



طراحی انجن هوای فشرده دوستروک بروی انجن پترولی چهار ستروک

پوهنمل ساربان مختار^۱، پوهنیار حمایت الله مجیدی^۲، پوهنیار میلاد احمد عبدالله^۳

^۱دپارتمنت انجینری میخانیک، پوهنځی انجینری، پوهنتون کابل، کابل، افغانستان

^{۲،۳}دپارتمنت انجینری برق و الکترونیک، پوهنځی انجینری، پوهنتون کابل، کابل، افغانستان

ایمیل: sarban.780@ku.edu.af

چکیده

انجن های احتراق داخلی با وجود کاربرد گسترده، به دلیل مصرف سوخت های فوسیلی و آلاینده گی بالا، چالش های زیست محیطی ایجاد کرده اند. این تحقیق به بررسی انجن هوای فشرده به عنوان جایگزینی پاک می پردازد. روش تحقیق شامل طراحی و مدل سازی کیم شافت و انجام آزمایش های تجربی برای ارزیابی عملکرد و سرعت انجن در شرایط عملی است. نتایج نشان می دهد انجن طراحی شده توان رسیدن به سرعت ۶۰ کیلومتر در ساعت را دارد و نسبت به وسایط نقلیه برقی، زمان سوخت گیری کوتاه تر، دوام بیشتر و آلاینده گی نزدیک به صفر دارد. این تحقیق، انجن هوای فشرده را راهکاری مناسب برای کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی و توسعه حمل و نقل پایدار معرفی می کند.

واژه های کلیدی: آلودگی هوا؛ انجن هوای فشرده؛ انجن های احتراق داخلی؛ هوای فشرده؛ محیط زیست؛ وسایط نقلیه

Design of Two-Stroke Compressed Air Engine Based on a Four-Stroke Petrol Engine

Sarban Mukhtar¹, Himayatullah Majidi², Milad Ahmad Abdullah³

¹Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Kabul University, Kabul, AF

^{2,3}Electrical and Electronics Engineering Department, Faculty of Engineering, Kabul University, Kabul, Afghanistan

Email: sarban.780@ku.edu.af

Abstract

Internal combustion engines, despite their widespread use, have created serious environmental challenges due to fossil fuel consumption and pollutant emissions. This study examines compressed air engine technology as a clean alternative. The research methodology includes analyzing the performance of this engine, advanced camshaft design, and practical tests to evaluate its speed and efficiency. The findings indicated that this engine can reach a speed of 60 km/h and offers advantages such as reduced pollution, faster refueling, and greater durability compared to electric vehicles. The significance of this technology lies in providing a sustainable solution to reduce fossil fuel dependency and revolutionize the transportation industry. This study demonstrates that the compressed air engine can be a suitable replacement for internal combustion engines.

Keywords: Air Pollution; Compressed Air; Compressed Air Engine; Environment; Internal Combustion Engines; Mechanical Vehicles

مقدمه

همان‌طور که همه ما می‌دانیم، وسایل نقلیه نقش عمده‌یی در آلودگی هوا و گرم شدن زمین دارند. استفاده از انجن موتورسکلیت که از هوای فشرده به عنوان مایع سوخت خود استفاده می‌کند؛ گامی عاقلانه به سمت یک محیط بدون آلودگی است (Ayeridis, 2020; Bendinskas, 2021). این تلاش برای ساختن انجن موتور سیکلت که بر روی هوای فشرده کار می‌کند، با تغییر برخی طرح‌های اولیه در انجن و کیم شافت است (Boger & Cutler, 2018; Boretti, 2019). والوی ورودی انجن همیشه بسته است و والوی آگراست دارای زمان‌بندی می‌باشد. این یک انجن دو ستروک است که بر روی طراحی یک انجن احتراق داخلی پترولی چهار ستروک فعالیت می‌کند. این تحقیق تلاش می‌کند تا با تمرکز بر ساخت و بهینه‌سازی انجن‌های موتورسیکلت که با هوای فشرده کار می‌کنند، گامی به سوی کاهش وابستگی به سوخت‌های فوسیلی بردارد. برای دستیابی به این هدف، برخی از طرح‌های اولیه در انجن و کیم شافت تغییر یافته است (Burton, 2013; Chinglenthioiba et al. 2016b; Chinglenthioiba et al., 2016d). در این پروژه، والوی ورودی انجن به صورت دائمی بسته است و والوی آگراست^۱ با زمان‌بندی مشخص کار می‌کند. این انجن دو ستروک بر اساس طراحی یک انجن چهار ستروک احتراق داخلی پترولی بهینه‌سازی شده است تا بتواند با هوای فشرده فعالیت نماید. در دهه‌های اخیر، تلاش‌های متعددی برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فوسیلی و جایگزینی آن‌ها با منابع انرژی پاک؛ مانند هوای فشرده صورت گرفته است. یکی از نخستین مطالعات در این زمینه، به بررسی امکان‌پذیری استفاده از هوای فشرده به عنوان منبع انرژی برای وسایل نقلیه پرداخته است (Chinglenthioiba et al., 2016a, 2016c). تحقیقات اولیه بیشتر بر استفاده از سیستم‌های فشرده‌سازی و ذخیره‌سازی هوا در سلندرهای موتور متمرکز بودند (DIDIK, 2010).

مطالعات انجام شده در دهه‌ی ۱۹۹۰ نشان داد که انجن‌های هوای فشرده از نظر بهره‌وری انرژی و کاهش آلاینده‌ها پوتانشیل بالایی دارند (Gibella Berland, 2024; Huang et al., 2018; Keegan, 2013). از جمله این مطالعات، تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی کاربرد هوای فشرده در انجن‌های دیزل و پترولی بود که به بررسی تأثیرات مختلف بر عملکرد، بازده و طول عمر این انجن‌ها پرداختند (Lu et al., 2012; May, 2010; Moore & Schneider, 2001; Pangeran et al., 2024). در اوایل دهه ۲۰۰۰، تحقیقات بیشتری بر طراحی و بهینه‌سازی انجن‌های هوای فشرده متمرکز شد. در این دوره، بسیاری از محققان به بررسی تفاوت‌ها و شباهت‌های عملکردی انجن‌های هوای فشرده و انجن‌های احتراق

^۱ Exhaust

داخلی شروع کردند. این مطالعات بر این نکته تأکید داشتند که انجن‌های هوای فشرده به دلیل عدم نیاز به احتراق، آلاینده‌های کمتری تولید می‌کنند و هزینه‌های نگهداری آن‌ها نیز کاهش می‌یابد (Parker, 2002; Sanger, 2005; Schiffer, 1994).

