10.22034/jrenew.2025.216127

سال دوازدهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۴، ص ص ۲۰۰- ۲۰۸

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

Online ISSN 2676-2994 Print ISSN 2423-4931

مقاله ترویجی

تاریخ دریافت: ۰۳/۰۷/۰۶

تاریخ پذیرش: ۴۰۳/۱۱/۲۱

مقایسه وسایل نقلیه با سوخت زیستی، الکتریکی، پیل سوختی و انرژی خورشیدی برای کربن‌زدایی بخش حمل‌ونقل

علی قربانی[۱*]، ترحم مصری گندشمین[۲]، هیمن خودکام[۳]، هادی غائبی[۴]

۱- دانشجوی دکتری مکانیک بیوسیستم گرایش انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳- دانشجوی دکتری مکانیک بیوسیستم گرایش انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۴- استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

* اردبیل، ۵۹۵۱۹۹۴۹۴۶، Ali.Gorbani@uma.ac.ir

چکیده

تغییرات آب‌وهوایی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای بشر را ملزم به تغییر رویکرد استفاده از سوخت نمود و باتوجه به اینکه بخش اعظم انتشار گازهای گلخانه‌ای مربوط به سیستم حمل‌ونقل است باید تدابیری جهت کربن‌زدایی این بخش اندیشید. در حال حاضر درصد قابل توجهی از انرژی وسایل نقلیه توسط سوخت فسیلی تامین می‌شود. برای کاهش آلایندگی و گرمایش جهانی لازم است وسایل نقلیه پایدار جایگزین وسایل نقلیه با موتورهای احتراقی معمولی شوند. در این مطالعه به‌طورکلی ویژگی‌ها، مزایا و معایب چهار فناوری برجسته خودرو (وسایل نقلیه با سوخت زیستی، خودروهای پیل سوختی، وسایل نقلیه الکتریکی و وسایل نقلیه خورشیدی) بررسی و مقایسه شد. بین گزینه‌های مورد بررسی، وسایل نقلیه الکتریکی بیشترین پتانسیل کاهش CO_2 را ارائه می‌دهد. وسایل نقلیه الکتریکی و وسایل نقلیه خورشیدی به‌عنوان گزینه‌های عملی‌تر و پایدارتر شناخته می‌شوند. خودروهای پیل سوختی حداقل انتشار گازهای گلخانه‌ای در خروجی اگزوز را دارند. محدودیت زیرساختی، کمبود سوخت زیستی، افزایش وزن و سایش سریع لاستیک‌های خودرو برای خودروهای پیل سوختی وجود دارد. همچنین تناوب تولید انرژی خورشیدی برای وسایل نقلیه خورشیدی مشکل‌آفرین است. عملکرد وسایل نقلیه با انرژی خورشیدی تحت تاثیر تابش خورشید، دما و سایه قرار می‌گیرد. خودروهای الکتریکی در مقایسه با خودروهای معمولی انتشار گازهای گلخانه‌ای کمتری دارند. میزان کاهش آلاینده‌ها به منبع تولید برق بستگی دارد. تولید برق از منبع تجدیدپذیر باعث کاهش درصد اعظمی از گازهای گلخانه‌ای است؛ اما در صورتی که از منابع نفتی استفاده گردد تنها درصد جزئی از کاهش آلایندگی مشهود است.

کلیدواژگان: انتشار گازهای گلخانه‌ای، انرژی تجدیدپذیر، خودروهای با فناوری نوین، سوخت فسیلی، گرمایش جهانی.

Comparison of vehicles with biofuel, electric, fuel cell and solar energy for decarbonization of the transportation sector

Ali Gorbani[1*], Tarahom Mesri Gundoshmian[2], Himan Khodkam[3], Hadi ghaebi[4]

1-PhD student in Biosystem Mechanics, Renewable Energy, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Professor, Department of Biosystem Mechanics Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

3- PhD student in Biosystem Mechanics, Renewable Energy, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

4- Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

* P.O.B. 5951994946 Ardabil, Iran, Ali.Gorbani@uma.ac.ir

Received: ۲۷ September 2024 Accepted: ۰۹ February 2025

Authors retain the copyright and full publishing rights. This article is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Abstract
Climate change, driven by greenhouse gas emissions, has compelled humanity to rethink its approach to fuel consumption. Given that a significant portion of these emissions originates from the transportation sector, it is imperative to implement measures aimed at decarbonizing this industry. Currently, fossil fuels supply a large percentage of the energy used in vehicles. To mitigate pollution and combat global warming, sustainable vehicles must replace those powered by conventional internal combustion engines. This study provides a comprehensive examination and comparison of the features, advantages, and disadvantages of four prominent vehicle technologies: biofuel vehicles, fuel cell vehicles, electric vehicles, and solar vehicles. Among these options, electric vehicles demonstrate the greatest potential for reducing CO_2 emissions. Both electric and solar vehicles are recognized as more practical and sustainable alternatives. Fuel cell vehicles, on the other hand, produce the lowest greenhouse gas emissions in their exhaust. However, they face challenges such as infrastructure limitations, a shortage of biofuels, increased vehicle weight, and rapid tire wear. Solar vehicles, while promising, are hindered by the intermittent nature of solar power generation. Their performance is heavily influenced by factors such as sunlight availability, temperature, and shading. Electric vehicles, in comparison to conventional vehicles, emit significantly fewer greenhouse gases. However, the extent of this reduction depends on the source of electricity generation. When electricity is generated from renewable sources, greenhouse gas emissions are drastically reduced. Conversely, if electricity is derived from petroleum-based sources, the reduction in emissions is minimal.

Keywords: Emission of greenhouse gases, renewable energy, cars with new technology, fossil fuel, global warming.

۱- مقدمه

رواج روزافزون وسایل نقلیه متکی به سوخت‌های فسیلی، نگرانی‌هایی را دررابطه‌با مصرف انرژی و اثرات زیست‌محیطی ایجاد کرده است [۱]. استفاده از این نوع سوخت‌ها با افزایش سطوح آلاینده‌ها مانند ذرات معلق (PM)، اکسیدهای نیتروژن (NOx)، منوکسید کربن (CO) و دی اکسید گوگرد (SO_2) همراه است. طبق گزارش اتحادیه اروپا، تقریباً ۲۸ درصد انتشار دی‌اکسیدکربن (CO_2) ناشی از صنعت حمل‌ونقل است [۲]. در نتیجه، بعضی از کشورها برای کاهش وابستگی به مشتقات نفت و آلودگی هوا، وسایل نقلیه با انرژی نوین (NEVs) را جایگزین خودروهای با سوخت فسیلی کرده‌اند [۱].

وسایل نقلیه با سوخت‌های تجدیدپذیر مانند برق، هیدروژن و سوخت‌های زیستی فرصتی برای حرکت به سمت روش‌های حمل‌ونقل سازگارتر با محیط‌زیست و پایدار فراهم می‌کنند [۱]. اخیراً ادغام فناوری‌های پیشرفته در وسایل نقلیه با هدف افزایش ایمنی سرنشینان و عابران پیاده رواج بیشتری یافته است. مقالات بسیاری در مورد انواع وسایل نقلیه با انواع مختلف سوخت‌ها اعم از سوخت‌های فسیلی، زیستی، هیبریدی، فناوری پیل سوختی هیدروژنی و انرژی خورشیدی منتشر شده است. بااین‌حال، مقالات کمی به مقایسه وسیله نقلیه مختلف با انرژی جدید پرداخته‌اند.

۲- مواد و روش‌ها

هدف اصلی این تحقیق بررسی وسایل نقلیه با چهار سوخت جدید (سوخت زیستی، الکتریکی، پیل سوختی و خورشیدی) برای کاهش انتشار کربن است. پارامترهای اصلی اعم از مزایا، معایب و ویژگی هر یک از سوخت‌ها به‌صورت مختصر و مفید بیان می‌شود. هر یک از سوخت‌های بیان شده در کاهش کربن نقش دارند و به کمک این مقاله می‌توان دریافت که کدام‌یک قابلیت اجرای بیشتری دارد.

