

## شبیه‌سازی سیستم نیرومحركه‌ی یک خودروی سمند سورن با قوای محركه‌ی پیل سوختی

سید مهدی حسینی بیرون<sup>۱</sup>، امیر حسین شامخی<sup>۲</sup>، آریا یزدانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد نیرو محركه، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، radin.hosseini@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار گروه نیرو محركه، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، shamekhi@kntu.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد نیرو محركه، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، radin.hosseini@gmail.com

### چکیده

نحوه کار خودروهای پیل سوختی بدین شکل است که کمپرسور قسمتی از

برق تولیدی در پیل سوختی را برای تولید هوای فشرده مصرف می‌کند و باید به نحوی کنترل شود تا در هر لحظه دبی و فشار مورد نظر برای هوا را تامین کند. همچنین باید از اختناق در کمپرسور جلوگیری کرد. هوای خروجی از کمپرسور دارای دمای زیادی است و به همین منظور در خنک‌کننده باید دمای هوای خروجی از کمپرسور با دمای عملکرد پیل سوختی پایین آورده شود. نقش خنک‌کننده تقریباً مانند نقش رادیاتور در خودروهای احتراق داخلی است. هوای ورودی به پیل سوختی باید در هر لحظه دارای رطوبت نسبی یک باشد. هرچه رطوبت نسبی هوای ورودی به پیل سوختی به یک نزدیک‌تر باشد ولتاژ به دست آمده بیشتر است ولی رطوبت بالای صد در صد باعث تولید آب در کاتد و متعاقب آن کاهش چشمگیر ولتاژ تولیدی می‌شود. وظیفه‌ی رطوبت زنی به پیل سوختی به عهده‌ی رطوبت‌زن است. هیدروژن ذخیره شده در داخل مخزن سوخت توسط شیر کنترل فشار وارد آمد می‌شود. نکته بسیار مهم برای فشار هیدروژن این است که فشار آمد و کاتد باید بسیار نزدیک به هم و حتی در هر لحظه برابر باشد تا بازده پیل سوختی افت نکند. به همین علت کنترل فشار هیدروژن ورودی به آمد نقش مهمی در بازده پیل سوختی دارد. هیدروژن ورودی به پیل سوختی نیز در آب ابتدا رطوبت زنی می‌شود. تا به رطوبت نسبی صددرصد برسد سپس وارد پیل سوختی می‌شود.

پیل سوختی پلیمری که توسط هوای فشرده و هیدروژن تغذیه می‌شود قلب سیستم تولید توان است که در آن عمل تولید برق انجام می‌شود. هیدروژن مرطوب ورودی به آمد در حضور کاتالیزور به پروتون و الکترون تجزیه می‌شود. این عمل باعث آزاد شدن مقداری انرژی به صورت گرما می‌شود. در کاتد اکسیژن با الکترون‌های گرفته شده از الکترون و  $H^+$  که از طریق غشا به محیط کاتد آمده است، واکنش می‌دهد و آب تولید می‌کند. وظیفه انتقال  $H^+$  از آمد به کاتد توسط ماده‌ای انجام می‌شود که به غشای پلیمری معروف است. این غشا باید به نحوی طراحی شود که فقط اجازه عبور به  $H^+$  را بدهد تا الکترون‌ها از طریق مدار خارجی به کاتد رفته و تولید الکتریسیته کنند.

اولین خودروی با قوای محركه‌ی پیل سوختی تاریخ که راهی جاده‌ها شد یک خودروی جنرال موتورز<sup>۱</sup> بود که در سال ۱۹۶۶ به تولید رسید. کمپانی دایملر-کرایسلر<sup>۲</sup> این دو شرکت در سال ۲۰۰۷ از هم جدا شدند) در سال‌های اول دهه‌ی نود به شکل وسیع دست به ساخت این نوع خودروها زد [۲]. فورد<sup>۳</sup> اولین نمونه از سری خودروهای پیل سوختی خود بنام نکار<sup>۴</sup> را در سال ۱۹۹۴ ساخت. پس از این شرکت فورد در سال ۱۹۹۹ خودروی P2000 را ساخت