در سال‌های اخیر، با پیشرفت فناوری و تجهیزات فشرده‌سازی هوا، محققان به بررسی عملی‌تر و گسترده‌تر استفاده از هوای فشرده در وسایل نقلیه پرداخته‌اند (Schiffer, 2004). در برخی مطالعات، تبدیل انجن‌های چهار ستروک به انجن‌های هوای فشرده مورد آزمایش قرار گرفته است (Shen & Hwang, 2009; Simon, 2017; Stephens, 2020). یافته‌های این تحقیقات نشان می‌دهد که تغییر در ساختار انجن و استفاده از سیستم‌های فشرده‌سازی مناسب می‌تواند به کارایی بالاتری در مصرف انرژی منجر شود. نیز نتایج این تحقیقات نشان داده است که استفاده از هوای فشرده به‌عنوان سوخت جایگزین می‌تواند یک راهکار مناسب برای کاهش آلودگی هوا و مصرف سوخت‌های فوسیلی باشد (Tian et al., 2023; Tien et al., 2022; Wang et al., 2014). با این حال، چالش‌هایی از جمله محدودیت‌های فنی، ذخیره‌سازی هوا با فشار بالا و هزینه‌های اولیه‌ی بالا، همچنان وجود دارد که نیازمند تحقیقات بیشتر و بهبودهای فنی هستند (Yu & Cai, 2015; Zhu et al., 1990). با توجه به پیشینه موجود، تحقیق حاضر بر آن است تا با تغییرات در ساختار انجن‌های احتراق داخلی و طراحی مجدد کیم شافت و والوها، عملکرد و کارایی انجن‌های هوای فشرده را مورد بررسی و ارزیابی قرار دهد. چندین کشور و شرکت در سراسر جهان در زمینه طراحی و ساخت انجن‌های هوای فشرده تحقیقات و پروژه‌هایی را انجام داده‌اند. در ادامه به برخی از کشورهای پیشرفته و شرکت‌هایی که در این زمینه فعالیت داشته‌اند، اشاره می‌شود:

شرکت MDI^۲ که یک شرکت فرانسوی بوده که توسط گای نگری^۳ تأسیس شد. این شرکت به‌طور ویژه در توسعه و طراحی انجن‌های هوای فشرده برای موتورها فعالیت دارد. این شرکت در اوایل دهه ۲۰۰۰ طراحی انجن هوای فشرده‌یی به نام ایر پاد^۴ را معرفی کرد. این موتور برای استفاده در محیط‌های شهری طراحی شده و از هوای فشرده به‌عنوان منبع انرژی خود بهره می‌برد.

تاتا موتورز^۵ یکی از بزرگ‌ترین شرکت‌های موتورسازی در هند است که در دهه گذشته همکاری‌های با MDI برای تولید موتورهاى هوای فشرده داشته است. این شرکت برای کاهش مصرف سوخت‌های

^۲ (Motor Development International)

^۳ Guy Nègre

^۴ Air Pod

^۵ Tata Motors

فوسیلی و آلودگی هوا در مناطق شهری، تحقیقاتی را برای توسعه انجن های هوای فشرده آغاز کرده است.

شرکت آمریکایی جنیرال الکتریک^۶ که با شرکت فرانسوی (MDI) همکاری می کند، هدف آن تولید موترهای با انجن هوای فشرده برای بازار آمریکا است. این شرکت قصد دارد موترهای هوای فشرده یی را به بازار عرضه کند که از نظر اقتصادی و زیست محیطی بهینه باشند.

شرکت سولزیر^۷ ویس، یکی از بزرگترین تولیدکنندگان موترهای سنگین، تحقیقاتی در زمینه انجن های هایبریدی که از هوای فشرده و سوخت فوسیلی به طور ترکیبی استفاده می کنند، انجام داده است. این فناوری برای کاهش مصرف سوخت و بهبود کارایی در موترهای سنگین؛ مانند موترها و بس ها مورد استفاده قرار می گیرد.

شرکت AVIC^۸ چینی نیز در حوزه توسعه انجن های هوای فشرده و هایبریدی فعالیت هایی داشته است. در چین، این فناوری ها برای کاهش آلودگی هوا در شهرهای بزرگ مورد توجه قرار گرفته اند.

شرکت فیات^۹ ایتالیایی در گذشته پروژه هایی راه اندازی کرده است که برای توسعه سیستم های ترکیب از هوای فشرده و سوخت های فوسیلی استفاده می کنند. هدف از این پروژه ها کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده ها در موترهای سبک و سنگین است.

شرکت موناش^{۱۰} که یک شرکت استرالیایی است نیز به توسعه انجن های هوای فشرده برای کاربردهای مختلف صنعتی و حمل و نقل می پردازد. این شرکت به دنبال استفاده از هوای فشرده به عنوان منبع انرژی پاک و تجدیدپذیر برای موترها و ماشین آلات می باشد.

شرکت KAI^{۱۱} در کوریای جنوبی، در کنار توسعه موترهای الکتریکی و هیدروجنی، تحقیقاتی در زمینه فناوری های نوین؛ مانند انجن های هوای فشرده نیز انجام داده است. این کشور به دلیل آلودگی هوا در شهرهای بزرگ، به شدت به دنبال فناوری های جایگزین برای موترهای فوسیلی است.

هدف از این پروژه ایجاد روشی پایدار و سازگار با محیط زیست برای تأمین انرژی وسایط نقلیه و کاهش اثرات منفی آن ها بر محیط زیست است.

⁶ General Electric Aviation

⁷ Sulzer Ltd

⁸ Aviation Industry Corporation of China

⁹ FIAT

¹⁰ Monash Company

¹¹ Korea Aerospace Industries

سؤالات تحقیق

۱. انجن طراحی شده‌ی هوای فشرده دو ستروک چه میزان توان و تورک، در مقایسه با انجن پایه‌ی چهار ستروک تولید می‌کند؟
۲. موثریت انرژی این انجن پس از تبدیل و بهینه‌سازی چقدر است؟
۳. مهم‌ترین چالش‌های فنی در تبدیل انجن چهارستروک به دو ستروک هوای فشرده چیست؟
۴. این طراحی تا چه حد در کاهش آلایندگی (مانند CO_2 و ذرات معلق) هوا موفق است؟
۵. عملیاتی: هزینه و پیچیدگی ساخت این انجن در مقایسه با نمونه‌ی اولیه چقدر است؟

روش تحقیق

این مطالعه شامل تحلیل عملکرد انجن هوای فشرده برای درک نحوه تبدیل هوای فشرده به انرژی میخانیکی میباشد. طراحی و بهینه‌سازی اجزای کلیدی؛ مانند کیم‌شافت و والوها به منظور بهبود کارایی صورت گرفته است. علاوه‌آ آزمایش‌های عملی و لابرآتواری برای ارزیابی سرعت، قدرت و دوام سیستم در شرایط واقعی و مقایسه عملکرد این فناوری با انجن‌های احتراق داخلی و سایش نقلیه‌ی برقی از نظر آلودگی، سرعت سوخت‌گیری و دوام انجام شده است. این رویکرد به‌طور جامع پوتانشیل انجن هوای فشرده را به‌عنوان جایگزین، پاک و کارآمد ارزیابی می‌کند. همچنان روش تحقیق ارائه‌شده در این مطالعه را می‌توان از چند بُعد اصلی بررسی کرد:

بُعد فنی-تحلیلی

در این مرحله، تمرکز بر درک دقیق پروسه‌ی تبدیل انرژی پوتانشیل هوای فشرده به انرژی میخانیکی است. تحلیل عملکردی شامل مدل‌سازی نحوه عملکرد پیستون، فشار واردشده به اجزا، زمان‌بندی باز و بسته‌شدن والوها و تعامل میان اجزای متحرک سیستم است. این تحلیل نقش حیاتی در شناسایی نقاط ضعف و قوت طراحی اولیه دارد و پایه‌ی برای بهینه‌سازی فراهم می‌سازد.

