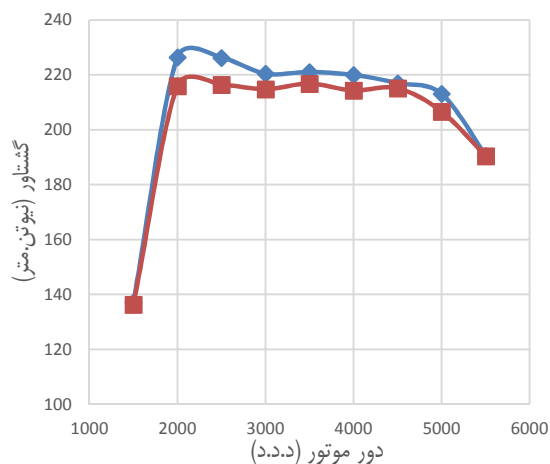
پرخوران برقی زمانی وارد مدار جریان سیال می‌شود که پرخوران مکانیکی قادر به ایجاد نسبت فشار مطلوب در چندراهه ورودی نبوده و یا ایجاد این فشار با تأخیر صورت گیرد. لذا در غیر اینصورت پرخوران برقی غیر فعال و از مدار خارج می‌شود. برای عبور جریان در شرایطی که پرخوران برقی غیر فعال است، یک مسیر فرعی موازی با پرخوران طراحی شده است. این مسیر دارای یک دریچه قابل پایش است که به هنگام غیر فعال شدن پرخوران برقی باز می‌شود و جریان سیال از مسیر فرعی عبور می‌کند (شکل ۱۲).



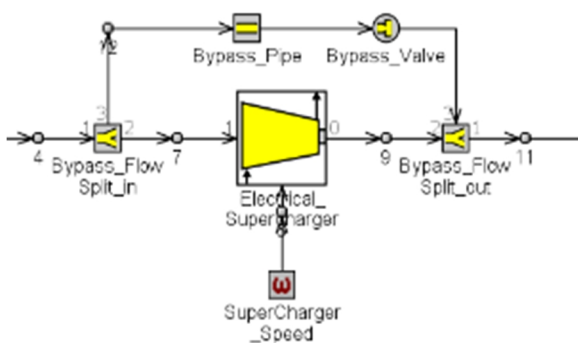
شکل ۹: موتور ملی پرخوران شبیه‌سازی شده در GT-Power



شکل ۱۱: شار جرمی ورودی به موتور در موتور ملی پرخوران



شکل ۱۰: مقایسه میان گشتاور خروجی حاصل از نتایج آزمایش و شبیه‌سازی، موتور ملی پرخوران



شکل ۱۲: پرخوران برقی شبیه‌سازی شده در GT-Power

برای شبیه‌سازی رفتار موتور برقی در نرم‌افزار، از جزء SpeedBoundaryRot استفاده شده است و به وسیله آن سرعت دورانی مطلوب به تنجار اعمال شده است. در شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ بترتیب نمونه شبیه‌سازی شده چپ‌های ۱، ۲ و ۳ در نرم‌افزار، ارائه شده است.

پس از صحت‌سنجی مدل موتور، فرایند شبیه‌سازی پرخوران برقی در سه نقطه ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده در شکل ۳ به منظور یافتن چپ‌های بهینه انجام گرفته است. از آنجایی که اکثر مشکلات پرخوران‌سازی، وابسته به سرعت‌های کند موتور است، انتخاب تنجار برای پرخوران برقی باید بر همین مبنا انجام شود. بدین معنی که تنجار انتخاب شده باید دارای بهترین عملکرد در محدوده شار دور کند باشد.

در شکل (۱۱) شار جرمی جریان در هر دور موتور برای موتور پرخوران ارائه شده است.

