

**توسعه یک موتور احتراقی کوچک دوار SI / CI**

**چرخه هیبریدی با توان بالا**

همانطور که از نام آن مشخص است، HEHC تلاش می­کند تا بهترین ویژگی­های چند چرخه ترمودینامیکی شامل دیزل[[1]](#footnote-1)، اتو[[2]](#footnote-2) و اتکینسون[[3]](#footnote-3) را با هم ترکیب (هیبریداسیون) کند تا موتور با بازده بالا ایجاد کند. در بهترین شکل، HEHC ویژگی­های زیر را با هم ترکیب می­کند:

• نسبت تراکم بالای هوا (مانند چرخه دیزل)

• احتراق حجم ثابت (ایزوکوریک ) (مانند چرخه اتو) احتراق طولانی مدتی در حجم نزدیک TDC (نقطه مرگ بالا)انجام می¬دهد.

• انبساط بیش از حد تا فشار اتمسفر (مانند چرخه اتکینسون).

چرخه HEHC توسط مایع پیستون توسعه داده شده است و در [7، 8، 9]ثبت شده است. ساختار X که بعدها با جزئیات آن شرح داده شده، برای انجام این چرخه طراحی شده است، و همچنین در [19، 20] ثبت شده است. در نسخه احتراق تراکمی (CI) چرخه HEHC ، هوای تازه (بدون سوخت) تا یک CR بالایی در محفظه احتراق متراکم شده است. سوخت درست قبل از نقطه مرگ بالا به درون محفظه احتراق تزریق شده است و CI (احتراق تراکمی) اتفاق می­افتد. حداکثر احتراق تحت شرایط نسبتا حجم ثابت اتفاق می­افتد، این حالت با قرار گرفتن طولانی مدت حجم محفظه احتراق در نزدیکی TDC بدست می­آید. سپس گاز حاصل از احتراق تا حجم بیشتری نسبت به حجم مکش اولیه منبسط می­شود. شکل 1 نشان می­دهد که یک منطقه بسیار بزرگتری را، در مقایسه با چرخه­های اتو و دیزل، توسط منحنی­های ترمودینامیکی پوشش داده شده است، بنابراین نشان دهنده بازده بیشتری است.

چرخه HEHC همچنین می­تواند با SI عمل کند، اگر چه با بازده کمتر. در این حالت مخلوط سوخت و هوا تا یک نسبت تراکم پایین تری، مشابه سیکل استاندارد موتور اتو متراکم شده است. کاهش در CR موجب کاهش در بازده در مقایسه با CI می­شود، اما قرار گرفتن حجم احتراق در نزدیکی TDC باعث فشار حداکثر و بازده بالاتری نسبت به موتور­های پیستونی که به صورت SI عمل می­کنند، می­شود. این موضوع به تغییرات آهسته تر جابه جایی در نزدیکی TDC نسبت به موتورهای پیستونی مرتبط است. انبساط بیش از حد مانند چرخه اتکینسون موجب افزایش بازده می­شود. قرار گرفتن حجم در TCD به موتور این اجازه را می­دهد که احتراق حجم ثابت (ایزوکوریک اضافی) واقعی­تری، در مقایسه با انجام پیستون با چرخه اتو بدست بیاید

چرخه HEHC با تکنیک های تقویت سازگار است، در درجه اول با اضافه کردن یک سوپرشارژر اثر آن در افزایش فشار دیاگرام PV خواهد بود. اگر انبساط بیش از حد تا نزدیکی فشار اتمسفر بدست آمده باشد، یک توربو شارژر نمی­تواند مورد استفاده قرار گیرد، اما یک سوپرشارژر هنوز هم کار خواهد کرد. در این مقاله ما در مورد حالت بدون سوپرشارژر تمرکز خواهیم کرد.

مدل ترمودینامیکی استاندارد HEHC گاز ایده آل با هدف مقایسه با چرخه­های استاندارد اتو گاز ایده آل (حرارت اضافی حجم ثابت) و دیزل (حرارت اضافی فشار ثابت) ارائه شده است. شکل 1 مقایسه کیفی دیاگرام حجم ثابت (P-V) برای هر چرخه را نشان می­دهد. تحلیل چرخه­های اتو و دیزل استاندارد گاز ایده آل برای اهداف تئوری مفید است تا روند بازده را توضیح دهند، و یک بحث مشترک در بسیاری از کتاب های درسی موتور احتراق داخلی است. این چرخه­های استاندارد گاز ایده آل فرض­های زیر را در نظر می گیرند:

• سیال کاری گاز ایده ال با گرمای ویژه ثابت است.