بُعد طراحی و بهینه‌سازی

در این بخش، اجزای کلیدی؛ مانند کیم‌شافت، والوها و سلندر با رویکرد بهینه‌سازی طراحی می‌شوند. استفاده از ابزارهای CAD/CAE یا نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انجیری میخانیک برای ارتقای شکل و اجزا و زمان‌بندی حرکتی، باعث بهبود مؤثریت حجمی و کارایی سیستم می‌شود. هدف آن افزایش مؤثریت و کاهش ضایعات انرژی در ساینکل کاری انجن است.

بعد تجربی-کاربردی

آزمایش‌های عملی و لابراتواری انجام شده برای ارزیابی متحولهایی؛ مانند سرعت، قدرت خروجی، دوام قطعات و پاسخ سیستم در شرایط واقعی عملکردی (مثلاً بارگذاری دینامیکی یا درجه حرارت محیط) صورت می‌گیرد. این داده‌ها برای اعتبارسنجی نتایج تیوری و شبیه‌سازی ضروری‌اند.

فورمول مورد استفاده

فشار عامل بزرگی است که در این طراحی استفاده می‌شود. فارمول اصلی که برای محاسبه خروجی‌ها استفاده شده است، عبارت از معادله محاسبه کتله گازات خیالی $PV = nRT$ می‌باشد که در اینجا:

P = فشار گاز: میزان فشار که مالیکول‌های گاز به دیواره‌های محفظه وارد می‌کنند. واحد معمول آن پاسکال (Pa) است.

V = حجم گاز: فضایی که گاز اشغال می‌کند. واحد معمول آن لیتر (L) یا مترمکعب (m^3) است.

n = تعداد مول‌ها^{۱۲}: مقدار ماده گاز در واحد مول. یک مول معادل 6.022×10^{23} مالیکول است.

R = ثابت گازهای ایده‌آل^{۱۳}: مقدار ثابت که برای گازهای ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود. مقدار آن برابر با 8.314 (در واحد ژول بر مول کلوین) یا 0.0821 (در واحد لیتر اتمسفر بر مول کالوین) است.

T = درجه حرارت: درجه حرارت گاز به کالوین، توجه داشته باشید که درجه حرارت در این فرمول باید به کالوین تبدیل شود. $(K = ^\circ C + 273.15)$

بنابراین، وزن هوا را می‌توان محاسبه کرد و می‌توان رابطه را با مقدار وزن برای مقدار انرژی خروجی محاسبه کرد.

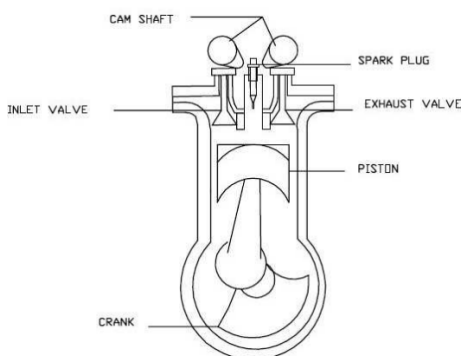
طراحی انجن (اصلاح شده): طراحی انجن هوای فشرده شامل بهینه‌سازی اجزای اصلی؛ مانند سلندر، پیستون، کیم‌شافت و والوها است. هوای فشرده از بالای پیستون وارد شده و آن را به حرکت در می‌آورد. طراحی پیشرفته کیم‌شافت و والوها عملکرد بهینه و پایدار سیستم را تضمین می‌کند که ذیلاً به آن می‌پردازیم.

¹² Amount of substance

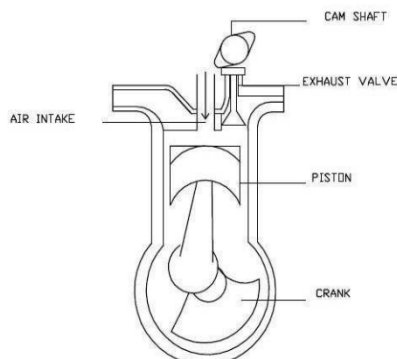
¹³ Ideal gas constant

نمای انجن

در ذیل شکل ۱ نشان‌دهنده‌ی طراحی اصلی انجن را نشان می‌دهد. در حالی‌که شکل ۲ نشان‌دهنده‌ی یک شکل اصلاح شده یک انجن پترولی چهار ستروک است. یک انجن چهار ستروک دارای یک والوی ورودی، یک والو آگزاست و دارنده‌ی یک پلگ جرقه است. در اینجا والوی ورودی برای همیشه بسته شده است و والوی آگزاست در مطابقت به والو تایمینگ^{۱۴} تغییر یافته و فعالیت می‌کند (Tsai et al., 2018; Van & Duc).



شکل ۱: طراحی اصلی انجن



شکل ۲: طراحی اصلاح شده انجن

کیم شافت

کیم شافت^{۱۵} در ابتدا دارای دو کیم با یک لوب بود که متقابلاً بر یکدیگر عمود بودند. کرنک^{۱۶} به دلیل حرکت پیستون می‌چرخد، کرنک شافت با زنجیر تایم یا تسمه تایم به کرنک شافت^{۱۷} متصل می‌باشد. همانطور که کرنک شافت می‌چرخد، کیم شافت نیز می‌چرخد و از این رو زمان‌بندی والوها مدیریت می‌شود. در کیم شافت قدیمی والو ورودی و خروجی هر دو کار می‌کنند.



شکل ۳: کیم شافت اصلی

¹⁴ valve timing

¹⁵ camshaft

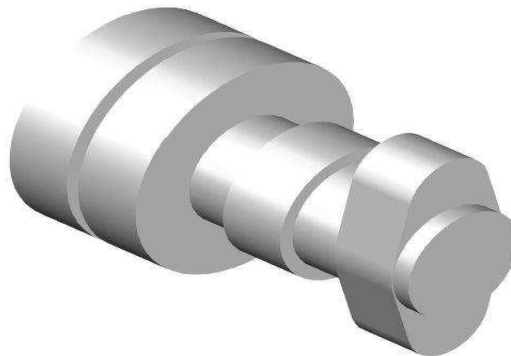
¹⁶ crank

¹⁷ crankshaft

در کیم شافت اصلاح شده، لوب کیم که برای والورودی کار می‌کند، سوهان شده و کیم دایروی ساخته شده است. همچنین کیم که برای والواگزاست کار می‌کند، با یک لوب دیگر درست در مقابل لوب موجود ارائه شده است. این امر باعث می‌شود که والوی ورودی بسته شود و والوی آگزاست با تغییر زمان‌بندی فعالیت خویش را آغاز می‌کند.

میکانیسم انجن هوای فشرده

در هر انجینی هوا از والوی ورودی وارد می‌شود و سپس توسط پیستون به دلیل چرخش کرنک شافت که حرکت به سمت متراکم شدن است، فشرده می‌شود. سپس جرقه از طریق پلگ انجام شده، سوخت مشتعل می‌شود و پروسه احتراق انجام می‌شود. ستروک انبساط و در نهایت محصول احتراق با ضربه‌ی آگزاست از انجن خارج می‌شود.



