نشریه مهندسی مکانیک
نشریه علمی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISME

دوره ۳۲، شماره ۲، شماره پیاپی ۱۴۹، خرداد و تیر ۱۴۰۲، صفحه ۸۰-۶۶
ISSN: 1605-9719

DOI: 10.30506/MMEP.2023.2000601.2090
DOR: 20.1001.1.16059719.1402.32.2.6.2

مروری بر روند توسعه خودروهای پیل سوختی در دنیا

ناصر بهارلو هوره*
استادیار

سید عرفان سخنگوی
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

چکیده: در این تحقیق با مرور بر بیش از ۵۰ مقاله معتبر و به روز بین المللی، مزایا و چالش های خودرو پیل سوختی، بیان گردیده است. همچنین ضمن ارائه آخرین آمار از بازار خودروهای پیل سوختی در دنیا، راهکارهای کشورهای مختلف جهت رفع چالش ها و توسعه این خودروها و نیز پیش بینی آینده آن ها عنوان گردیده است. بسیاری از کشورها سال های ۲۰۳۰ الی ۲۰۵۰ را به عنوان شروع ممنوعیت فروش خودروهای احتراق داخلی اعلام کرده اند. یکی از چالش های مهم خودرو پیل سوختی تولید هیدروژن است. طبق گزارش اتحادیه اروپا هزینه متوسط تولید هیدروژن از سوخت فسیلی ۱/۸ دلار به کیلوگرم است در حالیکه هزینه تولید هیدروژن از انرژی های تجدیدپذیر بین ۳ تا ۶/۶ دلار بر کیلوگرم است. با کاهش هزینه تولید هیدروژن از طریق استفاده از انرژی های تجدید پذیر، می توان به هدف ایده‌آل هزینه پایین و آلایندگی کم دست پیدا کرد، به نحوی که طبق نقشه راه آژانس بین المللی انرژی (IEA) در سال ۲۰۵۰ هزینه خودروهای پیل سوختی بسیار نزدیک به خودروهای بنزینی خواهد بود و سهم بازار خودرو پیل سوختی در حدود ۱۷ درصد خواهد بود. هم اکنون تخصیص یارانه های دولتی بسیار پر رنگ است. برای مثال می توان به تخفیف ۶۵ درصدی در کالیفرنیا برای فروش تویوتا Mirai و تخفیف ۵۰ درصدی در کره جنوبی برای فروش هیوندای NEXO اشاره کرد.

واژه‌های راهنما: خودرو الکتریکی، خودرو پیل سوختی، تولید هیدروژن، پیل سوختی غشاپلیمری، هزینه، یارانه، آلایندگی

مقاله مروری
دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۴
پذیرش:
۱۴۰۲/۰۴/۲۱

An overview of the development process of fuel cell vehicles in the world

Nasser Baharlou Houreh*
Assistant Professor

Seyed Erfan Sokhangouy
MA student, Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran

Abstract: In this research, by reviewing more than 50 authentic and up-to-date international articles, the advantages and challenges of fuel cell cars have been stated. Also, while presenting the latest statistics of the fuel cell car market in the world, the solutions of different countries to solve the challenges and development of these cars, as well as predicting their future, have been mentioned. Many countries have announced the years 2030 to 2050 as the beginning of banning the sale of internal combustion vehicles. One of the important challenges of the fuel cell car is hydrogen production. According to the European Union report, the average cost of producing hydrogen from fossil fuel is 1.8 dollars per kilogram, while the cost of producing hydrogen from renewable energy is between 3 and 6.6 dollars per kilogram. By reducing the cost of hydrogen production through the use of renewable energies, the ideal goal of low cost and low emissions can be achieved, so that according to the roadmap of the International Energy Agency (IEA) in 2050, the cost of fuel cell vehicles will be very close to gasoline cars and the market share of fuel cell cars will be around 17%. Currently, the allocation of government subsidies is very colorful. For example, we can mention a 65% discount in California for the sale of Toyota Mirai and a 50% discount in South Korea for the sale of Hyundai NEXO.

Keywords: Electric vehicle, Fuel cell vehicle, Hydrogen production, Polymer membrane fuel cell, Cost, Subsidy, Pollution

* نویسنده مسئول، nasser.baharloo@sru.ac.ir.

۱- چالش‌های سوخت فسیلی و لزوم روی آوردن دنیا به فناوری‌های نو

بخش حمل و نقل سبب ۲۵ درصد از کل انتشار دی اکسید کربن در سراسر جهان است. به طور خاص، انرژی مورد نیاز برای راه‌اندازی وسایل نقلیه شخصی با موتور احتراق داخلی (ICE[1]) سهم قابل توجهی از انتشار گازهای گلخانه‌ای سرانه را به خود اختصاص داده‌است. این درصد مطمئناً افزایش خواهدیافت، زیرا تولید وسایل نقلیه با ICE در سراسر جهان کماکان در حال افزایش است [۱]. طبق گزارش لی و کیومرا [۲] تا سال ۲۰۴۰، تعداد وسایل نقلیه مسافربری به تنهایی ۷۰ درصد افزایش خواهدیافت و نفت هنوز تا سال ۲۰۴۰، ۹۰ درصد تقاضای انرژی در بخش حمل‌و نقل را برآورده خواهدکرد که این روند منجر به کاهش سریع منابع سوخت‌های فسیلی خواهدشد [۳]. این سهم را می‌توان با جایگزین کردن منابع تجدیدپذیر شامل فتوولتائیک خورشیدی، انرژی باد، زیست‌توده و سوخت‌های مصنوعی (ترکیبی) [۴] به عنوان منبع تولید توان در خودرو کاهش داد.

تجربه جذاب رانندگی با خودروهای الکتریکی عامل مضاعف کنار گذاشتن خودروهای ICE است. کشورهای متعددی ممنوعیت قریب‌الوقوع موتورهای احتراق داخلی را اعلام کرده‌اند [۵]. در جدول(۱) نمونه‌ای از تعهد دولت‌ها جهت کاهش یا حذف تدریجی خودروهای ICE را مشاهده می‌شود [۱].

جدول ۱ سیاست‌های اجرایی اعلام شده برخی دولت‌ها برای حذف تدریجی خودروهای موتور احتراق داخلی [۶][۷][۸]

کشور	هدف‌گذاری بر اساس سند خط مشی	نام سند	سال حذف تدریجی
نروژ	تمام خودروهای سواری جدید و وانت‌های سبک فروخته شده در سال ۲۰۲۵ باید بدون آلایندگی باشند.	برنامه ملی حمل و نقل	۲۰۲۵
سوئد	از سال ۲۰۳۰ دیگر مجاز به فروش خودروهای بنزینی و دیزلی جدید نخواهدبود.	برنامه اقدام سیاست آب و هوا	۲۰۳۰
هلند	خودروهای سواری جدید حداکثر تا سال ۲۰۳۰ بدون آلایندگی خواهند بود.	توافقنامه آب و هوا	۲۰۳۰
انگلیس	تا سال ۲۰۳۵ به فروش خودروها و وانت‌های جدید بنزینی و دیزلی متعارف پایان دهد.	---	۲۰۳۵
فرانسه	تا سال ۲۰۴۰ فروش خودروهای سواری جدید و خودروهای تجاری سبک با استفاده از سوخت فسیلی پایان یابد.	قانون هدایت حمل و نقل	۲۰۴۰
ژاپن	کاهش ۴۶ درصدی انتشار گاز گلخانه‌ای تا ۲۰۳۰ و انتشار صفر در ۲۰۵۰	استراتژی رشد سبز	۲۰۳۰ و ۲۰۵۰
کره جنوبی	کاهش ۲۴ درصدی انتشار گاز گلخانه‌ای تا ۲۰۳۰	استراتژی کربن خنثی	۲۰۳۰
کانادا	کاهش ۴۰ درصدی انتشار گاز گلخانه‌ای تا ۲۰۳۰ و انتشار صفر در ۲۰۵۰	---	۲۰۳۰ و ۲۰۵۰

۲- معرفی جایگزین‌های سوخت فسیلی برای کاربردهای حمل و نقل در دنیا

بازار جهانی خودرو در حال حاضر در حال انجام یک اصلاح ساختاری است که هدف آن پیشی گرفتن از فاز کم‌کربن و در نهایت رسیدن به جامعه‌ای با کربن صفر است. استفاده از خودروهای برقی (EV[2]) به عنوان روشی مؤثر برای کاهش مصرف سوخت خودرو و انتشار گازهای گلخانه‌ای شناخته می‌شوند. برای مثال جایگزینی ۵۵٪ از وسایل نقلیه سبک با ماشین‌های الکتریکی در میلان ایتالیا، به حداکثر کاهش ۶/۸ میکروگرم در متر مکعب در انتشار اکسیدهای نیتروژن (NOx)، و ۱۳/۵میکروگرم در متر مکعب در انتشار نیتروژن مونو اکسید (NO) در مقایسه با وضعیت عدم استفاده از ماشین‌های الکتریکی، کمک کرده‌است [۹].

دو فناوری نیروی محرکه عمدتاً در برقی‌سازی وسایل نقلیه جاده‌ای استفاده‌شده‌اند: وسایل نقلیه الکتریکی باتری‌دار (BEV) که صرفاً از باتری استفاده می‌شود و خودروهای الکتریکی پیل‌سوختی (FCEV) که با برق تولیدشده ناشی از تزریق سوخت هیدروژن راه‌اندازی می‌شود[۵]. به کمک این خودروها علاوه بر رفع آلودگی هوا، مشکل آلودگی صوتی موتورهای احتراق داخلی را نیز برطرف می‌شود [۱] هم چنین وسایل نقلیه الکتریکی مبتنی برباتری از مزایای امکان شارژ باتری در ساعات کم‌مصرف (هزینه کمتر) برق برخوردار هستند [۱۰]. مدل‌های فعلی BEV و FCEV هر دو هنوز کاملا مقرون به صرفه نیستند و عمدتا برای استفاده عمومی با مسافت‌های طولانی رانندگی مانند اتوبوس‌های شهری یا تاکسی مناسب

[1] Internal combustion engine

[2] Electric vehicle

هستند [۱۱]. با این حال، به‌ویژه در بازار خودروهای سواری، BEV و FCEV اغلب به‌عنوان رقیب در نظر گرفته می‌شوند[۵].