• احتراق به صورت انتقال گرما به محیط از منبع خارجی در حجم ثابت (HEHC و اتو) یا فشار ثابت (دیزل) مدل شده است.

• هر دو فرآیند های تراکم و انبساط به صورت آدیاباتیک و برگشت پذیر هستند.

• چرخه با انتقال حرارت به محیط کامل می¬شود.



بازده­های حرارتی هر چرخه گاز ایده آل با جزئیات قبلا در مقاله­های [10، 11، 12، 13 و 14] و همچنین در کتاب [15] توضیح داده شده اند و در اینجا توضیح داده نخواهند شد. بازده­های حرارتی هر چرخه به صورت زیر می­تواند نوشته شود:

برای یک مقایسه کمی چرخه­ها مقادیر زیر انتخاب شده­اند: CR برای چرخه اتو 9.5، برای HEHC 18.5 و برای چرخه دیزل 18.5 است. نسبت حرارت مخصوص گاز 1.4 فرض شده است. فشار مکش  و دما  به ترتیب kPa 101 و k 300 فرض شده­اند. انرژی ورودی در حین فرایند احتراق برای همه چرخه­ها  1816 فرض شده است. جدول 1 مقایسه کمی چرخه­ها را نشان می­دهد. با توجه به این تحلیل بازده ترمودینامیکی ایده آل HEHC  38 درصد بیشتر از دیزل ، و 35 درصد بیشتر از چرخه اتو است.

بازده واقعی برای هر چرخه کمتر از چرخه استاندارد گاز ایده آل آن است. انحرافات از چرخه ایده آل شامل نشتی (توسط ضربه)، انتقال حرارت، اصطکاک، اتلافات مکانیکی دیگر، تلفات پمپاژ، و حرارت مخصوص و خواص گاز می­شوند که تابعی از فشار، دما و محتویات سیلندر (مخلوط هوا-سوخت) هستند.

یک مدل ترمودینامیکی صفر بعدی از HEHC و ساختار X با استفاده از معادلات چرخه سوخت- هوا با اقتباس از [15] ساخته شده است. مدل صفر بعدی بیشتر شامل استفاده از زیر مدل­هایی می شود که محفظه­های کاری و دریچه­ها، خواص ترمودینامیکی گاز های سوخته و نسوخته، جرم و انرژی منتقل شده از میان مرز­های سیستم و فرآیند احتراق را توصیف می­کند. انتقال حرارت با استفاده از رایطه Woschni مدل شده است و انتقال جرم، شامل نشتی، با استفاده از معادلات جریان تراکم پذیر یک بعدی برای جریان از میان یک ارفیس[[4]](#footnote-4) مدل شده است. احتراق (اضافه شدن حرارت) از طریق توابع Wiebe اعمال می شود. توصیف کاملی از مدل در خارج از محدوده این مقاله است، اما نتایج تحلیل صفر بعدی نشان می­دهد که بازده بالا (60 درصد خاص نشان داده شده) با فرضیات معقول برای CR، نشتی، انتقال حرارت و ضرایب جریان انتخاب شده از منابع امکان پذیر است. یک اثر فشار برای مثال و نمودار P-V شبیه سازی در شکل 2 و 3 نشان داده شده است. در قسمت نتایج، فشار شبیه سازی شده در مقابل فشار اندازه گیری شده واقعی نشان داده­ایم.

**ساختار و عملکرد موتور**

شکل 4 نمای داخلی از موتور نمونه X1 (L CI 1.35 / دیزل) را نشان می­دهد. یک ویدئو از موتور X مطابق با چرخه HEHC موجود است که به وضوح عملکرد موتور و چرخه را نشان می­دهد. یک موتور تک روتور، شامل یک روتور، محفظه، شفت خارج از مرکز، وزنه متعادل کننده متقابل، صفحات جانبی مکش/تخلیه و/یا پوشش­ها می­شود. همانطور که در شکل نشان داده شده است دارای یک طرح ساده فقط با دو قسمت دوار است. ساختار X1 (70 hp) در حالت CI عمل می­کند. کوچکترین موتور از گروه، ، که بر روی چرخه HEHC اصلاح شده برای عملیات SI عمل می­کند، یک نسخه کوچکتر از X1 است. توصیف اصول عملیاتی و اجزای این موتور تقریبا مشابه است.