شکل ۴: کیم شافت بعد از تغییر

در اینجا هوا ابتدا از اتموسفیر گرفته شده، سپس با کمک کمپریسور فشرده شده و بعداً به سلندر انجن فرستاده می‌شود. فرض بر این است که پیستون در نقطه‌ی مرکزی بالایی BDC^{۱۸} باشد، والو ورودی به طور دائم بسته است و در ابتدا والوی آگزاست نیز بسته می‌ماند. هوای فشرده حجم تخلیه شده را پر می‌سازد و هنگامی که یک چرخش کوچک به کرنک شافت داده می‌شود، این پیستون شروع به لغزش به پایین می‌کند؛ هوای فشرده تمایل به انبساط دارد و پیستون را به سمت پایین فشار می‌دهد. پیستون در یک حرکت از TDC^{۱۹} به BDC حرکت می‌کند. اکنون والوی آگزاست باز می‌شود و به دلیل اختلاف فشار هوای پر شده در حجم سلندر به بیرون حرکت می‌کند و پیستون از BDC به TDC بالا می‌رود. به این ترتیب یک دور در دو حرکت کامل می‌شود و دوباره همان پروسه انجام شده و خروجی به دست

^{۱۸} Top Dead Center (TDC)

^{۱۹} Bottom Dead Center (BDC)

می‌آید. انجن هوای فشرده یکی از فناوری‌های نوآورانه در حوزه حمل‌ونقل و انرژی است که به جای سوخت‌های فوسیلی از هوای فشرده به عنوان منبع انرژی استفاده می‌کند. مکانیزم عملکرد این انجن به شرح زیر است:

۱. **منبع هوای فشرده:** هوای فشرده در مخازن خاصی (تانک‌های ذخیره) با فشار بالا ذخیره می‌شود. این هوا به وسیله کمپرسورها فشرده می‌شود و انرژی پوتانشیل آن به عنوان منبع اصلی توان در انجن مورد استفاده قرار می‌گیرد.
۲. **ورود هوا به انجن:** هوای فشرده از مخزن به سلندر انجن وارد می‌شود. ورود هوا از طریق یک سیستم کنترل و الو صورت می‌گیرد که زمان‌بندی و مقدار هوای ورودی را تنظیم می‌کند.
۳. **تبدیل انرژی:** هوای فشرده در سلندر انبساط می‌یابد و باعث حرکت پیستون می‌شود. این حرکت پیستون انرژی ذخیره‌ی هوای فشرده را به انرژی میخانیکی تبدیل می‌کند. مکانیزم پیستون و کرنگ شافت مشابه انجن‌های احتراق داخلی عمل می‌کند و حرکت خطی پیستون را به حرکت دورانی تبدیل می‌کند.
۴. **خروج هوا:** پس از انجام کار، هوای مصرف‌شده از طریق والوهای خروجی از سلندر تخلیه می‌شود. این هوا معمولاً با فشار کمتر و بدون آلودگی وارد محیط می‌شود.
۵. **سیستم‌های کنترولی و تنظیم‌کننده:** برای تنظیم فشار و جریان هوای ورودی و خروجی از یک سیستم کنترل الکترونیکی یا میخانیکی کار گرفته شده که این سیستم‌ها بهینه‌سازی مصرف هوا و افزایش کارایی انجن را تضمین می‌کنند.

یافته‌ها

مطالعات نشان می‌دهند که انجن هوای فشرده قادر است به سرعت ۶۰ کیلومتر در ساعت برسد و عملکرد پایدار داشته باشد. این انجن به دلیل عدم استفاده از سوخت‌های فوسیلی، آلودگی محیط‌زیستی را به طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد و گازهای آلاینده تولید نمی‌کند. همچنین، زمان سوخت‌گیری آن سریع‌تر از وسایط نقلیه برقی است که به بهبود کارایی و راحتی استفاده کمک می‌کند. طراحی پیشرفته‌ی کیم شافت و والوها عملکرد بهینه و دوام بالای این سیستم را تضمین می‌کنند. این ویژگی‌ها نشان می‌دهند که انجن هوای فشرده می‌تواند به عنوان جایگزینی پاک و کارآمد برای انجن‌های احتراق داخلی مطرح شود و تحولی در صنعت حمل‌ونقل ایجاد کند. وسایط نقلیه سبک؛ مانند موتورسیکلت‌ها و موتورها کوچک، ماشین‌آلات صنعتی و ابزارهای پنوماتیک حمل‌ونقل عمومی و موتورها باریبری کوچک از جمله کاربردهای انجن‌های با هوای فشرده به حساب می‌روند.

موارد عملی

برای موارد عملی در نخست در لابر اتوار و متعاقباً در روی جاده بررسی ها انجام شده که ذیلاً به آن میپردازیم.

الف. در لابر اتوار. در لاتراتوار قرار ذیل بررسی انجام می شود:

ضروریات. ضروریات که درین پروسه نیاز است حد اقل از یک انجن موتور سیکلت، یک مخزن ذخیره سازی و یک کمپریسور می باشد.

پروسه. با استفاده از کمپریسور هوای اتموسفیر فشرده شده و در مخزن ذخیره با 600 Psi پر می شود. در این فشار هوای فشرده به انجن فرستاده شده و انجن مطابق آن فعالیت می کند. هوا در 600 Psi کتله بی نزدیک به دو کیلوگرم دارد که این مقدار هوا وارد انجن شده و مشاهدات زیر بدست می آید:

مشاهدات. با فشار 600 Psi انجن متذکره برای طی مسافت ۳,۴ کیلومتر فعالیت می کند. همچنین سرعت ۶۰ کیلومتر در ساعت با والوی گاز کامل به دست آمد.

ب. روی جاده. در روی قرار ذیل مورد بررسی قرار می گیرد:

ضروریات. ضروریات که درین پروسه نیاز است حد اقل یک انجن موتور سیکلت، یک مخزن ذخیره سازی و یک کمپریسور می باشد.

پروسه. هوای فشرده در سلندر LPG با ۶۰۰ psi پر شده است و وسیله ی نقلیه رانده شده با مسافت و سرعت بدست آمده در جدول ذیل رعایت شده است.

جدول ۱: مشاهدات و محاسبات

مشاهدات و محاسبات	
وزن سلندر خالی	۱۵ کیلوگرم
وزن خالص پس از پر شدن هوا فشرده	$۱۵ + ۳,۵ = ۱۸,۵$ کیلوگرم
مسافت پیموده شده توسط وسیله ی نقلیه	۲ کیلو متر
سرعت وسیله ی نقلیه	۴۵ کیلومتر در ساعت

مزایای انجن هوای فشرده

انجن هوای فشرده از بسیاری جهات با انجن های برقی قابل مقایسه است و یا هم بهتر از انجن های برقی است.

- انجن هوای فشرده در نهایت با برق کار می کند؛ زیرا کمپرسور به برق نیاز دارد ولی به شکل لحظوی. در حالی که انجن های برقی زمان زیادی را برای چارچ بطری های خود صرف می کنند.

