

مدلسازی دینامیکی و بررسی چرخه حیات یک اتوبوس هیدروژنی: با تأکید بر تأثیر تخریب پیل سوختی و باتری

سیده شادی بشیری موسوی

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران،
shadib.mousavi@gmail.com

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران،
pahmadi@ut.ac.ir

پوریا احمدی*

چکیده

بهره‌گیری از فناوری پیل سوختی چشم‌انداز روشنی را برای ظهور و توسعه خودروهای هیدروژنی فراهم آورده است با این حال وجود برخی از چالش‌های مهم نظیر هزینه بالای ناشی از تخریب پیل سوختی و باتری، طول عمر کوتاه و پیچیدگی ذاتی سیستم، بعنوان موانعی مهم در مسیر تجاری سازی این خودروها مطرح شده‌اند. مطالعه پیش‌رو با هدف بررسی چالش‌های اصلی در زمینه خودروهای پیل سوختی به مدلسازی دینامیکی یک اتوبوس هیدروژنی تحت شرایط واقعی رانندگی پرداخته است. در این تحقیق برخلاف مطالعات پیشین، مدلسازی با در نظر گرفتن تأثیر همزمان تخریب پیل سوختی و باتری بر روی عملکرد اتوبوس، انجام شده‌است که همچنین نوآوری اصلی پژوهش به حساب می‌آید. اتوبوس مدلسازی شده با مصرف ۱/۱۵۸ کیلوگرم هیدروژن مسافت ۱۳/۳ کیلومتر را در یک چرخه رانندگی طی نموده است. نتایج حاکی از افزایش ۹/۵٪ مصرف هیدروژن پس از ۳۵۰۰ ساعت عملکرد با یک استراتژی مدیریتی بر مبنای قانون بوده است. همچنین مهمترین عامل تخریب خاموش و روشن شدن سیستم شناخته شده است. از سوی دیگر در یک چرخه رانندگی ظرفیت باتری در حدود ۰/۰۲۵٪ کاهش داشته است. بررسی چرخه‌ی حیات اتوبوس، نمایانگر اهمیت استفاده از منابع تجدید پذیر را برای تأمین هیدروژن بوده به نحوی که استفاده از ذغال سنگ منجر به افزایش ۸۹٪ تولید گازهای گلخانه‌ای در مقایسه با انرژی خورشیدی شده است.

واژه‌های کلیدی: پیل سوختی، خودرو هیدروژنی، تخریب پیل سوختی، تخریب باتری، تحلیل چرخه حیات.

Dynamic modeling and lifecycle assessment of a hydrogen bus: focusing on battery and fuel cell degradation

Sh. B. Mousavi

Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

P. Ahmadi

Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

The utilization of fuel cell technology has created a promising outlook for the emergence and development of hydrogen vehicles. However, some major concerns including fuel cell degradation, battery aging, short lifespan, and powertrain complexity, have emerged as important obstacles to the commercialization of these vehicles. This study introduced a dynamic model of a hydrogen bus under a real driving cycle to investigate the main challenges in fuel cell vehicles. Unlike previous studies, this research implements a model that considers the simultaneous effects of fuel cell and battery degradation on system performance, as a main contribution. The designed hydrogen bus consumes 1.58 kg of hydrogen for 13.3 km during one driving cycle. After 3500 h of operation, the hydrogen consumption has been increased under a rule-based energy management strategy. Additionally, the start-stop mode has the highest impact on the degradation rate. The battery capacity was reduced by about 0.025% during one driving cycle. The results of the life cycle assessment analysis revealed the significance of renewable hydrogen production methods. Using coal instead of solar energy results in 89% higher emissions.

Keywords: Fuel cell, Hydrogen vehicle, Fuel cell degradation, Battery aging, Life cycle assessment.

راستای اهداف توسعه پایدار به شمار می‌آید [۴ و ۵].

تاکنون راه حل های گوناگونی از جمله استفاده از سوخت‌های جایگزین مانند گاز طبیعی و بایودیزل، همچنین به کارگیری خودروهای برقی پیشنهاد شده است که در این بین بکارگیری هیدروژن به واسطه پیل سوختی از جمله جدیدترین فناوری‌ها به شمار می‌آید [۶ و ۷]. در این خودروها پیل سوختی جایگزین موتور احتراق داخلی شده است که از هیدروژن به عنوان سوخت ورودی استفاده می‌نماید. از جمله مهمترین برتری های خودروهای پیل سوختی در مقایسه با خودروهای برقی محدوده سفر طولانی‌تر، زمان سوخت‌گیری کوتاه‌تر و

۱- مقدمه

تأمین انرژی همواره یکی از بزرگترین دغدغه های بشر به شماره آمده است که با توجه به گرایش به سمت زندگی مدرن و صنعتی شدن جوامع، تأمین این نیاز اساسی به گونه ای که کمترین آثار مخرب محیط زیستی را داشته باشد بیش از پیش حائز اهمیت می‌باشد [۱ و ۲]. در این بین مصرف سوخت‌های فسیلی در بخش حمل و نقل سهم ۶۰٪ را به خود اختصاص داده است و همچنین ۳۰٪ از آلاینده‌ی نیز مربوط به این واحد بوده است [۳]. به همین ترتیب استفاده از فناوری‌های جایگزین در بخش حمل و نقل یکی از موثرترین گام‌ها در

* نویسندگان مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: pahmadi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۷/۰۷/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۹/۰۹/۰۳

همچنین وزن سبک تر بوده است که آن را به گزینه ای بسیار مناسب بخصوص برای خودروهای سنگین و اتوبوس ها بدل ساخته است [۸]. علی‌رغم مزایای فراوان، برخی عوامل مانند هزینه بالا تعمیرات، ساختار پیچیده و نبود زیرساخت مناسب برای استفاده از سوخت هیدروژن اصلی‌ترین چالش ها در مسیر توسعه این نوع از خودروها شناخته شده اند [۹]. در سال های اخیر مطالعات گسترده ای برای بررسی عملکرد و رفع چالش های پیشرو انجام شده است که در ادامه به برخی از آن ها اشاره می‌شود.