برای تحلیل چرخه ایده آل استاندارد هوا، مقادیر 1.3 تا 1.4 برای نمونه استفاده شده­اند. تا زمانیکه مقدار مشابه برای مقایسه چرخه­های مختلف استفاده شده است، روند بازده نشان داده شده است.

**عملکرد**

محفظه و روتور سه محفظه کاری درون موتور تشکیل می­دهند (شکل 5 را ببینید). هر یک از این محفظه ها به طور پی در پی در حالیکه روتور در آن می­چرخد، متراکم و منبسط می­شود. یک چرخه 4 مرحله ای درون هر یک از سه محفظه به طور کامل انجام شده است و این به طور همزمان اتفاق می افتد. فرآیند­ها، برای محفظه پایین سمت راست در شکل 5 توضیح داده شده، شمل موارد زیر می­شوند:

1) مکش،

2) تراکم،

3) احتراق و انبساط و

4) تخلیه.

موتور پورت بندی شده است و جریان گاز توسط مسیریابی گازهای ورودی و خروجی از طریق روتور به دست آمده است. موتور X1 دارای یک صفحه ورودی برای یک سمت محفظه، و یک صفحه خروجی به عنوان قسمت دوم محفظه آن است. هر صفحه دارای دریچه-هایی است، که به گاز اجازه می دهد تا به محیط (از طریق یک منیفولد) داخل یک کانال درون روتور جریان یابد.

**مکش**

صفحه مکش دارای سه دریچه است. هوای تازه به طور محوری از منیفولد مکش از میان دریچه جریان می­یابد. حداقل یکی از سه دریچه همیشه با کانال ورودی درون روتور درگیر است. بنابراین کانال ورودی روتور به طور پیوسته با هوای تازه از منیفولد ورودی تامین شده است. کانال ورودی اجازه جریان گاز به یکی از محفظه های کاری از طریق دریچه روی سطح شعاعی روتور را می­دهد. وقتی روتور می­چرخد، دریچه در حال حرکت است، و فقط در معرض یکی از محفظه­ها در زمان مشخص قرار گرفته است. وقتی فرآیند مکش شروع می­شود، دریچه ورودی روتور ابتدا در معرض یک محفظه مشخص قرار گرفته است هنگامی که حجم آن حداقل است.

موقعیت دریچه ورودی زمان باز و بسته شدن ورودی را تعیین می­کند. با قرار گرفتن دریچه ورودی بنابراین آن زود یا دیر بسته می­شود، حجم ورودی نهایی کوچکتر از حداکثر حجم انبساط محفظه خواهد بود، بنابراین تغییر هندسی ساده­ای می­تواند استفاده شود تا انبساط بیشتری در موتور بدست آید.

**تخلیه**

 فرآیند تخلیه شبیه فرآیند مکش است، اما در جهت عکس اتفاق می­افتد. صفحه خروجی سه دریچه دارد که به جریان محوری خروجی از کانال تخلیه در روتور اجازه می­دهد تا به منیفولد خروجی سرانجام خروج از موتور جریان یاید. در همه زمان­ها، حداقل یکی از سه دریچه درگیر با کانال خروجی در روتور است، اجازه جریان بدون وقفه را می­دهد. در ادامه فرآیند انبساط درون محفظه، هنگامی که روتور می­چرخد، یک دریچه خروجی روی سطح شعاعی روتور به محفظه باز می­شود. وقتی حجم حداکثر است دریچه باز می­شود. حرکت روتور باعث کاهش حجم می­شود، بنابراین موجب جریان گاز­های خروجی از محفظه، از طریق دریچه خروجی در روتور، از میان کانال تخلیه داخل روتور، و سرانجام به سمت منیفولد خروجی می­شود، هنگامی که گاز از میان دریچه­های صفحه خروجی عبور می­کند.