- برای پیشبرد حمل و نقل سوخت مورد نیاز نیست. بنابراین، مقرون به صرفه است و همچنین آلودگی محیط زیست را کاهش می‌دهد.
- درجه حرارت تولید شده خیلی زیاد نیست. بنابراین، نیازی به سیستم سردکننده نیست و همچنین می‌توان از مواد با استحکام کم‌تر و مقاومت حرارتی کم‌تر برای ساخت این انجن استفاده کرد که با این کار هزینه‌ها را می‌توان کاهش داد.
- انجن را می‌توان از نظر حجم کاهش داد و هم دفع مخازن هوا آسان و به راحتی صورت گرفته می‌تواند.
- قابل بازیافت است و هزینه ساخت و نگهداری کم‌تر.
- ذخیره‌سازی ممکن است در زمان کم‌تری نسبت به چارچ شدن بطری در سیستم برقی صورت بگیرد.
- قیمت پر کردن وسایل نقلیه با انجن هوا به طور قابل توجهی ارزان‌تر از پترول، دیزل یا سوخت زیستی است. اگر برق ارزان باشد، فشرده‌سازی هوا نیز نسبتاً ارزان خواهد بود.
- انجن هوای فشرده هیچ‌گونه آلاینده مستقیم (مانند دای اکساید کاربن یا گازهای گلخانه‌یی) تولید نمی‌کند.
- کمک به کاهش آلودگی هوا، جلوگیری از گرم شدن زمین و حفظ کیفیت محیط زیست.
- هوای فشرده به عنوان منبع سوخت قابل تجدید در دسترس است و محدودیت منابع سوخت‌های فوسیلی را ندارد.
- کاهش وابستگی به سوخت‌های فوسیلی و کمک به پایداری انرژی.
- پر کردن مخزن هوای فشرده بسیار ارزان‌تر از خرید سوخت‌های فوسیلی؛ مانند پترول و دیزل است.
- کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و صرفه‌جویی اقتصادی برای کاربران.
- انجن‌های هوای فشرده نسبت به انجن‌های احتراق داخلی صدای بسیار کم‌تری تولید می‌کنند.
- بهبود کیفیت زندگی در مناطق شهری و کاهش آلودگی صوتی.
- در صورت بروز حوادث، هوای فشرده خطراتی؛ مانند آتش‌سوزی یا انفجار سوخت‌های فوسیلی را ندارد.
- افزایش ایمنی برای کاربران و محیط اطراف می‌باشد.
- این انجن‌ها قطعات متحرک کم‌تری نسبت به انجن‌های احتراقی دارند.

- کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و افزایش عمر مفید انجن.
- هوای فشرده تقریباً در همه جا قابل تولید است.
- نیازی به حمل و نقل سوخت‌های فوسیلی نیست و استفاده از انجن‌های هوای فشرده در مناطق دورافتاده نیز امکان‌پذیر است.
- کشورها می‌توانند به جای واردات سوخت‌های فوسیلی، هوای فشرده تولید کنند.
- کمک به تقویت استقلال انرژی و کاهش هزینه‌های ارزی.
- در کل چرخه تولید و مصرف، اثرات محیط‌زیستی این فناوری بسیار کم‌تر از فناوری‌های مبتنی بر سوخت‌های فوسیلی است.
- ترویج توسعه پایدار و حفاظت از منابع طبیعی.
- طراحی و عملکرد این انجن‌ها فرصت‌های زیادی برای تحقیق و توسعه فراهم می‌کند.
- درنهایت این انجن کمک به توسعه فناوری‌های مرتبط و ارتقای دانش فنی در حوزه انرژی است.

معایب انجن هوای فشرده

- عیب اصلی استفاده از انجن‌های هوای فشرده عبارت از استفاده از انرژی غیرمستقیم است. زیرا ابتدا باید هوا فشرده شود و سپس از آن هوا در انجن استفاده شود تا نتیجه مورد نظر را بدهد. همه ما می‌دانیم که در هر تبدیل انرژی همیشه مقداری انرژی از دست داده شود و در نتیجه مؤثریت انجن آسیب می‌بیند.
- می‌دانیم که وقتی هوا منبسط می‌شود، سرد می‌شود (قانون چارل) و از آن جایی که حرارت پایین می‌آید، حرکت پیستون تحت تأثیر قرار می‌گیرد و دوباره به نوبه‌ی خود متأثر می‌شود.
 - از آن جایی که این انجن هنوز رایج نیست، نمی‌توان آن را در خانه دوباره پر کرد؛ اما نیاز به کمپرسور دارد.
 - ظرفیت ذخیره را باید دانست؛ زیرا مقدار زیادی گاز بالاتر از حد پایدار ذخیره می‌تواند باعث انفجار ذخیره شود.
 - مجدداً اگر ظرفیت ذخیره کم باشد و مواد از استحکام کافی برخوردار نباشد، مؤثریتش کاهش می‌یابد و در صورت نیاز به کار ایمنی، مقدار هوای کمتری باید پر شود؛ اما این امر باعث پر کردن مکرر ذخیره می‌شود.
 - هوای فشرده انرژی کمتری نسبت به سوخت‌های فوسیلی در حجم برابر ذخیره می‌کند.

- نتیجه: وسایل نقلیه مجهز به انجن هوای فشرده معمولاً دامنه حرکت کوتاه‌تری دارند و برای سفرهای طولانی مناسب نیستند.
- تبدیل انرژی از مرحله فشرده‌سازی هوا تا استفاده از آن در انجن شامل تلفات انرژی قابل‌توجه است.
- مؤثریت سیستم نسبت به برخی دیگر از فناوری‌های مشابه پایین‌تر است.
- فشرده‌سازی هوا به انرژی و زمان زیادی نیاز دارد.
- ممکن است برای پر کردن مخزن هوای فشرده، زمان قابل‌توجهی صرف شود.
- فشرده‌سازی هوا نیاز به انرژی برقی دارد که در بسیاری از موارد از منابع غیرتجدیدپذیر تأمین می‌شود.
- نتیجه: این امر ممکن است باعث کاهش مزایای محیط‌زیستی این انجن‌ها شود.
- مخازن ذخیره هوای فشرده باید بسیار مقاوم باشند تا فشار بالا را تحمل کنند.
- وزن زیاد مخازن می‌تواند بر عملکرد وسیله نقلیه و کارایی انجن تأثیر منفی بگذارد.
- هنگام انبساط سریع هوا در سلندر، درجه حرارت به شدت کاهش می‌یابد که ممکن است باعث ایجاد مشکلاتی مانند یخ‌زدگی قطعات شود.
- نیاز به طراحی و استفاده از سیستم‌های گرمایشی یا مواد مقاوم به سرما هست.
- ایستگاه‌های پر کردن هوای فشرده به اندازه ایستگاه‌های سوخت‌گیری متداول نیستند.
- محدودیت در استفاده گسترده از این فناوری وجود دارد.
- طراحی و ساخت انجن‌های هوای فشرده و زیرساخت‌های مرتبط هزینه‌بر است.
- پذیرش این فناوری در مقایسه با سیستم‌های مرسوم کندتر خواهد بود.

