

مطالعه و مقایسه رویکردهای مدلسازی سیستم‌های پیل سوختی پلیمری در خودرو

شریف قریب^۱، حسن حسن‌زاده^۲، رامیار مازوجی^۳

۱ کارشناس ارشد، دفتر مهندسی و نظارت ناوگان، راه آهن جمهوری اسلامی ایران، تهران، gharib_sh@rai.ir

۲ استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه بیرجند، بیرجند

۳ کارشناس ارشد، اداره کل راه آهن آذربایجان، راه آهن جمهوری اسلامی ایران، تبریز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۰۶

چکیده

مدلسازی نقش مهمی در توسعه پیل سوختی و شناخت پارامترهای مؤثر بر عملکرد سیستم‌های پیل سوختی به کار رفته در خودرو دارد. قبل از انتخاب یک مدل پیل سوختی، آشنایی با خصوصیات کلی سیستم و احتیاجات آن ضروری است و این نخستین شرط در مدلسازی می‌باشد. مدل‌ها را از لحاظ دیدگاه می‌توان به صورت تجربی، نیمه تجربی، نظری و از لحاظ حالت به صورت استاتیکی و دینامیکی تقسیم‌بندی کرد. هدف این مقاله بررسی و مقایسه دو نوع مدلسازی استاتیکی و دینامیکی صورت گرفته روی یک سیستم پیل سوختی پلیمری برای کاربرد در خودرو می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که پاسخ سیستم به تغییرات جریان الکتریکی در حالت دینامیکی نسبت به حالت استاتیکی با تأخیر زمانی همراه است و هرچه مقدار جریان الکتریکی بیشتر باشد، دمای بدنه پیل سوختی، میزان مصرف واکنش‌گرها و گازهای ورودی به کانال‌های آند و کاتد افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: سیستم پیل سوختی پلیمری، مدلسازی استاتیکی، مدلسازی دینامیکی، خودرو، پاسخ سیستم

۱. مقدمه

آینده می‌تواند جایگزین مناسبی برای ادوات نقلیه امروزی باشند. پیل سوختی یک مبدل مستقیم انرژی است که انرژی سوخت و اکسیدکننده را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. بالابودن بازده، دمای کارکردی کم (مورد استفاده به عنوان محرک خودرو) و تشکیل نشدن آلاینده‌هایی چون اکسیدهای گوگرد^۲ و نیتروژن^۳، ارتعاشات و سروصدای کم، وابستگی کم بازده به اندازه سیستم و تنوع منابع سوختی (تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر) از جمله دلالتی است که پیل سوختی را به عنوان یکی از گزینه‌های مناسب برای جایگزینی موتورهای

توسعه وسائل نقلیه بر پایه موتورهای احتراق داخلی^۱، خصوصاً خودروها، از جمله دستاوردهای بزرگ دانش و فناوری بشری است. همین امر نیز بروز مشکلات جدی برای محیط زیست و زندگی بشر را در پی داشته است. آلودگی هوا، گرمایش زمین و محدودبودن منابع سوخت‌های فسیلی از عمده‌ترین این مشکلات‌اند. در دهه‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در مورد وسائل نقلیه با سوخت پاک و بازده بالا و ایمن صورت گرفته است که از جمله آنها می‌توان به وسائل نقلیه الکتریکی، هیبریدی الکتریکی و پیل سوختی اشاره کرد. این وسائل در

احتراق داخلی مطرح کرده است که می‌تواند راه‌حل مناسبی برای کاهش مشکلات انرژی و مشکلات زیست محیطی ناشی از مصرف مستقیم سوخت‌های فسیلی در آینده باشد. در حال حاضر، این مبدل انرژی به‌طور گسترده‌ای در سراسر جهان در حال مطالعه و بررسی است تا بتواند از جنبه‌های مختلف اعم از قیمت، تأمین سوخت، پایداری و ایمنی با موتورهای احتراقی قابل رقابت باشد. در جدول ۱ میزان تولید آلاینده‌ها توسط موتورهای احتراقی و پیل‌های سوختی و همچنین بازده آنها مقایسه شده است.

جدول ۱. میزان تولید آلاینده‌ها برحسب پوند در یک سال [۱]

پیل سوختی	موتور احتراقی	آلاینده
۰	۲۸۰۰۰	SO _x
۰	۴۱۴۲۷	NO _x
۷۲	۲۸۱۲۵	CO
۱۸۶۰۰۰۰	۴۰۴۴۰۰۰	CO ₂
۰	۵۰۰	ذرات معلق
۰	۴۶۸	ترکیبات ارگانیک
۴۰-۶۵	حدود ۳۰	بازده (درصد)

با توجه به اطلاعات جدول ۱ مشخص می‌شود که در پیل سوختی، آلاینده‌هایی از قبیل SO_x، NO_x، ذرات معلق و ترکیبات ارگانیک تولید نمی‌شود و آلاینده‌های CO و CO₂ به‌مراتب کمتر از موتورهای احتراقی تشکیل می‌شوند (میزان تولید CO در پیل سوختی ۰/۲۵ درصد موتور احتراقی و میزان تولید CO₂ در پیل سوختی ۴۶ درصد موتور احتراقی است). صنعت حمل‌ونقل و به‌دنبال آن خودروها سهم عمده‌ای در مصرف سوخت‌های فسیلی دارند؛ به‌گونه‌ای که مطابق شکل ۱ در سال ۱۹۹۷م به‌طور میانگین ۴۹ درصد سوخت موجود در جهان در کشورهای صنعتی و در حال توسعه صرف بخش حمل‌ونقل شده است. با توجه به روند مصرف سوخت پیش‌بینی می‌شود که از سال ۱۹۹۷ تا سال ۲۰۲۰م در کشورهای صنعتی به‌میزان مصرف سوخت در بخش حمل‌ونقل حدود ۱۱/۴ میلیون بشکه در روز افزوده شود. همین روند در کشورهای در حال توسعه نیز قابل مشاهده است؛ به‌طوری‌که در سال ۲۰۲۰م تقریباً ۵۰ درصد به این بخش اختصاص داده می‌شود. بر این اساس، امروزه تلاش‌های فراوانی برای استفاده از خودروهایی با

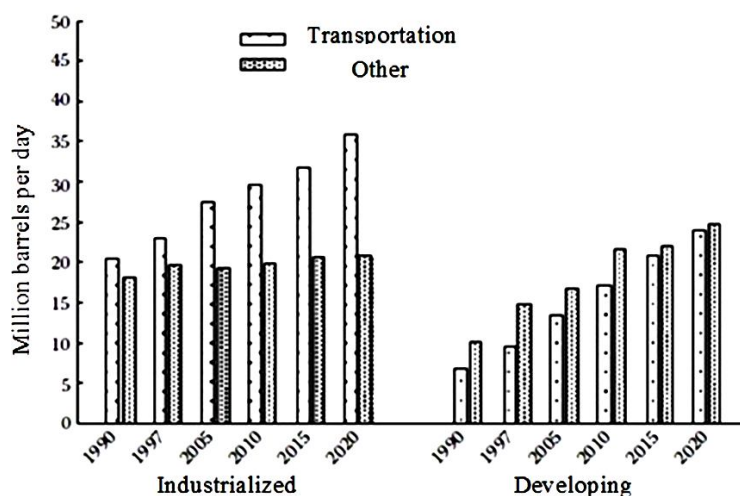
کارایی بالاتر از موتورهای احتراق داخلی و استفاده از سوخت‌های پاک به‌شدت مورد توجه خودروسازان دنیا است. لذا ادامه به بعضی از این خودروها اشاره می‌شود.