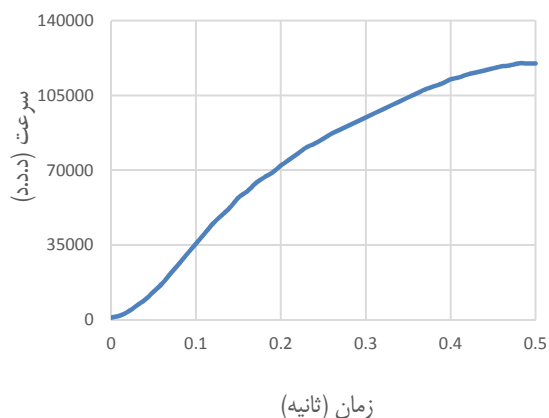
پس از طی مراحل و محاسبات انتخاب تنجار، تنجار ساخته شده با شرکت ایریستک انتخاب شد. این شرکت از این تنجار به منظور پرخوران‌سازی برقی یک موتور چهار استوانه ۲ لیتری استفاده کرده است [۱۰]. این تنجار دارای نسبت فشار مطلوب و همچنین بیشترین بازده در محدوده شار جریان سیال در دورهای کند موتور است.

۵- نتایج و بحث

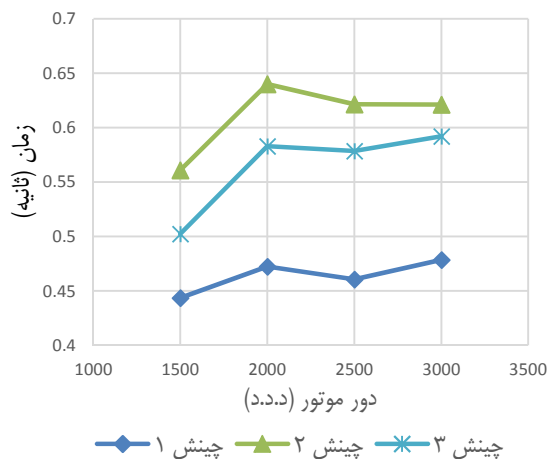
در بخش اول به ارائه نتایج حاصل از بررسی مکان پرخوران برقی در راهگاه هوا می‌پردازیم.

عملکرد گذرای موتور

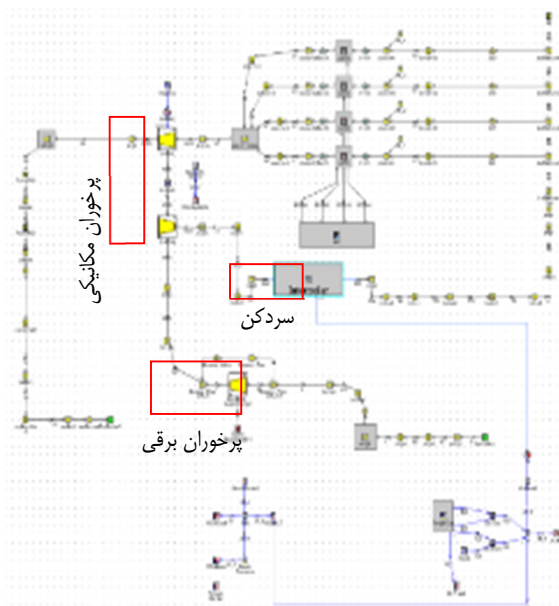
معیاری که به منظور مقایسه کمی عملکرد گذرای موتور در چپش‌های مختلف پرخوران برقی در نظر گرفته شده است، زمان رسیدن موتور به بیشینه گشتاور در هر دور موتور است. بدین صورت که در ابتدای شبیه‌سازی دور محور پرخوران مکانیکی ۱۵۰۰۰ د.د.د و پرخوران برقی غیر فعال است. با شروع شبیه‌سازی در حالت تمام بار، پرخوران برقی فعال شده و سرعت آن طبق شکل (۱۶) در ۰٫۵ ثانیه به ۱۲۰۰۰۰ د.د.د می‌رسد. در نتیجه نسبت فشار ورودی به موتور افزایش یافته و متعاقب آن گشتاور موتور و دور پرخوران مکانیکی افزایش پیدا می‌کند. تمامی مراحل فوق در دور موتور ثابت و در حالت تمام بار انجام شده و زمان رسیدن موتور به بیشینه گشتاور در هر دور موتور ثبت می‌شود. این آزمون برای هر چپش در دور موتورهای ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰ د.د.د انجام شده است.