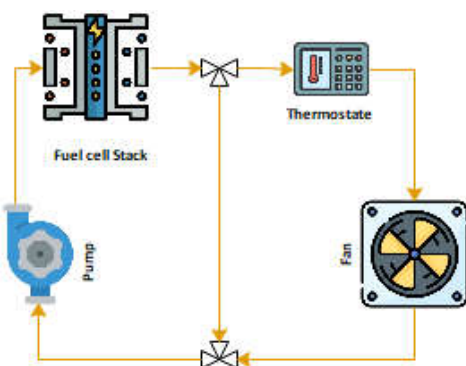
در مطالعه ای از تیموری و همکاران [۱۰] عملکرد خودروهای بنزینی، CNG، الکتریکی و هیدروژنی از نظر مصرف سوخت و آلایندگی با یکدیگر مقایسه شده است و طبق نتایج بدست آمده برای چرخه رانندگی نیویورک، میزان آلایندگی خودرو هیدروژنی به میزان ۷۵٪، ۷۳٪ و ۳۵٪ از خوردهای بنزینی، CNG و الکتریکی کمتر بوده است. به منظور افزایش بازه حرکتی خودرو پیل سوختی، در مطالعه ای از چنگیزیان و همکاران [۱۱] به منظور بهبود عملکرد این خودرو ها از سه منبع انرژی شامل پیل سوختی، باتری و ابرخازن بهره گرفته شده است. با اعمال یک استراتژی مدیریتی بر مبنای قانون^۱، نتایج حاکی از کاهش ۳/۳٪ مصرف هیدروژن و افزایش ۲۰/۲٪ طول عمر باتری بوده است. با این وجود استفاده از سه منبع انرژی سبب افزایش پیچیدگی این نوع از خودروها می‌شود. در مقاله‌ای از مصداقی و ملاجعفری [۱۲] عملکرد خودرو هیدروژنی مجهز به سیستم شارژ برقی بررسی شده است. در این مطالعه از پیل سوختی و باتری برای تأمین انرژی بهره گرفته‌شده و همچنین رابطه میان دو خودرو در شرایط ترافیکی جزو پارامترهای مورد بررسی بوده است. نتایج نشان داده که عامل سرعت جزو مهمترین پارامترها در مصرف سوخت بوده است این درحالی است که افزایش سرعت بیش از ۸۰ کیلومتر بر ساعت تأثیر چندانی بر میزان مصرف انرژی در پیل سوختی نداشته و تنها موجب افزایش استفاده از باتری می‌شود. قابل ذکر است که در سرعت‌های پایین سهم اصلی انرژی توسط باتری تأمین می‌شود. با توجه به اهمیت پارامتر دما در پیل سوختی و همچنین با رویکرد افزایش بازدهی پیل سوختی، در مطالعه ای از یان ما و همکاران [۱۳] بر اساس یک استراتژی مدیریت انرژی، نقشه‌های عملکرد بهینه بر پایه جریان و دمای پیل سوختی استخراج شده است و نتایج نشان داده است که بازدهی سیستم می‌تواند تا حدود ۱۱٪ بهبود پیدا کند. در همین راستا زائو و همکاران [۱۴] از دو مدل یک بعدی و دوبعدی برای مدلسازی دمای پیل سوختی در زمان حرکت استفاده نمودند و با استفاده از یک سیستم خنک‌کاری دمای حداکثر آن را به ۸۰°C محدود نمودند. در این مطالعه دمای محیط و سرعت خودرو مهمترین عوامل تأثیر گذار معرفی شده و بنابراین محدودیت های ایمنی خودرو سبب ایجاد محدودیت در حداکثر سرعت و زمان شتاب گیری خودرو شده است. از سوی دیگر یکی از اصلی ترین چالش‌ها در مسیر توسعه خودروهای هیدروژنی تخریب پیل سوختی می‌باشد که در طول زمان به علت موارد متعدد نظیر رطوبت، نشتی، دمای عملکردی، عدم موازنه سوخت و بسیاری از عوامل دیگر سبب تخریب لایه‌های اصلی پیل سوختی و افت ولتاژ

خروجی می‌شود [۱۵]. در همین راستا وایتلی و همکاران [۱۶] در مطالعه خود سعی بر آشکار ساختن روابط حاکم بر تخریب پیل سوختی و معرفی آن‌ها در غالب درخت تخریب داشته اند. همچنین پی و همکاران [۱۷] بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و با به کارگیری روش های یادگیری ماشین به مدلسازی تخریب تحت شرایط عملکردی مختلف پرداخته‌اند. در ادامه‌ی مسیر رئیسی و همکاران [۱۸] با بکارگیری چهار روش مختلف یادگیری ماشین و بر اساس داده‌های آزمایشگاهی مستخرج از مطالعات دیگر به تخمین تخریب پیل سوختی در زمان عملکرد خودرو هیدروژنی پرداختند. مطالعات آن‌ها نشان داد که تخریب پیل سوختی سبب افزایش ۱۴٪ در مصرف هیدروژن و همچنین افزایش تولید CO₂ به میزان ۲۶٪ انجامیده است. پس از آن در مطالعه ای از احمدی و خوشنویسان [۱۹] برای بررسی عملکرد خودرو پیل سوختی، میزان تخریب مقداری ثابت و بر اساس نتایج مطالعه پیشین در نظرگرفته شده است. به همین ترتیب از نرم افزار AMESim برای مدلسازی استفاده شده و نرم افزار GREET برای بررسی چرخه حیات انتخاب شده است. با درنظرگرفتن مقادیر ثابت برای تخریب پس از ۶۰۰۰ ساعت میزان مصرف هیدروژن به مقدار ۱۴٪ افزایش و ولتاژ خروجی پیل سوختی به مقدار ۱۱٪ کاهش یافته است. علاوه بر سلامت پیل سوختی، تخریب باتری نیز جزو پارامترهای مؤثری است که در نظرگرفتن آن حائز اهمیت می‌باشد. در مقاله ای از منصور و همکاران [۲۰] به مدلسازی دو خودرو پیل سوختی و خودرو برقی پرداخته شده است که به ترتیب بر پایه مدل های تجاری تویوتا میرای و نیسان لیف بوده است. فاکتورهای مختلفی در این مطالعه بررسی شده اند که از مهمترین آن‌ها سلامت پیل سوختی و باتری بوده است. نتایج این مطالعه مشخص نموده است که با کاهش سلامت باتری به ۸۰٪ محدوده حرکتی خودرو برقی به میزان ۳۵٪ کاهش یافته است و همچنین با گذشت ۵۰۰۰ ساعت از کارکرد خودرو، به علت تخریب پیل سوختی، محدوده حرکتی تا ۲۷٪ کاهش داشته است.

با در نظر گرفتن مطالعات صورت گرفته در سال های اخیر، می‌توان به این مهم دست یافت که ارائه یک مدل جامع از خودرو پیل‌سوختی با درنظرگرفتن تمامی ابعاد مختلف می‌تواند گام مهمی در راستای برطرف نمودن چالش های مطرح شده در زمینه خودروهای هیدروژنی باشد. از سوی دیگر با توجه به مزایای استفاده از فناوری‌های پیل سوختی، بکارگیری این سیستم ها در خودروهای سنگین و وسایل حمل و نقل عمومی چشم انداز بسیار روشنی دارد. در همین راستا مطالعه پیش رو به منظور بررسی هر چه دقیق‌تر چالش‌های اصلی در خودروهای هیدروژنی، به ارائه‌ی یک مدل جامع با درنظرگرفتن همزمان تأثیر تخریب پیل سوختی و باتری در یک اتوبوس پرداخته است. برخلاف مطالعات پیشین تمامی بخش‌ها به صورت کامل مدلسازی شده است و همچنین به منظور تأمین بحث ایمنی و کاهش تخریب، دمای پیل سوختی توسط سیستم خنک‌کاری در محدوده مناسب کنترل شده است. همچنین از جمله مهمترین نوآوری‌های این تحقیق تخمین تخریب پیل‌سوختی در زمان عملکرد اتوبوس و تأثیر آن بر مصرف سوخت می‌باشد. از سوی دیگر، مدلسازی دقیق باتری بعنوان دومین منبع تأمین انرژی در خودرو حائز اهمیت بوده است و درنظرگرفتن افت ظرفیت آن در طول چرخه رانندگی ضروری می‌باشد. همچنین با هدف دستیابی به عملکرد مناسب، از یک استراتژی

¹ Rule-based energy management

اتیلن گلیکول و آب استفاده شده است که طرحواره آن در شکل ۲ قابل مشاهده است.