مدلسازی نقش مهمی در توسعه پیل سوختی و شناخت پارامترهای مؤثر بر عملکرد سیستم‌های آن دارد. مدل‌های موجود براساس دیدگاه مدل (تجربی، نیمه‌تجربی و نظری) و حالت مدل (استاتیکی و دینامیکی) تقسیم‌بندی می‌شوند که هرکدام مزایا و معایب خود را دارند.

ویشارت و همکاران (۲۰۰۶) مدلی نیمه‌تجربی و استاتیکی ارائه کردند که توده پیل سوختی و اجزای وابسته به آن را مورد بررسی قرار دادند [۳]. آنها شرایط کاری بهینه را با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی به‌دست آوردند. سیستم آنها قابلیت استفاده در خودروها و ایستگاه‌های تولید قدرت را داشت. مدل ارائه‌شده توسط حسن‌زاده و جعفری (۲۰۱۶) نیز مدلی نیمه‌تجربی و استاتیکی بود [۴]. آنها سیستم پیل سوختی با قدرت ۵۰ کیلووات و اجزای وابسته به آن را مورد بررسی قرار دادند و کمپرسور و رطوبت‌زن مناسب را براساس نیاز سیستم انتخاب کردند و از منحنی مشخصه کمپرسور برای مدلسازی آن استفاده نمودند و در نهایت با استفاده از الگوریتم‌های مختلف شرایط کاری بهینه شامل دما، فشار و استوکیومتری هوا را برای دو تابع هدف بیشترین قدرت خالص خروجی میانگین و بیشترین بازده کل میانگین به‌دست آوردند. با توجه به اینکه در مدل‌های استاتیکی، خصوصیات سیستم برای یک نقطه کاری مشخص محاسبه می‌شود و در حالتی که سیستم شروع به کار می‌کند و شرایط دینامیک می‌شود، مدلسازی دینامیکی بیشتر در شناخت شرایط کاری سیستم و بهینه‌کردن آن به محققان کمک می‌کند. پورکوشپان و همکاران (۲۰۰۲) مدلی نیمه‌تجربی و دینامیکی از یک سیستم پیل سوختی و اجزای آن ارائه دادند [۵]. در این مدلسازی برای به‌دست آوردن نرخ جریان ورودی و خروجی از کانال‌های آند و کاتد از معادله حاکم بر نازل که توسط توماس [۶] به‌دست آمده بود استفاده شد و در کارهای بعد نیز همین معادله مورد استفاده قرار گرفت. ژو و همکاران (۲۰۰۴) مدلی نیمه‌تجربی و دینامیکی از توده یک پیل سوختی ارائه کردند [۷]. آنها در مدل خود از سه حجم کنترل کانال آند، کانال کاتد و بدنه پیل سوختی استفاده کردند و تغییرات دما، تغییرات سوخت و اکسیژن و ولتاژ خروجی از پیل را نسبت به تغییرات جریان

بررسی کردند و آثار شارژ لایه دوگانه را در معادلات الکتروشیمیایی وارد کردند تا رفتار دینامیکی پیل به واقعیت نزدیکتر باشد. پاساپاتی و همکاران (۲۰۰۵) مدلی نیمه تجربی و دینامیکی از توده پیل ارائه کردند [۸]. آنها اثر رطوبت را بر عملکرد سیستم خود مورد بررسی قرار دادند و با تغییر فشارهای ورودی سوخت و اکسیدکننده آثار فشار را بر تغییرات ولتاژ خروجی پیل سوختی بررسی کردند. زیگلر و همکاران (۲۰۰۵) مدلی نظری و دینامیکی از یک پیل سوختی ارائه دادند که براساس آن معادلات بقای جرم و انرژی به صورت یک‌بعدی و با استفاده از نرم‌افزار متلب حل کردند و نیروی درگ الکترواسموتیک و نفوذ آب در غشاء را نیز محاسبه کردند [۹]. در مقایسه با مدل‌های قبل، در این مدل از سیستم معادلات دیفرانسیل جزئی وابسته به زمان استفاده شده است و با توجه به اینکه مدل آنها نظری بود، نتایج عددی به خوبی بر نتایج نظری

انطباق ندارد. مور و همکاران (۲۰۰۵) از دیدگاه کنترلی سیستم خودروی پیل سوختی را مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. آنها برای راننده بلوکی در نظر گرفتند تا از آن طریق سیگنال‌های کنترلی را وارد سیستم کنند خودروی پیل سوختی آنها که سوخت آن هیدروژن خالص بود، شامل چهار بخش اصلی توده پیل سوختی، سیستم تغذیه هوا، سیستم مدیریت آب و حرارت و سیستم تغذیه هیدروژن بود که به صورت دینامیکی آن را مدل کردند. براون و همکاران (۲۰۰۸) مدلی دینامیکی ارائه دادند که علاوه بر توده پیل سوختی و سیستم خنک‌کننده، یک الکترولایزر و یک مخزن ذخیره از نوع هیدرید فلزی را نیز شامل می‌شد [۱۱]. مدل کوربو و همکاران (۲۰۰۹) مدلی تجربی و دینامیکی از سیستم پیل سوختی با قدرت ۳۰ کیلووات به منظور طراحی یک مینی‌بوس حمل‌ونقل شهری بود که نتایج آن را در این طراحی استفاده کردند.



شکل ۱. نمودار مصرف سوخت در بخش حمل‌ونقل و سایر بخش‌ها [۲]

خودروهای پیل سوختی^۱ به عنوان جایگزین مناسبی برای خودروهای کنونی نام برده می‌شود. در حال حاضر خودروها را از نظر منبع و مبدل انرژی مورد استفاده در آنها می‌توان به سه دسته تقسیم کرد.

۲-۱. خودروهای با موتور احتراق داخلی

در اواخر قرن ۱۹ میلادی، تلاش‌های فراوانی برای ارتقای خودروها و رسیدن آنها به حد کنونی انجام شد. اغلب کارل بنز را اولین کسی می‌دانند که در سال ۱۸۸۵م خودروی با موتور احتراق داخلی را با نام بنز پتنت موتورواگن ساخت. این خودروها

۲. خودروهای حال حاضر موجود در جهان

توسعه خودروهای موتورهای احتراق داخلی در سال‌های اخیر یکی از مهم‌ترین دستاوردهای فناوری مدرن می‌باشد. پیشرفت در صنعت خودروسازی استفاده از آن را بیشتر می‌کند و این امری اجتناب‌ناپذیر است که سبب بروز خطرات جدی برای محیط اطراف انسان و منابع سوخت‌های هیدروکربنی می‌شود. در سال‌های اخیر تلاش‌ها و تحقیقات گسترده‌ای در صنعت حمل‌ونقل مبتنی بر افزایش بازده، پاک‌ی سوخت و کم‌خطر بودن خودرو مد نظر دانشمندان قرار گرفته است که در این راستا از خودروهای الکتریکی^۲، خودروهای هیبریدی الکتریکی^۳ و