بر اساس ارقام موجود در گزارش جدید آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) در سال ۲۰۲۳، تعداد خودروهای الکتریکی پیل‌سوختی هیدروژنی (FCEV) در جاده‌های جهان در سال ۲۰۲۲ نسبت به سال ۲۰۲۱، ۴۰ درصد افزایش یافته و در مجموع به بیش از ۷۲۰۰۰ خودرو رسیده‌است[۱۲].

فروش خودروهای الکتریکی غیرهیدروژنی در سال ۲۰۲۲ از مرز ۱۰ میلیون نفر فراتر رفت که ۵۵ درصد نسبت به سال ۲۰۲۱ افزایش داشت که کمتر از ۳۰ درصد از این خودروهای هیبریدی پلاگین هستند. علاوه بر این، بیش از ۳۱۰۰۰۰ خودروی تجاری سبک الکتریکی، نزدیک به ۶۶۰۰۰ اتوبوس برقی و ۶۰۰۰۰ کامیون برقی متوسط و سنگین در سال ۲۰۲۲ فروخته شد[۱۲].

موجودی جهانی وسایل نقلیه الکتریکی در اواخر سال ۲۰۲۱ به ۱۱ میلیون رسید. بر اساس گزارش مرجع [۱]، ٪۴۵ از وسایل نقلیه الکتریکی در جاده در چین، ٪۲۴ در اروپا و ٪۲۲ در ایالات متحده آمریکا است. با این حال رشد در هر یک از این بازارها آهسته و بسیار کمتر از اهداف دولتهاست. به عنوان مثال، ژاپن تنها ۱۷ درصد از هدف را برای دستیابی به ۴۰۰۰۰ فروش تجمعی FCEV تا اوایل سال ۲۰۲۱ به دست آورده‌است. این رشد کند ناشی از چهار عاملی‌است که وضعیت بازار خودروهای برقی به آن وابسته‌است: ۱) تولید خودرو ۲) پشتیبانی از زیرساخت‌ها ۳) تقاضای خودرو ۴) سازمان‌ها، ارگانها و موسسات. هر دیدگاه در کنار نمونه‌هایی از موانع مرتبط در جدول (۲) خلاصه شده‌است.

جدول ۲ چهار عامل موثر بر ایجاد بازار خودرو الکتریکی [۱۳][۱۴][۱۵][۱۶]

دسته بندی	عوامل موثر
تولید خودرو توسط خودروسازان	• تعداد کم خودروسازان تولیدکننده خودرو • دامنه پایین پیمایش مسافت • هزینه بالای تولید وسایل نقلیه یا قطعات • کاهش زمان شارژ وسایل نقلیه الکتریکی • صرفه‌جویی در مقیاس پایین در تولید خودرو یا قطعه
تامین زیرساخت توسط دولت‌ها یا شرکت‌های خصوصی بزرگ	• ناکافی بودن ایستگاه‌های شارژ یا سوخت‌گیری • سود کم برای ایستگاه‌های شارژ یا سوخت‌گیری
	• هزینه‌های بالای ساخت و ساز
تقاضا برای وسایل نقلیه توسط شهروندان	• موانع روانی (مانند عدم تمایل ناشی از هزینه بالا) • آگاهی و فرهنگ پذیرش فناوری‌های نو
ایفای نقش دولت‌ها	• فقدان استانداردها و پروتکل‌ها برای به حداقل رساندن عدم اطمینان در مورد تکنولوژیکی غالب • قوانین یا مقرراتی که هزینه‌ها را افزایش می‌دهد یا مانع سرمایه‌گذاری در ایجاد بازار می‌شود.

۳-آشنایی با پیل‌سوختی مورد استفاده در خودرو

فناوری FCEV مورد استفاده برای خودروها، بر اساس نوع وسیله نقلیه به پیل‌سوختی غشاپلیمری (PEMC) و پیل‌سوختی اسید فسفریک (PAFC) تقسیم می‌شوند. پیل‌سوختی PEM رایج‌ترین مجموعه FC است و به دلیل چگالی توان بالا، دمای عملیاتی پایین (۸۰-۶۰ درجه سانتی-گراد) و خوردگی پایین نسبت به بقیه پیل‌های سوختی استفاده از آنها روز به روز در FCEV افزایش یافته‌است [۱۷] [۱۸]. از دیگر مزایای پیل‌سوختی غشاپلیمری نسبت به سایر پیل‌های سوختی زمان راه‌اندازی سریع‌تر هست [۱۹]. در کاربردهای حمل و نقل این ویژگی از اهمیت خاصی برخوردار است.

پیل سوختی غشا پلیمری نوعی پیل الکتروشیمیایی است که با هیدروژن و اکسیژن تغذیه می‌شود. هیدروژن در آند اکسید و اکسیژن در کاتد احیا می‌شود. اجزاء اصلی پیل سوختی غشا پلیمری شامل غشای انتقال دهنده پروتون، لایه‌های رسانای پخش گاز در دو طرف آند و کاتد، لایه‌های کاتالیست (الکترودها) بین لایه‌های پخش گاز و غشاء، صفحات قطبی یا جمع کننده جریان در دو طرف پیل، کانال‌های جریان برای انتقال سوخت و اکسید کننده در داخل آنها می‌باشد. پروتون-هایی که در طول اکسیداسیون هیدروژن آزاد شده‌اند، از طریق غشای تبادل پروتون به کاتد انتقال داده می‌شود [۲۰]. این غشاء هدایت کننده الکترونیکی نیست، بنابراین الکترون‌های آزاد شده از گاز هیدروژن، از طریق مدار خارجی حرکت کرده و جریان الکتریکی ایجاد می‌شود. لازم به ذکر است که بوسیله غشا از نفوذ کلیه گازها به جز بخار آب جلوگیری می‌شود.

به طور خلاصه می‌توان گفت فرایندهای زیر در پیل سوختی غشا پلیمری انجام می‌شود.

۱) جریان گاز داخل کانال‌ها (هوا از کاتد و هیدروژن از آند)

۲) انتقال گازها از کانال به سمت لایه‌های کاتالیست از طریق محیط متخلخل لایه پخش گاز
۳) واکنش‌های الکتروشیمیایی در لایه‌های کاتالیست
۴) انتقال پروتون H^+ و بخار آب در میان غشاء
۵) هدایت الکترون از طریق صفحات جمع کننده و تولید الکتریسیته
۶) انتقال آب به‌صورت مایع و بخار در میان لایه‌های کاتالیست و لایه‌های پخش گاز
۷) تولید آب و حرارت ناشی از واکنش رخ داده در سمت کاتد پیل‌سوختی

۴- مزایای خودروهای پیل‌سوختی

علی‌رغم تسلط BEVها در فروش خودروهای الکتریکی، FCEVها نیز مزایای متعددی دارند. (۱) آنها می‌توانند به سرعت در چند دقیقه سوخت‌گیری شوند (۲) مسافت طولانی مدت رانندگی مشابه خودروهای بنزینی یا دیزلی دارند (۳) در هوای بسیار سرد و بسیار گرم بدون از دست دادن ظرفیت ذخیره انرژی یا ظرفیت توان عملکرد مناسبی دارند(۴) یک توده پیل‌سوختی در یک وسیله‌نقلیه با عمر معمولی ۵۰۰۰ ساعت یا بیشتر، در حالی که وسایل نقلیه مبتنی بر باتری لیتیومی معمولاً حداقل یک بار در طی مدت ۵۰۰۰ ساعت نیاز به تعویض باتری‌دارند [۲]. در جدول شماره (۳) مزایای خودروهای پیل‌سوختی نسبت به موتورهای احتراق داخلی و خورو مبتنی بر باتری گردآوری شده‌است. تامین انرژی مورد نیاز برای تولید توان در انواع خودروهای الکتریکی از جمله خودروهای پیل‌سوختی از تبدیل سایر منابع انرژی اولیه فراهم می‌شود. برای این توالی تبدیل‌ها از منبع انرژی اصلی به انرژی نهایی تولیدکننده قدرت موتور خودرو باید اتلافات انرژی در طول کل فرآیندها ارزیابی شود که این ارزیابی کمیت‌سازی شده و با عنوان بازده انرژی از چاه به چرخ مشخص شده‌است.

جدول ۳ مزایای خودروهای پیل‌سوختی[۵][۲۱][۲۲][۲۳][۲۴][۲۵][۲۶]

مزایای خودروی پیل‌سوختی نسبت به موتور احتراق داخلی	مزایای خودروی پیل‌سوختی نسبت به خودروهای مبتنی بر باتری‌ها
طول عمر بالا به علت نبود قسمت‌های متحرک در پیل‌سوختی خودرو	قابلیت رسیدن به توان بالاتر با افزایش تعداد سل‌های سری شده پیل‌سوختی
عدم وجود سر وصدا	چگالی انرژی بالاتر پیل‌های سوختی نسبت به باتری‌ها
استفاده از انرژی تجدیدپذیردر تهیه هیدروژن و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی	تغذیه سریع‌تر وکاهش زمان شارژپیل‌سوختی نسبت به باتری
بازده انرژی بیشتر از چاه به چرخ	دامنه پیمایش مسافت بالاتر
پیل‌های سوختی می‌توانند همه قسمت‌هایشان جامد باشد و این وضعیت مکانیکی ایده‌آل است	بازده انرژی بیشتر از چاه به چرخ
عدم انتشار کربن دی اکسید در حرکت (جاده) و درصد پایین آلایندگی محصولات نامطلوب	درصد انتشار پایین‌تر آلایندگی

در جدول شماره (۴) مقایسه ای بین خودروهای پیل‌سوختی، احتراق داخلی و باتری‌دار انجام شده‌است. بدین‌ترتیب که مشخصه‌های ذکر شده در ستون اول، مشخصه-های مثبت هستند و رتبه‌های ۱ و ۳ در کل جدول به ترتیب نشان دهنده بهترین و بدترین عملکرد است. مشخصه آلایندگی پایین چاه تا چرخ با هدف مقایسه میزان آلایندگی تولیدشده در فرآیند تولید سوخت مورد نیاز هر خودرو می‌باشد.