شکل ۲- سیستم خنک کاری پیل سوختی.

در این سیستم خنک کاری از یک ترموستات برای کنترل دمای مبرد استفاده شده است و هنگامیکه دما از حد تعیین شده بالاتر باشد از فن برای کاهش دمای مبرد استفاده می‌شود. پس از کاهش دما، فشار مبرد توسط پمپ افزایش یافته و برای خنک کاری به پیل سوختی انتقال می‌یابد.

۳- مدلسازی سیستم و معادلات حاکم

در این مطالعه برای افزایش دقت نتایج، تمامی بخش‌های مختلف اتوبوس به صورت جداگانه مدلسازی شده‌اند. با این هدف از یک نرم افزار قدرتمند در زمینه مدلسازی سیستم‌های دینامیکی با نام AMESim استفاده شده است که امکان در نظر گرفتن تمامی بخش‌های مختلف با جزئیات را برای محققان فراهم آورده است [۲۱]. در این بخش به اختصار به معادلات حاکم بر سیستم‌های اصلی شامل پیل سوختی، موتور الکتریکی و باتری پرداخته شده است و از شرح کامل مدلسازی صرف نظر شده است.

۳-۱- مدلسازی حرکتی اتوبوس

برای محاسبه توان مورد نیاز برای حرکت اتوبوس لازم است که در ابتدا تحلیل دینامیکی خودرو در راستای طولی انجام شود به این صورت که تمامی نیروهای وارد شده به خودرو طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$F_t = F_a + F_w + F_r + F_g \quad (1)$$

در این معادله نیروی موتور بر اساس نیروی شتابی (F_a)، نیروی مقاومت هوا (F_w)، نیروی اصطکاکی چرخ‌ها (F_r) و در نهایت نیروی جاذبه (F_g) محاسبه می‌شود. مقادیر هر یک از این نیروها در مراجع به تفصیل قید شده است [۲۲].

پس از محاسبه نیروی لازم برای حرکت اتوبوس، مقادیر توان موتور از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

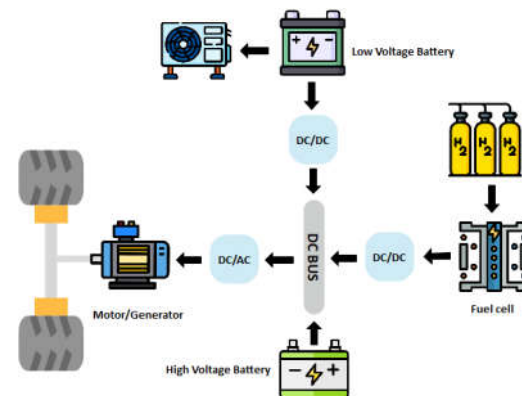
$$P_m = \frac{v_{(t)} \times F_t}{\eta} = P_{fc} + P_b \quad (2)$$

مدیریتی بر پایه قانون استفاده شده است تا انرژی میان منابع اصلی شامل پیل سوختی و باتری توزیع شود. در نهایت برای ارائه‌ی یک پژوهش جامع، چرخه حیات اتوبوس هیدروژن با در نظر گرفتن روش‌های مختلف تولید هیدروژن بررسی شده است که جزو نوآوری‌های این مقاله محسوب می‌شود. بطور کلی خلاصه‌ترین نوآوری‌ها و اهداف این پژوهش در ادامه خلاصه شده است:

- مدلسازی دینامیکی یک اتوبوس شهری با در نظر گرفتن تمامی زیرسیستم‌های اصلی.
- بررسی عملکرد اتوبوس تحت شرایط چرخه رانندگی واقعی.
- تخمین همزمان تخریب باتری و پیل سوختی و همچنین تأثیر آن بر طول عمر و مصرف سوخت اتوبوس در زمان عملکرد.
- کنترل دمای پیل سوختی در محدوده مناسب به منظور کاهش تخریب و ایمنی سرنشینان.
- بررسی چرخه حیات اتوبوس با در نظر گرفتن منابع تولید هیدروژن مختلف و مقایسه آن‌ها.

۲- توصیف سیستم

در این بخش به اختصار به توصیف اتوبوس هیدروژنی مدلسازی شده و بخش‌های اصلی آن پرداخته خواهد شد. به منظور افزایش طول بازه مسافتی و ارتقا طول عمر پیل سوختی، از باتری به عنوان دومین منبع انرژی در این اتوبوس بهره گرفته شده است. شکل ۱ سیستم تولید توان این اتوبوس را نشان می‌دهد.



شکل ۱- سیستم تولید توان اتوبوس هیدروژنی.

هنگام حرکت اتوبوس توان مورد نیاز موتور، توسط پیل سوختی و باتری ولتاژ بالا و طبق یک استراتژی مدیریتی بر مبنای قانون تأمین می‌شود. باتری ولتاژ پایین به منظور تأمین انرژی مورد نیاز سیستم‌های جانبی اتوبوس مورد استفاده قرار گرفته است. در این نوع از سیستم تولید توان، پیل سوختی و باتری ولتاژ پایین بصورت غیر مستقیم و با اینورتر DC/DC به پایانه اصلی، و باتری ولتاژ بالا بصورت مستقیم به آن متصل می‌شود. در این اتوبوس از یک موتور/ژنراتور استفاده شده است که در زمان ترمزگیری در حالت ژنراتور عمل کرده و انرژی جنبشی بازیابی شده را برای شارژ باتری استفاده می‌نماید. با هدف کنترل دمای پیل سوختی از یک سیستم خنک‌کننده بر پایه

$$\Delta V_{Deg} = \lambda_1 n_{start-stop} + \lambda_2 t_{High-load} + \lambda_3 t_{Low-load} + \lambda_4 \frac{\Delta P}{\Delta P_{max}} \quad (8)$$

در این رابطه به ترتیب بخش‌های ذکر شده شامل افت ولتاژ ناشی از خاموش و روشن شدن پیل سوختی، عملکرد در بار بالا ($0.18P_{max}$)، عملکرد در بار پایین ($0.2P_{max}$) و نوسانات بار خروجی می‌باشد. مقادیر ثوابت قید شده بر اساس خروجی داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد [۱۷].