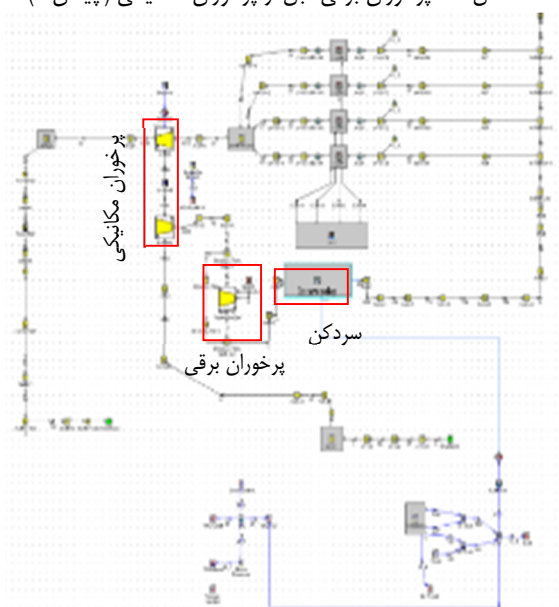
شکل ۱۶: نمودار افزایش سرعت موتور برقی استفاده شده در سامانه پرخورانی برقی



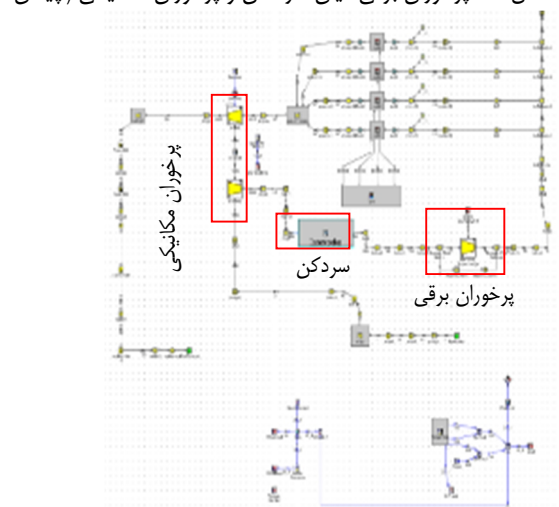
شکل ۱۷: مدت زمان رسیدن به بیشینه گشتاور در دور موتورهای مختلف



شکل ۱۳: پرخوران برقی قبل از پرخوران مکانیکی (چپش ۱)

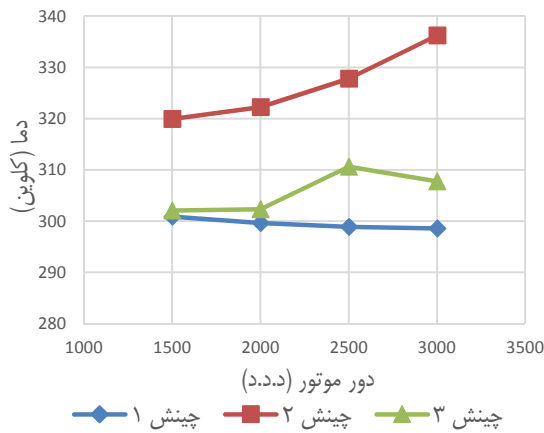


شکل ۱۴: پرخوران برقی میان سرد کن و پرخوران مکانیکی (چپش ۲)