جدول ۴ مقایسه بین خودروهای پیل‌سوختی، احتراق داخلی و باتری‌دار[۲۲][۲۳][۲۵] [۲۶]

پارامترها	خودرو پیل‌سوختی	خودرو احتراق داخلی	خودرو مبتنی برباتری
طول عمر بالا	۱	۲	۳
آلودگی صوتی پایین	۲	۳	۱
آلایندگی پایین چاه تا چرخ	۳	۱	۲
آلایندگی پایین در جاده (در حال حرکت)	۱	۳	۲
دانسیته توان حجمی بالا	۳	۱	۲
هزینه پایین تولید خودرو	۳	۱	۲
زمان سوخت‌گیری (شارژ) پایین	۲	۱	۳
بازده انرژی بالا از چاه به چرخ	۱	۳	۲

۵- چالش‌های خودروهای پیل‌سوختی

در جدول (۵) مقایسه تعداد کل FCEV و تعداد خودروهای مبتنی بر باتری (BEV) در چند کشور پیشرو در پایان سال ۲۰۲۲ را نشان داده شده‌است. مطابق جدول تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین تعداد FCEV و BEV وجود دارد. این تفاوت ناشی از چالش‌ها و نگرانی‌های بازار FCEV است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

جدول ۵ مقایسه تعداد FCEV و تعداد خودروهای مبتنی بر باتری BEV[۵][۲۷]

	آلمان	ژاپن	آمریکا
تعداد FCEV	۲۳۲۹	۷۹۷۴	۱۵۹۱۲
تعداد BEV	۷۵۴۰۰۰	۲۸۲۰۰۰	۸۲۸۰۰۰

عواملی که نگرانی‌های مربوط به توسعه خودروهای پیل‌سوختی افزایش داده‌است عبارتند از:

۵-۱- دانسیته توان

دانسیته توان حجمی پیل‌سوختی نسبت به باتری و موتور احتراق داخلی کمتر است، یعنی برای ایجاد یک توان مشخص، توده پیل‌سوختی نیاز به حجم بیشتری از فضا دارد. دانسیته توان نشان می‌دهد به کمک یک پیل سوختی چه مقدار توان بر واحد حجم (دانسیته توان حجمی) یا بر واحد جرم (دانسیته توان جرمی) تولید می‌شود. با وجود افزایش دانسیته توان پیل-سوختی در مقایسه با دهه‌های گذشته اما برای رقابت در کاربردهای حمل و نقل با تجهیزات موجود، بهبود بیشتر در آنها بسیار ضروری می‌باشد. تویوتا Mirai و هوندا Clarity به ترتیب دانسیته توان حجمی ۳ و ۴ کیلووات بر لیتر را گزارش داده‌اند [۲۸], [۲۹]، درحالیکه به سرعت مشغول فعالیت‌های تحقیق و توسعه در راستای افزایش این مقادیر هستند.

۵-۲- چالش‌های تولید هیدروژن: هزینه و آلایندگی

از نظر فراوانی در مقابل سوخت‌های فسیلی محدودیتی برای تولید هیدروژن وجود ندارد [۳۰] اما دو مشخصه آلایندگی و هزینه تولید بصورت تاثیر متضاد و متقابل باید توسط محققان و سیاست گزاران ارزیابی شده و به تعادل برسد.

تانگ و همکاران [۳۱] مسیرهای اصلی تولید هیدروژن را شامل پنج فرآیند اساسی برای تولید هیدروژن بررسی کردند: (۱) فرآیندهای شیمیایی- حرارتی (اصلاح، تبدیل به گاز، و تجزیه)، (۲) الکترولیز، (۳) تقسیم آب حرارتی، (۴) فرآیند فوتوالکتروشیمیایی (فتوالکترولیز یا فتولیز)، و (۵) فرآیندهای بیولوژیکی (فوتولیز، تخمیر، و الکترولیز که در میکروارگانیسم‌ها اتفاق می‌افتد). به همین ترتیب، منابع انرژی اولیه فرآیندهای تولید هیدروژن را می‌توان به ۳ دسته کلی تقسیم کرد: سوخت‌های فسیلی، انرژی هسته‌ای (شکافت)، و انرژی‌های تجدیدپذیر.

اکثریت قریب به اتفاق (تقریباً ۹۵٪) هیدروژن امروزی توسط روش اصلاح گاز طبیعی بخار متان (SMR) و یا روش-های مشابه آن تولید می‌شود، فرآیندی که ارزان‌تر است اما منجر به انتشار قابل توجهی دی اکسید کربن می‌شود. این هیدروژن خاکستری دارای انتشار حدود ۱۰/۹کیلوگرم در اکسید کربن به ازای یک کیلوگرم هیدروژن است. مقایسه هزینه تولید هیدروژن با فناوری‌های مختلف در جدول (۶) نشان داده شده‌است. بطور کلی، هزینه تولید هیدروژن از مسیری به مسیر دیگر و از کشوری به کشور دیگر متفاوت است، که بیشتر به دلیل تفاوت در هزینه‌های عملیاتی، طراحی و پیکربندی سیستم تولید، شرایط بازار انرژی، ساختارهای تعرفه، مالیات و یارانه‌ها و سایر سیاست‌های خاص کشور است[۲].

با توجه به گزارش دپارتمان انرژی ایالات متحده، هزینه تولید هیدروژن از الکترولیز متمرکز یا توزیع شده ۳/۹-۳ دلار به ازای هر کیلوگرم در سال ۲۰۱۵ بوده است. DOE ایالت متحده هدف‌گذاری کاهش قیمت برای سال ۲۰۲۵ را ۲ دلار در کیلوگرم و برای سال ۲۰۳۰ مقدار ۱ دلار بر کیلوگرم اعلام کرده‌است [۳۲]. در این گزارش روش تولید هیدروژن از سه طریق الکترولایزر غشایی (PEM)، آلکالین و اکسید جامد ذکر شده‌است. ضعف این گزارش این است که در هدف‌گذاری روش تولید هیدروژن بطور دقیق اشاره نشده‌است؛ بلکه عنوان شده‌است که تلاش می‌شود تا عمده برق الکترولایزر از طریق منابع تجدیدپذیر تامین شود. خودروهای پیل‌سوختی واقعاً «سبز» به هیدروژن سبز نیاز دارند اما طبق جدول (۶) استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید هیدروژن یا به اصطلاح تولید هیدروژن سبز هزینه بالایی را در بر دارد. طبق گزارش ۲۰۲۰ اتحادیه اروپا هزینه متوسط تولید هیدروژن از سوخت فسیلی

۱/۸ دلار به کیلوگرم است در حالیکه هزینه تولید هیدروژن از انرژی‌های تجدیدپذیر بین ۳ تا ۶/۶ دلار بر کیلوگرم است [۷]. کشورهای مختلفی برای تولید هیدروژن سبز برنامه‌ریزی کرده‌اند. برای مثال دولت ژاپن ۲ تریلیون (۱۸,۵ میلیارد دلار) برای تحقق هدف خود برای تولید سالانه ۳۰۰۰۰۰ تن هیدروژن سبز تا سال ۲۰۳۰ سرمایه گذاری کرده است. عربستان سعودی سرمایه‌گذاری ۵ میلیارد دلاری با هدف تولید ۶۵۰ تن هیدروژن سبز تا سال ۲۰۲۵ کرده و قصد دارد آن را به اروپا و آسیا صادر کند. اتحادیه اروپا، ۴۳۰ میلیارد دلار برای ایجاد ۷۰ پروژه هیدروژن سبز تا سال ۲۰۳۰ در نظر گرفته است تا به اهداف قرارداد سبز خود دست یابد [۳۳].

تویوتا Mirai جدید مصرف سوخت را ۰/۸۶ کیلوگرم بر ساعت در هر ۱۰۰ کیلومتر می‌دهد، بنابراین با استفاده از هیدروژن خاکستری حدود ۹۴ گرم دی‌اکسید کربن در هر کیلومتر تولید می‌شود. این رقم تنها یک بهبود جزئی در انتشار گازهای گلخانه‌ای دی اکسید کربن موتورهای احتراقی مدرن است [۳۴].

جدول ۶ مقایسه هزینه تولید هیدروژن با فناوری‌های مختلف[۳۵]

هزینه($\$/kgH_2$)	روش	
۲/۰۸	SMR	سوخت‌های فسیلی به هیدروژن
۲/۲۷	SMR با CCS*	
۱/۳۴	CC**	
۱/۷۷- ۲/۷۷	تبدیل به زیست‌توده	زیست‌توده به هیدروژن
۲/۱۳	بیوفتولیز مستقیم	
۱/۴۲	بیوفتولیز غیر مستقیم	
۵/۷۳ -۸/۵۴	الکترولیز شبکه‌ای	الکترولیز
۵/۷۸ -۲۳/۲۷	الکترولیز فوتوولتاییک	
۵/۲۷ -۹/۳۷	الکترولیز بادی	
۳/۵۶ -۷/۰۰	الکترولیز هسته‌ای	
۲/۱۷ -۲/۶۳	ترمولیز هسته‌ای	چرخه‌های ترموشیمیایی و ترمولیز
۷/۹۸ -۸/۴۰	ترمولیز خورشیدی	

Carbon Capture and Storage Technology*
carbon capture**

۵-۳- توزیع هیدروژن

هیدروژن را می‌توان در محل در یک ایستگاه سوخت‌گیری هیدروژن یا در یک کارخانه متمرکز بزرگ تولید کرد. ساخت یک الکترولیز متمرکز بزرگ می‌تواند هزینه تولید هیدروژن را کاهش دهد، اما هزینه حمل و نقل افزایش می‌یابد. سه شکل اصلی انتقال هیدروژن وجود دارد که عبارتند از (۱) هیدروژن فشرده در تریلرها یا کشتی‌ها، (۲) هیدروژن مایع در تانکرها یا کشتی‌ها و (۳) خط لوله هیدروژن. هیدروژن فشرده به دلیل چگالی انرژی پایین گاز و هزینه بالای تراکم بسیار گران است. با استفاده از فناوری فعلی، مایع سازی بیش از ۳۰ درصد از محتوای انرژی هیدروژن را مصرف کرده و هزینه بالایی دارد. علاوه بر این، مقداری از هیدروژن مایع ذخیره شده از طریق تبخیر یا جوش از بین می‌رود.