**تراکم**

پس از مرحله مکش، وقتی دریچه ورودی روتور در یکی از محفظه­های کاری بسته می­شود، حرکت روتور موجب می­شود که حجم در محفظه بعلت تراکم گاز کاهش یابد. سرانجام، در TDC، حجم محفظه به حداقل خواهد رسید، حداکثر گاز در حجم ثابت محفظه احتراق قرار گرفته، که اساسا یک دوره رکود درون محفظه است. CR بالا با داشتن محفظه احتراق کوچک بدست آمده است.

**احتراق**

 مرحله تراکم پس از آن احتراق و انبساط است. وقتی روتور به TDC نزدیک می­شود، در X1، سوخت با استفاده از یک فشار بالای سیستم تزریق سوخت متداول تزریق شده است. برای توسعه نمونه اولیه، ما از پمپ­های اتوماتیک خارج از قفسه بوش و انژکتور­ها استفاده کرده­ایم. در نزدیکی TDC، قوس محفظه با قوس روتور مطابقت می­کند، و حجم بیش از 20 درجه از چرخش روتور تقریبا ثابت باقی می ماند. در مدت این دوره، بشتر گاز در محفظه احتراق است. زمان زیادی برای تزریق سوخت وجود دارد، و موتور می­تواند حداکثر سوخت را تحت شرایط حجم ثابت قبل از شروع انبساط مخلوط کند و بسوزاند. در موتور ، سوخت و هوا از قبل مخلوط شده­اند و یک CR کمتری با SI استفاده شده است. موتور همچنان انتظار می رود از روند طولانی مدت احتراق حجم ثابت استفاده کند.

**انبساط**

 سرانجام، وقتی روتور به چرخش ادامه دهد، حجم منبسط شده است. فشار گاز به روتور اعمال می­شود که به گشتاور ترمز تبدیل می-شود. فرآیند انبساط ادامه می­یابد تا اینکه حداکثر حجم انبساط بدست آید، و دریچه خروجی روتور باز شود. اگر دریچه های مکش و خروج به طور نامتقارن قرار گرفته باشند، نسبت انبساط موثر به طور قابل توجهی بیشتر از نسبت تراکم خواهد بود، اجازه می­دهد که انرژی بیشتری از گاز به کار مفید تبدیل شود. این انبساط بیشتر همچنین دارای اثر کاهش دمای متوسط در محفظه، کاهش نیاز به سرمایش است. بعلاوه، فشار خروجی می­تواند نزدیک اتمسفر باشد- بنابراین دارای دما و فشار کمتر از اگزوز موتور سنتی است.

**آب بندی**

آب بندی روتور در موتور­های دوار وظایف مشابهی را با رینگ­های پیستون در یک موتور رفت و برگشتی انجام می­دهند زیرا آنها یک آب بند برای گاز­های حاصل از احتراق فراهم می­کنند. شکل 6 آب بندی گاز­های اصلی اجزای موتور X1 را نشان می­دهد. این\_ها شامل فیس سیل[[5]](#footnote-5) (کاسه‌نمدی که از ترشح و نشتی سیالات از اطراف محور‌های دوار جلوگیری میکند) در هر طرف روتور، سه حداکثر آب بند و حلقه های O شکل ثابت در محفظه می­شوند. فیس سیل­ها درون شیار­هایی روی سطح روتور با فنر­هایی نصب شده­اند. حداکثر آب بند­های دو تکه­ای در موتور X1 برای عملکرد آب بندی گاز بهتر در مقایسه با حداکثر آب بند یک تکه ای استفاده شده اند. با وجود ابعاد متفاوت، آب بند­ها مشابه آب بند­های مزدا RX-8 هستند.

آب بند­های گاز در ابتدا با نیروی فنر قرار گرفته اند، اما در عمل، نیرو­های گاز به مراتب بیشتر از نیروی فنر به آب بند­ها اعمال می­شوند. از آنجاییکه حداکثر آب بند­های یک موتور دوار مرسوم در شکاف­های شعاعی در هر راس روتور وارد می­شوند، قسمت عمده نیرو که روی حداکثر آب بند کار می­کند نیروی گریز از مرکز است، که یکی از محدودیت­های عمده برای طراحی حداکثر آب بند در موتور­های معمولی دوار است. به هر حال، نیروی گریز از مرکزی روی حداکثر آب بند موتور X1 وجود ندارد زیرا حداکثر آب بند در محفظه قرار دارد که یک قسمت ثابت است. همچنین شیوه روغنکاری تغییر می­کند، هنگامی که حداکثر آب بند ثابت می­تواند با مقدار کمی از روغن به طور مستقیم اندازه گیری شده در موقعیت آب بند از طریق محفظه اصلی ثابت یا قسمت جانبی محفظه روغنکاری شده باشد.