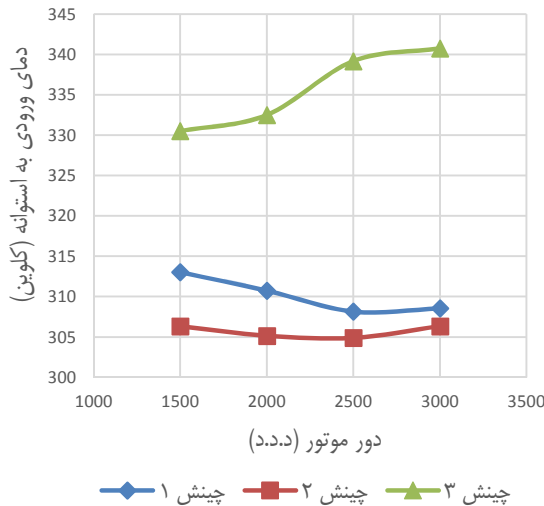
شکل ۱۵: پرخوران برقی بعد از سرد کن (چپش ۳)

امر را می‌توان دمای کمتر جریان ورودی به پرخوران برقی در چینش ۱ دانست. هرچه دمای ورودی به تنجار گرمتر باشد تنجار با بازده کمتر و نزدیک‌تر به خط نوسان شدید کار می‌کند.



شکل ۲۱: دمای جریان ورودی به تنجار پرخوران برقی در سه چینش

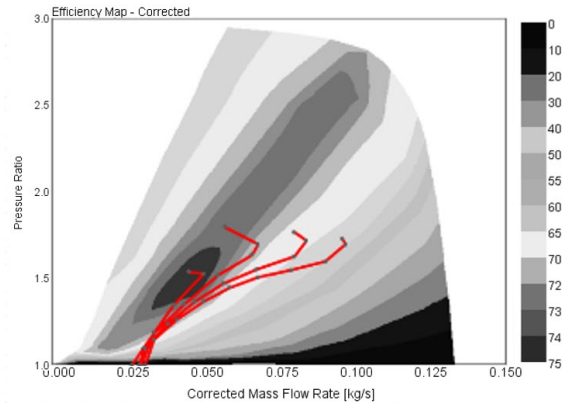
پس از بررسی بازده تنجار پرخوران برقی، دمای ورودی به موتور در سه چینش مختلف بررسی شده است. در شکل (۲۲) نمودار دمای ورودی به استوانه در دور موتورهای مختلف برای سه چینش نشان داده شده است. با توجه به شکل در چینش ۱ و ۲ دمای ورودی به موتور بسیار کمتر از چینش ۳ است. دلیل این امر جایگزینی پرخوران برقی بلافاصله در بالادست چندراهه ورودی به استوانه در چینش ۳ است که در این شرایط سیال بدون خنک‌سازی وارد موتور می‌شود.



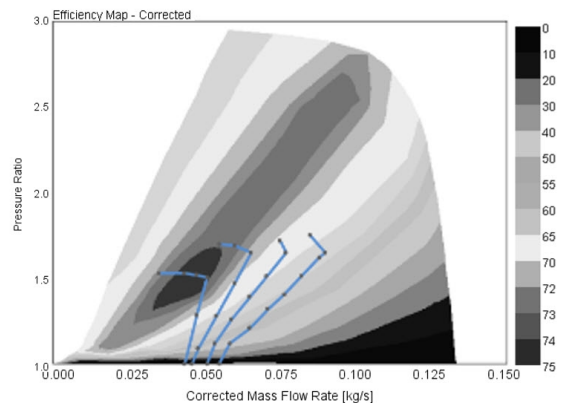
شکل ۲۲: دمای جریان ورودی به موتور در سه چینش

عملکرد پایای موتور در دور کند برای مقایسه عملکرد پایای موتور در چینش‌های مختلف، از متغیر گشتاور در دور موتور ۱۵۰۰ د.د.د استفاده شده است. در سایر دور موتورها عملکرد پرخوران مکانیکی در حالت پایا به گونه‌ای است که