الکترولیز توزیع شده بالاترین هزینه تولید را با بیش از ۶ دلار در کیلوگرم دارد. الکترولیز متمرکز با استفاده از نیروی باد هزینه‌های تولید کمتری در حدود ۵ دلار در کیلوگرم دارد، اما پس از در نظر گرفتن حمل و نقل و تحویل هیدروژن از تولید متمرکز، هزینه هیدروژن توزیع شده بیش از ۷ دلار در کیلوگرم است که قیمت بالایی است. روش SMR و روش‌های مشابه که هزینه‌های تولید پایین (۱/۴۰-۱/۷۰ دلار بر کیلوگرم) دارد، اما به دلیل هزینه‌های قابل توجه حمل و نقل، هزینه نهایی تولید و توزیع هیدروژن به بالای ۴ الی ۴/۵ دلار در کیلوگرم می‌رسد [۲].

۵-۴- دوام و پایداری عملکرد اجزای پیل‌سوختی

با توجه به نوظهور بودن فناوری خودرو پیل‌سوختی، تعداد مراکز تاسیسات نگهداری و تعمیر کافی نیست. ساخت تاسیسات نگهداری و تعمیر FCEV یک الزام است چون این فناوری کاملا جدید است و مزایای باتری EV را ندارد. همچنین، توزیع جریان غیر متعادل در FCEV بین FCها باعث یک آرایش عملیاتی نامناسب در پیل‌ها و مجموعه‌ها می‌شود. این وضعیت باعث ایجاد عدم قطعیت بالا و تحلیل یا زوال کارامدی می‌شود [۳۶].

۵-۵- ایمنی هیدروژن

مشکلات موجود در ذخیره گاز سبکی مانند هیدروژن و سطح بالایی از ایزولاسیون مورد نیاز برای ذخیره هیدروژن مایع، نیازمند تبدیل هیدروژن مایع به گاز هیدروژن بسیار کم دما با استفاده از مبدل‌حرارتی برای تنظیم فشار و کاهش تشکیل NOX می‌باشد. با خنک کردن هیدروژن گازی تا دمای زیر ۲۵۳ درجه سانتیگراد (۴۲۳ درجه فارنهایت) به مایع تبدیل می‌شود، پس از آن می‌شود آن را در مخازن بزرگ با عایق بندی قوی ذخیره کرد. به دلیل پتانسیل نشت هیدروژن، یکپارچگی

ساختاری مخزن ذخیره برای کاهش خطر نشت ضروری است. علاوه بر این، نصب یک سیستم ایمنی هیدروژن بر روی صفحه همراه با یک سیستم سنسور نشت، سوپاپ و کنترل آب بندی اجزا در کنترل بر نشت هیدروژن موثر باشد. دریچه مخزن گاز در مخزن هیدروژن برای کاهش فشار گاز هیدروژن در صورت بیشتر شدن فشار از مقدار آستانه آن می‌تواند خطر انفجار را کاهش دهد [۳۷]. تمام موارد ذکر شده مستلزم هزینه‌های اضافی است.

۵-۶-تشخیص خطا

خطا زمانی اتفاق می‌افتد که یک دستگاه در خارج از شرایط مشخصات استاندارد خودش عمل کند. در FCEV خطا در سیستم‌های FC، سیستم‌های ذخیره‌کننده، مبدل‌های قدرت، دستگاه‌های اندازه‌گیری و موتور الکتریکی ایجاد شود. این خطاها باعث بارگذاری بیش از حد در FC، شارژ بیش از حد در دستگاه‌های ذخیره‌کننده، اتصال کوتاه یا مدار باز در سیم-پیچی‌های استاتور موتور، سوییچ باز یا کوتاه در اجزاء مبدل قدرت، داغی بیش از حد در دستگاه‌ها و غیره شود. بعضی از این خطاها باعث افت عملکرد وسیله‌نقلیه شده و منجر به لرزش، نویز یا آسیب سیستم دینامیک وسیله‌نقلیه می‌شود [۳۸].

۵-۷- قیمت بالای توده پیل‌سوختی به علت قیمت بالای اجزای آن از جمله لایه کاتالیست [۳۹].

۶- راهکارهای غلبه بر چالش‌های خودرو پیل‌سوختی

در حالی که هیدروژن و FCEV در همه کشورها در شرایط فعلی قابل رقابت با خودروهای برقی نیستند با این حال، به احتمال زیاد در آینده نزدیک قابل رقابت خواهند شد، زیرا انتظار می‌رود هزینه هیدروژن و FCEV به میزان قابل توجهی کاهش یابد [۲]. بنابر تحقیقات انجام شده، استدلال‌های زیر به دست آمده‌است:

۶-۱- حمایت دولتها و پرداخت یارانه و مشوق‌های مالی

سیاست‌های دولت‌ها تأثیر مستقیم و قابل توجهی بر رقابت‌پذیری انرژی هیدروژنی و FCEVs دارند. سیاست‌های اختصاصی مانند مالیات‌ها، یارانه‌ها و سایر مشوق‌ها یا بازدارنده‌ها و نیز سیاست‌های کلی انرژی و محیط‌زیست کمک شایانی به بهبود بازار انرژی سبز و استفاده از خودروهای پیل‌سوختی خواهدکرد. از جمله سیاست‌های کلی انرژی می‌توان به قیمت گذاری خدمات شبکه برق و قیمت گذاری خدمات تولید، توزیع و ذخیره سازی هیدروژن اشاره کرد.

خودروهای پیل‌سوختی تا کنون عمدتا از حمایت‌های دولتی برخوردار بوده‌اند. به عنوان مثال، در کالیفرنیا، Mirai با ۶۵ درصد تخفیف نسبت به قیمت فهرست ۵۰ هزار دلاری خود در دسترس بود. با ارائه تخفیف ۲۰ هزار دلاری تویوتا به اضافه مشوق‌های مالیاتی فدرال و ایالتی ایالات متحده که مجموعاً ۱۲/۵ هزار دلار است، Mirai در سال ۲۰۲۱ در ایالات متحده با قیمتی کمتر از ۱۸ هزار دلار در دسترس بود. برای تشویق بیشتر مشتریان، تویوتا همچنین اعتبار سوخت ۱۵ هزار دلاری را برای سه سال اول کار ارائه کرد. یک خودروی ۵۰ هزار دلاری با قیمت کمتر از ۲۰ هزار دلار با ۱۰۰ هزار کیلومتر سوخت رایگان بدون شک یک معامله جذاب است. قیمت Mirai در ژاپن بر اساس مدل بین ۶/۴۵ تا ۷/۸۲ میلیون ین متغیر است که مقدار یارانه بین ۱/۴۵ میلیون ین تا ۲/۳۸ میلیون ین برای آن در نظر گرفته شده‌است [۳۴].

برای هیوندای نیز چنین حمایتی موجود بوده است. از ۹۶۲۰ هیوندای نکسو فروخته شده در سطح جهان در سال ۲۰۲۱، ۸۸ درصد آن در کره جنوبی بوده است. مشوق‌های ملی و ایالتی کره جنوبی در سال ۲۰۲۱ به این صورت بوده که فروش هر NEXO با قیمت ۶۰ هزار دلار با ارائه یارانه حدود ۳۰ هزار دلار پشتیبانی می‌شد یعنی ۵۰٪ تخفیف جذاب. در کره جنوبی، قیمت معمولی برای اتوبوس‌های پیل‌سوختی حدود ۶۳۰ میلیون وون است که مشوق‌هایی بین ۱۵۰ تا ۳۳۰ میلیون وون پرداخت می‌شود [۳۴].

در چین تا پایان سال ۲۰۱۹، FCVها بودجه دولتی را به عنوان بخشی از سیاست حمایت مالی برای وسایل نقلیه با انرژی جدید دریافت می‌کردند. طبق این سیاست، خودروهای سواری ۶۰۰۰ یوان به ازای هر کیلووات و حداکثر ۲۰۰۰۰۰ یوان برای هر وسیله‌نقلیه، اتوبوس‌ها و کامیون‌های کوچک ۳۰۰۰۰۰ یوان و اتوبوس‌ها و کامیون‌های بزرگ ۵۰۰۰۰۰ یوان دریافت می‌کردند. در آلمان به خریداران تویوتا Mirai ۵۰۰۰ یورو از دولت و ۲۵۰۰ یورو از سازنده خودرو (مجموعا ۷۵۰۰ یورو) پاداش داده می‌شود. ارزیابی درخواست‌های پاداش زیست‌محیطی تا ۱ مارس ۲۰۲۲ نشان می‌دهد که ۱۷۰ خودروی هیوندای نکسوس، ۱۹ هیوندای ix۳۵ پیل‌سوختی و ۵۲ خودروی تویوتا Mirai از این برنامه پشتیبانی دریافت کردند [۴۰].

۶-۲- کاهش هزینه تولید و انتقال هیدروژن

اگر از روش‌هایی برای تولید هیدروژن استفاده شود که آلایندگی بالایی داشته باشند هزینه کمی خواهند داشت اما می‌بایست از انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده کرد که آلایندگی کمی داشته باشد. هزینه‌های تولید هیدروژن از انرژی‌های تجدیدپذیر از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ به میزان ۸۰ درصد کاهش یافته‌است [۲]. بنابراین اگر این روند کاهش در قیمت تولید هیدروژن از انرژی تجدیدپذیر با همین سرعت ادامه پیدا کند، پیش‌بینی‌های انجام شده جهت تولید هیدروژن با آلودگی کم و قیمت پایین محقق خواهدشد.

۶-۳- کاهش هزینه‌های تولید توده پیل‌سوختی

با روش‌های متعدد و نوینی مانند بهبود میدان جریان با روش-های میدان جریان همراه با مانع [۴۱]، میدان جریان همراه با فوم فلزی [۴۲]، میدان جریان پینی، میدان جریان لانه زنبوری [۴۳]، میدان جریان مارپیچ [۴۴]، میدان جریان درختی [۴۵] می‌توان عملکرد پیل‌سوختی را بهبود بخشید و نیز هزینه ساخت توده پیل‌سوختی به ازای یک توان مشخص را نیز کاهش داد.