**سرمایش**

فرآیند انبساط بیش از حد HEHC دمای متوسط سیلندر را کاهش می­دهد و خروجی خنک تر است. به عبارت دیگر، دما­های احتراق بالاتر در حین احتراق حجم ثابت بدست آمده­اند. لازم به ذکر است که حتی احتراق حجم ثابت، حداکثر دما­ها و فشار­ها در HEHC با مکش طبیعی کمتر از موتور دیزل با توربو شارژر است. سرمایش برای جلوگیری از گرمای بیش از حد اجزا و فشار سایش، بخصوص بعلت تنزل فیلم روغن در سطوح مشترک آب بند ضروری است. بر خلاف موتور وانکل[[6]](#footnote-6)، احتراق در سه اتاق محفظه گسترش یافته است و هر یک از این اتاق­ها همچنین یک مرحله مکش سرد را می­بینند، بنابراین مساله گرمایش محفظه انتظار میرود کمتر از گرمایش روتور باشد. تکنیک­های سرمایش سنتی، برای مثال صندوق آب در محفظه و سرمایش روغن با گذرگاه­هایی در روتور، می­تواند مورد استفاده قرار گرفته باشد. نمونه اولیه X1 بدون سرمایش اجرا شد، همانطور که این نمونه اولیه فقط برای نشان دادن عملیات اساسی این چرخه طراحی شده بود موتور  از یک تکنیک سرمایش هوا استفاده می­کند، هوا به طور محوری از طریق روتور در امتداد تعدادی از شیار­ها جریان می­یابد. شبیه­سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در rpm 10000 و بارگذاری کامل با یک دفع حرارت 55 درصد از LHV سوخت را نشان می دهد، دمای روتور زیر  (حداکثر دمای روغن روغنکاری ) با نرخ جریان  نگه داشته شده است.

چرخه زنی مدوام یک استراتژی کنترل است که ممکن است منحصرا برای موتورهای احتراق داخلی فشرده مناسب می­باشد. اگر چنین کنترل استفاده شود، چرخه-های بدون وقفه یک اثر خنک کننده اضافی بر روی موتور خواهند داشت.

**تفاوت­ها با موتور وانکل**

موتور X برخی از مزایای ساختار موتور دوار مانند وانکل را به اشتراک می گذارد، برای مثال سادگی داشتن دو قسمت عمده متحرک ؛ لرزش کم/ روتور کاملا متعادل؛ و مزیت نداشتن هیچ جرم در حال نوسان، بنابراین موجب کاهش نیاز به فلایویل و ایجاد موتور پاسخگوتر می­شود (شکل 7 را ببینید). به هر حال، همچنین اختلافات بسیاری وجود دارد:

1. چرخه ترمودینامیکی موتور وانکل چرخه اتو است، اما اجرای پایین تری نسبت به موتور پیستونی سنتی دارد؛ موتور X به عبارت دیگر، برای کار روی چرخه HEHC با مزایای چرخه، هم CI یا SI بهینه شده است.

2. موتور X همه گاز درون محفظه احتراق ایزوله شده را متراکم می­کند. این محفظه احتراق می­تواند کوچک باشد، منجر به CR بالا­تر نسبت به موتور وانکل امکان پذیر است.

3. محفظه احتراق ایزوله شده می­تواند یک هندسه تقریبا کروی داشته باشد یعنی یک سطح کم به نسبت حجم خواهد داشت. با توجه به این که موتور­ها بخش بزرگی از حرارت خود را در طول فرآیند احتراق از دست می­دهند، موتور X یک سطح مناسبی را در طول این قسمت از چرخه خواهد داشت، که منجر به اتلاف انتقال حرارت کمتر می­شود. اگر چه در طول انبساط سطح می­تواند بزرگتر از موتور پیستونی عادی با اتلاف حرارت بیشتر باشد، ولی اکثر انتقال حرارت در طول احتراق و شروع مرحله انبساط اتفاق می­افتد.