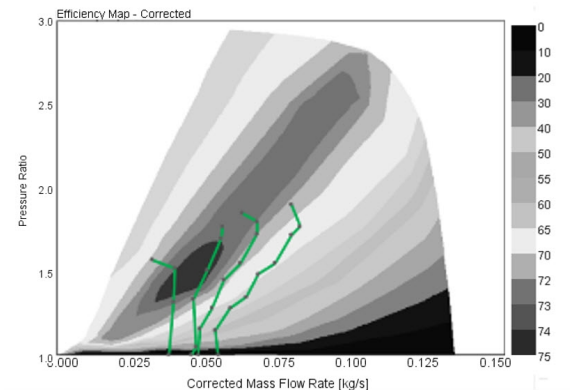
باتوجه به نتایج به دست آمده بهترین عملکرد گذرا برای چینش ۱ به دست آمده است. برای تحلیل چرایی این نتیجه، نقشه‌های تنجار پرخوران برقی و مکانیکی به همراه نمودار دمای جریان ورودی به موتور و پرخوران برقی گزارش شده است. در شکل‌های (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) مسیر نقاط عملکردی در تنجار پرخوران برقی برای سه چینش آمده است و هر کدام از شاخه‌ها متعلق به یک دور موتور است.



شکل ۱۸: مسیر نقاط عملکردی تنجار پرخوران برقی در چینش ۱



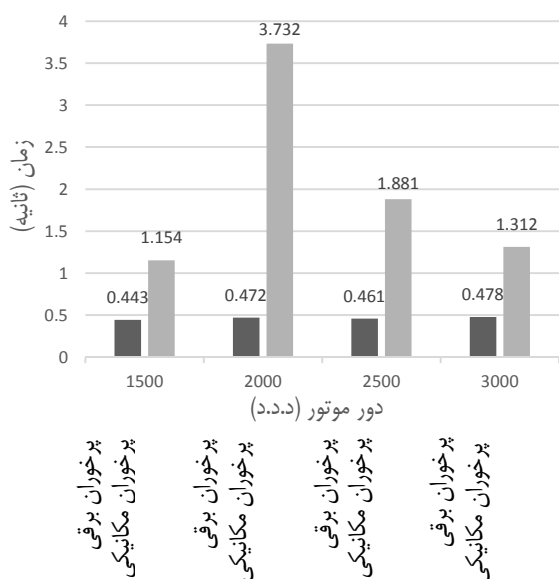
شکل ۱۹: مسیر نقاط عملکردی تنجار پرخوران برقی در چینش ۲



شکل ۲۰: مسیر نقاط عملکردی تنجار پرخوران برقی در چینش ۳

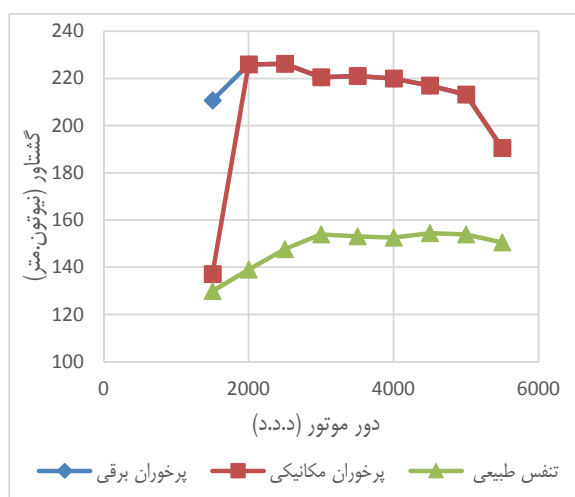
طبق نتایج موجود در شکل، بازده تنجار پرخوران برقی در چینش ۱ نسبت به سایر چیدمان‌ها مقدار بیشتری را اتخاذ کرده است. علت این

رسیدن به بیشینه گشتاور برای دو موتور ملی دارای پرخوران مکانیکی و موتور ملی دارای پرخوران برقی انجام شده است.