۲-۱- بررسی اجمالی وسایل نقلیه سوخت زیستی[1] (BPVs)

اکنون ۸۰ درصد انرژی جهان از سوخت‌های فسیلی تامین می‌شود که بخش اعظم آن صرف حمل‌ونقل می‌گردد [۳]. تقریباً ۱۰ درصد از انرژی جهان از طریق انرژی‌های زیستی تامین می‌شود. پیش‌بینی شده است تا سال ۲۰۶۰ تولید انرژی‌های زیستی از سطح ۵۶ به ۱۴۵ EJ برسد [۴]. امروزه سوخت‌های زیستی تولیدی از مواد اولیه طبیعی (منابع تجدیدپذیر) جایگزین سوخت‌های فسیلی می‌شوند. سوخت‌های زیستی جایگزین مناسبی برای پاسخگویی به تقاضای آینده و در عین حال کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و اثرات زیست‌محیطی هستند [۵]. زیست‌توده یک ماده آلی است که از منابع مختلفی از جمله پسماند جامد شهری، جنگلی و... به دست می‌آید که به دلیل انرژی شیمیایی نهفته آن، یک منبع انرژی جایگزین بشمار می‌آید. پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۵۰، زیست‌توده تقریباً دو سوم کل منابع انرژی تجدیدپذیر را تشکیل دهد [۶].

اغلب کشورهای درحال‌توسعه دچار ناامنی انرژی هستند و برای حل این مشکل می‌توانند از زمین‌های حاصلخیز موجود محصولات انرژی‌زا جهت تأمین سوخت‌های زیستی تولید کنند. استفاده روزافزون وسایل نقلیه با موتورهای احتراق داخلی سبب افزایش تقاضا برای سوخت‌های مبتنی بر نفت می‌شود که اثرات منفی بر محیط‌زیست، سلامت انسان و گرم‌شدن کره زمین دارد. کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای با استفاده از سوخت زیستی در خودروها میسر است [۷]. برای رسیدن به شهری پایدار و پاک لازم است سوخت‌های زیستی جایگزین بنزین و گازوئیل شود زیرا کاهش روز افزون منابع سوخت‌های فسیلی و افزایش گرمایش جهانی مشهود است. سوخت‌های مبتنی به نفت را می‌توان به عنوان مواد اولیه در صنایع پتروشیمی مورد استفاده قرار داد یا با نرخ بالاتر صادر نمود. افزایش دمای جهان سبب تغیرات اقلیمی و بروز انواع بیماری در انسان می‌شود.

۲-۱-۱- طبقه‌بندی سوخت‌های زیستی

برخلاف فرایند طبیعی و بسیار کند تولید سوخت‌های فسیلی، سوخت زیستی به‌سرعت از منابع بیولوژیکی تولید می‌شوند. سوخت‌های سازگار با محیط‌زیست بر اساس مواد اولیه و روش‌های تولید به چندین دسته تقسیم می‌شوند

[1] biofuel-powered vehicles

[۸] که از نظر حالت‌های فیزیکی می‌توان به دسته‌های مایع، گاز و جامد تقسیم نمود. زیست‌توده به دلیل ساختار مبتنی بر کربن و توانایی تبدیل مستقیم به سوخت مایع به‌عنوان بالقوه‌ترین منبع انرژی تجدیدپذیر در نظر گرفته می‌شود که در درازمدت می‌تواند در تامین انرژی جهان نقش داشته باشد. سوخت‌های زیستی مایع و گازی می‌توانند در انواع مختلف وسایل نقلیه استفاده شوند [۹]. اخیراً بیودیزل از بین سوخت‌های زیستی محبوبیت پیدا کرده است [۱۰]. طبق گزارش IRENA[۱]، تا سال ۲۰۳۰ میزان ۱۰ درصد از انرژی مورد استفاده در بخش حمل‌ونقل از سوخت‌های زیستی مایع تامین می‌شود [۱۱].

بیو اتانول به دلیل عدد ستان بالاتر، پایداری و گرمای قابل‌توجه تبخیر به‌عنوان یک جایگزین برای سوخت‌های فسیلی شناخته می‌شود [۱۲]. شباهت سوخت بیواتانول و بنزین، موتور را از انجام تغییرات بی‌نیاز کرده است و فقط در درصدهای بالا یا استفاده ۱۰۰ درصدی اتانول، نیاز به اعمال تغییراتی در موتور است. اتانول زیستی توانایی استفاده خالص یا ترکیب با بنزین در برخی از وسایل نقلیه را دارد [۱۳]. بیومتانول از لحاظ بازده انرژی ویژه نسبت به بیواتانول برتری دارد و همچنین سهولت ذخیره‌سازی، حمل‌و-نقل راحت‌تر سوخت و حالت مایع در دمای اتاق از دیگر مزیت‌های این سوخت است [۱۴]. امکان تولید متانول از دو روش بیولوژیکی و ترموشیمیایی وجود دارد [۱۵].

بیو بوتانول به‌عنوان سوخت زیستی نسل دوم شناخته می‌شود. مطالعات متعدد اثرات سودمند ترکیب بیو بوتانول با مخلوط‌های متفاوت در گازوئیل را نشان داده‌اند. بیو بوتانول به دلیل خورندگی کمتر، محتوای انرژی و نقطه اشتعال بالاتر و کاهش فشار بخار عملکرد بهتری از بیو اتانول و بیو متانول دارد. بهره‌وری پایین از ویژگی منفی بیو بوتانول نسبت به سایر الکل‌های زیستی است [۱۶]. استفاده مستقیم روغن‌های زیستی در موتورهای اشتعال تراکمی (CI) به دلیل چگالی بالا، ویسکوزیته بالا، جرم مولی زیاد و فراریت کم (به دلیل وجود چربی‌های غیراشباع) توصیه نمی‌شود [۱۷].

بیودیزل (متشکل از آلکیل استرهای مشتق شده از اسیدهای چرب آزاد) جایگزینی برای گازوئیل است. بیودیزل به دلیل توانایی آن در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند CO_2، CO، SO_2 و HC به‌عنوان یک منبع انرژی پاک در نظر گرفته می‌شود [۱۸]؛ بنابراین استفاده از بیودیزل به حفظ تعادل اکولوژیکی کمک می‌کند. بیودیزل را می‌توان بدون نیاز به هیچ گونه تغییری در موتورهای احتراق تراکمی (CIE) به صورت ترکیبی با گازوئیل به نسبت ۵ تا ۲۰ درصد حجمی (به عنوان مخلوط B5-B20 نامیده می‌شود) استفاده کرد. به منظور افزایش درصد مخلوط باید تغییراتی در موتورها جهت بهبود ویژگی‌های عملیاتی خود مانند زمان تزریق، نسبت تراکم و فشار تزریق انجام داد [۱۹]. بیودیزل از هیدروکربن‌هایی تشکیل شده است که هیچ گونه اجزای معطری ندارند. بیودیزل یک جایگزین برتر برای رسیدگی به مشکل کاهش سریع سوخت‌های فسیلی، آلودگی هوا و گرمایش جهانی است. روغن‌های گیاهی، چربی‌های حیوانی، پسماند روغن پخت‌وپز و زیست‌توده لیگنوسلولزی از منابع تولید بیودیزل بشمار می‌روند.

بیو بنزین نوعی بنزین است که از چغندر، نیشکر یا زیست‌توده سلولزی به دست می‌آید. بیو بنزین به دلیل اجزای سبک‌تر و ویژگی‌های فیزیکی متمایز، انتشار آلاینده‌های کمتری را در طی احتراق نشان می‌دهد. علاوه بر این، انرژی به‌دست‌آمده از بیو بنزین به دلیل وزن مولکولی بالاتر اجزای مشتق‌شده از جلبک، به طور قابل‌توجهی بیشتر از اتانول مبتنی بر ذرت است که با بنزین معمولی مخلوط می‌شود [۲۰].