۳-۴- باتری

به منظور افزایش بازه حرکتی اتویوس و کاهش تخریب پیل-سوختی از باتری بعنوان منبع ثانویه تأمین انرژی بهره گرفته شده است. در این مطالعه برای مدل‌سازی باتری از روش مدار معادل چند مرتبه‌ای استفاده شده است که در واقع شامل مدل‌سازی افت پتانسیل-های مختلف در غالب مقاومت معادل در مدار باتری می‌باشد [۳۲]. در این روش برای محاسبه پتانسیل باتری از رابطه (۹) استفاده می‌شود.

$$\frac{dU}{dt} = \frac{U_{OCV} - \Delta U_{Loss}^{total} - U}{\tau_U} \quad (9)$$

طبق این رابطه U پتانسیل باتری U_{OCV} ولتاژ مدار باز U_{Loss} افت پتانسیل ناشی از مقاومت‌های تعریف شده و τ_U ثابت زمانی فیلترینگ باتری می‌باشد.

همچنین برای محاسبه سطح شارژ باتری (SOC) بر اساس رابطه (۱۰) از نسبت جریان باتری (I) به ظرفیت کلی آن (Q) در هر لحظه استفاده شده است [۳۳].

$$\frac{dSOC}{dt} = 100 \frac{I}{Q} \quad (10)$$

به منظور مدل‌سازی باتری، میزان مقاومت داخلی باتری و ولتاژ مدار باز بر حسب SOC از نمودارهای مربوط به ویژگی‌های آن در نرم‌افزار استخراج شده است. قابل ذکر است که در این پژوهش از باتری لیتیوم یون استفاده شده است.

ظرفیت باتری با گذشت زمان به علت عوامل مختلفی کاهش می‌یابد که در این مطالعه این عوامل به دو بخش تخریب تقویمی و تخریب چرخه‌ای تقسیم شده است. تخریب تقویمی در واقع به علت واکنش شیمیایی بین الکترودها و الکترولیت رخ می‌دهد که وابسته به دما و پتانسیل باتری می‌باشد. از سوی دیگر تخریب چرخه‌ای به علت فرآیند شارژ و دشارژ متناوب در باتری ایجاد می‌شود و در نهایت تخریب کلی از مجموع دو عامل ذکر شده و وابسته به زمان تخمین زده می‌شود [۳۴].

$$A_{Total} = A_{Cycl} + A_{Cat} \quad (11)$$

$$SOH = 1 - A_{Total} \quad (12)$$

در معادله (۱۲) پارامتر SOH سطح سلامت باتری را تعیین می‌نماید. تمامی روابط و ثوابت مورد نیاز برای محاسبه معادلات ذکر شده در مراجع قید شده است [۳۵ و ۳۶].

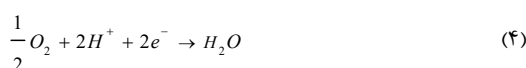
در این رابطه بازده از حاصل ضرب بازده اینورتر، کانورتر و متور بدست آمده است. قابل ذکر است که این مقادیر با بهره‌گیری از دو منبع اصلی تولید انرژی در اتوبوس که پیل سوختی و باتری می‌باشد تأمین می‌شود.

۳-۲- پیل سوختی

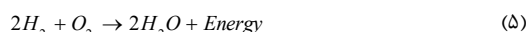
پیل سوختی $PEMFC$ اصلی‌ترین بخش در تأمین توان خودرو هیدروژنی است که به دلیل چگالی انرژی بالا و دمای عملکردی پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۳ و ۲۴]. در یک پیل سوختی سوخت ورودی در طی یک واکنش شیمیایی با هوا بصورت مستقیم به الکتریسیته تبدیل می‌شود. هر پیل سوختی دارای سه بخش اصلی کاتد، آند و لایه غشائی است که در لایه آند هیدروژن وارد سیستم شده و طبق رابطه زیر واکنش صورت می‌گیرد [۲۵].



همچنین در سمت کاتد هوای ورودی طبق معادله (۲) با هیدروژن وارد واکنش می‌شود [۲۶ و ۲۷].



در نهایت واکنش کلی را می‌توان با معادله (۳) نمایش داد:



برای محاسبه مقدار توان خروجی پیل سوختی ابتدا ولتاژ خروجی هر سلول محاسبه می‌شود که شامل کسر افت پتانسیل‌های ناشی از غلظت، تلفات اهمی و فعال‌سازی از مقدار پتانسیل ایده‌آل که ولتاژ نرنست نامیده می‌شود، می‌باشد [۲۸ و ۲۹].

$$E_{cell} = E_N - \eta_a - \eta_r - \eta_c \quad (6)$$

توان خروجی را می‌توان بر اساس رابطه (۷) محاسبه نمود. قابل ذکر است نحوه محاسبه افت پتانسیل‌های ذکر شده به تفصیل در مراجع قید شده است [۳۰].

$$P_{Stack} = E_{Cell} \times N_{Cell} \times I_{Cell} \quad (7)$$

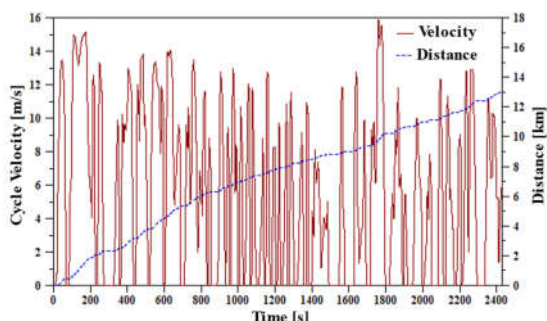
روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی پیل سوختی وجود دارد که استفاده از معادلات برازش شده، معادلات ولتاژ و منحنی ولتاژ-جریان پیل سوختی از جمله این روش‌ها بشمار می‌آید. در این پژوهش از محاسبه مستقیم ولتاژ بر اساس روابط حاکم استفاده شده است و همچنین برخی از اطلاعات مانند افت ولتاژ فعال‌سازی از نمودار ولتاژ برحسب جریان پیل سوختی استخراج شده است.

همانطور که پیشتر به آن اشاره شد در نظر گرفتن تخریب پیل-سوختی در خودرو هیدروژنی اهمیت فراوانی دارد بنابراین تخمین این مقدار برای بررسی دقیق عملکرد سیستم امری ضروری به شمار می‌آید. در این مطالعه مقدار افت ولتاژ بر اساس رابطه میان شرایط عملکردی و تأثیر آن بر تخریب و طبق رابطه (۸) محاسبه شده است [۳۱].

¹ Proton exchange membrane fuel cell

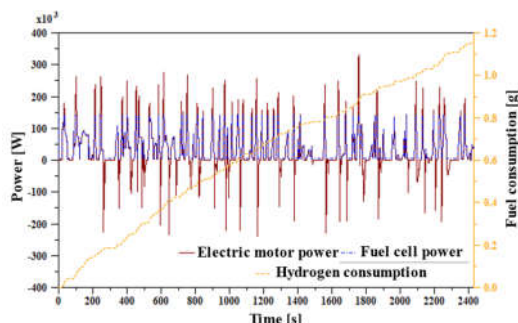
² Nernst voltage

مدلسازی دینامیکی اتوبوس می‌باشد که قادر بوده است سرعت خروجی را منطبق بر چرخه رانندگی و با خطای نزدیک به صفر نماید. اتوبوس مورد بررسی با میانگین سرعت ۶/۲۲ متر بر ثانیه در مدت زمان ۲۴۳۰ ثانیه مسافتی در حدود ۱۳/۳ کیلومتر را طی نموده است.