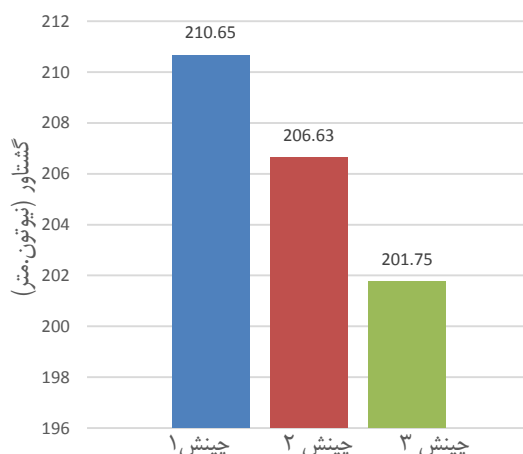
شکل ۲۴: مدت زمان رسیدن به بیشینه گشتاور در دور موتورهای مختلف

تأثیر استفاده از پرخوران برقی در عملکرد گذرای موتور در شکل (۲۴) نشان داده شده است. با توجه به شکل زمان رسیدن به بیشینه گشتاور در سرعت موتور ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ بترتیب کاهش ۶۲ و ۸۷ درصدی داشته است. این کاهش چشمگیر به دلیل عملکرد بسیار نامناسب پرخوران مکانیکی در این دور موتورها است که پرخوران برقی به جبران آن کمک می‌کند. در شکل (۲۵) عملکرد پایایی سه موتور ذکر شده مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل، تأثیر استفاده از پرخوران برقی در دور موتور ۱۵۰۰ د.د.د مشهود است.



شکل ۲۵: مقایسه گشتاور حالت پایا در سه موتور ملی تنفس طبیعی، دارای پرخورانی مکانیکی و موتور مجهز به پرخوران برقی

نیازی به استفاده از پرخوران برقی وجود ندارد. در شکل (۲۳) مقایسه‌ای بین گشتاور خروجی موتور در حالت پایا انجام گرفته است. با توجه به شکل، عملکرد پایایی موتور از بیشترین به کمترین مقدار بترتیب برای چینش‌های ۱، ۲ و ۳ است. در چینش ۱ و ۲ جریان قبل از ورود به استوانه از خنک‌کننده عبور کرده و با کاهش دما و افزایش چگالی همراه است؛ اما در چینش ۳ جریان پس از افزایش فشار با پرخوران برقی بدون خنک‌سازی وارد استوانه می‌شود. با توجه به یکسان بودن نسبت فشار مطلوب در راهگاه هوا برای سه چینش، می‌توان انتظار داشت در این حالت جرم سیال ورودی به استوانه کمتر باشد.



شکل ۲۳: مقایسه گشتاور حالت پایا در سرعت موتور ۱۵۰۰

بارحرارتی تنجارها

به منظور بررسی بار حرارتی وارد شده بر تنجارها از داده‌های شکل (۲۱) برای مقایسه دمای جریان ورودی به تنجار پرخوران برقی در چینش‌های مختلف استفاده شده است. بر طبق این مقایسه بار حرارتی وارد بر تنجار از ضعیف به شدید بترتیب در چینش ۱ و ۳ و ۲ به دست آمده است. از طرفی در چینش ۱ بار حرارتی وارد بر تنجار پرخوران مکانیکی مقدار بیشتری دارد. در چینش ۱ جریان ورودی به تنجار پرخوران برقی مستقیماً از محیط وارد می‌شود ولی در چینش ۲ و ۳ جریان پس از گذر از پرخوران مکانیکی وارد پرخوران برقی می‌شود که طبیعتاً با یک مرحله فشرده‌سازی دمای گرمتری از دمای محیط دارد؛ اما با این حال در چینش ۳ بین پرخوران برقی و مکانیکی خنک‌کننده‌ای وجود دارد که به کاهش بار حرارتی و همچنین افزایش بازده تنجار پرخوران برقی کمک می‌کند؛ بنابراین چینش انتخاب شده برای پرخوران برقی چینش ۱ است.