سوخت‌های زیستی گازی مانند بیوگاز، بیومتان، بیو هیدروژن و گاز سنتز می‌توانند برای تولید انرژی حرارتی و الکتریکی استفاده شوند. بیو هیدروژن به‌عنوان عملی‌ترین جایگزین برای منابع انرژی معمولی شناخته می‌شود [۲۱]. بیوگاز نوعی سوخت زیستی است که در اثر تجزیه میکروب‌ها در حالت بی‌هوازی استحصال می‌شود. بیوگاز را می‌توان برای تولید طیف وسیعی از سوخت‌های حمل‌ونقل از جمله سوخت‌های بیومتان فشرده (CBG)[۲]، بیومتان مایع (LBG)[۳]، هیدروژن، متانول و دی متیل اتر استفاده کرد [۲۲]. برای تولید بیومتان، بیوگاز را تحت یک فرایند تصفیه قرار می‌دهند که به‌عنوان بیوگاز ارتقایافته نیز شناخته می‌شود. بیومتان مشتق شده از زیست‌توده یک جایگزین سازگار با محیط‌زیست برای تأمین سوخت وسایل نقلیه با گاز طبیعی فشرده است [۲۳]. با تبدیل پسماند به سوخت، به مفهوم اقتصاد دایره‌ای کمک می‌کند [۲۴].

می‌توان CBG تولیدی از بیوگاز را به‌عنوان یک جایگزین تجدیدپذیر برای گاز طبیعی فشرده (CNG)[۴] در وسایل نقلیه استفاده کرد [۲۵]. بیوگاز را می‌توان علاوه بر CBG و LBG به انواع سوخت‌های پایدار مانند هیدروژن، متانول یا DME تبدیل نمود [۲۶]. برای استفاده از بیوگاز به عنوان سوخت، لازم است آن را با حذف CO_2 و سایر آلاینده‌ها تصفیه کرد [۲۷]. تبدیل بیوگاز به سایر سوخت‌های پایدار سبب افزایش دامنه کاربرد خواهد شد. حالت مایع، ذخیره‌سازی راحت‌تری دارد و همچنین امکان ذخیره بیشتر سوخت عامل افزایش میزان برد وسیله‌نقلیه است. در اینصورت تعداد سوخت‌گیری‌ها و هدر رفت زمان جهت سوخت‌گیری کاهش می‌یابد و همچنین خطرات ناشی از ذخیره‌سازی (به دلیل فشار کم در داخل مخزن) به حداقل مقدار ممکن می‌رسد.

۲-۱-۲- ویژگی‌های تکنولوژیکی وسایل نقلیه سوخت زیستی

سوخت‌های زیستی مایع اغلب با بنزین/گازوئیل معمولی یا با جایگزینی کامل آنها مورد استفاده قرار می‌گیرند. به طور معمول، استفاده از سوخت‌های زیستی مایع نیازی به تغییرات خاصی ندارد [۲۸]. خودروهای سوخت زیستی گازی، بیوگاز را در مخازن تحت‌فشار (در حالت گازی) ذخیره می‌کنند [۲۹]. LBG ظرفیت ذخیره‌سازی سوخت بیشتری را در وسایل نقلیه ممکن می‌سازد و در نتیجه چگالی انرژی بالاتری نسبت به CBG دارد. برد خودروهای سوخت زیستی گازی اغلب کوتاه‌تر از وسایل نقلیه مشابه دیزلی یا بنزینی است؛ زیرا گاز طبیعی چگالی انرژی کمتری دارد [۳۰]. درصد عمده گازهای گلخانه‌ای (به‌عنوان محصول جانبی احتراق سوخت بنزین) را مونوکسید کربن (CO)، دی‌اکسیدکربن (CO_2)، هیدروکربن نسوخته و اکسیدهای نیتروژن (NOx) را تشکیل می‌دهد که گاز طبیعی، برخی از این آلاینده‌های موتور را کاهش می‌دهد [۳۱].

[۱] آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر

[2] compressed biomethane
[3] liquefied natural gas
[4] compressed natural gas

اختلاط با درصدهای پایین، موتور را از ایجاد تغییرات بی‌نیاز می‌کند. درصد استفاده از سوخت‌های زیستی با میزان آلایندگی‌های خروجی از اگزوز رابطه عکس دارند؛ یعنی با افزایش درصد سوخت‌های زیستی میزان آلایندگی‌ها کاهش می‌یابد؛ اما درصد اختلاط باید از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه باشد. وسایل نقلیه سوخت زیستی هنگام استفاده در سیستم حمل‌ونقل دارای مزایا و معایبی هستند. جدول ۱ مزایا و معایب وسایل نقلیه سوخت زیستی را مورد بحث قرار می‌دهد [۳۲].

جدول ۱ مزایا و معایب وسایل نقلیه سوخت زیستی

جوانب منفی	جوانب مثبت
نیاز به بهبود بهره‌وری فن آوری‌های تولید سوخت زیستی	تجدیدپذیر هستند و پایداری را ارتقا می‌دهند.
هزینه گزاف فناوری سوخت زیستی	قابلیت اطمینان بالاتر
نیاز به فرایندهای پیش‌تصفیه	کمک به ثبات قیمت انرژی
تولید آن در سطوح تجاری می‌تواند چالش‌برانگیز باشد.	کاهش وابستگی به منابع انرژی خارجی
نیاز به بودجه برای تحقیق‌وتوسعه	حمایت از توسعه روستایی
نیاز به یارانه برای تولید سوخت زیستی	کمک به کاهش آلودگی هوا
نیاز به امکانات ذخیره‌سازی تخصصی	منبع تولید آن پسماندها هستند
امکان رقابت با مواد غذایی	باعث جذب کربن
نیاز به بهبود بهره‌وری فن آوری‌های تولید سوخت زیستی	تجدیدپذیر هستند و پایداری را ارتقا می‌دهند.
هزینه گزاف فناوری سوخت زیستی	قابلیت اطمینان بالاتر

۲-۲- مروری بر وسایل نقلیه الکتریکی (EVs) و وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی

تغییرات آب‌وهوایی و امنیت تأمین انرژی، صنعت حمل‌ونقل را از سوخت‌های فسیلی به‌سوی فناوری‌های با پایداری طولانی‌مدت سوق می‌دهد. خودروهای الکتریکی یک فناوری بالقوه برای کاهش شدید انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از حمل‌ونقل جاده‌ای هستند [۳۳]. بزرگ‌ترین نقطه‌ضعف خودروهای الکتریکی عدم استقلال آنهاست. از سوی دیگر، محققان برای افزایش برد رانندگی، کاهش زمان شارژ، وزن و هزینه بر روی فناوری باتری متمرکز شده‌اند [۳۴]. وسایل نقلیه الکتریکی به‌صورت زیر طبقه‌بندی خواهند شد که در شکل ۱ نشان‌داده‌شده است:

خودروهای برقی هیبریدی پلاگین (PHEVs)[1]: این نوع خودروها توسط یک موتور احتراق معمولی و یک موتور الکتریکی (که توسط یک منبع الکتریکی خارجی شارژ می‌گردد) تغذیه می‌شوند. در شرایط عادی رانندگی، PHEVها با ذخیره انرژی از شبکه میزان مصرف بنزین خود را به‌صورت چشمگیری کاهش می‌دهند [۳۵].

وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی (HEV)[2]: وسایل نقلیه هیبریدی توسط ترکیبی از یک موتور احتراق داخلی و یک موتور الکتریکی کار می‌کنند [۳۶] و امکان اتصال به شبکه وجود ندارد. در واقع باتری تامین کننده انرژی الکتریکی توسط موتور احتراقی خودرو شارژ می‌شود. اخیراً از نیروی ترمز نیز برای شارژ باتری (تبدیل انرژی جنبشی به انرژی الکتریکی) استفاده می‌کنند [۳۷].