۶-۴-پیوندزنی یا استفاده هیبریدی از پیل‌های سوختی با سیستم‌های ذخیره انرژی مانند باتری و ابرخازن

ایده‌های بکارگیری ترکیبی از پیل‌های سوختی با سیستم‌های ذخیره انرژی مانند باتری و ابرخازن یکی از راهکارهای کاهش هزینه است [۴۶]. از جمله روش‌های پیوندزنی می‌توان به پیوندزنی پیل‌سوختی و باتری [۴۷]، پیل‌سوختی و ابرخازن [۴۸]، پیوند سه‌گانه پیل‌سوختی، باتری و ابرخازن [۴۹]، پیوند سه‌گانه پیل‌سوختی، باتری و پنل فوتوولتاییک[۵۰] اشاره کرد.

۶-۵- افزایش دانسیته توان حجمی پیل‌سوختی

از روش‌های مختلفی برای کاهش حجم توده پیل‌سوختی در یک توان مشخص استفاده می‌شود. از جمله استفاده از صفحات دو قطبی فلزی به جای صفحات گرافیتی، بهینه سازی و طراحی‌های جدید میدان جریان (موارد مطرح شده در بخش ۶-۳)، طراحی بهینه منیفولد و اصلاح فناوری مونتاژ توده پیل‌سوختی [۵۱]. برای مثال خودروی هوندا Clarity با طراحی میدان جریان موجی شکل توانسته تا ۵۰ درصد حجم توده پیل‌سوختی را کاهش دهد [۲۸].

۷- بازار خودروهای پیل‌سوختی در دنیا

FCEVهای موجود در بازار تا به امروز، تولیدکنندگان آن و مشخصات ویژه آنها در جدول (۷) آورده شده‌است. موارد ذکر شده در جدول همه از پیل‌سوختی PEM استفاده شده‌است. بر اساس جدول (۷) راندمان خودروی هیوندای ix۳۵ از ۷۵ کیلومتر بر کیلوگرم در سال ۲۰۱۴ به ۱۰۵ کیلومتر بر کیلوگرم در سال ۲۰۲۲ و راندمان خودروی هیوندای NEXO از ۸۹ کیلومتر بر کیلوگرم در سال ۲۰۱۸ به ۱۱۹ کیلومتر بر کیلوگرم در سال ۲۰۱۸ افزایش یافته است. این معادل افزایش سالانه ٪۵ و ٪۴/۸۲ برای دو مدل است[۵۲].شرکت‌های تویوتا و هوندا مجموعه‌های FC خود را تولید می‌کنند و کمپانی‌های دیگر مانند هیوندا FC را از تولیدکننده می‌خرند.

جدول۷ مشخصات تعدادی از FCEVهای تولیدشده توسط تولیدکنندگان خودرو[۵۲]

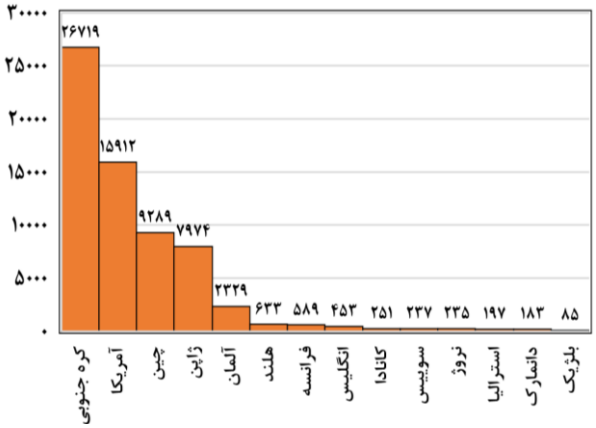
نام خودرو	مدل خودرو	برد (کیلومتر)	راندمان (km/kg)	توان FC بر حسب (KW)
Citroen e-Jumpy	۲۰۲۲	۴۰۰	۹۱	۱۰۰
PEUGEOT e-Expert	۲۰۲۲	۴۰۰	۹۱	۱۰۰
Opel Vivaro-e	۲۰۲۲	۴۰۰	۹۱	۱۰۰
Mercedes-Benz GLC	۲۰۲۲	۴۷۸	۱۲۰	۱۴۲
Honda Clarity	۲۰۲۲	۵۸۹	۱۱۸	۱۳۰
Honda FCX Clarity	۲۰۰۸	۳۸۴	۱۰۷	۱۰۰
Toyota MIRAI II	۲۰۲۲	۶۵۰	۱۱۶	۱۳۶
Toyota MIRAI	۲۰۲۲	۶۵۰	۱۱۶	۱۸۶
Toyota MIRAI	۲۰۱۵	۴۹۹	۱۰۰	۱۱۵
Hyundai ix۳۵	۲۰۲۲	۵۹۴	۱۰۵	۱۰۰
Hyundai NEXO	۲۰۲۲	۷۵۶	۱۱۹	۱۲۰
Hyundai ix۳۵	۲۰۱۴	۴۲۴	۷۵	۱۰۰
Hyundai NEXO	۲۰۱۸	۵۶۶	۸۹	۱۲۰

جدول (۸) آمار تعداد خودروهای FCEV در جاده‌های چند کشور پیشرو در پایان سال ۲۰۱۹ و پایان سال ۲۰۲۲ آورده شده است. مطابق جدول (۸) کره‌جنوبی با افزودن بیش از ۲۱۰۰۰ خودرو پیل‌سوختی فقط در طی ۳ سال بیشترین سهم اضافه شده خودرو پیل‌سوختی را به خود اختصاص داده و توانسته در رتبه اول قرار بگیرد. در طی این ۳ سال چین کمترین میزان اضافه شدن را داشته‌است[۲۷].

جدول ۸ تعداد خودروهای FCEV در جاده‌های چند کشور پیشرو در پایان سال ۲۰۱۹ و پایان سال ۲۰۲۲[۲۷] [۲] [۵]

کشور	پایان سال۲۰۱۹	پایان سال ۲۰۲۲
آلمان	۱۰۸۳	۲۳۲۹
ژاپن	۴۰۰۰	۷۹۷۴
آمریکا	۹۲۵۲	۱۵۹۱۲
چین	۸۴۴۳	۹۲۸۹
کره جنوبی	۵۰۳۸	۲۶۷۱۹

در شکل (۱) نمودار FCVها در ۱۴ کشور پیشرو تا پایان سال ۲۰۲۲ نشان داده شده‌است. مطابق شکل کره‌جنوبی از نظر تعداد FCV در جاده‌های خود با ۲۶۷۱۹ وسیله‌نقلیه، پیشتاز است. آمریکا با ۱۵۹۱۲ وسیله‌نقلیه در رتبه دوم قرار دارد و پس از آن چین و ژاپن قرار دارند.



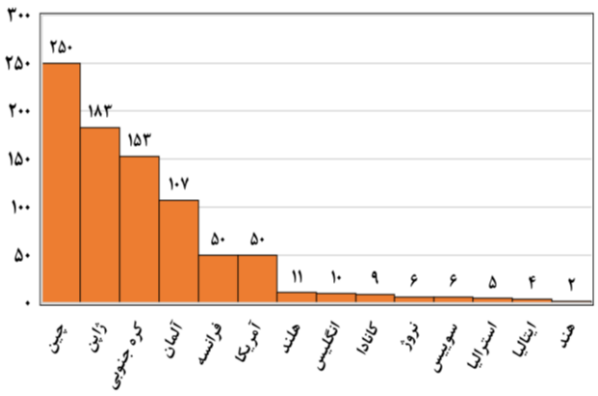
شکل ۱ آمار FCVهای در جاده در ۱۴ کشور پیشرو تا پایان سال ۲۰۲۲ [۲۷]

بیشترین تعداد از خودروهای پیل‌سوختی را خودروهای سواری با ۸۲ درصد به خود اختصاص داده‌است. ۹/۲ درصد هم اتوبوس‌ها را شامل می‌شود. کامیون‌های متوسط، کامیون‌های سنگین و خودروهای تجاری سبک هم به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند [۴۰].

۸- نقشه راه و پیش‌بینی آینده خودرو پیل‌سوختی

با در نظر گرفتن مزایای خودروهای پیل‌سوختی و راهکارهای برطرف شدن چالش‌های موجود، تقاضا برای این خودروها افزایش خواهدیافت. وسعت بازار وسایل نقلیه با سوخت هیدروژن در سال ۲۰۱۸ در حدود ۶۵۱/۹ میلیون دلار بود و بنا شده که این رقم در سال ۲۰۲۶ به ۴۲۰۳۸/۹ میلیون برسد که نشان‌دهنده نرخ رشد ترکیبی سالانه ۶۶/۹٪ از ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۶ خواهدبود [۵۳]. آخرین پیش‌بینی ها تخمین می‌زند که در سال (۲۰۲۵) ۳۴۵۰۰ خودرو پیل‌سوختی و در سال (۲۰۲۸) ۶۵۶۰۰ خودرو پیل‌سوختی در جاده‌های کالیفرنیا وجود خواهد داشت [۵۴].

افزایش تعداد خودرو پیل‌سوختی به معنی افزایش تقاضای هیدروژن در دهه پیش رو است. لذا کشورها در کنار خودرو پیل سوختی، تعداد ایستگاه‌های سوخت‌گیری هیدروژن (HRS) خود را نیز افزایش داده‌اند. در شکل(۲) تعداد ایستگاه‌های سوخت‌گیری هیدروژن تا پایان سال ۲۰۲۲ در ۱۴ کشور پیشرو دنیا نشان داده شده‌است. براساس گزارش جدید آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) در سال ۲۰۲۳، ۱۰۲۰ ایستگاه سوخت‌گیری هیدروژن در سال ۲۰۲۲ در سراسر جهان فعال بوده است که چین بیشترین جایگاه را دارد [۱۲]. سه کشور برتر که هر سه بیش از ۱۰۰ HRS دارند، به ترتیب چین(۲۵۰)، ژاپن(۱۸۳) و کره جنوبی (۱۵۳) هستند. در ژاپن نقشه راه برای سال ۲۰۲۵ احداث ۳۲۰ ایستگاه سوخت هیدروژن می‌باشد [۵۵]. براساس بیانیه سال ۲۰۱۵ وزارت محیط زیست کره جنوبی، نصب ۵۲۰ ایستگاه هیدروژن تا سال ۲۰۳۰ هدف‌گذاری شده‌است [۵۶].