به دلیل اینکه پرسروصدا و آلوده کننده بودند نسبت به خودروهای الکتریکی به سرعت عمومیت پیدا نکردند. هیرام میکسام در سال ۱۸۹۷ م یک صدا خفه کن اختراع کرد که تقریباً مشکل سروصدا را حل کرد. همچنین استارت در سال ۱۹۱۱ م مشکل شروع به کار سریع را حل کرد. به دلیل چگالی بالای انرژی بنزین، این خودروها به سرعت پیشرفت کردند تا جایی که خودروهای الکتریکی دیگر توانایی رقابت با آنها را نداشتند. از آن زمان تاکنون خودروهای با موتور احتراق داخلی تقریباً تمام بازار خودرو را از آن خود کرده اند. این خودروها هیچ گاه نمی توانند در زمره خودروهای با آلاینده‌گی صفر^۷ قرار بگیرند، اما می توانند در ردیف خودروهای با آلاینده‌گی کم^۸ قرار گیرند. موتورهای احتراق داخلی به دو دسته اشتعال جرقه‌ای^۹ و اشتعال تراکمی^{۱۰} دسته بندی می شوند. تفاوت اساسی بین این دو دسته موتور در نحوه احتراق آنهاست.

۲-۲. خودروهای الکتریکی

خودروهای الکتریکی در زمره خودروهای با آلاینده‌گی صفر به شمار می روند و همچنین تاریخچه پیدایش آنها خودروهای با موتور با احتراق داخلی برابری می کند. در سال ۱۹۰۰ م، ۳۸ درصد خودروهای جهان را خودروهای الکتریکی، ۲۲ درصد را ICEV و ۴۰ را خودروهای با قدرت پیشران بخار تشکیل می دادند. با پیشرفت ICEV به دلیل ارزان تر بودن و قدرت بیشتر آنها خودروهای الکتریکی پیشرفت شان به کندی صورت گرفت و به حالت انزوا درآمدند. در سال ۱۹۷۳ م، با تحریم نفت اوپک خودروهای الکتریکی دوباره احیا شدند و شرکت های خودروسازی مانند جنرال موتورز به توسعه این خودروها پرداختند تا جایی که در سال ۲۰۰۱ م تعداد ۲۵۰۰ دستگاه خودروی الکتریکی در کالیفرنیا کار می کردند.

۲-۳. خودروهای هیبریدی

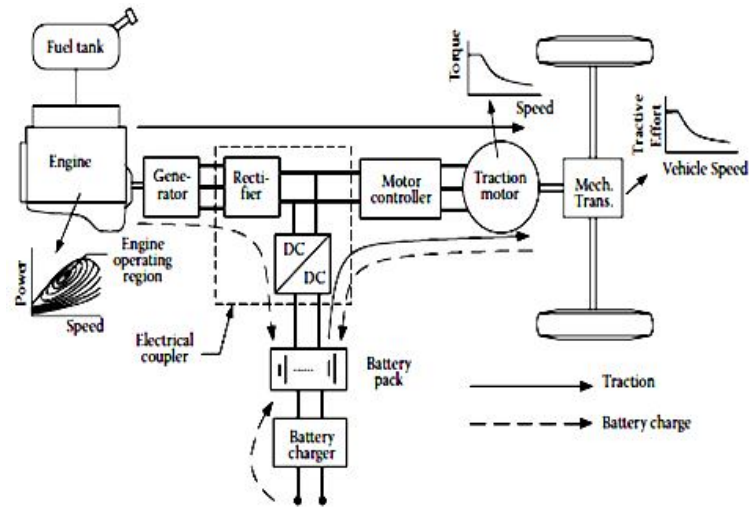
بر اساس تعریفی که کمیسیون بین المللی الکتروتکنیک^{۱۱} از خودروی هیبریدی ارائه کرده است، خودروی هیبریدی خورویی است که در حین کار انرژی خود را از دو یا چند منبع یا مبدل انرژی تأمین می کند و حداقل دو منبع یا مبدل انرژی روی خودرو نصب باشد. از زیرمجموعه های خودروهای هیبریدی، خودروهای هیبریدی الکتریکی می باشد. در این نوع خودرو باید

یکی از منابع یا مبدل ها انرژی الکتریکی تولید کنند. نخستین خودروی هیبریدی توسط دکتر فردیناند پورشه در سال ۱۸۹۹ م ساخته شد، لونر - پورشه میکس نام داشت و از یک موتور احتراقی که با سرعت ثابت می چرخید برای به حرکت درآوردن یک دینام که تعدادی از انباره ها را شارژ می کرد، استفاده می کرد. انباره ها جریان الکتریکی را به موتور الکتریکی می رساندند و این انرژی از موتور بین چرخ های جلو تقسیم می شد. به دلیل سادگی سیستم انتقال قدرت و افت های مکانیکی کم، بازده آن به ۸۳ درصد می رسید. خودروهای هیبریدی به دو دسته اصلی سری و موازی تقسیم می شوند. در حالت سری، خودرو توسط دو منبع تولید انرژی الکتریکی (ژنراتور و باتری) که یک موتور الکتریکی را تغذیه می کنند به حرکت درمی آید. قدرت مورد نیاز ژنراتور توسط یک مبدل انرژی دیگر مانند موتور احتراق داخلی یا پیل سوختی تأمین می شود. وقتی سرعت خودرو پایین است، مقدار کمی از الکتریسیته تولیدی صرف حرکت و بقیه در باتری ذخیره می شود تا در سرعت های بالا از هر دو منبع انرژی استفاده شود. در شکل ۲ این سیستم نمایش داده شده است.

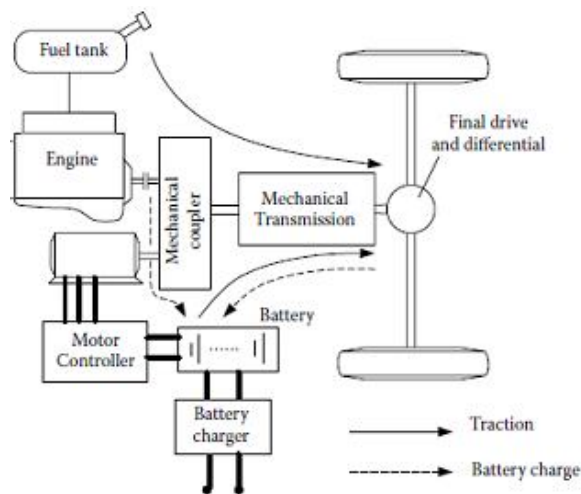
در حالت موازی، موتور احتراقی یا ژنراتور و یا هر دو که توسط یک متصل کننده مکانیکی بهم وصل می شوند، قدرت مورد نیاز را برای به حرکت درآوردن چرخ های خودرو تأمین می کنند. در سرعت های پایین ژنراتوری که قدرت خود را از یک باتری می گیرد انرژی مورد نیاز خودرو را تأمین می کند و در سرعت های متوسط موتور احتراقی این وظیفه را برعهده دارد و انرژی اضافی در باتری ذخیره می شود تا در سرعت های بالا موتور احتراقی و ژنراتور با هم این انرژی را تأمین کنند. در شکل ۳ سیستم خودروی هیبریدی موازی نشان داده شده است.