وسایل نقلیه الکتریکی پیل سوختی (FCEVs)[3]: این خودروها دارای موتور الکتریکی هستند که از ترکیب هیدروژن فشرده و اکسیژن موجود در هوا استفاده می‌کند. آب تنها خروجی حاصل از این فرایند است به همین دلیل دارای "آلودگی صفر" هستند [۳۸].

شکل ۱ طبقه‌بندی وسایل نقلیه الکتریکی

خودروهای الکتریکی با برد گسترده (ER-EV): این خودروها به یک موتور احتراق ثانویه جهت شارژ باتری‌های خودرو مجهز هستند. این موتور بر خلاف موتورهای موجود در PHEV و HEV، فقط برای شارژ استفاده می‌شود و به چرخ‌های خودرو متصل نیست [۳۹]. در شکل ۱ انواع وسایل نقلیه الکتریکی طبقه‌بندی شده است. جدول ۲ نقاط مثبت و محدودیت های وسایل نقلیه الکتریکی را فهرست می‌کند.

جدول ۲ مزایا و معایب وسایل نقلیه الکتریکی

منفی	جوانب مثبت
زیرساخت سوخت‌گیری محدود	بهره‌وری بالاتر
هزینه اولیه بالاتر	چگالی انرژی بالاتر نسبت به سایر سوخت‌های معمولی
هزینه بالای تولید خودرو	بهبود شتاب و انتقال نیرو در مقایسه با فناوری موتور احتراقی
به‌شدت قابل‌اشتعال	قابلیت شارژ مجدد سیستم باتری
هزینه باتری و تعویض آن	کارکرد موتور بدون صدا

۲-۳- مروری بر وسایل نقلیه الکتریکی پیل سوختی (FCEVs)

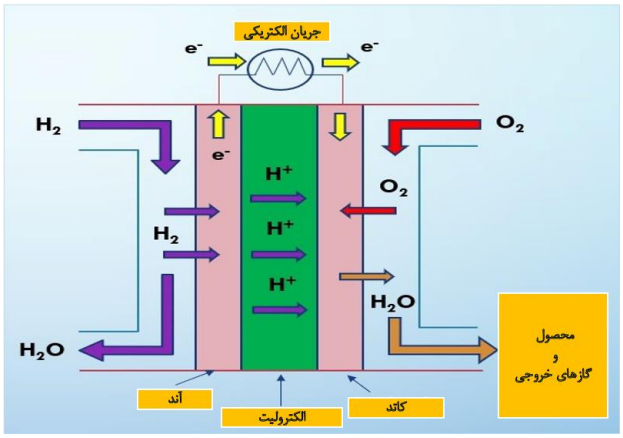
خودروها یکی از دلایل افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه افزایش گرمایش زمین هستند. بااین‌حال، بسیاری از وسایل نقلیه از مشتقات نفت خام مبتنی بر سوخت فسیلی استفاده می‌کنند. سوزاندن سوخت‌های فسیلی گازهای گلخانه‌ای بیشتری تولید می‌کند؛ بنابراین برای کاهش آلایندگی، وسایل نقلیه الکتریکی جایگزین می‌شوند. خودروهای الکتریکی مبتنی بر پیل سوختی به دلیل زمان سوخت‌گیری کوتاه و وزن کمتر، بهتر از خودروهای الکتریکی مبتنی بر باتری عمل می‌کنند. وسایل نقلیه FCEVs زیرمجموعه‌ای از وسایل نقلیه الکتریکی هستند که یک موتور الکتریکی را با برق تولیدی

[1] Plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs)
[2] Hybrid electric vehicles (HEV)
[3] Fuel Cell Electric Vehicles (FCEVs)

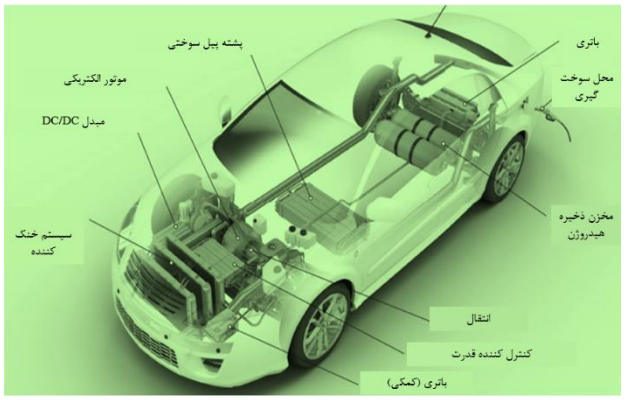
توسط پیل سوخت راه‌اندازی می‌کند. FCEVها از تبدیل گاز هیدروژن برای تولید انرژی استفاده می‌کنند [۴۰].

پیل سوختی (PEM)[1] یک گزینه محبوب برای کاربردهای خودرو است [۴۱]. پیل سوختی بر اساس فرآیند الکترولیز عمل می‌کند. فرآیند الکترولیز بین دو الکترود پیل سوختی انجام می‌شود. از آنجایی که هیدروژن و اکسیژن به صورت الکتروشیمیایی واکنش می‌دهند، پیل سوختی بلافاصله هیدروژن یا سوخت‌های مبتنی بر هیدروژن را به انرژی و گرما تبدیل می‌کند. الکترولیز فرآیند اتفاقی در سلول‌های سوختی برگشت‌پذیر است [۴۱]. واکنش‌های الکتروشیمیایی اساسی که در سراسر الکترودهای آند و کاتد رخ می‌دهد در شکل ۲ نشان داده شده است [۴۲]. طراحی مجموعه داخلی برای یک وسیله نقلیه الکتریکی پیل سوختی در شکل ۳ نشان داده شده است [۴۳].

وسایل نقلیه الکتریکی پیل سوختی برد طولانی و آلایندگی صفر دارند؛ اما آنها با چالش‌های مربوط به زیرساخت، هزینه و رقابت با سایر فناوری‌های خودروهای الکتریکی روبرو هستند. جدول ۳ لیستی از جوانب مثبت و منفی یک وسیله نقلیه الکتریکی پیل سوختی را از را فهرست می‌کند [۴۴]. به‌طورکلی خودروهای پیل سوختی به دلیل جوانب مثبت زیادی که دارد امیدوار کننده است؛ اما به دلیل یکسری محدودیت‌ها امکان عملی‌بودن آن خصوصاً در حالت کلان مشکل است. با تحقیق و پژوهش می‌توان محدودیت‌های کنونی جهت تجاری‌سازی را رفع و خودروی مقرون‌به‌صرفه روانه بازار نمود.



شکل ۲ مکانیسم واکنش الکتروشیمیایی یک پیل سوختی



شکل ۳ اجزای فنی یک وسیله نقلیه الکتریکی پیل سوختی

جدول ۳ مزایا و معایب وسایل نقلیه الکتریکی پیل سوختی

جوانب منفی	جوانب مثبت
ذخیره‌سازی هیدروژن	انتشار گازهای خروجی صفر
محدودیت زیرساخت	چگالی انرژی بالاتر نسبت به سایر سوخت‌های معمولی
سوخت‌گیری	
هزینه تولید هیدروژن	تولید H_2 تجدیدپذیر از نیروی باد و خورشیدی
هزینه اولیه تولید خودرو	برد طولانی سفر
به‌شدت قابل‌اشتعال	زمان سوخت‌گیری کوتاه
هزینه مواد کاتد/آند	کارکرد موتور بدون صدا

۲-۴- خودرو با فتوولتائیک یکپارچه (وسایل نقلیه با انرژی خورشیدی)

ادغام سیستم‌های فتوولتائیک در وسایل نقلیه به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با حمل‌ونقل و تغییرات آب‌وهوایی کمک می‌کند. انرژی‌های تجدیدپذیر زیادی جهت سوخت وسایل نقلیه معرفی شده است که فناوری فتوولتائیک یکی از منابع پایدار انرژی بشمار می‌رود [۴۵]. شکل ۴ نمونه‌ای از خودرو فتوولتائیک یکپارچه را نمایش می‌دهد [۴۶].