بحث و مناقشه

در سال‌های اخیر، با افزایش نگرانی‌ها در مورد تغییرات اقلیمی، آلودگی هوا و کاهش منابع سوخت‌های فوسیلی، استفاده از انرژی‌های جایگزین در صنعت حمل و نقل بیش‌ازپیش مورد توجه قرار گرفته است. یکی از گزینه‌های نوین در این زمینه، بهره‌گیری از انجن‌های هوای فشرده است. این نوع انجن‌ها با استفاده از هوای فشرده ذخیره‌شده در مخازن هوا، بدون تولید گازهای آلاینده، انرژی لازم برای حرکت وسایط نقلیه را فراهم می‌سازند. ایده تبدیل یک انجن پترولی چهار ستروک به انجن هوای فشرده دوستروک از جمله رویکردهای ابتکاری است که در برخی پروژه‌های تحقیقاتی یا

نمونه‌سازی‌های صنعتی دنبال شده است. اما این نظریه، هم‌زمان با فرصت‌ها، با چالش‌ها و مناقشات فنی نیز روبه‌رو است.

تحقیقات متعدد نشان‌دهنده چالش‌ها و مزایای فراوانی برای چنین تبدیلی بوده که ذیلاً در مورد آن بحث صورت گرفته است. انجن‌های پטרولی چهار ستروک در بازار به‌طور گسترده موجود بوده و بسیاری از آنها به دلیل فرسودگی یا نبود سوخت، دیگر مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. با این رویکرد، می‌توان در عوض باطل ساختن و دور انداختن یا بازیافت پرهزینه، آنها را با اعمال تغییراتی میخانیکی به انجن‌های هوای فشرده تبدیل کرد. در این تبدیلی، از سیستم‌های ساده‌تر و سبک‌تر دوستروک استفاده می‌شود که توانایی بیشتری در ارائه تورک در دوره‌های پایین دارند. همچنین، مطالعه نشان می‌دهد که حذف سیستم احتراق، منبع سوخت مایع و اجزای برقی پیچیده، باعث می‌شود هزینه نگهداری کاهش یابد و ایمنی نیز افزایش پیدا کند؛ زیرا دیگر خطر آتش‌سوزی یا انفجار وجود ندارد. علاوه بر این، تحقیقات بیانگر آنست که از منظر محیط‌زیستی، حذف احتراق داخلی سبب کاهش انتشار کاربن دی‌اکساید، اکسیدهای نایتروجن و سایر آلاینده‌ها می‌شود. این ویژگی، به‌ویژه در فضا‌های بسته یا شهری که هوای پاک اهمیت بیشتری دارد، یک مزیت بزرگ محسوب می‌شود. همچنین از آن‌جای که هوای فشرده می‌تواند از منابع انرژی تجدیدپذیر (مانند توربین‌های بادی یا پنل‌های خورشیدی) تولید شود، این سیستم به سمت بهره‌وری پایدار و پاک حرکت می‌کند.

اما در سوی دیگر، چالش‌های فنی و عملکردی متعددی در قبال این طرح وجود دارد که ذیلاً می‌توان روی آن بحث کرد. نخستین چالش مطرح شده توسط عبارت از تفاوت بنیادی بین طراحی انجن چهار ستروک پטרولی و عملکرد مورد انتظار از یک انجن هوای فشرده دوستروک است. تحقیقات بیانگر آنست که انجن‌های پטרولی برای کار با احتراق و درجه حرارت بالا طراحی شده‌اند؛ در حالی که انجن‌های هوای فشرده نیاز به مقاومت در برابر فشار میخانیکی بالا ولی درجه حرارت نسبتاً پایین دارند. همین تفاوت، موجب می‌شود قطعاتی؛ مانند پیستون، سلندر، و غیره به‌صورت مستقیم قابل استفاده نباشند و نیاز به تغییرات دقیق داشته باشند.

پس از سال ۲۰۱۰، تحقیقات بر انجن‌های هوای فشرده از مرحله امکان‌سنجی اولیه به سمت بهینه‌سازی طراحی و کاربرد عملی حرکت کرده‌اند. مطالعات لو^{۲۰} و همکاران (۲۰۱۲) بر کاهش

^{۲۰} Lu

آلاینده‌ها تأکید داشت، در حالی که بوگر و کتler^{۲۱} (۲۰۱۸) و بوریتی^{۲۲} (۲۰۱۹) نشان دادند که اصلاحات میخانیکی مانند تغییر کیم شافت و والوها می‌تواند بازده را افزایش دهد. تحقیقات هووانگ^{۲۳} (۲۰۱۸) بیشتر بر مزایای محیط زیستی تمرکز کرد، در حالی که ستیفنز^{۲۴} (۲۰۲۰) نشان داد که مؤثریت در سرعت‌های پایین بهتر و در سرعت‌های بالا محدود است. در سال‌های اخیر، مطالعات تین^{۲۵} (۲۰۲۲) و تیان^{۲۶} (۲۰۲۳) راهکارهای هایبریدی را برای رفع محدودیت‌های ذخیره‌سازی پیشنهاد کردند و یافته‌های جیبلا^{۲۷} (۲۰۲۴) و پنگیران^{۲۸} (۲۰۲۴) نشان داد که کاربرد اقتصادی این فناوری بیشتر در وسایل نقلیه سبک شهری توجیه‌پذیر است.

در نهایت، یکی از مسائل کلیدی، میزان انرژی قابل ذخیره در مخازن هوای فشرده و محدود بودن بُرد حرکتی این وسایط است. انجن‌های هوای فشرده معمولاً دامنه حرکت محدودی دارند و نیاز به چارج مجدد سریع و در دسترس بودن کمپریسورهای فشار بالا دارند که ممکن است در مناطق دورافتاده یا اطراف فراهم نباشد.

نتیجه‌گیری

امروزه نیاز به انرژی به طور مداوم در حال افزایش است و ما از منابع معمولی با سرعت هشداردهنده استفاده می‌کنیم. بنابراین، سوخت جایگزین مورد نیاز است و فناوری هوای فشرده می‌تواند یکی از بهترین جایگزین‌ها باشد؛ زیرا آلودگی ایجاد شده صفر است و همچنین ارزان‌تر از سوخت‌های چون پترول و دیزل می‌باشد. آزمایشی که انجام شد، همچنین نشان داد که این وسیله نقلیه با سرعت خوب (۶۰ کیلومتر در ساعت) فعالیت می‌نماید و وزن افزایش یافته (۱۸،۵ کیلوگرم) که فقط به طور معمولی بر کارایی انجن تأثیر داشته است و مؤثریت انجن را زیاد متأثر نمی‌سازد. همچنین آلودگی محیطی بار نمی‌آورد. از این رو نسبت به سوخت‌هایی مانند پترول و غیره بهتر و پایدار و سازگارتر با محیط زیست است. توسعه انجن‌های هوای فشرده به عنوان یک جایگزین پاک و کارآمد برای سوخت‌های فوسیلی همچنان مورد توجه بسیاری از کشورها و شرکت‌ها قرار دارد. با پیشرفت تکنولوژی در زمینه فشرده‌سازی هوا و بهبود کارایی این سیستم‌ها، احتمالاً در آینده شاهد گسترش استفاده از این فناوری خواهیم بود.