۲-۴. خودروهای پیل سوختی

خودروی پیل سوختی به واسطه بازده بالا، آلودگی و سروصدای کم، امکان تهیه سوخت پاک برای آن و توانایی کار با هیدروژن و سوخت های مختلف، گزینه مناسبی برای جایگزینی خودروهای موتور احتراق داخلی می باشد. پیل سوختی پلیمری به دلیل داشتن مزایایی چون جامد بودن الکترولیت، خوردگی کم، چگالی قدرت و عمر مفید بالا، زمان شروع به کار کم و پاسخ دینامیکی سریع برای کاربرد در خودرو مناسب است.



شکل ۲. سیستم خودروی هیبریدی سری [۲]



شکل ۳. سیستم خودروی هیبریدی موازی [۲]

داده شده است. امروزه شرکت‌هایی چون هیوندای، تویوتا و هوندا مدل‌های از خودروی پیل سوختی Hyundai ix35 FCV، TOYOTA Mirai، Honda Clarity را تولید کرده‌اند.

۳. سیستم خودروی پیل سوختی

به‌منظور استفاده از توده پیل سوختی به‌عنوان منبع تأمین قدرت یک خودرو به یک سری تجهیزات جانبی نیاز است. در شکل ۵ نمای شماتیک ساده از یک سیستم پیل سوختی مورد استفاده در یک خودرو ترسیم و اجزای اصلی آن نمایش داده شده است. مطابق شکل، این سیستم از چهار بخش اصلی شامل توده پیل سوختی، سیستم تغذیه هوا (کمپرسور، رطوبت‌زن و پمپ رطوبت‌زن)، سیستم تغذیه سوخت (مخزن ذخیره، شیر تنظیم

درحال حاضر، بازده پیل سوختی از موتور احتراق داخلی بالاتر است، اما برای تجاری‌شدن آن باید به پارامترهای دیگری چون قابلیت اطمینان، پایداری، قیمت، دردسترس بودن سوخت و رضایت عموم توجه کرد. یک خودروی پیل سوختی که شامل مخزن ذخیره هیدروژن (که هیدروژن را در فشار بالا نگاه می‌دارد)، توده پیل سوختی (که گاز هیدروژن و اکسیژن را به الکتریسیته مورد نیاز برای موتور الکتریکی تأمین می‌کند)، موتور الکتریکی (که خودرو را بدون سروصدا و به آهستگی جلو می‌راند)، واحد کنترل قدرت (که جریان الکتریسیته را مدیریت می‌کند) و باتری با خروجی بالا (که انرژی تولیدشده را در حالت ترمز در خود ذخیره و برای استفاده موتور الکتریکی برمی‌گرداند) می‌باشد. در شکل ۴ نمونه‌ای از خودروی پیل سوختی نمایش

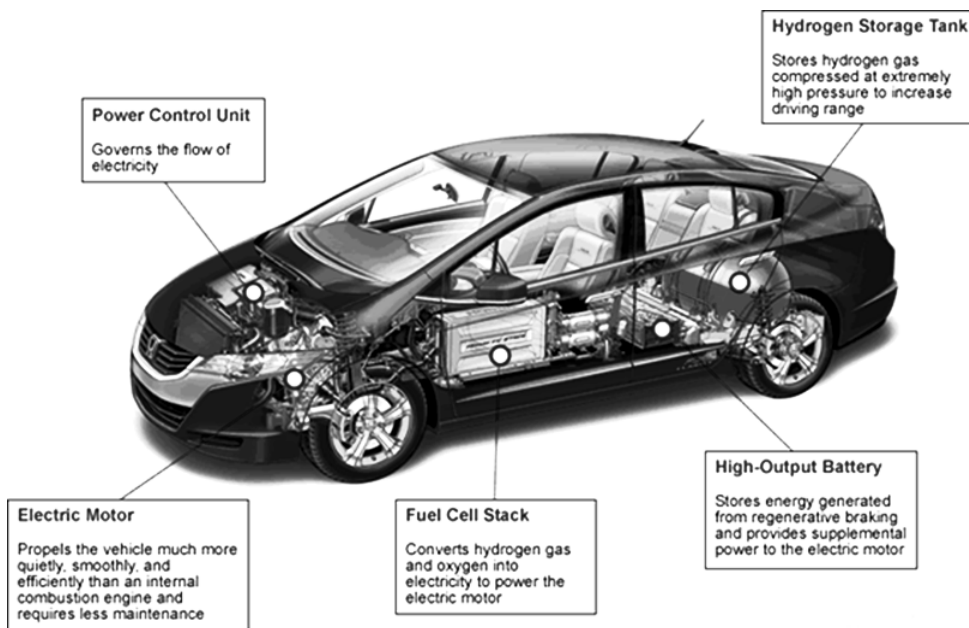
فشار و رطوبت زن) و سیستم خنک کننده (رادیاتور، کندانسور، فن دمنده، مخزن آب و پمپ) تشکیل شده است. در ادامه، دربارهٔ مورد هر یک از این قسمت‌ها توضیحاتی مطرح می‌شود.

۳-۱. تودهٔ پیل سوختی

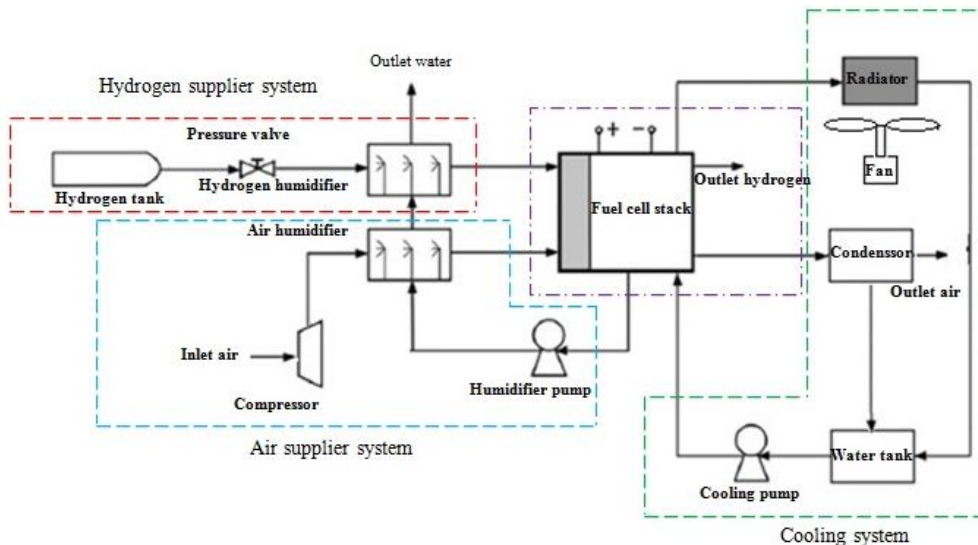
ولتاژ خروجی یک تک‌پیل سوختی مقداری کم است و برای بسیاری از کاربردهای عملی پیل‌های سوختی، تعدادی از آنها را به صورت سری به هم متصل کرده و تودهٔ پیل سوختی^{۱۲} را تشکیل می‌دهند تا ولتاژ و قدرت مورد نیاز مورد نظر را تأمین کند. پیل‌های سوختی را معمولاً به صورت مسطح یا لوله‌ای

می‌سازند. بیشتر توده‌های پیل سوختی به صورت مسطح طراحی می‌شوند و در این آرایش تک‌سلول‌های پیل سوختی به هم متصل می‌شوند و بین آنها صفحات جداکننده‌ای به منظور ارتباط الکتریکی بین سلول‌های مجاور و همچنین ایجاد سدی برای جدا کردن سوخت و اکسیدکنندهٔ ورودی به سلول‌های مجاور قرار می‌گیرند.