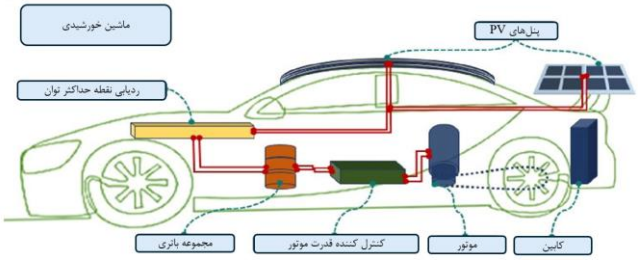
۱

[1] polymer electrolyte membrane

شکل ۴ خودرو با فتوولتائیک یکپارچه

۲-۴-۱- اصول کار خودروهای خورشیدی (خودرو با فتوولتائیک یکپارچه)

پنل‌های فتوولتائیک دارای سلول‌های فتوولتائیک [1] یکپارچه هستند که نور خورشید را به برق تبدیل می‌کنند. خودروهای خورشیدی از سلول‌های فتوولتائیک برای تبدیل نور خورشید به انرژی الکتریکی استفاده می‌کنند [۴۷]. نور خورشید (فوتون‌ها) در صورت برخورد به سلول‌های PV سبب تحریک الکترون‌ها و ایجاد جریان الکتریکی می‌گردد. سلول‌های PV از مواد نیمه هادی مانند سیلیکون و آلیاژهای ایندیم، گالیم و نیتروژن ساخته می‌شوند. سیلیکون کریستالی با نرخ بازده ۱۵-۲۵ درصد رایج‌ترین ماده در ساخت پنل‌های خورشیدی است. برای دریافت بیشترین میزان تابش، پنل‌های خورشیدی را در سقف خودروهای خورشیدی نصب می‌کنند [۴۸]. شکل ۵ اجزای کلیدی یک وسیله نقلیه خورشیدی را نشان می‌دهد که شامل یک پنل PV، موتور، کنترل کننده قدرت موتور، مجموعه باتری و کابین راننده است.

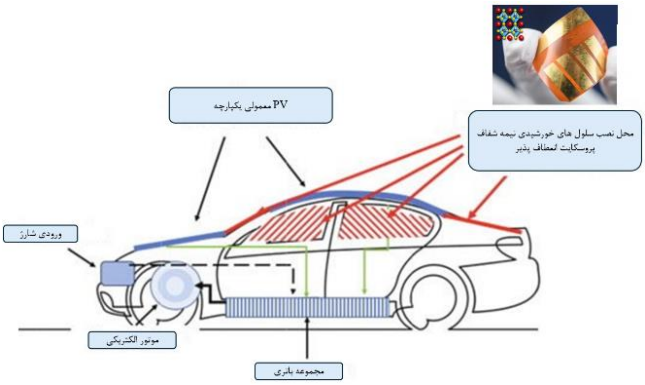


شکل ۵ اجزای فنی یک وسیله نقلیه خورشیدی

۲-۴-۲- عملکرد بر اساس آب‌وهوا، طراحی و جنبه‌های انتشار

تابش خورشیدی عامل اصلی در طراحی فتوولتائیک‌های یکپارچه خودرو [2] (VIPV) است که عملکرد سیستم بسته به منطقه آب‌وهوایی می‌تواند متفاوت می‌باشد. تغییرات تابش خورشیدی، دما و رطوبت همگی بر کارایی سیستم تاثیر دارند. عملکرد سیستم‌های VIPV در مناطق مختلف آب‌وهوایی متفاوت می‌باشد و طراحی یک سیستم برای بکارگیری در همه مکان‌ها دشوار است.

وسایل نقلیه پتانسیل استفاده کامل از انرژی خورشیدی را ندارند. نتایج مطالعه‌ای نشان داد که در بهترین شرایط آب‌وهوایی حدود ۳۵ درصد مسافت پیموده شده یک خودرو را می‌توان از انرژی خورشیدی دریافت کرد [۴۸] که در شرایط آب‌وهوایی نامساعد به ۱۲ درصد نیز کاهش می‌یابد [۴۹]. نتایج مطالعه‌ای دیگر نشان داد رطوبت هوا، حضور ابر و جهت‌گیری ساختمان‌ها بر عملکرد تاثیر دارند. با وجود این عوامل امکان کاهش چشمگیر عملکرد نسبت به روزهای آفتابی وجود دارد. شکل ۶ مکان نصب انواع پنل‌های خورشیدی را به تصویر کشده است [۵۰]؛ بنابراین جهت استفاده از این تکنولوژی باید قبل از احداث منطقه، از برنامه‌ریزی شهری برای جهت‌گیری ساختمان‌ها جهت کاهش سایه‌اندازی (کمینه مقدار ممکن) استفاده شود.



شکل ۶ نقاط ادغام و انواع پنل‌های PV برای وسایل نقلیه خورشیدی

وسایل نقلیه الکتریکی خورشیدی [3] (EVs) به‌عنوان راه‌حلی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از حمل‌ونقل دیده می‌شود. منبع تامین برق جهت شارژ خودروهای برقی یک عامل بسیار مهم و حائز اهمیت است. نتایج مطالعه‌ای نشان داد در صورت استفاده از زغال‌سنگ برای تولید برق این خودروها، تنها مقدار جزئی از انتشار گازهای گلخانه‌ای نسبت به وسایل نقلیه معمولی کاهش می‌یابد [۵۱]. در مطالعه‌ای دیگر اثرات وسایل نقلیه الکتریکی بر انتشار آلاینده‌ها و سلامت انسان بررسی شد. نتایج نشان داد که خودروهای الکتریکی تاثیر مثبتی بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا در مقایسه با خودروهای معمولی دارند. اما میزان کاهش به منبع تولید برق بستگی دارد [۵۲]. در هر صورت کاهش آلایندگی مشهود است؛ ولی کاهش واقعی آلاینده‌ها توسط خودروهای برقی بستگی به منبع تولید برق دارد. درصورت استفاده از منبع تولید برق تجدیدپذیر شاهد کاهش ۱۰۰ درصدی خواهیم بود؛ اما لازم به ذکر است برای تولید و ساخت منابع تجدیدپذیر مقداری آلایندگی تولید می‌شود.

خودرو با سلول‌های فتوولتائیک دارای منحنی‌ها، خطوط نرم و اشکال ارگانیک هستند که به خودرو امکان می‌دهد در هوا بلغزد و انرژی ازدست‌رفته از طریق مقاومت هوا را به حداقل می‌رساند. ضریب درگ خوب (کم) به معنای خودرویی اقتصادی‌تر است که انرژی کمتری مصرف و مسافت بیشتری را طی می‌کند. در شکل ۷ نمونه‌ای از خودروی دارای سلول فتوولتائیک نمایش داده شده است [۴۶].

[1] photovoltaic cells (PV cells)
[2] vehicle-integrated photovoltaics (VIPV)
[3] Solar electric vehicles

شکل ۷ طراحی خودروی دارای سلول فتوولتاییک

فناوری خورشیدی یکپارچه نیاز به شارژ را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. امکان شارژ در حضور نور فراهم است (چه در حالت پارک و چه در حال حرکت). با حداکثر سرعت شارژ خورشیدی (۱.۰۵ کیلووات) می‌تواند تا ۷۰ کیلومتر (بسته به شرایط، مکان و فصل) برد آزاد و پاک در روز داشته باشد. [۴۶].