4. موتور X، شبیه یک موتور وانکل معکوس عمل می­کند، که دارای حداکثر آب بندی­ها است که در محفظه ثابت هستند، در حالیکه حداکثر آب بند­ها در موتور وانکل در روتور هستند. بنابراین، موتور X دارای بارگذاری گریز از مرکز آب بند ها نیستند و اجازه اندازه گیری مستقیم روغنکاری آب بند­ها را می­دهد. این روش در آزمایشگاه انجام شده است تا به طور قابل توجهی سایش موتوررا کاهش دهد، در حالیکه روغن موتور را 10 برابر کمتر نسبت به موتور­های وانکل تامین می­کند.

**بازده**

مزیت اصلی موتور X اکه برای کار بر روی چرخه HEHC بهینه شده است، استفاده از CR بالا، سطح کم در طول احتراق، احتراق طولانی مدت/حجم ثابت، و انبساط بیش از حد، و کنترل اشتعال بدون وقفه برای حفظ بازده بالا حتی در بار­های کم است.

**اندازه و وزن**

 یک روتور از سه حفره درون محفظه تشکیل می­شود. برای هر چرخش روتور، سه چرخه 4 مرحله­ای به طور همزمان اجرا شده­اند، که منجر به سه احتراق در هر دوران کامل روتور می­شود. روتور به شفت با نسبت 3:2 متصل شده است، منجر به 1.5 احتراق در هر دوران کامل شفت می­شود. بنابراین موتور فشرده با دو قسمت متحرک شبیه به 3 سیلندر موتور دیزل 4 مرحله­ای رفتار می­کند (شکل 8 را مشاهده کنید).

**لرزش کم**

روتور کاملا روی مرکز دورانش بالانس شده است. روتور بر روی یک محور خارج از مرکز می­چرخد، بنابراین می تواند با وزنه های تعادل نصب شده بر روی شفت در جهت مخالف متعادل شود. در X1، با داشتن 2 وزنه تعادل در دو طرف موتور انجام شده است. در XMv3 ، یاتاقان­ها برای عمل به عنوان وزنه­های تعادل دارای وزن هستند. نیرو­های ارتعاشی و ممان­های XMv3، در مقایسه با یک تجاری 30cc و یک موتور 4-مرحله­ای (تک سیلندر) بررسی شده است، و در شکل 9 مقایسه شده­اند. نیرو­های ارتعاشی با دو مرتبه بزرگی کاهش یافته­اند.

**قابلیت چند سوختی**

 انواع مختلفی از تکنیک­ها وجود دارند که قابلیت توانایی چند سوختی در موتور X را داشته باشند. این موتور یک CR بزرگ را با فرآیند سوختن طولانی مدت کوپل می کند. انواع مختلفی از سوخت تحت CI می­تواند جایگزین شده باشد، اگر یک انژکتور سوخت مناسب توانایی تامین سوخت­های متنوع را داشته باشد. موتور همچنین می تواند درج محفظه احتراق استفاده کند، که میتواند برای تعویض سریع حفره­ها استفاده شود. بنابراین تغییر CR، هندسه محفظه احتراق، و انژکتور­های سوخت که می­توانند به محفظه احتراق جفت شوند. متناوبا، یک محفظه احتراق می تواند یک پیستون کوچک برای تغییر CR در حین اجرا ، همچنین فراهم کردن یک شمع درخشان ، شمع جرقه و انژکتور سوخت قرار دهد.



**سر و صدا**

 چهار دلیل اصلی سر و صدا در یک موتور دیزل 4 سیلندر وجود دارد:

1) افزایش سریع احتراق در مدت احتراق

2) دریچه مکش به علت تماس فلز با فلز به عنوان دریچه¬هایی باز و بسته می شوند.

3) افت سریع فشار وقتی گاز¬های خروجی در سیلندر به اتمسفر باز هستند

4) ضربه پیستون باعث ایجاد یک تماس فلز با فلز بین پیستون و سوراخ سیلندر می شود.