تودهٔ لوله‌ای بیشتر برای پیل‌های سوختی دما بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. سلول‌های لوله‌ای مزایای زیادی از جمله نشست‌بندی مناسب و ساختار مقاوم برای کارکرد در دمای بالا را دارند.



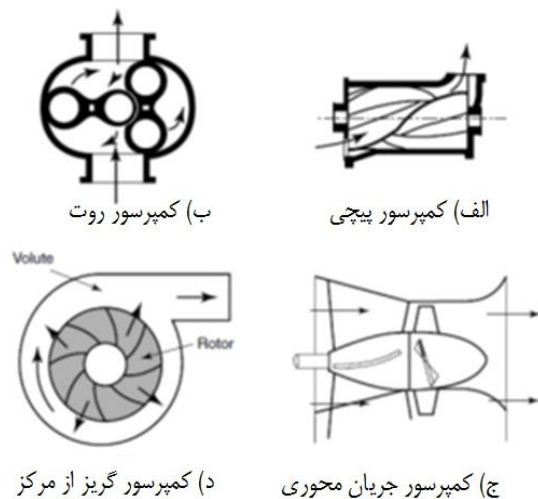
شکل ۴. نمایی شماتیک از یک خودروی پیل سوختی



شکل ۵. نمایی شماتیک از سیستم خودروی پیل سوختی

۳-۲. سیستم تغذیه هوا

هوای مورد نیاز سیستم باید در فشار و رطوبت لازم و دمایی نزدیک به دمای کاری توده پیل سوختی وارد سیستم شود. این بخش شامل کمپرسور، رطوبت‌زن و پمپ رطوبت‌زن است. هوای ورودی پس از تراکم در کمپرسور و رطوبت‌زنی در درجه حرارت و فشار کاری توده پیل سوختی وارد آن می‌شود. انواع کمپرسورهای مورد استفاده در پیل‌های سوختی مانند کمپرسورهای مورد استفاده در سایر مبدل‌های انرژی می‌باشد. چهار نوع اصلی کمپرسورها که در شکل ۶ نشان داده شده است شامل کمپرسور روت^{۱۳}، کمپرسور پیچی^{۱۴}، کمپرسور گریز از مرکز^{۱۵} و کمپرسور جریان محوری^{۱۶} می‌باشد.



شکل ۶. چهار نوع اصلی کمپرسورها [۱۳]

کمپرسور جریان محوری تیغه‌های بسیار زیادی دارد که با سرعت بالایی در حال چرخیدن می‌باشند؛ بازده این نوع کمپرسور بالاست و در محدوده کمی از دبی کارایی دارد؛ همچنین به دلیل وجود تیغه‌های زیاد قیمت آن بالاست.

هوا و هیدروژن ورودی به پیل سوختی باید رطوبت‌زنی شوند؛ زیرا رطوبت غشاء بر رسانایی یونی آن و در نتیجه بر قدرت تولیدی پیل سوختی اثرگذار است. در پیل سوختی پلیمری با توجه به پدیده درگ الکترواسموتیک مولکول‌های آب به همراه یونهای هیدروژن از سمت آند به کاتد حرکت می‌کنند، از اینرو سمت آند ممکن است با کمبود رطوبت مواجه شود. بنابراین برای رسیدن به بهترین عملکرد پیل سوختی باید رطوبت آن کنترل شود و این کار توسط یک رطوبت‌زن انجام می‌شود. رطوبت‌زن‌ها انواع گوناگونی دارند که از جمله آنها می‌توان به نازل اسپری^{۱۷}، حباب‌گازی^{۱۸}، چرخ آنتالپی^{۱۹} و غشایی^{۲۰} اشاره کرد. رطوبت‌زن نازل اسپری، آب را به ذرات ریزی تبدیل و آنها را روی گازهای واکنش‌دهنده می‌پاشد. در نوع حباب‌گازی، گاز با عبور از محفظه‌های آب گرم مرطوب می‌شود. این دو نوع رطوبت‌زن نیازمند آب با دمای بالا هستند؛ بنابراین مقداری قدرت اضافی برای گرم کردن آب مورد نیاز است. در نوع چرخ آنتالپی از آنتالپی گاز خروجی برای گرم و مرطوب کردن گاز ورودی استفاده می‌شود. این رطوبت‌زن دارای یک موتور الکتریکی است که مقداری از قدرت تولیدی پیل سوختی صرف راه‌اندازی این موتور می‌شود.

رطوبت‌زن غشایی از دو کانال، که توسط یک غشاء از هم جدا شده‌اند، تشکیل شده است. گاز خشک از یک کانال وارد شده و توسط گاز یا مایعی که از کانال دیگر عبور می‌کند مرطوب می‌شود. کانال‌های آب و هوای خشک مستقیماً به هم راه ندارند و چون این نوع رطوبت‌زن هیچ عضو متحرکی ندارد؛ بنابراین هیچ قدرت اضافی در آن مصرف نمی‌شود و به این دلیل است که برای استفاده در سیستم‌های پیل سوختی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳-۳. سیستم خنک‌کننده

به‌منظور خنک‌کاری سیستم از فن در اندازه‌های مختلف استفاده می‌شود. در نسبت فشارهای پایین از فن محوری استفاده می‌شود و در نسبت فشارهای بالاتر از فن گریز از مرکز استفاده

کمپرسور روت در محدوده نسبت فشارهای پایین کاربرد دارد و در محدوده دبی‌های گسترده قابل استفاده است و بیشتر از آنها به‌عنوان سوپرشارژر در موتورهای بنزینی و در بعضی از مدل‌های شرکت فورد استفاده می‌شود.

کمپرسور پیچی در نسبت فشارهای بالا (حدود ۸) قابل استفاده است. از دیگر مزایای این نوع کمپرسور بازده بالای آن است؛ این ویژگی‌ها سبب شده است تا با اینکه هزینه تولید این نوع کمپرسور زیاد می‌باشد، در اغلب سیستم‌های پیل سوختی از این نوع کمپرسور استفاده شود. بازده کمپرسور گریز از مرکز بالاست و تنها در محدوده کمی از دبی کارایی دارد، عیب آن نیز این است که روتور آن با سرعت بالا (در حدود ۸۰۰۰۰ دور بر دقیقه) می‌چرخد، که این سرعت باعث می‌شود یاتاقان‌های کمپرسور به روغنکاری و نگهداری نیاز داشته باشد.

شود. فلزات و آلیاژهای مورد استفاده در این مخازن Mg،
LaNi₅ و FeTi، Mg₂Ni می‌باشند.