مهم‌ترین مزیت خودروهای خورشیدی توانایی آنها در شارژ مداوم باتری‌ها حتی در حالت پارک شده در زیر نور مستقیم خورشید هستند. این فرایند به طور موثر هزینه‌های جاری مرتبط با وسیله نقلیه را حذف می‌کند [۵۳]. از معایب این روش: ۱) قیمت بالای پنل خورشیدی است که موجب افزایش قیمت خودروی خورشیدی می‌شود. ۲) بهره‌وری و کارایی پایین پنل خورشیدی ۳) وابستگی وسایل نقلیه خورشیدی به آب‌وهوا (ساعات کار بهینه محدودی در روز وجود دارد). استفاده از پنل‌های خورشیدی در خودروها باعث کاهش ظرفیت باتری مورد استفاده می‌شود که به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید برق و تولید باتری کمک می‌کند. بااین‌حال، ساخت سلول‌های PV ممکن است به نوبه خود باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای اضافی شود و نیاز به سایر مواد کمیاب را افزایش دهد. علاوه بر این، موقعیت جغرافیایی خودرو بر میزان برق تولید شده توسط سلول‌های PV و همچنین مصرف انرژی در هر کیلومتر رانندگی تاثیر می‌گذارد.

۳- بینش در مورد انتشار CO_2 از وسایل نقلیه مختلف

مقدار انتشار CO_2 برای هر نوع وسیله نقلیه بسته به عوامل مختلف متفاوت است و ممکن است نیاز به تجزیه‌وتحلیل دقیق بر اساس فرضیات خاص داشته باشد.

منبع سوخت مصرفی و روش تولید: انتشار CO_2 از یک وسیله نقلیه سوخت زیستی به مواد اولیه و روش‌های تولید آن بستگی دارد. شیوه‌های تولید پایدار از جمله استفاده از مواد بازیافتی و فرایندهای کارآمد انرژی می‌تواند انتشار CO_2 را در انواع خودروها کاهش دهد.

اندازه و کارایی خودرو: خودروهای بزرگ‌تر و کارآمدتر بدون توجه به نوع سوخت، CO_2 بیشتری در هر کیلومتر منتشر می‌کنند.

مکان و ترکیب شبکه: به طور چشمگیری ترکیب برق مورد استفاده بر وسایل نقلیه الکتریکی و پیل سوختی تاثیر می‌گذارد. به‌طورکلی مناطقی با ضریب نفوذ انرژی تجدیدپذیر بالا منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شوند.

شیوه‌های تولید: انتشار CO_2 در وسایل نقلیه بستگی به عواملی همچون نوع سوخت زیستی مورد استفاده، نوع موتور، راندمان فرایندهای تولید، اجزاء و مواد مورد استفاده در ساخت و مونتاژ خودرو دارد.

مرحله استفاده: انتشار CO_2 در مرحله استفاده از وسایل نقلیه تا حد زیادی به‌شدت کربن سوخت، منبع برق برای شارژ و نیازهای انرژی کمکی بستگی دارد. شارژ با برق تولیدی از منابع تجدیدپذیر به طور قابل‌توجهی انتشار CO_2 را در مقایسه با شارژ با برق از سوخت‌های فسیلی کاهش می‌دهد.

فرایندهای پایان عمر: انتشار CO_2 بسته به کارایی بازیافت اجزای خودرو، پنل خورشیدی، باتری‌ها و مواد پیل سوختی متفاوت است.

با درنظرگرفتن این عوامل، یک نمای کلی از محدوده انتشار CO_2 برای هر یک از خودرو در زیر ارائه شده است [۴۶]. مقادیر خاص می‌توانند بسیار متفاوت باشند.

- سوخت زیستی: ۳۰ تا ۱۵۰ درصد از آلاینده‌های خودروهای بنزینی (بسته به مواد اولیه و تولید)
- وسیله نقلیه الکتریکی: ۳۰-۳۰۰ گرم CO_2/km (بسته به ترکیب شبکه و ساخت)
- وسیله نقلیه خورشیدی: ۲۰ تا ۱۲۰ گرم CO_2/km (انتشارهای متمرکز بر تولید)
- وسیله نقلیه پیل سوختی: ۰-۲۰۰ گرم CO_2/km (بسته به منبع هیدروژن)

۴- نتیجه گیری

وسایل نقلیه الکتریکی (EVs) در حال حاضر بیشترین پتانسیل را برای کاهش انتشار CO_2 ارائه می‌دهند که در چرخه عمرشان ۵۰ تا ۸۰ درصد کمتر از خودروهای بنزینی است. استفاده از وسایل نقلیه پایدار به طور قابل توجهی انتشار کربن را کاهش می‌دهد و باعث ایجاد چشم‌انداز حمل‌ونقل پاک‌تر می‌شود. پذیرش گسترده خودروهای الکتریکی از طریق کاهش وابستگی به سوخت، کاهش هزینه‌های نگهداری و ایجاد شغل جدید در بخش انرژی پاک به مزایای اقتصادی منجر می‌شود.

تجزیه‌وتحلیل مقایسه‌ای نشان داد که وسایل نقلیه الکتریکی و وسایل نقلیه خورشیدی در حال حاضر به‌عنوان گزینه‌های عملی‌تر و پایدارتر شناخته می‌شوند، درحالی‌که وسایل نقلیه با سوخت زیستی کامل و وسایل نقلیه پیل سوختی با چالش‌هایی روبرو هستند که باید موردتوجه قرار گیرند. در جدول ۴ مقایسه‌ای کلی بین انواع وسایل نقلیه انجام شده است که نقاط قوت و ضعف هر فناوری را نشان می‌دهد:

وسایل نقلیه سوخت زیستی: انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهند، اما نگرانی‌هایی در مورد پایداری مواد اولیه وجود دارد.

وسایل نقلیه پیل سوختی: حداقل انتشار گازهای گلخانه‌ای در خروجی اگزوز تولید می‌کنند، اما به زیرساخت هیدروژن تمیز نیاز دارند و با چالش‌های هزینه مواجه هستند.

خودروهای برقی: کاهش قابل‌توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند، اما بر کربن‌زدایی شبکه تکیه می‌کنند و با زیرساخت شارژ و هزینه باتری با چالش‌هایی روبرو هستند.

SV: پتانسیل انتشار صفر را با اثرات زیست‌محیطی محدود ارائه می‌دهد، اما برای رفع محدودیت‌های برد و وابستگی به آب‌وهوا نیاز به توسعه بیشتر دارد.

چندین چالش مانند کمبود سوخت زیستی، افزایش وزن، سایش سریع لاستیک‌های خودرو، محدودیت‌های زیرساختی برای وسایل نقلیه پیل سوختی وجود دارد و همچنین متناوب بودن انرژی خورشیدی برای وسایل نقلیه خورشیدی باید موردتوجه قرار گیرند. عملکرد وسایل نقلیه با انرژی خورشیدی تحت تاثیر تابش خورشید، دما و سایه قرار می‌گیرد. وسایل نقلیه با انرژی خورشیدی در صورت ترکیب با سیستم‌های پشتیبان هیبریدی بر چالش‌های مرتبط با تغییرات فصلی و کاهش دسترسی به نور خورشید غلبه می‌کنند. ارزیابی آب‌وهوای منطقه برای استفاده از فتوولتائیک در وسایل نقلیه الکتریکی بسیار مهم است که منجر به راه‌حل‌های موفق حمل‌ونقل با انرژی خورشیدی می‌شود.

برای تقویت تحرک پایدار باید بر روی به چالش‌های فنی مختلف متمرکز شد که شامل پیشرفت در فناوری باتری، کاهش زمان شارژ، به‌حداقل‌رساندن تخریب باتری، وزن پنل‌های خورشیدی، بهبود کارایی پنل‌های خورشیدی، بهبود زیرساخت‌های شارژ، روش‌های تولید هیدروژن و روش‌های دفع برای افزایش دوام وسایل نقلیه سبز است.