²¹ Boger & Cutler

²² Boretti

²³ Huang

²⁴ Stephens

²⁵ Tien

²⁶ Tian

²⁷ Gibella

²⁸ Pangeran

پیشنهادهات

با توجه به یافته‌های این تحقیق که نشان می‌دهد انجن هوای فشرده می‌تواند به عنوان جایگزینی پاک، کم‌مصرف و کارآمد برای انجن‌های احتراق داخلی مطرح شود، پیشنهاد می‌شود که مطالعات بیشتری در زمینه بهینه‌سازی و توسعه این فناوری صورت گیرد. در ادامه، پیشنهادات عمومی و پژوهشی برای ادامه مسیر علمی این فناوری ارائه می‌گردد.

نخست، یکی از چالش‌های اصلی انجن‌های هوای فشرده، برد حرکتی محدود به دلیل ظرفیت پایین مخازن هوا و کثافت انرژی کم نسبت به سوخت‌های فوسیلی یا بطری‌ها است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده روی طراحی و ساخت مخازن ذخیره‌سازی هوای فشرده با وزن سبک‌تر، استحکام بالاتر و ظرفیت بیشتر متمرکز شود. استفاده از مواد کامپوزیتی پیشرفته، مانند فایبر کاربن تقویت‌شده با رزین‌های مقاوم، می‌تواند نقش مؤثری در کاهش وزن کل سیستم و افزایش فشار ذخیره‌سازی ایفا کند.

از سوی دیگر، تحلیل دقیق‌تر عملکرد ترمودینامیکی انجن نیز ضروری است. پیشنهاد می‌شود که مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی دینامیکی رفتار انجن در مراحل مختلف ساینکل کاری، با استفاده از نرم‌افزارهایی؛ مانند MATLAB/Simulink یا ANSYS، به عنوان بخشی از تحقیق آینده مد نظر قرار گیرد. این مدل‌ها می‌توانند به انجینران کمک کنند تا پدیده‌هایی؛ مانند افت فشار، ضایعات حرارتی، و مؤثریت حجمی را بهتر درک کرده و ساختار سیستم را بهینه نمایند.

همچنین، در این مطالعه از طراحی بهینه کیم شافت و والوها برای افزایش کارایی بهره گرفته شده است. پیشنهاد می‌شود تحقیقات بعدی به طور خاص بر توسعه سیستم‌های کنترل هوشمند والو تمرکز کنند تا زمان‌بندی دقیق باز و بسته شدن آن‌ها با توجه به شرایط باز، درجه حرارت، فشار و سرعت انجام گیرد. چنین سیستم‌هایی می‌توانند عملکرد انجن را در شرایط متغیر محیطی و بارهای گوناگون پایدارتر و مؤثرتر کنند.

در بُعد عملی، پیشنهاد می‌شود که تست‌های میدانی گسترده‌تری در محیط‌های واقعی شهری یا صنعتی انجام گیرد تا قابلیت اعتماد، دوام، و نگهداری سیستم در بلندمدت ارزیابی شود. بررسی رفتار انجن در شرایط حرارتی مختلف، رطوبت بالا، یا گرد و خاک محیطی، می‌تواند بینش ارزشمندی درباره عملکرد واقعی این سیستم فراهم کند.

از منظر مقایسه‌یی، مطالعات آینده می‌توانند به تحلیل اقتصادی جامع‌تری میان انجن‌های فشرده، انجن‌های احتراق داخلی و سیستم‌های برقی بپردازند. این تحلیل می‌تواند شامل هزینه‌ی ساخت، نگهداری، زیرساخت لازم و طول عمر باشد. چنین بررسی‌هایی برای تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران و سیاست‌گذاران در توسعه این فناوری حیاتی است.

در نهایت، پیشنهاد می‌شود که نتایج این تحقیق در قالب برنامه‌های آموزشی یا پروژه‌های پوهنتونی برای محصلین انجینیری میخانیک، انرژی و محیط‌زیست گنجانده شود تا نسل آینده انجیران با فناوری‌های پاک و جایگزین آشنا شوند و مشارکت فعال‌تری در توسعه آن‌ها داشته باشند.

در مجموع، انجن‌های هوای فشرده پوتانشیل بالایی برای تبدیل شدن به راه‌حلی عملی و دوست‌دار محیط‌زیست در حمل‌ونقل دارند؛ اما تحقق این هدف نیازمند تلاش‌های چندرشته‌یی در حوزه طراحی انجینیری، مواد نوین، شبیه‌سازی عددی و سیاست‌گذاری فناورانه است.

سیاسگذاری

در گام نخست، از استادان مشاور و راهنما که با ارشادهای علمی، نقدهای سازنده و حمایت‌های بی‌دریغ‌شان در مسیر تدوین این تحقیق نقش کلیدی ایفا نمودند، ابراز امتنان می‌کنم.

سپاس ویژه دارم از نهادها و مؤسسه‌ای که با فراهم‌سازی امکانات مالی، فنی و لابراتواری، زمینه عملی‌سازی مراحل تحقیق و انجام آزمایش‌ها را میسر ساختند.

همچنین از همکاران علمی، محققان هم‌دوره، تخنیکران لابراتوار و دوستانی که در مراحل طراحی، اجرا و تحلیل نتایج سهم فعال داشتند، قدردانی می‌نمایم.

تشکر و امتنان خود را از تمام اشخاص حقیقی و حقوقی که در جمع‌آوری منابع، تهیه تجهیزات، یا فراهم‌سازی تسهیلات لازم برای تحقیق همکاری نموده‌اند، ابراز می‌دارم.

سهم نویسندگان در تحقیق

- پوهنمل ساربان مختار (نویسنده اول) طراحی و هدایت کلی تحقیق، توسعه مفهومی موضوع، طراحی سیستم انجن‌های فشرده، انجام آزمایش‌های لابراتواری، تحلیل دیتاها و نگارش بخش‌های مقدمه، روش تحقیق، یافته‌ها و نتیجه‌گیری به‌طور کامل توسط ایشان صورت گرفته است. همچنین مسؤولیت اصلی هماهنگی بین نویسندگان، بازبینی نهایی و تدوین نسخه نهایی مقاله نیز بر عهده ایشان بوده است.

- پوهنیار حمایت الله مجیدی (نویسنده دوم) در طراحی اجزای فنی به‌ویژه کیم شافت و والوها، همکاری در انجام شبیه‌سازی‌ها و تهیه دیاگرام‌های فنی مشارکت داشته است. همچنین، بازیابی علمی بخش روش تحقیق و کمک در تدوین قسمت تحلیل عملکرد سیستم.
- پوهنیار میلاد احمد عبدالله (نویسنده سوم) تهیه و تنظیم منابع علمی، نگارش پیشینه تحقیق، ویرایش زبانی و ساختاری متن مقاله و بررسی نهایی نگارش برای ارسال به مجله یا ارائه علمی.