شکل ۲ ایستگاه‌های سوخت‌گیری هیدروژن تا پایان سال ۲۰۲۲ در کشورهای دنیا [۲۷]

یک پارامتر مهم جهت ارزیابی توسعه کشورها در زمینه خودرو پیل سوختی، نسبت تعداد جایگاه‌های سوخت هیدروژن

به تعداد خودرو پیل‌سوختی است. این نسبت نشان می‌دهد که تا چه میزان مدیران تصمیم گیرنده نگرش چند بعدی داشته‌اند و متناسب با افزایش خودرو به افزایش جایگاه سوخت نیز اقدام کرده‌اند. آمار پنج کشور پیشرو با توجه شکل (۱) و شکل (۲) ارائه شده‌است. بالاترین نسبت یعنی بهترین وضعیت متعلق به فرانسه و سپس به ترتیب ایتالیا و آلمان می‌باشد.

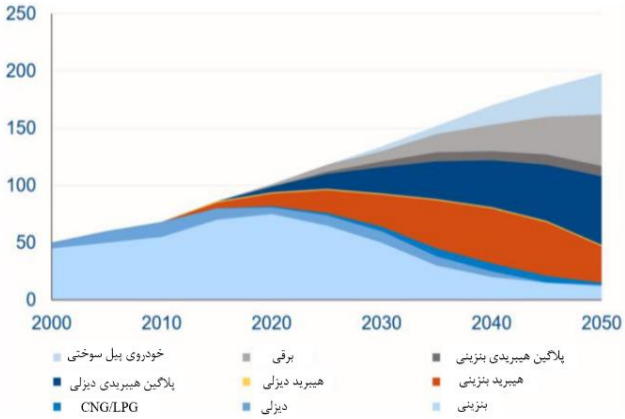
جدول ۹ آمار نسبت تعداد جایگاه‌های سوخت هیدروژن به تعداد خودرو پیل‌سوختی در پنج کشور پیشرو [۵]، [۲۷]

کشور	نسبت تعداد جایگاه‌های سوخت به ازای هر ۱۰۰ خودرو پیل‌سوختی
فرانسه	۸/۵
ایتالیا	۶/۱
آلمان	۴/۶
کانادا	۳/۶
چین	۲/۷

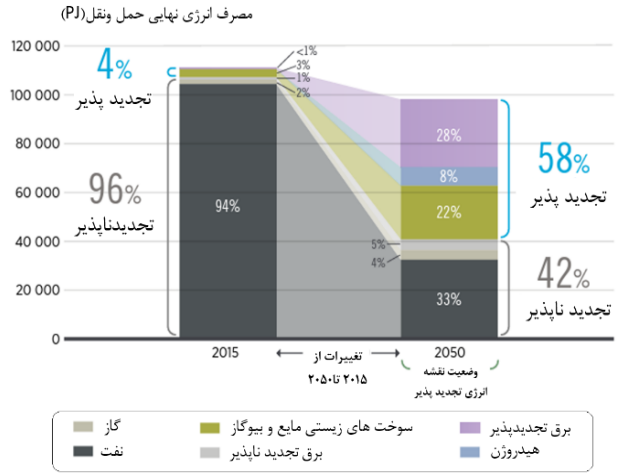
افزایش امنیت استفاده از هیدروژن و بالا رفتن تعداد ایستگاه‌های سوخت، فاکتورهایی هستند که تقاضا برای این وسایل را افزایش می‌دهند. واضح است که اگر رانندگان بتوانند به آسانی به این گونه ایستگاه‌ها دسترسی داشته باشند میزان تمایل آنها به FCEV بیشتر می‌شود. در نتیجه، ناگزیر تعداد ایستگاه‌های سوخت هیدروژن در ۱۰ سال آینده افزایش می‌یابد [۵۷].

درشکل (۳) پیش‌بینی‌های حجم فروش خودروی پیل‌سوختی را بر اساس سناریوی ترکیبی انواع پیشرانه‌ها برای بلندمدت (میلیون واحد سالانه) نشان داده شده‌است [۵۸]. با در نظر گرفتن سناریوی مشابه، آژانس بین المللی انرژی (IEA) سهم بازار خودروی پیل‌سوختی را در حدود ۱۷ درصد تا سال ۲۰۵۰ (۳۵ میلیون واحد فروش سالانه) پیش‌بینی می‌کند. باید توجه شود که این امر نیاز به سرمایه‌گذاری قابل توجهی در زیرساخت هیدروژن ایجاد می‌کند. برای هر یک از ۱۵۰ میلیون FCEV فرضی فروخته شده تا سال ۲۰۵۰، حدود ۹۰۰ تا ۱۹۰۰ دلار باید برای توسعه زیرساخت‌های هیدروژنی هزینه شود [۲].

نقشه راه انرژی‌های تجدیدپذیر (Roadmap) تا سال ۲۰۵۰ که توسط آژانس بین المللی انرژی‌های تجدیدپذیر (IRENA) تدوین شده‌است [۵۹]، همان طور که در شکل (۴) نشان داده شده‌است، اگر مطابق این نقشه راه عمل شود، باید در سال ۲۰۵۰ هشت درصد مصرف انرژی در بخش حمل و نقل مربوط به استفاده از هیدروژن به عنوان سوخت حمل و نقل باشد که مهم‌ترین مصداق آن خودرو پیل‌سوختی است.

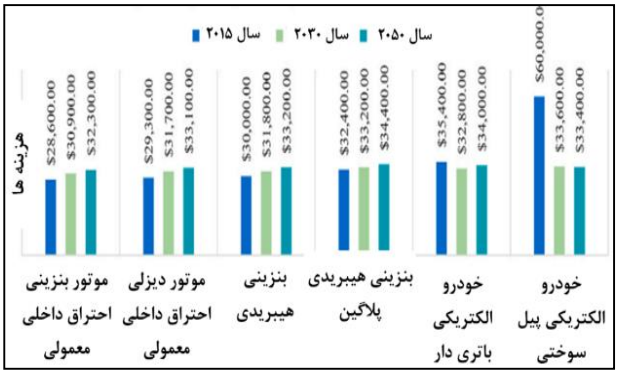


شکل ۳ حجم فروش خودروهای پیل‌سوختی بر اساس گزارش آژانس بین المللی انرژی [۵۸]



شکل ۴ تفکیک مصرف نهایی انرژی در بخش حمل و نقل، بر اساس منبع [۵۹](PJ/year)

برای اینکه خودروهای الکتریکی، جایگزین امیدوار کننده‌ای برای خودروهای احتراق داخلی شوند، کاهش هزینه این وسایل نقلیه باید در دستور کار قرار گیرد. با توجه به تجزیه و تحلیل هزینه‌ها، نتیجه‌گرفته شده‌است که هزینه وسایل نقلیه پیل‌سوختی و باتری‌دارها، که پر هزینه‌ترین گزینه‌ها در سال ۲۰۱۶ بودند، در سال ۲۰۵۰ بسیار نزدیک به انواع خودروهای دیگر از جمله بنزینی بشود [۶۰]. هزینه وسایل نقلیه سبک مسافری برای ایالات متحده در سال ۲۰۱۵ و تخمین کاهش هزینه‌ها بر اساس داده‌های IEA در شکل (۵) ارائه شده‌است. کاهش هزینه پیل‌سوختی به ۵۰ دلار در هر کیلووات و هزینه باتری به ۱۰۰ دلار در هر کیلووات ساعت می‌تواند تصمیم اقتصادی در خودروهای پیل‌سوختی را تغییر دهد.



شکل ۵ هزینه وسایل نقلیه سبک مسافری برای ایالات متحده در سال ۲۰۱۵ و پیش‌بینی سال ۲۰۳۰ و ۲۰۵۰ [۶۰]

۹- روند توسعه پیل‌سوختی در ایران

در ایران هنوز خودرو پیل‌سوختی ساخته نشده است لکن اقداماتی در حوزه تحقیقات و نیز ساخت استک پیل‌سوختی انجام شده است که در ادامه ذکر شده است.

۹-۱- سند راهبردی ملی توسعه فناوری پیل‌سوختی

به منظور سیاست‌گذاری متمرکز، جهت‌دهی و هماهنگی فعالیت‌های توسعه فناوری پیل‌سوختی، سند راهبردی ملی توسعه فناوری پیل‌سوختی در سال ۱۳۸۶ توسط هیئت دولت وقت تصویب گشت. بر طبق این سند یک بازه ۱۵ ساله مشخص شده بود که جمهوری اسلامی ایران بتواند جزء پنج کشور توسعه‌یافته، توانمند و صاحب‌فناوری قاره آسیا و اولین کشور منطقه در زمینه طراحی، تولید، ارتقاء و بکارگیری فناوری پیل‌سوختی راهبردی بشود. در این سند هدفگذاری تولید ۱۰۰ دستگاه خودرو پیل‌سوختی تا پایان سال ۱۴۰۱ شده بود. بدین منظور کمیته راهبری پیل سوختی در سازمان انرژی‌های نو ایران در پژوهشگاه نیرو تاسیس و فعالانه تا سال ۹۱ به حمایت و ارائه خدمات پرداخت.

راه‌اندازی سایت انرژی‌های نو طالقان به منظور پیاده‌سازی و اجرای طرح‌های نمونه هیدروژن و پیل سوختی، خرید صد نمونه کیت آموزشی پیل و اهدا به مراکز آموزش و پرورش کشور، ساخت سیستم پیل‌سوختی ظرفیت ۱۰ کیلووات [۶۱]، تامین، نصب و راه‌اندازی یک سیستم پیل سوختی ۲۵ کیلو وات با هدف اتصال به شبکه و تجهیزات جانبی آن در سایت انرژی‌های نو طالقان، حمایت از مقالات و پایان نامه‌های تحصیلات تکمیلی، از جمله اقداماتی بود که از سال ۸۶ تا سال ۹۱ در کشور با حمایت کمیته راهبری پیل‌سوختی انجام شده بود [۶۲].

کمیته راهبری پیل‌سوختی متاسفانه از سال ۹۲ منحل گردید و کشور از اهداف تعیین شده در سند راهبردی پیل سوختی به کلی دور شد.