جدول ۴ مقایسه وسایل نقلیه از جنبه‌های مختلف

برقی	پیل سوختی	خورشیدی	سوخت‌های زیستی	پارامترها	
باتری و موتور الکتریکی برق متوسط انفجار باتری	پیل سوختی و موتور الکتریکی هیدروژن بالا هیدروژن	باتری و موتور سلول خورشیدی نور خورشید پایین انفجار باتری	موتور سوخت‌های زیستی بسیار بالا اشتعال‌پذیری سوخت	منبع تغذیه اجزای اصلی سوخت مسافت پیموده شده/ برد خطرات احتمالی	فنی
متوسط بالا متوسط پایین	پایین خیر بالا متوسه	موردنیاز نیست خیر بسیار بالا صفر	تأسیس شد بله پایین بالا	زیرساخت امکان هیبریداسیون هزینه اولیه هزینه در حال اجرا	اقتصادی
صفر	صفر (بخار آب)	صفر	بستگی به سوخت دارد	انتشار گازهای گلخانه‌ای	زیست‌محیطی
بالا	پایین	پایین	متوسط	ادراک اجتماعی	اجتماعی
بله	خیر	خیر	بله	حمایت از سیاست دولت	سیاست
شرکت‌های بیشتر	هوندا، تویوتا، مرسدس‌بنز، هیوندای	سال نوری	ترکیب تجاری است	وضعیت تجاری	روند بازار

۵- مراجع

[1] L. Andaloro, S. Micari, G. Napoli, A. Polimeni, V. Antonucci, A hybrid electric fuel cell minibus: Drive test, *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 8, No. 1, pp. 131-138, 2016.

[2] G. De Lorenzo, R. M. Ruffo, P. Fragiacomo, Preliminary Design of the Fuel Cells Based Energy Systems for a Cruise Ship, *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 14, No. 9, pp. 263-274, 2023.

[3] M. K. G. Deshmukh, M. Sameeroddin, D. Abdul, M. A. Sattar, Renewable energy in the 21st century: A review, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 80, No. 1, pp. 1756-1759, 2023.

[4] S. Y. Foong, Y. H. Chan, S. S. M. Lock, B. L. F. Chin, C. L. Yiin, K. W. Cheah, S. S. Lam, Microwave processing of oil palm wastes for bioenergy production and circular economy: Recent advancements, challenges, and future prospects, *Bioresource Technology*, Vol. 369, No. 1, pp. 128478-128488, 2023.

[5] N. Li, B. Liu, L. Jia, D. Yan, J. Li, Liquid biofuels for solid oxide fuel cells: A review, *Journal of Power Sources*, Vol. 556, No. 1, pp. 232437-232449, 2023.

[6] G. Velvizhi, P. J. Jacqueline, N. P. Shetti, K. Latha, G. Mohanakrishna, T. M. Aminabhavi, Emerging trends and advances in valorization of lignocellulosic biomass to biofuels, *Journal of Environmental Management*, Vol. 345, No. 1, pp. 118527-118536, 2023.

[7] A. M. Liaquat, M. A. Kalam, H. H. Masjuki, M. H. Jayed, Potential emissions reduction in road transport sector using biofuel in developing countries, *Atmospheric Environment*, Vol. 44, No. 32, pp. 3869-3877, 2010.

[8] L. M. Fulton, L. R. Lynd, A. Körner, N. Greene, L. R. Tonachel, The need for biofuels as part of a low carbon energy future, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, Vol. 9, No. 5, pp. 476-483, 2015.

[9] D. Debnath, M. Khanna, D. Rajagopal, D. Zilberman, The future of biofuels in an electrifying global transportation sector: imperative, prospects and challenges, *Applied Economic Perspectives and Policy*, Vol. 41, No. 4, pp. 563-582, 2019.

[10] N. Singh, R. R. Singhania, P. S. Nigam, C. D. Dong, A. K. Patel, M. Puri, Global status of lignocellulosic biorefinery: Challenges and perspectives, *Bioresource Technology*, Vol. 344, No. 1, pp. 126415-126427, 2022.

[11] A. Pacheco-Lopez, F. Lechtenberg, A. Somoza-Tornos, M. Graells, A. Espuña, Economic and environmental assessment of plastic waste pyrolysis products and biofuels as substitutes for fossil-based fuels, *Frontiers in Energy Research*, Vol. 9, No. 1, pp. 676233-676242, 2021.

[12] A. K. Patel, J. K. Saini, R. R. Singhania, Development of multiple inhibitor tolerant yeast via adaptive laboratory evolution for sustainable bioethanol production, *Bioresource technology*, Vol. 344, No. 1, pp. 126247-126259, 2022.

[13] D. Tarangan, M. A. Sobati, S. Shahnazari, B. Ghobadian, Physical properties, engine performance, and exhaust emissions of waste fish oil biodiesel/bioethanol/diesel fuel blends, *Scientific Reports*, Vol. 13, No. 1, pp. 14024-14034, 2023.

[14] P. Gautam, S. N. Upadhyay, S. K. Dubey, Bio-methanol as a renewable fuel from waste biomass: current trends and future perspective, *Fuel*, Vol. 273, No. 1, pp. 117783-117794, 2020.

[15] F. M. Baena-Moreno, L. Pastor-Perez, Q. Wang, T. R. Reina, Bio-methane and bio-methanol co-production from biogas: A profitability analysis to explore new sustainable chemical processes, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 265, No. 1, pp. 121909-121918, 2020.

[16] Y. Liu, Y. Yuan, G. Ramya, S. M. Singh, N. T. L. Chi, A. Pugazhendhi, T. Mathimani, A review on the promising fuel of the future–Biobutanol; the hindrances and future perspectives, *Fuel*, Vol. 327, No. 1, pp. 125166-125176, 2022.

[17] L. Aguado-Deblas, F. J. López-Tenllado, D. Luna, F. M. Bautista, A. A. Romero, R. Estevez, Advanced biofuels from ABE (acetone/butanol/ethanol) and vegetable oils (castor or sunflower oil) for using in triple blends with diesel: evaluation on a diesel engine, *Materials*, Vol. 15, No. 18, pp. 6493-6499, 2022.

[18] Y. Zhang, Y. Zhong, J. Wang, D. Tan, Z. Zhang, D. Yang, Effects of different biodiesel-diesel blend fuel on combustion and emission characteristics of a diesel engine, *Processes*, Vol. 9, No. 11, pp. 1984-1992, 2021.

[19] E. Akbarian, B. Najafi, A novel fuel containing glycerol triacetate additive, biodiesel and diesel blends to improve dual-fuelled