چرخه HEHC از فرآیند­های انبساط بیش از حد استفاده می­کند، که در آن گاز ممکن است گسترش یافته به همه روش­ها منبسط شود تا به فشار اتمسفر دست یابد، به طور قابل توجهی موجب کاهش سر و صدا اگزوز می­شود. موتور­های X در آزمایشگاه بدون لوله اگزوز (هدر­های باز) اجرا شده­اند، تفاوت کمی در سر و صدای اگزوز چه موتور در حال کار یا اشتعال باشد شنیده شده است. بعلاوه، موتور X دارای سر و صدای دریچه مکش یا ضربه پیستون نیست. سر و صدای احتراق را می توان با معرفی سوخت برای یک دوره مدت زمان طولانی­تر کاهش داد (هم تزریق نرخ پایین برای مدت طولانی و یا داشتن تزریق چندگانه). این برای زمان ماندگاری طولانی در حجم TDC مجاز است. LPI به طور رسمی سطوح سر و صدا را اندازه گیری نمی کند، در حالیکه داینو و اجزای پشتیبان کننده در برخی موارد بلند تر از خود موتور هستند. به هر حال، به نظر می رسد موتور X آرام است، زیرا سر و صدای اشتعال قابل مقایسه با رانندگی است.

**هزینه و دوام**

 به طور قابل ملاحظه­ای، هسته موتور دارای فقط پنج قسمت اولیه است، که دو تا از آنها متحرک هستند. انتظار می رود تعداد قطعات کم هزینه، مخصوصا در کار برای مونتاژ موتور تولید را کاهش دهد. نمونه­های اولیه برای ساخت عمدتا با فرز CNC طراحی شده­اند، و توجه کمی به تکنیک­های ریخته گری/ ساخت در حجم بالا داده شده است. این کار برای آینده انجام می­شود.

موتور­های وانکل دارای شهرت در حمل و نقل هوایی بدلیل قابلیت اطمینان هستند، در صورتی که شکست موتور بعید است، معمولا یک روند آهسته­ای دارد، که موتور توان کمتری را در طول زمان ایجاد می­کند، در حالیکه موتور­های پیستونی به شکست فاجعه بار شناخته شده­اند. به طور کلی سادگی موتور موجب دوام آن می­شود، وقتی اجزای کمتری برای شکست وجود دارد و موتور به سادگی سرویس می­شود. سایش اولیه اجزا در موتور X، مشابه وانکل دوار، دارای حداکثر آب بندی است. به هر حال، برخلاف موتور وانکل، حداکثر آب بند های موتور X ثابت هستند و در محفظه قرار گرفته­اند. این آب بند­ها ممکن است ساخته شده باشند تا برای سرویس نیاز به جداسازی کامل قطعات موتور نباشد. بعلاوه، تکنیک روغنکاری مستقیم منحصر بفرد انتظار می­رود از لحاظ تریبولوژی[[7]](#footnote-7) برای وانکل مطلوب باشد، بعلاوه موجب کاهش سایش اجزای آب بند شود. نمونه­های اولیه موتور X فقط تحت آزمایش اولیه قرار گرفتند، و مقدار قابل توجهی از کار برای اثبات دوام طولانی مدت موتور باقی مانده است. مدیریت حرارتی از جمله نگهداری یک فیلم روغن خوب برای همه سطوح لغزنده (از جمله آب بند) در موتور، بسیار مهم خواهد بود، اما موضوعات مشابهی در موتور­های دوار تجاری تا حد زیادی مورد توجه قرار گرفته است.

**اثر حرارتی**

به عنوان یک چرخه با بازده بالاتر، HEHC اجازه می دهد تا انرژی بیشتری به کار مکانیکی تبدیل شود و کمتر به عنوان گرما از دست برود. فرآیند انبساط بیشتر چرخه HEHC دمای خروجی را کاهش می­دهد. XMv3، که با هوا خنک شده است، هوای خنک را با جریان خروجی مخلوط می­کند، به طور قابل توجهی دمای گاز خروجی را کاهش می­دهد، که ممکن است در کاربرد­هایی خاص مطلوب باشد. دمای خروجی پایین تر ممکن است با سیستم­های انتشار کاتالیزوری خاص سازگار نباشد و برای کارهای آینده مهم است.

**References**

1. Blair, G., “Design and Simulation of Four-Stroke Engines,” (Warrendale, Society of Automotive Engineers, Inc., 1999), doi:10.4271/R-186.