در بخش دوم مقایسه میان موتور ملی در سه نوع تنفس طبیعی، دارای سامانه پرخورانی مکانیکی و موتور مجهز به پرخوران برقی با چینش برگزیده، پرداخته شده است. در شکل (۲۴) این مقایسه میان زمان

پرخوران برقی به عملکرد پایای موتور نیز کمک کرد، به طوری که گشتاور در سرعت ۱۵۰۰ د.د.د نسبت به موتور پرخوران عادی با افزایش ۵۳ درصدی همراه بود. این مطلب به طراحان کمک می‌کند تا با آزادی عمل بیشتری به بهینه‌سازی عملکرد پرخوران مکانیکی در سرعت‌های تندتر موتور بپردازند و عملکرد موتور در دور کند را با پرخوران برقی بهبود بخشند. آنچه می‌تواند به عنوان تحقیقات بعدی در ادامه این بررسی دنبال شود، تمرکز بر روی تأثیر پرخوران برقی بر عملکرد موتور در بار جزئی^{۲۴} است. این بررسی می‌تواند معیاری تعیین کننده در مقدار کاهش مصرف سوخت و کاهش آلاینده‌گی باشد.

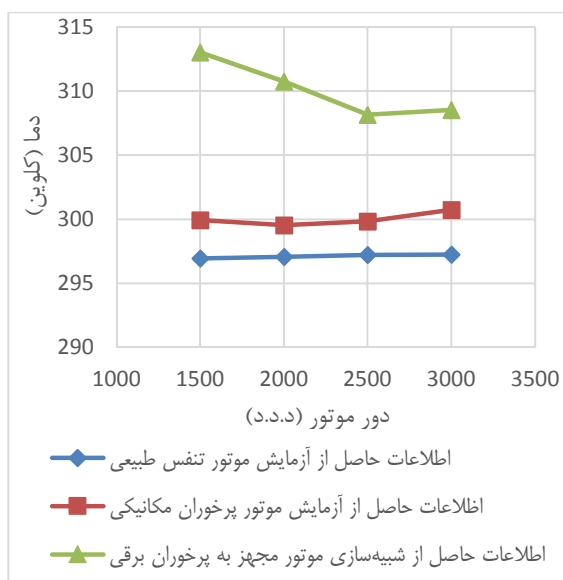
تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) اعلام می‌دارند.

مراجع

- [1] A. Lefebvre, S. Guilain, Modelling and Measurement of the Transient Response of a Turbocharged SI Engine, SAE Technical Paper 2005-01-0691, 2005
- [2] C. Balis, P. Barthelet, C. Morreale, Electronic boosting its influence on downsizing and transient torque, MTZ worldwide, Vol. 63, Issue. 9, pp. 50-53, 2002
- [3] K. A. Zinner, Supercharging of Internal Combustion Engines, Springer Berlin Heidelberg, Chapter 12, 1978
- [4] S. Biwersi, S. Tavernier, S. Equoy, Electric Compressor with High-Speed Brushless DC Motor, MTZ worldwide, Vol. 73, Issue. 12, pp. 50-53, 2012
- [5] S. Biwersi, S. Tavernier, Electric Motor Improves Performance of Turbo and Compressor Charging, ATZelektronik worldwide, Vol. 6, Issue. 3, pp. 14-17, 2011
- [6] R. Aymanns, T. Uhlmann, C. Nebbia, T. Plum, Electric Supercharging New Opportunities with Higher System Voltage, MTZ worldwide, Vol. 75, Issue. 7, pp. 4-11, 2014
- [7] P. Newman, N. Luard, S. Jarvis, S. Richardson, T. Smith, R. Jackson, C. Rochette, D. Lee, M. Criddle, Electrical supercharging for future diesel powertrain applications, 11th International Conference on Turbochargers and Turbocharging, pp. 207-216, 2014
- [8] Y. Yamashita, S. Ibaraki, K. Sumida, M. Ebisu, B. An, H. Ogita, Development of Electric Supercharger to Facilitate the Downsizing of Automobile Engines, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, Vol. 47 No. 4, pp. 7-12, 2010
- [9] S. Rothgang, M. Pachmann, S. Nigrin, M. von Scheven, The Electric Supercharger Challenge, Conception and Implementation, MTZ

در شکل (۲۶) متوسط دمای ورودی به استوانه در این سه موتور بررسی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به دلیل استفاده از سردکن در موتور پرخوران مکانیکی، متوسط دمای ورودی به استوانه، به طور میانگین در این ۴ دور موتور تنها ۳ درجه از موتور تنفس طبیعی بیشتر است اما در موتور مجهز به پرخوران برقی، افزایش دمای بیشتری مشاهده می‌شود که دلیل این امر استفاده از یک سردکن در عین پرخوران‌سازی دو مرحله‌ای است.