شکل ۳- چرخه رانندگی و مسافت طی شده.

شکل ۲ مقدار توان مورد نیاز موتور را در زمان حرکت و همچنین میزانی از این توان که توسط پیل سوختی تأمین می‌شود را نشان می‌دهد.



شکل ۴- توان مصرفی موتور، توان تولیدی پیل سوختی و مقادیر هیدروژن مصرفی.

مقادیر منفی نشان دهنده عملکرد موتور در حالت ژنراتور و تولید توان از طریق سیستم ترمز گیری می‌باشد. قابل ذکر است که اختلاف میان توان مصرفی موتور و توان تولیدی پیل سوختی توسط باتری تأمین شده است. اتوبوس مورد بررسی پس از گذشت یک چرخه رانندگی ۱/۱۵۸ کیلوگرم هیدروژن مصرف کرده است.

شکل ۵ میزان سطح انرژی و سطح شارژ باتری ولتاژ بالا را در زمان عملکرد اتوبوس نشان داده است.

۳-۵- موتور الکتریکی

موتور الکتریکی مسؤل تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی و در نتیجه تأمین گشتاور مورد نیاز برای حرکت خودرو می‌باشد. این درحالی است که در زمان ترمزگیری موتور الکتریکی در غالب ژنراتور عمل کرده و با دریافت انرژی مکانیکی ناشی از تلافات جنبشی، انرژی الکتریکی تولید کرده و باتری را شارژ می‌نماید. با تعریف میزان گشتاور مورد نیاز (T_{req}) گشتاور موتور بر اساس رابطه (۱۳) و با استفاده از معادله تأخیر مرتبه اول محاسبه شده است [۳۶].

$$T_M = \frac{1}{1 + \tau_r s} T_{req} \quad (13)$$

پس از محاسبه گشتاور مورد نیاز و باتوجه به سرعت دورانی موتور میزان توان محاسبه می‌شود. نکته قابل توجه این است بر اساس بازده موتور بخشی از این توان تلف می‌شود که باید در محاسبه توان کلی لحاظ گردد [۱۱].

$$P_{elec} = T_M \omega + P_{Loss} \quad (14)$$

$$P_{Loss} = (1 - \eta) |T_M| \quad (15)$$

مهمترین پارامترهای طراحی اتوبوس مدلسازی شده در جدول ۱ خلاصه شده است [۳۷-۳۹]

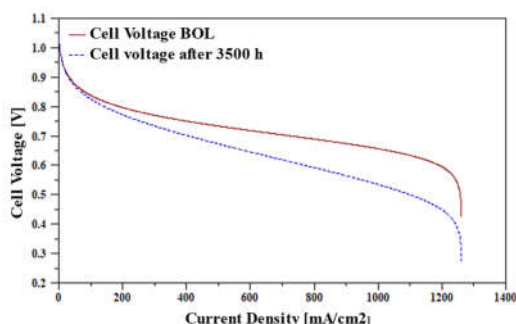
جدول ۱- مشخصات طراحی اتوبوس هیدروژنی

پارامتر	مقدار
مشخصات کلی	
ابعاد [m]	۱۲/۲×۵/۳×۵۹/۳۵
وزن [kg]	۱۲۴۵۰
ظرفیت مسافری [-]	۴۰
پیل سوختی	
حداکثر توان [kW]	۱۴۰
تعداد سلول ها [-]	۳۰۹
باتری	
ظرفیت [kWh]	۱۰
تعداد سلول ها [-]	۵×۱۵۳
موتور	
حداکثر گشتاور [N.m]	۹۷۵
حداکثر سرعت [rpm]	۶۰۰۰
حداکثر بازده [%]	۹۷/۶

۴- نتایج

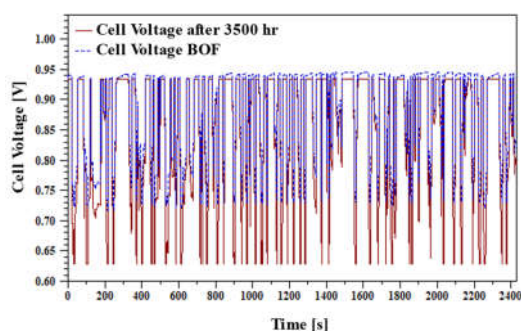
۴-۱- تفسیر نتایج و نمودارها

در این بخش به بررسی مهمترین خروجی های مدلسازی و تحلیل آن ها پرداخته می شود. شکل ۳ چرخه رانندگی استفاده شده در این مطالعه را نشان می‌دهد که مربوط به شرایط رانندگی واقعی برای اتوبوس در کشور چین می‌باشد [۴۰]. نتایج روشن کننده صحت



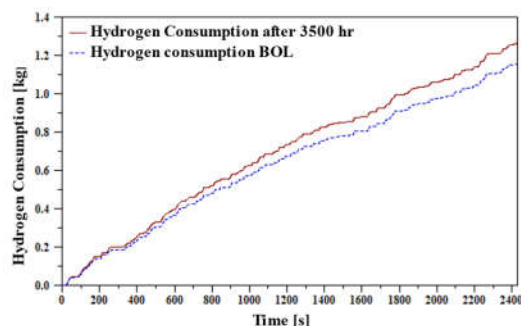
شکل ۷- تغییرات ولتاژ با جریان برای پیل سوختی.

به منظور بررسی بیشتر نمودار افت ولتاژ خروجی در شکل ۸ نمایش داده شده است. با توجه به این نمودار در جریان های بالا ولتاژ خروجی تا مقادیر 0.63 ولت کاهش یافته است که سبب افزایش مصرف هیدروژن برای تأمین توان مورد نیاز موتور می شود.



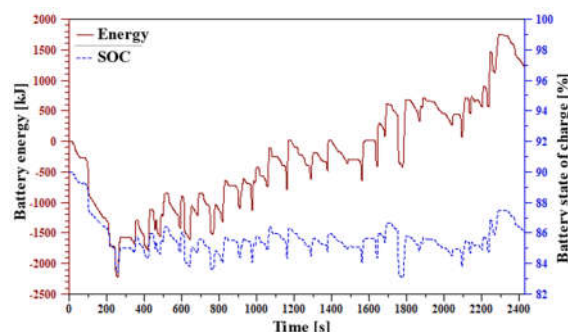
شکل ۸- ولتاژ خروجی پیل سوختی در طول چرخه رانندگی.

میزان افزایش مصرف هیدروژن نیز در شکل ۹ نشان داده است. استفاده از پیل سوختی پس از 3500 ساعت سبب شده است که برای چرخه رانندگی مدنظر میزان مصرف هیدروژن از مقادیر $1/15$ به $1/26$ افزایش یابد.



شکل ۹- مصرف هیدروژن در طول یک چرخه رانندگی.