impacts: Detailed investigation of charging infrastructure, power management, and control techniques, *Applied Sciences*, Vol. 13, No. 15, pp. 8919-8928, 2023.
[38] V. J. Reddy, N. P. Hariram, R. Maity, M. F. Ghazali, S. Kumarasamy, Sustainable Vehicles for Decarbonizing the Transport Sector: A Comparison of Biofuel, Electric, Fuel Cell and Solar-Powered Vehicles, *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 15, No. 3, pp. 93-100, 2024.
[39] M. Mohammadi, J. Thornburg, J. Mohammadi, Towards an energy future with ubiquitous electric vehicles: Barriers and opportunities, *Energies*, Vol. 16, No. 17, pp. 6379-6388, 2023.
[40] Y. Luo, Y. Wu, B. Li, T. Mo, Y. Li, S. P. Feng, P. K. Chu, Development and application of fuel cells in the automobile industry, *Journal of Energy Storage*, Vol. 42, No. 1, pp. 103124-103131, 2021.
[41] M. Muthukumar, N. Rengarajan, B. Velliyangiri, M. A. Omprakas, C. B. Rohit, U. K. Raja, The development of fuel cell electric vehicles–A review, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 45, No. 1, pp. 1181-1187, 2021.
[42] R. Ghasemi, M. Sedighi, M. Ghasemi, Sadat B. Ghazanfarpoor, Design of a Fuzzy Adaptive Voltage Controller for a Nonlinear Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell with an Unknown Dynamical System, *Sustainability*, Vol. 15, No. 18, pp. 13609-13618, 2023.
[43] Y. Manoharan, S. E. Hosseini, B. Butler, H. Alzhahrani, B. T. F. Senior, T. Ashuri, J. Krohn, Hydrogen fuel cell vehicles; current status and future prospect, *Applied Sciences*, Vol. 9, No. 11, pp. 2296-2302, 2019.
[44] H. K. Shin, S. K. Ha, A review on the cost analysis of hydrogen gas storage tanks for fuel cell vehicles, *Energies*, Vol. 16, No. 13, pp. 5233-5241, 2023.
[45] L. Susskind, J. Chun, S. Goldberg, J. A. Gordon, G. Smith, Y. Zaerpoor, Breaking out of carbon lock-in: Malaysia's path to decarbonization, *Frontiers in Built Environment*, Vol. 6, No. 1, pp. 21-30, 2020.
[46] V. J. Reddy, N. P. Hariram, R. Maity, M. F. Ghazali, S. Kumarasamy, Sustainable Vehicles for Decarbonizing the Transport Sector: A Comparison of Biofuel, Electric, Fuel Cell and Solar-Powered Vehicles, *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 15, No. 3, pp. 93-100, 2024.
[47] W. Guo, L. Kong, T. Chow, C. Li, Q. Zhu, Z. Qiu, S. B. Riffat, Energy performance of photovoltaic (PV) windows under typical climates of China in terms of transmittance and orientation, *Energy*, Vol. 213, No. 1, pp. 118794-118799, 2020.
[48] C. Thiel, A. G. Amillo, A. Tansini, A. Tsakalidis, G. Fontaras, E. Dunlop, M. Yamaguchi, Impact of climatic conditions on prospects for integrated photovoltaics in electric vehicles, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 158, No. 1, pp. 112109-112117, 2022.
[49] M. F. Hossain, Implementation of hybrid wind and solar energy in the transportation sector to mitigate global energy and environmental vulnerability, *Clean Technologies and Environmental Policy*, Vol. 25, No. 4, pp. 1195-1210, 2023.
[50] M. Nukunudompanich, D. Sriprapai, S. Sontikaew, Aspects of optical and thermal performances in flexible perovskite solar cells made of nanomaterials with potential for development of vehicle-integrated photovoltaics, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 66, No. 1, pp. 3163-3167, 2022.
[51] R. Á. Fernández, A more realistic approach to electric vehicle contribution to greenhouse gas emissions in the city, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 172, No. 1, pp. 949-959, 2018.
[52] W. J. Requia, M. Mohamed, C. D. Higgins, A. Arain, M. Ferguson, How clean are electric vehicles? Evidence-based review of the effects of electric mobility on air pollutants, greenhouse gas emissions and human health, *Atmospheric Environment*, Vol. 185, No. 1, pp. 64-77, 2018.
[53] M. H. Ghodusinejad, A. Ghodrati, R. Zahedi, H. Yousefi, Multi-criteria modeling and assessment of PV system performance in different climate areas of Iran, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 53, No. 1, pp. 102520-102529, 2022.
diesel engines performance and exhaust emissions, *Fuel*, Vol. 236, No. 1, pp. 666-676, 2019.
[20] A. Zuorro, J. B. García-Martínez, A. F. Barajas-Solano, The application of catalytic processes on the production of algae-based biofuels: a review, *Catalysts*, Vol. 11, No. 1, pp. 22-32, 2020.
[21] S. M. Safieddin Ardebili, A. Khademalrasoul, An assessment of feasibility and potential of gaseous biofuel production from agricultural/animal wastes: a case study, *Biomass Conversion and Biorefinery*, Vol. 12, No. 11, pp. 5105-5114, 2022.
[22] C. Ternel, A. Bouter, J. Melgar, Life cycle assessment of mid-range passenger cars powered by liquid and gaseous biofuels: Comparison with greenhouse gas emissions of electric vehicles and forecast to 2030, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 97, No. 1, pp. 102897-102908, 2021.
[23] P. Marconi, L. Rosa, Role of biomethane to offset natural gas, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 187, No. 1, pp. 113697-113708, 2023.
[24] S. Dahlgren, Biogas-based fuels as renewable energy in the transport sector: an overview of the potential of using CBG, LBG and other vehicle fuels produced from biogas, *Biofuels*, Vol. 13, No. 5, pp. 587-599, 2022.
[25] M. Munagala, Y. Shastri, S. Nagarajan, V. Ranade, Production of Bio-CNG from sugarcane bagasse: commercialization potential assessment in Indian context, *Industrial Crops and Products*, Vol. 188, No. 1, pp. 115590-115599, 2022.
[26] K. Sudhakar, M. Rajesh, M. Premalatha, A mathematical model to assess the potential of algal bio-fuels in India, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 34, No. 12, pp. 1114-1120, 2012.
[27] P. de Jong, E. A. Torres, S. A. B. V. de Melo, D. Mendes-Santana, K. V. Pontes, Socio-economic and environmental aspects of bio-LPG and bio-dimethyl ether (Bio-DME) production and usage in developing countries: The case of Brazil, *Cleaner and Circular Bioeconomy*, Vol. 6, No. 1, pp. 100055-100065, 2023.
[28] M. Gustafsson, I. Cruz, N. Svensson, M. Karlsson, Scenarios for upgrading and distribution of compressed and liquefied biogas—energy, environmental, and economic analysis, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 256, No. 1, pp. 120473-120481, 2020.
[29] M. Channappagoudra, Comparative study of baseline and modified engine performance operated with dairy scum biodiesel and Bio-CNG, *Renewable Energy*, Vol. 151, No. 1, pp. 604-618, 2020.
[30] P. Zhang, L. Zhou, W. Xu, Compressibility factor calculation from gross calorific value and relative density for natural gas energy measurement, *International Journal of Energy Research*, Vol. 46, No. 7, pp. 9948-9959, 2022.
[31] G. Dhamodaran, G. S. Esakkimuthu, T. Palani, A. Sundaraganesan, Reducing gasoline engine emissions using novel bio-based oxygenates: a review, *Emergent materials*, Vol. 6, No. 5, pp. 1393-1413, 2023.
[32] A. Peppas, S. Kottaridis, C. Politi, P. Oustadakis, Environmental Assessment of Replacing Fossil Fuels with Hydrogen for Motorised Equipment in the Mining Sector, *Materials Proceedings*, Vol. 15, No. 1, pp. 5043-5051, 2023.
[33] A. Poullikkas, Sustainable options for electric vehicle technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 41, No. 1, pp. 1277-1287, 2015.
[34] A. Jerry, Madrid Electric and Hybrid Vehicle Battery Technologies: Advancements and Challenges, *Int. J. Adv. Res. Sci. Commun. Technol*, Vol. 3, No. 1, pp. 803-807, 2023.
[35] J. Han, H. Shu, X. Tang, X. Lin, C. Liu, X Hu, Predictive energy management for plug-in hybrid electric vehicles considering electric motor thermal dynamics, *Energy Conversion and Management*, Vol. 251, No. 1, pp. 115022-115034, 2022.
[36] G. De Lorenzo, L. Andaloro, F. Sergi, G. Napoli, M. Ferraro, V. Antonucci, Numerical simulation model for the preliminary design of hybrid electric city bus power train with polymer electrolyte fuel cell, *International journal of hydrogen energy*, Vol. 39, No. 24, pp. 12934-12947, 2014.
[37] M. Kumar, K. P. Panda, R. T. Naayagi, R. Thakur, G. Panda, Comprehensive review of electric vehicle technology and its