۴. پیل سوختی پلیمری

در میان پیل‌های سوختی مختلف پیل سوختی پلیمری به دلیل داشتن مزایایی چون دمای کاری پایین (حدود ۸۰ درجه سانتی‌گراد)، بازده بالا، چگالی قدرت بالا و شروع به کار سریع برای استفاده در صنعت حمل‌ونقل گزینه مناسبی است. در پیل سوختی پلیمری یک الکترولیت جامد پلیمری که هادی یون هیدروژن (پروتون) است بین دو الکترود متخلخل قرار می‌گیرد. نفیون^{۲۱} یکی از بهترین الکترولیت‌های مورد استفاده در این نوع پیل سوختی است. در این پیل سوختی مدیریت بهینه آب از اهمیت زیادی برخوردار است؛ زیرا غشای تبادل یونی همواره باید هیدراته باشد تا میزان بازدهی افزایش یابد. مزایایی که باعث شده است پیل سوختی پلیمری بهترین گزینه برای استفاده در حمل‌ونقل باشد عبارت است از: چگالی قدرت بالا، آلودگی کم، کارکرد بدون صدا و شروع به کار سریع، طراحی و مونتاژ ساده، مستقل از طرز قرارگیری الکترولیت جامد و نهایتاً محدوده کاربرد وسیع. استفاده از کاتالیست‌های گران یکی از بزرگترین موانع پیشرفت پیل‌های سوختی پلیمری است. از دیگر موانع تجاری شدن پیل سوختی پلیمری تهیه هیدروژن ارزان و نحوه ذخیره آن است. جهت استفاده از سوخت‌هایی مثل متانول و بنزین به جای هیدروژن خالص نیاز به مبدل سوخت^{۲۲} است که لازمه این کار وجود تجهیزات جانبی است که موجب کاهش بازده کلی و افزایش وزن و قیمت سیستم پیل سوختی به خصوص در حمل‌ونقل می‌شود. حساسیت پلاتین مورد استفاده در کاتالیست پیل سوختی پلیمری به گاز مونو اکسید کربن از دیگر محدودیت‌های پیش روی پیل سوختی پلیمری است؛ همچنین نیاز به سیستم رطوبت‌زن و مدیریت آب و حرارت پیل سوختی پلیمری از دیگر مشکلات این نوع پیل سوختی است.

۵. انواع مدل‌سازی

قبل از انتخاب یک مدل پیل سوختی، آشنایی با خصوصیات کلی سیستم و همچنین احتیاجات سیستم ضروری می‌باشد و این نخستین شرط در مدل‌سازی می‌باشد. خصوصیات و ویژگی‌های یک مدل پیل سوختی را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

می‌شود. فن‌های گریز از مرکز شامل دو نوع انحنا به جلو و انحنا به عقب می‌باشند که این نامگذاری براساس شکل تیغه‌های آنها انجام شده است. نوع انحنا به جلو برای استفاده در سیستم‌های پیل سوختی کوچک و متوسط کاربرد دارد و از نوع انحنا به عقب در سیستم‌های پیل سوختی بزرگ استفاده می‌شود. همچنین برای خنک‌کاری آب در گردش و دفع حرارت آن به محیط به یک رادیاتور نیاز است.

۳-۴. سیستم تغذیه سوخت

تهیه هیدروژن و ذخیره آن از مشکلات اساسی استفاده از پیل‌های سوختی در خودروها می‌باشد. با توجه به آنکه هیدروژن کمترین وزن مولکولی و چگالی، بیشترین هدایت حرارتی و سرعت مولکولی را در بین تمام گازها دارد و این خصوصیات باعث می‌شود که ضریب نفوذ هیدروژن نسبت به سایر گازها بیشتر باشد؛ به طوری که ضریب نفوذ هیدروژن ۲/۸ برابر بیشتر از متان است از اینرو برای جلوگیری از نفوذ در مخزن و اشتعال این گاز، ذخیره‌سازی و نگهداری آن از اهمیت خاصی برخوردار است. هیدروژن می‌تواند با روش‌های مختلفی در خودرو ذخیره شود که رایج‌ترین آنها عبارت‌اند از: ذخیره به صورت گاز فشرده، هیدروژن مایع و ذخیره در مخازن هیدرید فلزی اشاره کرد.

یکی از روش‌های معمول برای ذخیره هیدروژن، که در اکثر کارهای صنعتی و تحقیقات از آن استفاده می‌شود، نگهداری آن در مخازن فشار بالاست. امروزه مخازن ذخیره هیدروژن را برای کاهش وزن و حجم، از مواد کامپوزیتی مانند الیاف کربن می‌سازند. برای ذخیره‌سازی هیدروژن به صورت مایع باید از مخازن ذخیره هیدروژن مایع استفاده نمود. در این روش هیدروژن را تا دمای ۲۲ کلوین سرد می‌کنند. البته نیاز به مخزنی کاملاً عایق برای نگهداری هیدروژن و جلوگیری از تبخیر آن است. این نوع مخازن که LH₂ نام دارند، مخازنی با مقاومت، ایمنی، وزن و قیمت بالا هستند. مخازن هیدرید فلزی از یک محیط متخلخل فلزی یا آلیاژ فلزی درست شده‌اند. اتم‌های هیدروژن با فلز به صورت یک فرایند گرمازا واکنش می‌دهد و آزادسازی هیدروژن از این مخازن فرایندی گرماگیر است. در این مخازن برای آزادسازی هیدروژن دمای بالای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد نیاز است و احتمالاً برای استفاده در پیل‌های سوختی دما پایین هیدروژن خروجی از مخزن باید سرد

۱. دیدگاه مدل (نظری، نیمه تجربی، تجربی)

۲. حالت مدل (استاتیکی، دینامیکی)

۳. مرز سیستم (پیل سوختی، توده، سیستم پیل سوختی)

۴. بعد مدل (یک بعدی، دوبعدی، سه بعدی)

۵. میزان پیچیدگی در روابط حاکم (روابط الکتروشیمی، ترمودینامیکی، دینامیک سیالاتی)

۶. گام زمانی (ثابت، متغیر، زمان واقعی)

۷. سرعت، دقت و انعطاف پذیری

۸. مستندسازی و اعتبارسنجی

از نظر حالت مدل‌ها می‌توانند استاتیکی یا دینامیکی باشند. در مدل‌های استاتیکی، خصوصیات سیستم برای یک نقطه یا نقاط کاری مشخص محاسبه می‌شوند. این نوع مدلسازی برای برآورد اندازه اجزای سیستم، محاسبه مقدار مواد مورد نیاز مانند کاتالیست کاربرد دارد. پیل‌های سوختی که در آزمایشگاه‌ها وجود دارند در حالت استاتیکی کار می‌کنند؛ یعنی به تغییرات بار به سرعت واکنش نشان می‌دهند و همچنین اجزای وابسته به آنها نیز همین رفتار را دارند.

با توجه به اینکه در مدل‌های استاتیکی شرایط کاری سیستم در یک نقطه یا نقاط ثابت در نظر گرفته می‌شود، برای به‌دست آوردن پاسخ واقعی سیستم به تغییرات بار، مدلسازی دینامیکی مورد توجه قرار می‌گیرد و بهینه‌سازی زمان پاسخ سیستم به این تغییرات بررسی می‌شود و همچنین مدل‌های دینامیکی برای تحلیل آغاز و پایان سیکل کاری مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ادامه توده یک پیل سوختی پلیمری با استفاده از تعدادی از روابط استفاده شده در مدل ژو و همکاران، پاسپاتی و همکاران و پورکوشپان و همکاران با استفاده از سیمولینک متلب به صورت استاتیکی و دینامیکی مدل می‌شود و پاسخ ولتاژ خروجی پیل سوختی و قدرت تولیدی پیل نسبت به تغییرات پله‌ای بار به دست می‌آید و با هم مقایسه می‌شود.