۹-۲- ظرفیت‌های موجود و ارائه راهکار برای دست یابی به خودرو پیل‌سوختی در ایران

بیش از ۱۵ مرکز پژوهشی در دانشگاه‌ها و پژوهشگاه‌های سراسر کشور بطور خاص با موضوع پیل‌سوختی فعالیت می‌کنند. اعضای هیات علمی از دانشگاه‌های سراسر کشور در هزاران مقاله در مجلات معتبر نمایه شده در WOS با کیفیت Q۱ به چاپ رسانده‌اند. تا کنون ۱۱ سمینار و ۵ همایش برگزار شده است که در هر یک از آنها ده ها مقاله از سراسر کشور از رشته‌های مختلف شیمی، فیزیک، مهندسی‌مکانیک، مهندسی‌برق، مهندسی‌صنایع، مهندسی‌شیمی و مهندسی مواد آخرین دستاوردهای خود را در زمینه پیل سوختی ارائه داده اند؛ لذا ظرفیت محققان و اساتید ظرفیت بالا و بسیار آماده‌ای است تا ایران نیز بتواند وارد عرصه ساخت خودرو پیل‌سوختی بشود. به همین دلیل می‌توان گفت از لحاظ تولید استک پیل‌سوختی مورد نیاز خودرو و نیز زیرساخت‌های هیدروژنی از نظر علمی و فنی در ایران با چالش جدی مواجه نیستیم. قطعاً توجیه اقتصادی از جمله هزینه‌های مرتبط با تولید و توزیع هیدروژن جدی‌ترین چالش در ایران است. بنابراین جهت تامین منابع مالی، نهادهای مسول می‌توانند با حمایت و تسهیل شرایط، بانک‌ها و بنگاه‌ها و فعالان اقتصادی را دعوت به همکاری نمایند. همچنین به منظور توسعه خودروهای پیل سوختی در ایران می‌توان از زیرساخت‌های کشور از جمله ظرفیت‌های پالایشگاهی و نیروگاهی در جهت تولید هیدروژن بهره برد. بعلاوه این امکان وجود دارد که از جایگاه‌های سوخت CNG در کشور در جهت تامین گاز ایستگاه‌های شارژ هیدروژن به روش ریفورم گاز طبیعی به منظور سوخت‌گیری خودروهای پیل سوختی استفاده کرد [۶۳].

۱۰- نتیجه گیری

در این مطالعه با بررسی بخش‌های مختلف شامل چالش‌های سوخت‌های فسیلی و لزوم جایگزینی آنها با فناوری‌های نو،

آشنایی با فناوری پیل‌سوختی، معرفی مزایا و چالش‌های خودرو پیل‌سوختی، راهکارهای غلبه بر چالش‌ها و پیش‌بینی آینده بازار خودروهای پیل‌سوختی بر اساس آخرین یافته‌های محققین و تولیدات شرکت‌های بزرگ خودرو پیل‌سوختی و سیاست‌های کشورهای مختلف بررسی گردید. در راستای سیاست دولت‌ها جهت حرکت به سمت خودروهای برقی و پیل‌سوختی، کشورهای نروژ، هلند و سوئد تا سال ۲۰۳۰، انگلیس تا ۲۰۳۵، فرانسه تا سال ۲۰۴۰ و اغلب کشورهای دیگر تا سال ۲۰۵۰ ممنوعیت فروش خودروهای مبتنی بر سوخت-های فسیلی را اعلام کرده‌اند. خودروهای پیل‌سوختی نسبت به خودروهای احتراق داخلی و خودروهای مبتنی بر باتری از طول عمر بالاتر، میزان آلایندگی در حال حرکت پایین‌تر و بازده چاه به چرخ بالاتری برخوردار هستند. مطابق آمارها تا پایان سال ۲۰۲۲، کره‌جنوبی از نظر تعداد FCV در جاده‌های خود با ۲۶۷۱۹ وسیله‌نقلیه، پیشتاز است. آمریکا با ۱۵۹۱۲ وسیله نقلیه در رتبه دوم و پس از آن چین و ژاپن قرار دارند.

دو مشخصه آلایندگی و هزینه تولید بصورت تاثیر متضاد و متقابل باید ارزیابی شده و به تعادل برسد. طبق گزارش اتحادیه اروپا هزینه متوسط تولید هیدروژن از سوخت فسیلی ۱/۸ دلار به کیلوگرم است در حالیکه هزینه تولید هیدروژن از انرژی‌های تجدیدپذیر بین ۳ تا ۶/۶ دلار بر کیلوگرم است. با کاهش هزینه تولید هیدروژن از انرژی‌های تجدیدپذیر، می‌توان به هدف ایده-آل هزینه پایین و آلایندگی کم دست پیدا کرد. تخصیص یارانه و سیاست‌های تشویقی دولت‌ها در سال‌های اخیر جهت خرید خودرو پیل‌سوختی بسیار پر رنگ بوده‌است. برای مثال در کالیفرنیا در سال ۲۰۲۱، تویوتا Mirai با ۶۵ درصد تخفیف در دسترس مشتریان قرار گرفته‌است. در کره جنوبی نیز فروش هیوندای NEXO با ۵۰ درصد یارانه دولتی همراه بوده‌است. بر اساس مطالعات آژانس بین المللی انرژی (IEA) سهم بازار خودروی پیل‌سوختی را تا سال ۲۰۵۰ در حدود ۱۷ درصد (۳۵ میلیون واحد فروش سالانه) پیش‌بینی شده‌است. طبق پیش‌بینی IEA هزینه خودروهای پیل‌سوختی، که پر هزینه‌ترین گزینه‌ها در سال‌های اخیر بودند، در سال ۲۰۵۰ بسیار نزدیک به انواع خودروهای دیگر از جمله بنزینی خواهد بود.

۱۱- تشکر و قدردانی

لازم است از حمایت های عضو محترم هیات علمی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی جناب آقای دکتر آرش محمدی قدردانی کنیم. همچنین از مرکز تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران‌خودرو نیز بابت حمایت های ایشان تشکر می‌کنیم.

۱۲- مراجع

[1] Alcázar-García, D., and Romeral Martínez, J. L., Model-based design validation and optimization of drive systems in electric, hybrid, plug-in hybrid and fuel cell vehicles, *Energy*, Vol. 254, DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123719, (2022).

[2] Li, Y., and Kimura, S., Economic competitiveness and environmental implications of hydrogen energy and fuel cell electric vehicles in ASEAN countries: The current and future scenarios, *Energy Policy*, Vol. 148, part B, Article ID: 111980, DOI: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111980 (2021).

[3] Liu, T., Tang, X., Wang, H., Yu, H., and Hu, X., Adaptive hierarchical energy management design for a plug-in hybrid electric vehicle, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 68, pp. 11513–11522, DOI: 10.1109/TVT.2019.2926733, (2019).

[4] Offer, G.J., Howey, D., Contestabile, M., Clague, R., and Brandon, N.P., Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system, *Energy Policy*, Vol. 38, pp. 24–29, DOI: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.08.040 (2010).

[5] Trencher, G., and Wesseling, J., Roadblocks to fuel-cell electric vehicle diffusion: Evidence from Germany, Japan and California, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 112, Article ID: 103458, DOI: https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.10345, (2022).

[6] Khan, U., Yamamoto, T., and Sato, H., Understanding the discontinuance trend of hydrogen fuel cell vehicles in Japan, *International Journal of Hydrogen Energy*, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.07.141, Vol. 47, pp. 31949–31963, (2022).

[7] Park, C., Lim, S., Shin, J., and Lee, C.-Y., How much hydrogen should be supplied in the transportation market? Focusing on hydrogen fuel cell vehicle demand in South Korea: Hydrogen demand and fuel cell vehicles in South Korea, *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 181, Article ID: 121750,DOI: https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121750, (2022).

[8] Zhang, K., Lau, H.C., and Chen, Z., The contribution of carbon capture and storage to Canada’s net-zero

plan, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 404, Article ID: 136901, DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136901, (2023).

[9] Ferrero, E., Alessandrini, S., and Balanzino, A., Impact of the electric vehicles on the air pollution from a highway, *Applied Energy*, Vol. 169, pp. 450–459, DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.098, (2016).

[10] Mahmoudzadeh Andwari, A., Pesiridis, A., Rajoo, S., Martinez-Botas, R., and Esfahanian, V., A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 78, pp. 414–430, DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.138, (2017).

[11] Moon, S., Lee, Y.-J., and Lee, D.-J., A cost-effectiveness analysis of fuel cell electric vehicles considering infrastructure costs and greenhouse gas emissions: An empirical case study in Korea, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 54, Article ID: 102777, DOI: https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102777, (2022).

[12] International Energy Agengy, Global EV Outlook 2023, *Geo*, (2023).

[13] Upham, P., The re Volution is conditional? The conditionality of hydrogen fuel cell expectations in five European countries, *Energy Research and Social Science*, Vol. 70, Article ID: 101722, DOI: https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101722, (2020).

[14] Leibowicz, B.D., Policy recommendations for a transition to sustainable mobility based on historical diffusion dynamics of transport systems, *Energy Policy*, 2023 Elsevier Ltd, Vol. 119, pp. 357–366, DOI: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.066, (2018).

[15] Cano, Z.P., Siyu Ye, D.B., Hintennach, A., Lu, J., Fowler, M., & Chen, Z., Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets, *Nature Energy*, Vol. 3, pp. 279–289, DOI:10.1038/s41560-018-0108-1, (2018).

[16] Bergman, N., Electric vehicles and the future of personal mobility in the United Kingdom, in *Transitions in Energy Efficiency and Demand*, Routledge, pp. 53–71, (2019).

[17] Mekhilef, S., Saidur, R., and Safari, A., Comparative study of different fuel cell technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp. 981–989, DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.020, (2012).

[18] Ognissanto, F., Landen, T., Stevens, A., Emre, M., and Naberezhnykh, D., Evaluation of the CO2 emissions pathway from hydrogen production to fuel cell car utilisation, *IET Intelligent Transport Systems*, Vol. 11, pp. 360–367, DOI: https://doi.org/10.1049/iet-its.2016.0210, (2017).