به علت بحران‌های روز افزون انرژی و نیز مشکلات مربوط به آلودگی محیط زیست خودروهای پیل سوختی هیبریدی به عنوان یکی از گزینه‌های جایگزینی خودروهای احتراق داخلی در صنعت جهان مدنظر هستند. پیل‌های سوختی پلیمری به علت چگالی توان بالا و نیز دمای عملکرد پایین مناسب‌ترین نوع پیل سوختی برای مصارف خودرویی هستند. در این مقاله با استفاده از یک مدل دینامیکی، سیستم تولید و انتقال توان خودروی سمند سورن مدل‌سازی شده و سپس توسط نرم افزار سیمولینک شبیه‌سازی شده است. پنج زیر شاخه‌ی مهم در مدل‌سازی، پیل سوختی، سیستم تامین هوای کاتد، موتورالکتریکی، باتری و سیستم انتقال قدرت است. در انتها پارامترهایی توان و ولتاژ تولید شده توسط پیل سوختی، گشتاور تولیدی موتورالکتریکی و سرعت خودرو به عنوان نتایج آورده شده است.

### کلمات کلیدی

پیل سوختی- خودروی هیبرید- مدل‌سازی- گشتاور- توان

### مقدمه

پیل سوختی یک سیستم الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی سوخت (هیدروژن یا متانول) و هوا را به طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. هر سلول پیل سوختی از سه جز آمد، کاتد و الکترولیت تشکیل شده است. پیل‌های سوختی آلودگی هوا و صوتی ایجاد نمی‌کنند و در آن‌ها اتلاف انرژی حداقل است. این مولدهای انرژی دارای بازده بالایی هستند.

پیل‌های سوختی پلیمری تنها نوع پیل سوختی است که برای مصرف در صنعت حمل و نقل مناسب است. الکترولیت در این پیل‌های سوختی یک پلیمر هدایت‌کننده‌ی یون با سطح پوشیده از کاتالیست است. این پیل‌ها به علت داشتن چگالی توان بالا، الکترولیت جامد، عمر سلولی زیاد، رسوب کمتر و دمای عملکرد پایین برای استفاده در وسایل نقلیه بهتر هستند و همچنین دمای عملکرد پایین آن‌ها امکان رسیدن به شرایط پایدار و داشتن زمان استارت کمتر را به ما می‌دهد [۱].

خودرویی با نیروی محركه پیل سوختی چگالی توان بالایی دارد. منظور از چگالی توان، توان تولیدی توسط منبع تولید توان به جرم آن است. برای مثال یک سیستم پیل سوختی با سوخت متانول در حدود ۱۹۰۰ وات بر کیلوگرم چگالی توان دارد که این در مورد یک باتری اسیدی ۴۰ وات بر کیلوگرم است. در مورد زمان شارژ نیز به شکل واضحی این خودرو ارجحیت زیادی به خودروی برقی دارد [۱].

<sup>1</sup> General Motors

<sup>2</sup> DaimlerChrysler

<sup>3</sup> Ford

<sup>4</sup> Necar

ساخت ۴/۱ کیلوگرم برای ۳۸۶ کیلومتر است. با احتساب قیمت ۵ تا ۱۰ دلاری هر کیلوگرم هیدروژن خالص این خودروها از نظر هزینه‌ی سوخت توانایی رقابت با خودروهای احتراق داخلی را دارند.



شکل ۲: خودروی هوندا کلاریتی FCX [۳].