تضاد منافع

بدین وسیله ما نویسندگان تصدیق می‌کنیم که در انجام این تحقیق و تهیه مقاله حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافع مالی، علمی، یا شخصی میان ما وجود نداشته است. تمامی مراحل تحقیق به‌صورت مستقل، علمی و با رعایت اصول امانت‌داری و صداقت تحقیقی انجام شده و هیچ نوع تضاد منافع با نهادها، اشخاص یا سازمان‌های مرتبط گزارش نمی‌گردد.

- Ayeridis, G. (2020). Electric cars: history and perspectives. In: Bendinskas, A. (2021). *Pneumatinių variklio kartingui projektavimas ir jo parametrų tyrimas* Kauno technologijos universitetas.]. [Link](#)
- Boger, T., & Cutler, W. (2018). *Reducing Particulate Emissions in Gasoline Engines: An SAE Technical Paper Compilation*. SAE International. <https://doi.org/10.4271/0768094186>.
- Boretti, A. (2019). *Advances in Turbocharged Racing Engines: An SAE Technical Paper Compilation*. SAE International. Burton, N. (2013). History of electric cars. Crowood. ISBN is 978-1847974617.
- Chinglenthoba, C., Balaji, V., Abbas, B., & Kumar, A. M. Modification of Compressed Air Technology in Vehicles: A. <https://doi.org/10.37628/jsmfe.v2i2.234>
- Chinglenthoba, C., Balaji, V., Abbas, B., & Kumar, A. M. (2016a). Classification of Chains Based on Strength and Reliability in Machines. *International Journal of Fracture and Damage Mechanics*, 1(2), 52-54. <https://doi.org/10.1021/ja0771639>
- Chinglenthoba, C., Balaji, V., Abbas, B., & Kumar, A. M. (2016b). Modification of Compressed Air Technology in Vehicles: A Review. *International Journal of Structural Mechanics and Finite Elements*, 2(2), 67-73. <https://doi.org/10.37628/jsmfe.v2i2.234>
- Chinglenthoba, C., Balaji, V., Abbas, B., & Kumar, A. M. (2016c). Speculative Study of Ball Bearings and Its Related Parts. *International Journal of Machine Design and Manufacturing*, 1(2), 58-61. <https://doi.org/10.1021/ja0771639>.
- Chinglenthoba, C., Balaji, V., Abbas, B., & Kumar, A. M. (2016). System design and mechanism of a compressed air engine. *International Journal of Mechanical Dynamics & Analysis*, 1(2), 45-49. www.journalspub.com
- DIDIK, F. (2010). History and directory of electric cars from 1834-1987. *Recuperado em novembro de*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6783637>
- Gibella Berland, M. (2024). Sustainability in Motion: The Electric Transformation of a Derbi Senda E-XTREME Motorcycle. [link](#)
- Huang, S. K., Kuo, L., & Chou, K.-L. (2018). The impacts of government policies on green utilization diffusion and social benefits—A case study of electric motorcycles in Taiwan. *Energy Policy*, 119, 473-486. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.061>
- Keegan, B. C. (2013). A history of newswork on Wikipedia. Proceedings of the 9th international symposium on open collaboration, <https://doi.org/10.1145/2491055.2491062>

- Lu, C.-H., Hwang, Y.-R., & Shen, Y.-T. (2012). Modeling and simulation of a novel pneumatic hybrid motorcycle. *International journal of green energy*, 9(6), 467-486 <https://doi.org/10.1080/15435075.2011.622022>.
- May, M. (2010). Former life of the electric car. *Scientific American*, 303(2), 51-51. [Link](#)
- Moore, S. W., & Schneider, P. J. (2001). A review of cell equalization methods for lithium ion and lithium polymer battery systems <https://doi.org/10.4271/2001-01-0959>
- Pangeran, A., Shalahuddin, M., Prabaswara, R., Lazuardy, A., Nurcahyo, R., & Habiburrahman, M. (2024). Factors Influencing Community Willingness to Buy Electric Motorcycles for Green Transportation in Indonesia: Towards a Sustainable and Eco-Friendly City. 2024 ASU International Conference in Emerging Technologies for Sustainability and Intelligent Systems (ICETSIS), <https://doi.org/10.1109/ICETSIS61505.2024.10459429>
- Parker, A. A. (2002). The power assisted bicycle: a green vehicle to reduce greenhouse gas emissions and air pollution. *Proceedings of the 25th Australasian Transportation Research Forum*. [Link](#)
- Sanger, L. (2005). The early history of Nupedia and Wikipedia: a memoir. *Open sources*, 2, 307-338. [Link](#)
- Schiffer, M. B. (1994). *TAKING CHARGE. THE ELECTRICAL AUTOMOBILE IN AMERICA*. ISBN: 978-1560983444 (Hardcover), 978-1560984670 (Paperback)
- Schiffer, M. B. (2004). *The Electric Vehicle: Technology and Expectations in the Automobile Age*. By Gijs Mom. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2004. xiii+ 423 pp. Illustrations, photographs, figures, bibliography, notes, index. Cloth, \$54.95. ISBN: 0-801-87138-7. *Business History Review*, 78(3), 548-551. <https://doi.org/10.2307/25096928>
- Shen, Y.-T., & Hwang, Y.-R. (2009). Design and implementation of an air-powered motorcycles. *Applied Energy*, 86(7-8), 1105-1110. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.06.008>
- Simon, M. (2017). Pneumatic vehicle, research and design. *Procedia Engineering*, 181, 200-205. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.370>
- Stephens, C. (2020). Innovation in Hybrid-Electric Technology for Sustainable Transportation: The Development of a Hybrid Electric Range Extended Motorcycle. <https://www.proquest.com/docview/1234567890>
- Tian, H., Zhang, H., Yin, Z., Liu, Y., Zhang, X., Xu, Y., & Chen, H. (2023). Advancements in compressed air engine technology and power system integration: A comprehensive review. *Energy Reviews*, 2(4), 100050. <https://doi.org/10.1016/j.enrev.2023.100050>
- Tien, N. D., Quang, K. V., Luong, N. T., Tuyen, P. H., & Khanh, N. D. (2022). Study on improving emission conversion efficiency of three-way catalyst equipped in

- carburetor motorcycle by air supplement system. *International Journal of Ambient Energy*, 43(1), 2137-2145.
<https://doi.org/10.1080/01430750.2020.1725635>
- Tsai, J.-H., Yao, Y.-C., Huang, P.-H., & Chiang, H.-L. (2018). Fuel economy and volatile organic compound exhaust emission for motorcycles with various running mileages. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(12), 3056-3067.
<https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.08.0315>
- Van, N. N., & Duc, N. H. PV-INTEGRATED ELECTRIC TWO-WHEELER CHARGING STATIONS: A SOLUTION TOWARDS GREEN CITIES. <https://www.crossref.org/>
- Wang, Y.-W., You, J.-J., Sung, C.-K., & Huang, C.-Y. (2014). The applications of piston type compressed air engines on motor vehicles. *Procedia Engineering*, 79, 61-65. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.311>
- Yu, Q., & Cai, M. (2015). Experimental analysis of a compressed air engine. *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, 3(4), 144-153.
<https://doi.org/10.4236/jfcmv.2015.34013>
- Zhu, Y., Evers, D., Huigen, G., & Hommersom, G. (1990). SAE Technical Paper Series. <https://doi.org/10.4271/900123>