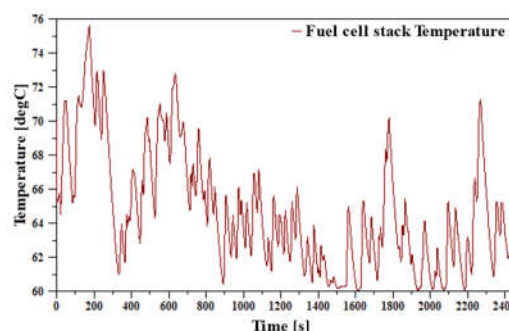
افت ولتاژ ناشی از هر یک از عوامل تخریب، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این مقادیر مربوط به افت ولتاژ در طول یک چرخه رانندگی و با در نظر گرفتن یکبار خاموش و روشن شدن پیل سوختی می باشد. با بررسی نمودار می توان نتیجه گرفت که به ترتیب دفعات خاموش و روشن شدن و همچنین تغییرات بار پیل سوختی از



شکل ۵- تغییرات سطح انرژی و شارژ باتری ولتاژ بالا با زمان.

در ابتدای حرکت باتری در حالت تخلیه قرار دارد بنابراین مقادیر انرژی منفی و نشان دهنده انرژی خروجی از باتری برای تأمین مقادیر مورد نیاز می باشد به همین منوال سطح شارژ باتری نیز کاهش یافته و این روند تا زمانی که موتور در حالت ژنراتور قرارگیرد و یا باتری به حداقل سطح شارژ یعنی 60% برسد ادامه می یابد. در این مدلسازی سطح اولیه شارژ باتری 90% در نظر گرفته شده است.

از دیگر پارامترهای مهم در عملکرد اتوبوس هیدروژنی دمای پیل سوختی می باشد که باید در بازه مناسب کنترل شود. دمای ایده آل برای پیل سوختی بین 60 تا 80 درجه سلسیوس است و تغییرات دما نیز باید در بازه 10 درجه قرار داشته باشد. شکل ۶ نمودار تغییرات دما در طول یک چرخه رانندگی را نشان داده است.

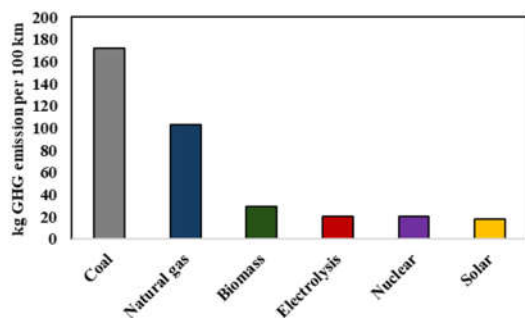


شکل ۶- تغییرات دمای پیل سوختی.

بر اساس این نمودار سیستم خنک کاری طراحی شده دمای پیل سوختی را در بازه 60 تا 76 درجه به تغییرات دمای کمتر از 10 درجه کنترل نموده است.

همانطور که پیشتر به آن اشاره شد، تخریب پیل سوختی که منجر به کاهش ولتاژ خروجی آن می شود تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سیستم داشته و بنابراین در نظر گرفتن آن اهمیت بسیاری دارد. شکل ۷ نمودار ولتاژ بر حسب جریان را در دو حالت ابتدای زندگی و پس از 3500 ساعت عملکرد نشان داده است. افت پتانسیل در این مطالعه بر اساس شرایط رانندگی مدلسازی شده است و بر اساس آن ولتاژ خروجی پیل سوختی برای جریان 700 mA/cm^2 از مقادیر 0.7 به 0.62 ولت افت داشته است. تاثیر افت ولتاژ در جریان های پایین ناچیز است.

مسافت ۱۰۰ کیلومتر برای شش روش مختلف تولید هیدروژن نشان می‌دهد. قابل انتظار است که تولید هیدروژن از طریق ذغال سنگ بیشترین مقدار آلاینده‌گی در حدود ۱۷۳ کیلوگرم به ازای ۱۰۰ کیلومتر را داشته است و به دنبال آن استفاده از گاز طبیعی با مقادیر ۱۰۲ کیلوگرم تولید آلاینده‌گی در جایگاه دوم قرار دارد. این در حالی است که استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی تنها در حدود ۱۴ کیلوگرم آلاینده‌گی را به دنبال داشته است. قابل ذکر است که مقادیر ذکر شده در این نمودار مربوط به چرخه حیات کامل اتوبوس از چاه تا چرخ^۱ است که شامل فرآیندهای تولید بخش‌های مختلف مانند باتری و همچنین حمل و نقل سوخت نیز بوده است. در نتیجه استفاده از منبع تولید هیدروژن و انتخاب فناوری تولید آن تأثیر قابل توجهی در میزان آلاینده‌گی داشته است که عدم توجه به آن هدف اصلی که کاهش تخریب محیط زیست می‌باشد را با چالش روبرو می‌کند.



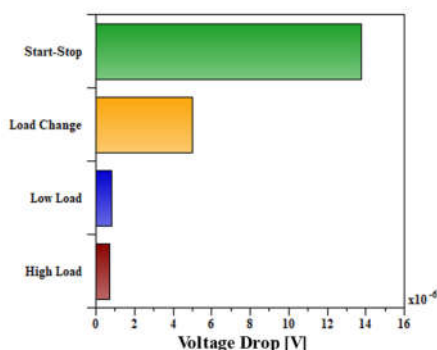
شکل ۱۲- میزان آلاینده‌گی اتوبوس هیدروژنی در طول چرخه حیات برای منابع مختلف تولید هیدروژن.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به مدلسازی دینامیکی یک اتوبوس هیدروژنی در شرایط چرخه رانندگی واقعی پرداخته شده است. به منظور افزایش بازه حرکتی اتوبوس، علاوه بر پیل سوختی، از باتری نیز بعنوان سیستم تأمین انرژی بهره گرفته شده است. با هدف افزایش دقت مدلسازی و امکان مدلسازی زیرسیستم‌های مختلف با جزئیات، نرم‌افزار Amesim انتخاب شده و شرایط رانندگی اتوبوس هیدروژنی در کشور چین به منظور ارزیابی عملکرد سیستم اعمال شده است. این مطالعه برخلاف مطالعات پیشین، تأثیر همزمان تخریب پیل سوختی و باتری را بر عملکرد سیستم بررسی نموده است همچنین با استفاده از سیستم خنک‌کاری دمای پیل سوختی در محدوده ایمنی کنترل شده است. در ادامه به صورت خلاصه به ذکر مهمترین نتایج حاصل از این مطالعه پرداخته شده است:

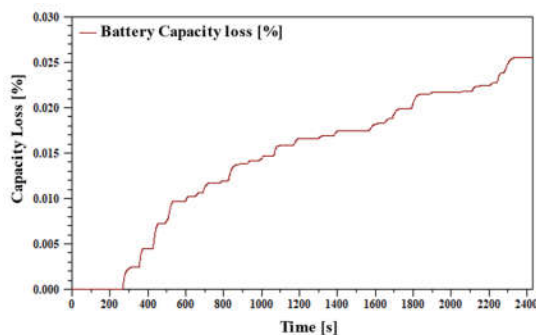
- اتوبوس هیدروژنی مدلسازی شده با میانگین سرعت ۶/۶ متر بر ثانیه و طی مسافت ۱۳/۳ کیلومتر، ۱/۱۵۸ کیلوگرم هیدروژن مصرف نموده است.