شرکت هیوندای در سال ۲۰۱۰ دو نوع خودروی پیل سوختی را به‌روی پلات‌فرم‌های توسان<sup>۷</sup> و اسپورتیج<sup>۸</sup> ارائه نمود. کمپانی دایملر در سال ۲۰۰۹ اعلام کرد تا سال ۲۰۱۳، ده هزار خودروی پیل سوختی روانه‌ی بازار خواهد کرد. در همین سال این کمپانی دو نوع خودروی پیل سوختی با اسامی اف‌سل<sup>۹</sup> و اف‌سل روداستر<sup>۱۰</sup> ساخت. پژو اولین مدل از این نوع خودروها را در سال ۲۰۰۴ با عنوان کوآرک<sup>۱۱</sup> ساخت و پس از آن مدل H2Origin-Fuelcell را در سال ۲۰۰۸ به نمایش گذاشت. آخرین مدل خودروی پیل سوختی جنرال موتورز نیز هیدروژن<sup>۱۲</sup> است که در سال ۲۰۰۷ ارائه شده است. این خودرو دارای ۴۴۰ سلول پیل سوختی با توان ۹۳ کیلووات است. این خودرو برای هر صد کیلومتر ۱٫۳ کیلوگرم هیدروژن مصرف می‌کند [۲].

### مدل‌سازی سیستم تولید توان

سیستم کلی به پنج زیر شاخه اصلی تقسیم می‌شود که تمامی آن‌ها به تنهایی و نیز در ارتباط با یکدیگر کنترل می‌شوند [۷]. این پنج زیر شاخه عبارتند از:

- جریان واکنش‌دهنده‌ها
- دما و حرارت
- مدیریت آب
- مدیریت توان
- سوخت‌رسانی

[۲]. در سال ۲۰۰۵ وانگ<sup>۱</sup> و همکارانش یک خودروی سبک وزن به نام مینگ‌تانو<sup>۲</sup> ساختند. در این خودرو از یک پیل سوختی پلیمری ۵ کیلوواتی برای تامین نیرو استفاده شده بود. بازده خالص پیل سوختی در این خودرو ۳۰٪ بود [۳]. مرکز تحقیقات شرکت هوندا<sup>۳</sup> در سال ۲۰۰۹ با معرفی خودروی هوندای کلاریتی<sup>۴</sup> به معرفی پیشرفت‌های انجام گرفته در زمینه تولید خودروهای پیل سوختی خود پرداخت. توان خروجی این خودرو ۱۰۰ کیلووات و بازده پیل سوختی‌ها شرایط عملکرد بهینه ۵۲٪ است. این خودرو قابلیت استارت زدن در دمای ۳۰- درجه سانتی‌گراد را دارد [۴]، [۵] و [۶].

کمپانی‌های خودروسازی زیادی در حال تحقیق و پیشرفت برای ساخت خودروی پیل سوختی هستند. به علت سبز بودن این نوع خودروها دولت‌های پیشرفته در حال سرمایه‌گذاری به‌روی تحقیقات صنعتی این خودروها هستند. در سال ۲۰۰۹ تعداد خودروهای پیل سوختی در حال حرکت در جاده‌های آمریکا به ۲۰۰ خودرو رسید که اکثر آن‌ها در کالیفرنیا هستند. تعداد این خودروها بستگی مستقیم به تعداد جایگاه‌های سوخت‌گیری هیدروژن دارد. به همین علت تا سال ۲۰۱۰، شانزده جایگاه سوخت‌گیری هیدروژن در لوس-آنجلس افتتاح شده است، شکل (۱). کشور های اروپایی و ژاپن نیز در حال ساخت و توسعه‌ی جایگاه‌های سوخت‌گیری هیدروژن خود هستند. آلمان و ایتالیا از سال ۲۰۰۸ ساخت یک آزادراه هیدروژنی<sup>۵</sup> بین مونتووا<sup>۶</sup> و مونیخ را آغاز کرده‌اند [۲].