شکل ۲۶: دمای جریان ورودی به موتور در سه موتور ملی تنفس طبیعی، دارای پرخورانی مکانیکی و موتور مجهز به پرخوران برقی

در مقاله حاضر، استفاده از پرخوران برقی تنها برای شتاب‌گیری اولیه خودرو فرض شده است. در این شرایط پرخوران برقی تنها چند ثانیه وارد مدار می‌شود تا با ایجاد نسبت فشار مناسب به افزایش گشتاور موتور و دور محور پرخوران مکانیکی کمک کند. سپس از مدار خارج می‌شود و عملاً دیگر تاثیری بر روی دمای جریان ورودی به استوانه نمی‌گذارد؛ بنابراین در این مقاله به استفاده از تنها یک سردکن اکتفا شده است. حال آنکه در صورت استفاده از پرخوران برقی برای مدت قابل ملاحظه، نیاز به استفاده از سردکن دوم پررنگ خواهد شد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله استفاده از پرخوران برقی بر روی موتور ملی پرخوران بررسی شد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، مکان مناسب قرارگیری پرخوران برقی در راهگاه هوا، بالادست پرخوران مکانیکی است. همچنین نتایج حاکی از بهبود عملکرد گذرای موتور بویژه در دور موتورهای ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ د.د.د است. این موضوع در شتاب‌گیری خودرو و کاهش آلاینده‌های ناشی از احتراق نامناسب تأثیر به‌سزایی دارد.

- [11] J. King, A. Fraser, G. Morris, D. Durrieu, Electrification Boost for Downsized Gasoline Engine, Auto Tech Review, Vol. 1, Issue. 9, pp. 40-46, 2012
- [12] N.C. Baines, Fundamentals of Turbocharging, Concepts ETI. 2005

worldwide, Vol. 76, Issue. 9, pp. 4-9, 2015

- [10] B. Richards, T.H. Hiep, O. Porter, M. Parrett, P. Matajsz, Downsized Gasoline Engine with a High-Speed, Permanent Magnet Electric Supercharger, 4th International on Energy Efficient Vehicles, Dresden, Germany, 2015



The effect of using electric supercharging on the performance of a SI-TC engine

A. Mohammadebrahim^{1*}, M. Ehteram², M. Salimian³, V. Khoramirad⁴

¹ Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran, m.brahim@araut.ac.ir

² Department of Mechanical & Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, m_ehteram@sbu.ac.ir

³ Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran, hosein.salimian@gmail.com

⁴ Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran, v.khorrami@yahoo.com

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 20 March 2016

Accepted: 25 June 2016

Keywords:

electric supercharger

turbo lag

GT-Power

ABSTRACT

Implementing turbocharger is a well-known technology to down-sizing of the internal combustion engine with keeping the torque and power output. But, implementing this technology has some problems such as delays in transient engine operation period, and pressure increment in exhaust pipe. Implementation of electrical supercharger besides the turbocharger is a solution to overcome these problems. In this paper, the use of electrical supercharger on a four-cylinder turbocharged IC engine, has investigated. For this purpose, the well-known engine simulation software, GT-Power has been implemented to evaluate the optimum location of electrical supercharger in the intake air passages. Simulation results show superiority of engine performance is achieved when electrical super charger is located on the upstream of mechanical turbocharger. In the next step, a comparison between the performance of simulated engine and the turbocharged engine, performed. Results of this comparison showed that the use of electric turbocharger dramatically improves transient performance of the engine.