تأثیرگذارترین عوامل تخریب بوده اند بصورتی که به ترتیب میزان ۱۳/۸، ۵، ۰/۸ و ۰/۶۸ میکرو ولت در زمان خاموش و روشن، تغییرات بار، کارکرد با بار پایین و کارکرد با بار بالا تخریب شده است.



شکل ۱۰- سهم هر عامل در میزان تخریب پیل سوختی در طی یک چرخه رانندگی.

از دیگر مهمترین چالش‌های پیشرو افت ظرفیت باتری در طول عملکرد خودرو می‌باشد. شکل ۱۱ درصد افت ظرفیت باتری را در طول یک چرخه رانندگی نشان داده است. در طول عملکرد اتوبوس به علت شارژ و دشارژ شدن باتری و همچنین تخریب طبیعی سیستم در طول زمان، میزان ظرفیت آن به اندازه ۰/۰۲۵٪ کاهش یافته است. قابل توجه است که این میزان در طی مسافت ۱۳ کیلومتر و تنها یک چرخه رانندگی بوده است.



شکل ۱۱- درصد افت ظرفیت باتری در طول یک چرخه رانندگی.

بعنوان چالشی قابل تأمل، علیرغم ادعاهای مربوط به بی آلاینده بودن استفاده از خودروهای هیدروژنی، مسأله مهم نحوه تولید هیدروژن می‌باشد که بصورت مستقیم می‌تواند در مقادیر تولید گازهای گلخانه‌ای مؤثر باشد. از سوی دیگر همچنان مسأله استخراج مواد اولیه و بازیافت باتری‌ها نیز جزو عوامل ایجاد آلودگی به شمار می‌آید. شکل ۱۲ نتایج حاصل از بررسی چرخه‌ی حیات اتوبوس مورد بررسی را نشان داده است. این مقادیر با استفاده از نرم‌افزار GREET که ابزاری شناخته شده برای تحلیل چرخه حیات می‌باشد، استخراج شده است. داده‌های حاصله با در نظر گرفتن فرآیند تولید هیدروژن، انتقال آن و سوخت گیری گزارش شده است. که میزان تولید گازهای گلخانه‌ای در طی

¹ Well to wheel

- دمای پیل سوختی با استفاده از یک سیستم خنک‌کاری بر پایه اتیلن گلیکول و آب به بازه ۶۰ تا ۷۰ °C محدود شده است
- به منظور افزایش طول عمر باتری و همچنین افزایش محدوده حرکتی اتوبوس، سطح شارژ باتری در طول عملکرد بین ۸۲٪ تا ۸۸٪ کنترل شده‌است.
- استفاده از سیستم مدیریت انرژی بر مبنای قانون به خوبی توانسته است با ایجاد توازن میان انرژی تولیدی از پیل سوختی و باتری، توان مورد نیاز اتوبوس را در طول چرخه رانندگی تأمین کند.
- تخریب پیل سوختی سبب شده است که مصرف هیدروژن پس از ۳۵۰۰ ساعت عملکرد به میزان ۹/۵٪ افزایش یابد که از این میزان بیشترین سهم به علت فرایند خاموش و روشن شدن پیل سوختی بوده است.
- به ترتیب خاموش و روشن شدن سیستم پیل سوختی، نوسانات بار، عملکرد با بار پایین و عملکرد در بار بالا سبب افت ولتاژ پیل سوختی شده‌اند.
- ظرفیت باتری در یک چرخه رانندگی به دلیل تلافات چرخه‌ای و تقویمی در حدود ۰/۰۲۵٪ کاهش داشته است.
- بررسی چرخه‌ی حیات اتوبوس نشان داده است که استفاده از منبع ذغال سنگ و گاز طبیعی به ترتیب باعث تولید ۱۷۳ کیلوگرم و ۱۰۲ کیلوگرم گاز گلخانه‌ای در ۱۰۰ کیلومتر می‌شود که این مقدار در مقایسه با انرژی‌های تجدیدپذیر که در حدود ۱۴ کیلوگرم بوده است مقداری قابل توجه به شمار می‌آید.
- تولید هیدروژن با استفاده از انرژی خورشیدی و یا بکارگیری روش الکترولیز با حداقل تولید آلاینده‌گی، بهترین روش‌ها برای کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای در هنگام بکارگیری اتوبوس هیدروژنی می‌باشند.

۶- مراجع

- [۱] عبدالعلی پورعدل م، رستمی م، خلیل آریا ش، یاری م. تحلیل انرژی و انرژی یک سیستم بر مبنای انرژی زمین‌گرمایی برای تولید همزمان توان، آب شیرین، گرمایش و هیدروژن. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۲۰۲۱، د. ۵۱، ش. ۴، ص ۴۴-۱۳۵.
- [۲] عبدالعلی پورعدل م، رستمی م، محمدخانی ف، خلیل آریا ش. تحلیل ترمودینامیکی یک سیستم تولید همزمان بر مبنای توربین گازی با سوخت بیوگاز برای تولید توان، آب شیرین، گرمایش و هیدروژن. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۲۰۲۲، د. ۵۱، ش. ۴، ص ۱۷-۲۰۹.
- [3] Ahmadi P, Kjeang E. Comparative life cycle assessment of hydrogen fuel cell passenger vehicles in different Canadian provinces. *International journal of hydrogen energy*. 2015;40(38):12905-17
- [4] Mosammam ZM, Ahmadi P, Houshfar E. Multi-objective optimization-driven machine learning for charging and V2G pattern for plug-in hybrid vehicles: Balancing battery aging and power management. *Journal of Power Sources*. 2024;608:234639
- [۵] محبی ح، قندهارون س، اثمري ش. ارزیابی چرخه‌حیات سیستم حصر مستقیم کربن دی‌اکسید با فرایند فیشر-تروپش برای تولید سوخت حمل و نقل تحت سه سناریو تولید برق. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۲۰۲۳، د. ۵۲، ش. ۴، ص ۵۶-۳۴۷.
- [۶] یاری م، غایبی ه، قوامی گرگری س. تحلیل انرژی و انرژی سیستم نوین ریفرمینگ بخار آب بیوگاز خورشیدی برای تولید هیدروژن. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۲۰۱۹، د. ۴۸، ش. ۴، ص ۲۸-۳۱۹.
- [۷] غائبی ه، یاری م، قوامی س. شبیه سازی یک سیستم نوین تولید یکپارچه هیدروژن و توان با تلفیق چرخه ORC و سیستم ریفرمینگ بخار آب زیست گاز خورشیدی. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۲۰۱۹، د. ۴۹، ش. ۲، ص ۹۸-۱۸۹.
- [8] Lohse-Busch H, Stutenberg K, Duoba M, Liu X, Elgowainy A, Wang M, et al. Automotive fuel cell stack and system efficiency and fuel consumption based on vehicle testing on a chassis dynamometer at minus 18 C to positive 35 C temperatures. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(1):861-72
- [9] Alemohammad S, Ahmadi P. Investigation of modeling challenges of PEM fuel cells cold start operation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;52:1192-212
- [10] Teimouri A, Kabeh KZ, Changizian S, Ahmadi P, Mortazavi M. Comparative lifecycle assessment of hydrogen fuel cell, electric, CNG, and gasoline-powered vehicles under real driving conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022;47(89):37990-8002
- [11] Changizian S, Ahmadi P, Raeesi M, Javani N. Performance optimization of hybrid hydrogen fuel cell-electric vehicles in real driving cycles. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(60):35180-97
- [12] Mesdaghi A, Mollajafari M. Improve performance and energy efficiency of plug-in fuel cell vehicles using connected cars with V2V communication. *Energy Conversion and Management*. 2024;306
- [13] Ma Y, Hu F, Hu Y. Energy efficiency improvement of intelligent fuel cell/battery hybrid vehicles through an integrated management strategy. *Energy*. 2023;263:125794
- [14] Zhou P, Gao S, Wang B, Wang Y, Li C, Wang Y, Sun B. Influence of hydrogen fuel cell temperature safety on bus driving characteristics and stack heating mode. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;48(30):11541-54
- [15] Zhao J, Li X. A review of polymer electrolyte membrane fuel cell durability for vehicular applications: Degradation modes and experimental techniques. *Energy Conversion and Management*. 2019;199:112022.
- [16] Whiteley M, Dunnett S, Jackson L. Simulation of polymer electrolyte membrane fuel cell degradation using an integrated Petri Net and OD model. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020;196:106741
- [17] Pei P, Chang Q, Tang T. A quick evaluating method for automotive fuel cell lifetime. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2008;33(14):3829-36.
- [18] Raeesi M, Changizian S, Ahmadi P, Khoshnevisan A. Performance analysis of a degraded PEM fuel cell stack for hydrogen passenger vehicles based on machine learning algorithms in real driving conditions. *Energy Conversion and Management*. 2021;248:114793
- [19] Ahmadi P, Khoshnevisan A. Dynamic simulation and lifecycle assessment of hydrogen fuel cell electric vehicles considering various hydrogen production methods. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022;47(62):26758-69
- [20] Mansour S, Raeesi M. Performance assessment of fuel cell and electric vehicles taking into account the fuel cell degradation, battery lifetime, and heating, ventilation, and air conditioning system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;52:834-55
- [21] Software SDI. Simcenter Amesim | Systems Simulation Software [Available from: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/systems-simulation/amesim/>]