[19] Maiti, T.K., Singh, J., Dixit, P., Majhi, J., Bhushan, S., Bandyopadhyay, A., Chattopadhyay, S., Advances in perfluorosulfonic acid-based proton exchange membranes for fuel cell applications: A review, *Chemical Engineering Journal Advances*, Vol. 12, Article ID: 100372, DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceja.2022.100372, (2022).

[20] Djilali, N., Computational modelling of polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells: challenges and opportunities, *Energy*, Vol. 32, pp. 269–280, DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.08.007, (2007).

[21] Kasimalla, V. K., G, N.S., and Velisala, V., A review on energy allocation of fuel cell/battery/ultracapacitor for hybrid electric vehicles, *International Journal of Energy Research*, Vol. 42, pp. 4263–4283, DOI: https://doi.org/10.1002/er.4166, (2018).

[22] Álvarez Fernández, R., Corbera Caraballo, S., Beltrán Cilleruelo, F., and Lozano, J.A., Fuel optimization strategy for hydrogen fuel cell range extender vehicles applying genetic algorithms, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81, pp. 655–668, DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.047 (2018).

[23] Wong, E.Y.C., Ho, D.C.K., So, S., Tsang, C.W., and Chan, E.M.H., Life cycle assessment of electric vehicles and hydrogen fuel cell vehicles using the greet model—a comparative study, *Sustainability (Switzerland)*, Vol. 13, Article ID: 4872, DOI: https://doi.org/10.3390/su13094872, (2021).

[24] Kaur, G., PEM Fuel Cells*:* Fundamentals, Advanced Technologies, and Practical Application, *Elsevier*, (2021).

[25] Sagaria, S., Costa Neto, R., and Baptista, P., Assessing the performance of vehicles powered by battery, fuel cell and ultra-capacitor: Application to light-duty vehicles and buses, *Energy Conversion and Management*, Vol. 229, Article ID: 113767, (2021).

[26] Wu, H.W., and Lin, K. W., Thermodynamic analysis of hydrogen-rich syngas production with a mixture of aqueous urea and biodiesel, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, pp. 6804–6814, (2018).

[27] IPHE Country Update: Available online: https://www.iphe.net (accessed on 4 June 2023).

[28] Matsunaga, M., Fukushima, T., and Ojima, K.,

Advances in the power train system of Honda FCX clarity fuel cell vehicle, *SAE International*, DOI: 10.4271/PT-143/5, (2009).

[29] Nakagaki, N., The newly developed components for the fuel cell vehicle, Mirai, *SAE Technical Paper*, DOI: https://doi.org/10.4271/2015-01-1174, (2015).

[30] Jiao, J., Li, J., and Bai, Y., Ethanol as a vehicle fuel in China: A review from the perspectives of raw material resource, vehicle, and infrastructure, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 180, pp. 832–845, DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.141, (2018).

[31] Tong, F., and Azevedo, J.M.I., A review of hydrogen production pathways, cost and decarbonization potential, In Riding the Energy Cycles, *35th USAEE/IAEE North American Conference, Nov 12-15*, International Association for Energy Economics, (2017).

[32] DOE, "Hydrogen Production: Electrolysis" [Online].Available:https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis.

[33] Albatayneh, A., Juaidi, A., Jaradat, M., and Manzano-Agugliaro, F., Future of Electric and Hydrogen Cars and Trucks: An Overview, *Energies*, Vol. 16(7), pp. 3230, DOI: https://doi.org/10.3390/en16073230, (2023).

[34] "IDTechEx"[Online].Available: https://www.idtechex.com/en/research-article/fuel-cells-are-not-the-problem-the-hydrogen-fuel-is/25913. [Accessed: 14-Feb-2022].

[35] Ji, M., and Wang, J., Review and comparison of various hydrogen production methods based on costs and life cycle impact assessment indicators, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, pp. 38612–38635, DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.142, (2021).

[36] Wang, J., Wang, H., and Fan, Y., Techno-economic challenges of fuel cell commercialization, *Engineering*, Vol. 4, pp. 352–360, DOI: https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.007, (2018).

[37] Sun, K., and Li, Z., Quantitative risk analysis of life safety and financial loss for road accident of fuel cell vehicle, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, pp. 8791–8798, DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.065, (2019).

[38] Zhang, J., Yao, H., and Rizzoni, G., Fault diagnosis for electric drive systems of electrified vehicles based on structural analysis, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 66, pp. 1027–1039, DOI: DOI: 10.1109/TVT.2016.2556691, (2016).

[39] Inayati, I., Waloyo, H. T., Nizam, M., and Saidi, H., Model-Based Simulation for Hybrid Fuel Cell/Battery/Ultracapacitor Electric Vehicle, *Proceeding - 2018 5th International Conference on Electric Vehicular Technology, ICEVT 2018*, pp. 112–115, DOI: 10.1109/ICEVT.2018.8628338, (2019).

[40] Samsun, R.C., Rex, M., Antoni, L., and Stolten, D., Deployment of fuel cell vehicles and hydrogen refueling station infrastructure: a global overview and perspectives, *Energies*, Vol. 15(14), pp. 4975, DOI: 10.3390/en15144975, (2022).

[41] Bilgili, M., Bosomoiu, M., and Tsotridis, G., Gas flow field with obstacles for PEM fuel cells at different operating conditions, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, pp. 2303–2311, DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.139, (2015).

[42] Atyabi, S. A., Afshari, E., Zohravi, E., and Udemu, C.M., Three-dimensional simulation of different flow fields of proton exchange membrane fuel cell using a multi-phase coupled model with cooling channel, *Energy*, Article ID: 121247, DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121247, (2021).

[43] Atyabi, S.A., and Afshari, E., Three-dimensional multiphase model of proton exchange membrane fuel cell with honeycomb flow field at the cathode side, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 214, pp. 738–748, DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.293, (2019).

[44] Toghyani, S., Afshari, E., Baniasadi, E., and Atyabi, S.A., Thermal and electrochemical analysis of different flow field patterns in a PEM electrolyzer, *Electrochimica Acta*, pp. 234–245,DOI: https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.02.078, (2018).

[45] Lorenzini-Gutierrez, D., Hernandez-Guerrero, A., Ramos-Alvarado, B., Perez-Raya, I., and Alatorre-Ordaz, A., Performance analysis of a proton exchange membrane fuel cell using tree-shaped designs for flow distribution, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, pp. 14750–14763, DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.08.012, (2013).

[46] Koubaa, R., and krichen, L., Double layer metaheuristic based energy management strategy for a Fuel Cell/Ultra-Capacitor hybrid electric vehicle, *Energy*, Vol. 133, pp. 1079–1093, DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.070, (2017).

[47] Saib, S., Hamouda, Z., and Marouani, K., Energy management in a fuel cell hybrid electric vehicle using a fuzzy logic approach, in *2017 5th International Conference on Electrical Engineering-Boumerdes (ICEE-B)*, pp. 1–4, DOI: 10.1109/ICEE-B.2017.8192197, (2017).

[48] Yang, B., Design and implementation of Battery/SMES hybrid energy storage systems used in electric vehicles: A nonlinear robust fractional-order control approach, *Energy*, Vol. 191, Article ID: 116510, DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116510, (2020).

[49] García, P., Fernández, L.M., Torreglosa, J. P., and Jurado, F., Operation mode control of a hybrid power system based on fuel cell/battery/ultracapacitor for an electric tramway, *Computers & Electrical Engineering*, Vol. 39, pp. 1993–2004, DOI: https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2013.04.022, (2013).

[50] Ezzat, M.F., and Dincer, I., Development, analysis and assessment of fuel cell and photo Voltaic powered vehicles, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, pp. 968–978, (2018).

[51] Wang, G., Progress on design and development of polymer electrolyte membrane fuel cell systems for vehicle applications: A review, *Fuel Processing Technology*, Vol. 179, pp. 203–228, DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.065, (2018).

[52] Selmi, T., Khadhraoui, A., and Cherif, A., Fuel cell–based electric vehicles technologies and challenges, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol.29, pp.78121–78131, DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-022-23171-w, (2022).

[53] İnci, M., Büyük, M., Demir, M.H., and İlbey, G., A review and research on fuel cell electric vehicles: Topologies, power electronic converters, energy management methods, technical challenges, marketing and future aspects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 137, DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110648, (2021).

[54] Air Resources Board, Fuel Cell Electric Vehicle Deployment and Hydrogen Fuel Station Network Development, *California Environmental Protection Agency*, July, (2021).

[55] Fuse, M., Noguchi, H., and Seya ,H., Near-term location planning of hydrogen refueling stations in Yokohama City, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, Issue 23, pp. 12272-12279, DOI: DOI:10.1016/j.ijhydene.2020.09.199, (2021).

[56] Kim, J.H., Kim, H.J., and Yoo, S.H., Willingness to pay for fuel-cell electric vehicles in South Korea, *Energy*, Vol. 174, pp. 497–502, DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.185, (2019).

[57] Asif, U., and Schmidt, K., Fuel cell electric vehicles (Fcev): Policy advances to enhance commercial success, *Sustainability*, Vol. 13, p. 5149,DOI: https://doi.org/10.3390/su13095149, (2021).

[58] Manoharan, Y., Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Current Status and Future Prospect, *Applied Sciences*, Vol. 9, Article ID: 2296, DOI: https://doi.org/10.3390/app9112296, (2019).

[59] IRENA International Renewable Energy Agency and I. Renewable Energy Agency, *Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050 (2019 Edition)*, (2019).

[60] Balali, Y., and Stegen, S., Review of energy storage systems for vehicles based on technology, environmental impacts, and costs, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 135, Article ID: 110185, DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110185, (2021).

[61] Ashraf khorasani, M R., Goorabi, H., Dashti, I., Gholami jourshari, M., D, *IJE*, (2015).

[62] Baharlou-Houreh, N., Rajabi, F., and Afshari, E., The development of polymer fuel cells in the world and Iran, *Third Annual Clean Energy Conference*, 3-4 July, Kerman, Iran, (2013). (In Persian)

[63] Torabi, M., Bozorgmehri, S., and Golmohammad, M., Future study of application of Fuel Cells and Batteries in electrical vehicles (EVs), *The national technological requirements Niroo Research Institute (NRI)*, https://press.nri.ac.ir/book_400863.pdf, DOI: 10.30503/nripress.2020.104, (2020). (In Persian)