۶. مدلسازی توده پیل سوختی

برای به دست آوردن معادلات حاکم بر مسئله و مدلسازی دینامیکی پیل سوختی، از روش حجم کنترل متناهی استفاده می‌کنیم. برای این کار پیل سوختی را مطابق شکل ۷ به سه حجم کنترل شامل کانال آند، کانال کاتد و بدنه پیل سوختی تقسیم بندی شده و از معادلات بقای جرم و بقای انرژی به همراه

معادلات الکتروشیمیایی حاکم بر واکنش‌های پیل سوختی استفاده می‌شود. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، در بخش اول مدلسازی، گاز هیدروژن و هوا به ترتیب وارد کانال آند و کاتد شده و در بخش دوم مخلوط گاز هیدروژن و بخار آب و مخلوط هوا و بخار آب وارد این کانال‌ها می‌شوند و مقداری از گاز ورودی به کانال آند با نفوذ در الکتروند آند به لایه فعال کاتالیست می‌رسد و در کاتالیست با وقوع واکنش‌های شیمیایی، پروتون و الکترون تولید می‌شود و پروتون‌ها از لایه کاتالیست آند با ورود به داخل غشاء به سمت کاتد حرکت می‌کنند و خود را به یون‌های اکسیژن در لایه فعال کاتالیست کاتد می‌رسانند و با ترکیب شدن با آنها آب و حرارت تولید می‌شود. در اثر وقوع واکنش‌های الکتروشیمیایی دمای پیل سوختی افزایش یافته و این افزایش بر دبی نفوذی گازها به پیل سوختی تأثیرگذار است. این حرارت طی فرایندهای انتقال حرارت تشعشع به محیط و جابه‌جایی به کانال‌های نفوذ گاز منتقل می‌شود. تغییرات دمای داخل پیل سوختی سبب تغییرات فشار و دبی در داخل کانال‌ها شده و بر ولتاژ خروجی پیل سوختی تأثیرگذار است. برای استخراج معادلات حاکم فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

۱. مخلوط گازها ایده‌آل اند

۲. با در نظر گرفتن خصوصیات ماکروسکوپیکی دینامیکی، از حل معادله مومنتوم در امتداد کانال‌ها صرف نظر می‌شود
با توجه به معادلات کلی حاکم بر مسأله معادلات بقای جرم در کانال‌ها به صورت زیر هستند:

$$\frac{dm_{H_2}}{dt} = k_{up,an}(P_{s,an} - P_{an}) - kd_{own,an}(P_{an} - P_{atm}) - \frac{Ni}{2F} M_{H_2} \quad (1)$$

$$\frac{dm_{O_2}}{dt} = k_{up,ca}(P_{s,ca} - P_{ca}) \quad (2)$$

گرمای اضافه شده و کار انجام شده روی حجم کنترل بدنه پیل سوختی از رابطه ۳ به دست می‌آید:

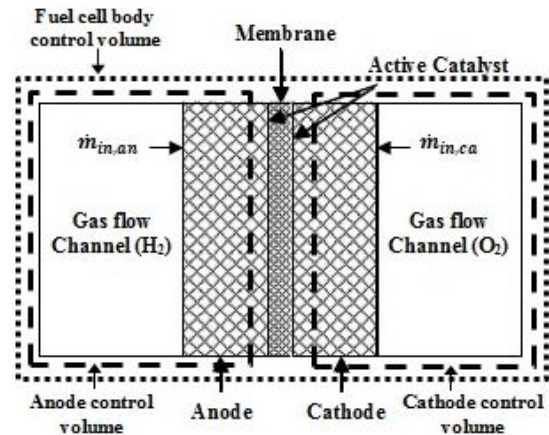
$$\frac{dQ}{dt} + \frac{dW}{dt} = k_{conv,an}(T_{an} - T_{body}) + k_{conv,ca}(T_{ca} - T_{body}) + k_{conv,amb}(T_{amb} - T_{body}) + \Delta H_{R,T} \frac{Ni}{2F} M_{H_2} - NV_{cell} i \quad (3)$$

با توجه به معادلات به دست آمده، برای حل آنها به به دست آوردن ولتاژ خروجی از پیل سوختی نیاز است. برای به دست

آوردن ولتاژ در حالت‌های استاتیکی و دینامیکی ابتدا به تعریف ولتاژ نرنست^{۲۳} می‌پردازیم:

$$E_{\text{nernst}} = 1.229 - 0.8463 \times 10^{-3} (T - 298.15) + 4.3087 \times 10^{-5} T (\ln(a_{\text{an},H_2}) + 0.5 \ln(a_{\text{ca},O_2})) \quad (4)$$

که در آن T دمای بدنه پیل سوختی برحسب کلون می‌باشد و a_{an,H_2} و a_{ca,O_2} به ترتیب فعالیت^{۲۴} هیدروژن و اکسیژن در کانال‌های آند و کاتد می‌باشد.



شکل ۷. حجم کنترل کانال‌های کاتد، آند و بدنه پیل سوختی

برای به دست آوردن ولتاژ پیل سوختی در حالت دینامیکی از روابط الکتروشیمیایی حاکم بر آن استفاده می‌شود:

$$V_{\text{cell}} = E_{\text{nernst}} - V_{\text{dyn}} + \psi_{\text{ohmic}} \quad (6)$$

که در این رابطه V_{dyn} افت ولتاژ دینامیکی پیل سوختی می‌باشد.

۷. بررسی نتایج

در شکل ۹ ولتاژ خروجی از توده پیل سوختی متشکل از ۳۵ تک‌پیل سوختی که مساحت هر کدام ۱۵۰ سانتی‌متر مربع می‌باشد به ازای ورودی جریان الکتریکی و تغییرات آن مطابق شکل ۸ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش جریان الکتریکی، ولتاژ خروجی به دلیل کم شدن فشارهای جزئی گازهای هیدروژن و اکسیژن و همچنین افزایش افت ولتاژها کاهش می‌یابد. با تغییر پله‌ای جریان الکتریکی در زمان از ۱۰ آمپر به ۳۵ آمپر و از ۳۰ آمپر به ۲۵ آمپر تأخیر در پاسخ ولتاژ خروجی، به این تغییرات مشاهده می‌شود. تأخیر در پاسخ‌ها، تفاوت میان مدل‌سازی دینامیکی و استاتیکی می‌باشد.