- [39] Santarelli MG, Torchio MF. Experimental analysis of the effects of the operating variables on the performance of a single PEMFC. *Energy conversion and management*. 2007;48(1):40-51
- [40] Jia C, He H, Zhou J, Li J, Wei Z, Li K. Learning-based model predictive energy management for fuel cell hybrid electric bus with health-aware control. *Applied Energy*. 2024;355:122228
- [22] Tang T, Peng Q, Shi Q, Peng Q, Zhao J, Chen C, Wang G. Energy management of fuel cell hybrid electric bus in mountainous regions: A deep reinforcement learning approach considering terrain characteristics. *Energy*. 2024;311
- [۲۳] رستمی م، دهقان منشادی م. تحلیل ترمودینامیکی یک سیستم تولید توان پیل سوختی غشایی تبادل پروتونی در یک هواپیمای بدون سرنشین. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۲۰۲۲، ۵۲، ش. ۱، ص ۴۱-۵۰.
- [۲۴] خداپرست ش، زارع و، محمدخانی ف. تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی یک پیکربندی نوین مایع‌سازی هیدروژن بر مبنای انرژی زمین‌گرمایی دما پایین. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۲۰۲۳، ۵۳، ش. ۱، ص ۲۰-۱۱۱.
- [۲۵] عبدالعلی پورعدل م. بررسی قانون اول و دوم یک سیستم جدید جهت تولید توان، گرمایش، هیدروژن با استفاده از سیستم پیل سوختی پلیمری. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۲۰۲۴، ۵۴، ش. ۲، ص ۹۹-۱۰۸.
- [26] Zhang C, Zhang Y, Wang L, Deng X, Liu Y, Zhang J. A health management review of proton exchange membrane fuel cell for electric vehicles: Failure mechanisms, diagnosis techniques and mitigation measures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023;182:113369
- [۲۷] صابری مهر ع، فرهنگ مهر و. تحلیل ترمودینامیکی سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد-توربین گاز تغذیه شده با متانول و با بهره‌گیری از سیستم خورشیدی. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۲۰۲۲، ۵۲، ش. ۲، ص ۶۹-۷۸.
- [28] Shojaeefard MH, Mollajafari M, Pische NE, Mousavi SM. Plug-in fuel cell vehicle performance and battery sizing optimization based on reduced fuel cell energy consumption and waste heat. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2023;56:103099
- [۲۹] صابری مهر ع، حیدری ب. پیشنهاد یک سیستم تولید سه گانه بر پایه سیستم پیل سوختی اکسید جامد با سوخت گاز طبیعی مایع شده ترکیب شده با توربین گازی هوا مرطوب برای کاربرد ایستگاه های ماهواره ای. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۲۰۲۱، ۵۱، ش. ۳، ص ۸۹-۹۸.
- [30] Li L, Gao S, Wang B, Li C, Wang Y, Sun B, Wang Y. Analysis of cooling and heating characteristics of thermal management system for fuel cell bus. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;48(30):11442 ۵۴-
- [31] Jia C, Zhou J, He H, Li J, Wei Z, Li K, Shi M. A novel energy management strategy for hybrid electric bus with fuel cell health and battery thermal-and health-constrained awareness. *Energy*. 2023;271:127105
- [32] Di Domenico D, Prada E, Creff Y. An adaptive strategy for Li-ion battery SOC estimation. *IFAC Proceedings Volumes*. 2011;44(1):9721-6
- [33] Hu X, Zheng Y, Howey DA, Perez H, Foley A, Pecht M. Battery warm-up methodologies at subzero temperatures for automotive applications: Recent advances and perspectives. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2020;77:100806
- [34] Wohlfahrt-Mehrens M, Vogler C, Garche J. Aging mechanisms of lithium cathode materials. *Journal of power sources*. 2004;127(1-2):58-64
- [35] Guenther C, Schott B, Hennings W, Waldowski P, Danzer MA. Model-based investigation of electric vehicle battery aging by means of vehicle-to-grid scenario simulations. *Journal of Power Sources*. 2013;239:604-10
- [36] Mousavi SB, Ahmadi P, Raeesi M. Performance evaluation of a hybrid hydrogen fuel cell/battery bus with fuel cell degradation and battery aging. *Renewable Energy*. 2024;227:120456
- [37] Mousavi SB, Ahmadi P, Raeesi M. Performance evaluation of a hybrid hydrogen fuel cell/battery bus with fuel cell degradation and battery aging. *Renewable Energy*. 2024;227
- [38] Qu Y, Li D, Wang R. Study on integrated thermal management system of hydrogen fuel cell vehicles based on heat pump air conditioning. *Journal of Cleaner Production*. 2024 Jan;434:139951