2. Norbye, Jan P. “The Wankel Engine”, Bailey & Swinfen, 1971, <http://dx.doi.org/10.4271/R-186>.

 3. Yamamoto, K., Rotary Engine, Toyo Kogyo Co., Japan, 1971.

4. Ohkubo, M., Tashima, S., Shimizu, R., Fuse, S. et al., “Developed Technologies of the New Rotary Engine (RENESIS),” SAE Technical Paper 2004-01-1790, 2004, doi:10.4271/2004-01-1790.

5. Muroki, T. and Miyata, J., “Material Technology Development Applied to Rotary Engine at Mazda,” SAE Technical Paper 860560, 1986, doi:10.4271/860560.

 6. Froede, W., “The NSU-Wankel Rotating Combustion Engine,” SAE Technical Paper 610017, 1961, doi:10.4271/610017.

 7. Shkolnik, N., “Internal Combustion Power System”, US Patent 7,191,738, 2003.

 8. Shkolnik, A. and Shkolnik, N., “High Efficiency Hybrid Cycle (HEHC) Thermodynamic Cycle”, US Patent 8,365,698, 2007.

 9. Shkolnik, A. and Shkolnik, N., “High Efficiency Hybrid Cycle (HEHC) X Engine”, PCT Patent Application: US2012-0294747, 2012.

10. Nabours, S., Shkolnik, N., Nelms, R., Gnanam, G. et al., “High Efficiency Hybrid Cycle Engine,” SAE Technical Paper 2010-01-1110, 2010, doi:10.4271/2010-01-1110.

11. Shkolnik, N. and Shkolnik, A., “Rotary High Efficiency Hybrid Cycle Engine,” SAE Technical Paper 2008-01- 2448, 2008, doi:10.4271/2008-01-2448.

12. Shkolnik, N. and Shkolnik, A., “High Efficiency Hybrid Cycle Engine”, proceedings of the ASME Fall Conference on Internal Combustion Engines, ICEF2005-1221, 2005, doi:10.1115/ICEF2005-1221.

 13. Shkolnik, A., Shkolnik, N., Nabours, S., Nickerson, M., Cho, K., Shah, H., Sapre, C., Louthan, L., Danner, B., and Phillips, E., “Development of the High Efficiency X1 Rotary Diesel Engine”, 2012 Directions in Engine-Efficiency and Emissions Research (DEER) Conference, Michigan, 2012.

14. Cao, Y., “Thermodynamic Cycles of Internal Combustion Engines for Increased Thermal Efficiency, ConstantVolume Combustion, Variable Compression Ratio, and Cold Start,” SAE Technical Paper 2007-01-4115, 2007, doi:10.4271/2007-01-4115.

 15. Heywood, J., “Internal Combustion Engine Fundamentals”, McGraw-Hill, New York, 1988.

16. Shimizu, R., Tadokoro, T., Nakanishi, T., and Funamoto, J., “Mazda 4-Rotor Rotary Engine for the Le Mans 24- Hour Endurance Race,” SAE Technical Paper 920309, 1992, doi:10.4271/920309.

17. LiquidPiston ‘X’ Engine animation. Website URL: http:// liquidpiston.com/technology/how-it-works/.

 18. LiquidPiston XMv3 Engine video. Website URL: http:// vimeo.com/99002635.

 19. Shkolnik, N., and Shkolnik, A., “Cycloid rotor engine”, US Patent # 8,523,546, 2013.

20. Shkolnik, N., and Shkolnik, A., “Hybrid Cycle Combustion Engine and Methods”, US Patent # 8,794,211, 2014.

21. Li, W., Gu, F., Ball, A. D., Leung, A. Y. T., Phipps, C.E., “A Study Of The Noise From Diesel Engines Using The Independent Component Analysis”, Mechanical Systems and Signal Processing Volume 15 Issue 6, Pages 1165- 1184, 2001, doi:10.1006/mssp.2000.1366.

1. Diesel [↑](#footnote-ref-1)
2. Otto [↑](#footnote-ref-2)
3. Atkinson [↑](#footnote-ref-3)
4. Orifice [↑](#footnote-ref-4)
5. Face seal [↑](#footnote-ref-5)
6. Wankel [↑](#footnote-ref-6)
7. Tribological [↑](#footnote-ref-7)