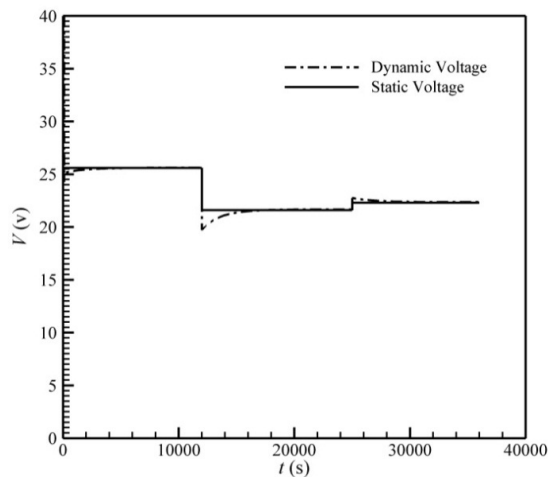
۸. نتیجه‌گیری

در مدل‌سازی استاتیکی پارامتر زمان دخالت داده نمی‌شود و پاسخ سیستم بدون تأخیر می‌باشد که از واقعیت دور است. در مدل‌سازی دینامیکی افت ولتاژ فعال‌سازی توسط پدیده خازنی تا حدی جبران می‌شود؛ بدین‌گونه که به تدریج بار روی لایه دوگانه بار می‌نشیند و ولتاژ به آرامی افزایش می‌یابد. وقتی جریان افزایش پیدا می‌کند در مقایسه با کاهش جریان، چون غلظت پروتون‌ها در کاتالیست کاتد به سرعت افزایش می‌یابد، پاسخ ولتاژ به افزایش جریان سریع‌تر پایدار می‌شود. با توجه به این شرایط، پیل‌های سوختی که در آزمایشگاه‌ها وجود دارند و همچنین اجزای وابسته در حالت استاتیکی کار می‌کنند؛ یعنی به تغییرات بار به سرعت واکنش نشان می‌دهند و از مدل‌سازی دینامیکی جهت مدل‌کردن شرایط کاری واقعی پیل سوختی استفاده می‌شود و محققان در پی بهینه کردن زمان پاسخ سیستم‌های پیل سوختی مورد استفاده در خوروها هستند.

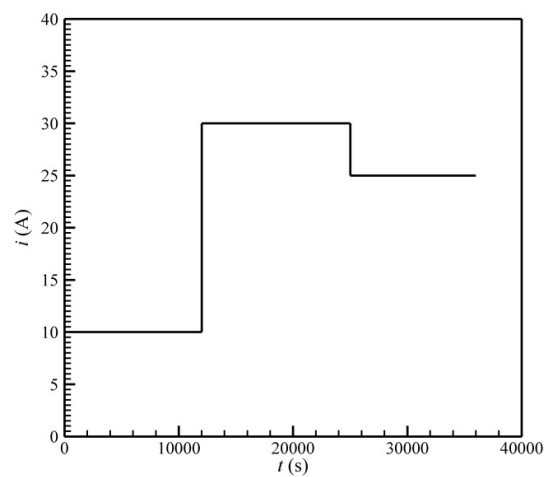
ولتاژ نرنست که توسط معادله ۴ به دست آمد، ولتاژ بازگشت‌پذیر پیل سوختی است و همان‌طور که قبلاً اشاره شد در عمل هیچ‌گاه شرایط بازگشت‌پذیر برای یک پیل سوختی به وجود نمی‌آید و با توجه به منحنی مشخصه پیل سوختی لیل وجود بازگشت‌ناپذیری‌هایی از جمله افت‌های ولتاژ فعال‌سازی، مقاومتی و غلظتی ولتاژ خروجی در حالت استاتیکی مطابق رابطه ۵ محاسبه می‌شود. در این تحقیق از اثر جریان‌های داخلی^{۲۵}، عبور ناخواسته سوخت^{۲۶} و مقاومت تماسی^{۲۷} بر ولتاژ خروجی صرف‌نظر شده است.

$$V_{\text{cell}} = E_{\text{nernst}} - \psi_{\text{act}} + \psi_{\text{conc}} + \psi_{\text{ohmic}} \quad (5)$$

به طوری که در این رابطه ψ_{act} افت ولتاژ فعال‌سازی (ولتاژی که جهت شروع واکنش تلف می‌شود)، ψ_{ohmic} افت ولتاژ مقاومتی (میزان ولتاژی که در اثر مقاومت جریان الکترون در الکتروود و مقاومت جریان یون در الکتروولیت تلف می‌شود) و ψ_{conc} افت ولتاژ غلظتی (میزان ولتاژی که در اثر کاهش غلظت واکنش‌دهنده‌ها در الکتروودها تلف می‌شود) می‌باشد.



شکل ۹. ولتاژ خروجی توده پیل سوختی در حالت استاتیکی و دینامیک



شکل ۸. منحنی تغییرات جریان اعمال شده به سیستم بر حسب زمان

۹. مأخذ

- [1] A. Boudghene Stambouli, E. Traversa, Fuel Cells, an alternative to standard sources of energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 6, pp. 297-306, 2002.
- [2] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay, A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles Fundamentals: Theory & Design*, CRC Press, 2005.
- [3] J. Wishart, Z. Dong, M. Secanell, Optimization of a PEM fuel cell system based on empirical data and a generalized electrochemical semi-empirical model, *Journal of Power Sources*, Vol. 116, pp. 1041-1055, 2006.
- [4] H. Hassanzadeh, H. Jafari, Modeling and optimization of fuel cell vehicle driver system with power of 50kW, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 141-152, 2016 (in Persian فارسی).
- [5] J. T. Purkushpan, H. Peng, A. G. Stefanopoulou, Simulation and analysis of transient fuel cell system performance based on dynamic reactant flow model, 2002 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition November 17-22, New ORLEANS, Louisiana, USA, 2002.
- [6] P. Thomas, *Simulation of Industrial Processes for Control Engineer*, London, Butterworth Heinemann, 1999.
- [7] X. Xue, J. Tang, A. Smirnova, R. England, Nigel Sammes, System level lumped-parameter dynamic modeling of PEM fuel cell, *Journal of Power Sources*, Vol. 133, pp. 188-204, 2004.
- [8] P. R. Pathapati, X. Xue, J. Tang, A new dynamic model of predicting transient phenomena in a PEM fuel cell system, *Renewable Energy*, Vol. 30, pp. 1-22, 2005.
- [9] C. Ziegler, S. Philipps, J. Niemyer, J. O. Schumacher, A new dynamic model of predicting transient phenomena in a PEM fuel cell system, Lucerne fuel cell Forum 2005, Lucerne, Switzerland, 4-8, July 2005.
- [10] R. M. Moore, K. H. Hauer, D. Freidman, J. Cunningham, P. Badrinarayanan, S. Ramaswamy, A. Eggert, A dynamic simulation tool for hydrogen fuel cell vehicles, *Journal of Power Sources*, Vol. 141, pp. 272-285, 2005.
- [11] T. M. Brown, J. Brouwer, G. S. Samuelsen, F. H. Holcomb, J. King, Dynamic first principles model of a complete reversible fuel cell system, *Journal of Power Sources*, Vol. 139 pp. 152-164, 2008.
- [12] P. Corbo, F. Migliardini, O. Veneri, Dynamic behavior of hydrogen fuel cells for automotive application, *Renewable Energy*, Vol. 34, Issue8, pp. 1955-1961, August 2009.
- [13] J. Larminie, Andrew Dicks, *Fuel Cell System Explained*, Second edition, John Wiley & Sons Ltd, 2003.

-
1. internal combustion engine vehicles
 2. SO_x
 3. NO_x
 4. electric vehicle
 5. hybrid electric vehicle
 6. fuel cell vehicle
 7. zero emission vehicle
 8. partial zero emission vehicle
 9. spark-ignition (SI)
 10. compression-ignition (CI)
 11. international electrotechnical commission
 12. stack
 13. root compressor
 14. screw compressor
 15. centrifugal compressor
 16. axial flow compressor
 17. nozzle spray
 18. gas bubbling
 19. entalphy wheel
 20. membrane
 21. nafion
 22. reformer
 23. nernst voltage
 24. activiy
 25. internal current
 26. cross over
 27. contact resistance