شکل ۱: جایگاه سوخت‌گیری هیدروژن (تولید شده توسط انرژی خورشیدی) شرکت هوندا در لوس‌آنجلس [۲]

کمپانی هوندا در سال ۱۹۹۹ اولین مدل خودروی پیل سوختی خود با نام FCX را معرفی کرده و سپس در سال ۲۰۰۷ دومین مدل خود را با نام کلاریتی FCX را در نمایشگاه خودروی لوس‌آنجلس به معرض تماشا گذاشت، شکل (۲). این خودرو دارای یک پیل سوختی صد کیلوواتی و با مصرف

<sup>7</sup> Tucson  
<sup>8</sup> Sportage  
<sup>9</sup> F-cell  
<sup>10</sup> F-CELL Roadster  
<sup>11</sup> Quark  
<sup>12</sup> Hydrogen4

<sup>1</sup> Wang  
<sup>2</sup> Mingtao  
<sup>3</sup> Honda R&D Center  
<sup>4</sup> FCX Clarity  
<sup>5</sup> Hydrogen Highway  
<sup>6</sup> Montova

### سیستم جریان واکنش دهنده‌ها

این زیرشاخه شامل تامین هیدروژن و هوا برای آند و کاتد می‌شود. وقتی که موتور خودرو به جریان بیشتری احتیاج دارد، آند و کاتد تهی از هیدروژن و اکسیژن می‌شوند. در این شرایط مقدار هیدروژن و اکسیژن آند و کاتد توسط یک شیر و ایجاد فشار مثبت برای جریان آن‌ها اصلاح می‌شود. هدف کنترل در اینجا ایجاد جریان کافی واکنش دهنده‌ها و برای اطمینان از پاسخ گذرای توان<sup>۱</sup> سریع و مطمئن و کمینه کردن مصرف توان محوری است. کوپلینگ مستقیم پیل سوختی با کمپرسور به علت مزایای حجمی و نیز بازده بالا ترجیح داده می‌شود.

### سیستم حرارت و دما

این زیرشاخه شامل سیستم خنک کاری بدنه پیل سوختی و دمای واکنش دهنده‌ها است. هنگامی که جریان به علت نیاز موتور افت می‌کند حرارت داخل پیل سوختی جمع می‌شود. برای سبک‌سازی پیل سوختی که برای حمل مسافر به کار می‌رود حرارت جمع شده را نمی‌توان با جابجایی هوا و تشعشع از سطح خارجی دفع کرد. در اینجا ما نیازمند یک خنک‌کاری فعال درون جریان واکنش دهنده‌ها و زیر شاخه خنک کاری هستیم. مدیریت خنک کاری در یک سیستم پیل سوختی حساس‌تر و سخت‌تر از یک موتور احتراق داخلی است. زیرا اولاً آب یونیزه شده به جای یک مایع مناسب برای خنک کاری بدنه پیل سوختی به کار می‌رود و ثانیاً دمای طراحی شده برای عملکرد یک پیل سوختی حدود ۸۰ درجه سانتی‌گراد است پس هوای خروجی از آن که همان ۸۰ درجه است توانایی زیادی برای خروج حرارت ندارد. پس دفع حرارت یک مسئولیت مهم برای سیستم انتقال حرارت است. این در حالی است که اختلاف دمای کم بین بدنه و آب خنک کاری مانعی مقابل انتقال حرارت موثر از بدنه می‌باشد. جدا از دبی آب خنک کاری و دمای آن، دمای جریان هوای ورودی نیز روی دمای بدنه تاثیر دارد. مدیریت حرارت را می‌توان با تغییر سرعت فن خنک کاری و پمپ گردش آب انجام داد. هدف مدیریت گرما گرم شدن سریع سیستم بدون فراجش دمای نهایی و نیز کمترین توان محوری مصرفی پمپ و فن خنک کاری است.

### سیستم مدیریت آب

نقش سیستم مدیریت آب حفظ رطوبت غشای پلیمری و نیز تعادل مصرف و تولید آب در سیستم است. مقدار دبی واکنش دهنده‌ها و نیز آب تزریق شده به آند و کاتد بر روی رطوبت غشا تاثیر دارد. غشای خشک و نیز غشای بیش از حد نم منجر به افزایش اتلاف توان در قطب‌ها می‌شود. هنگامی که با افت جریان پیل سوختی مواجه هستیم، مولکول‌های آب هم در کاتد تولید می‌شوند و از آند به کاتد نیز توسط یون‌های هیدروژن انتقال می‌یابند. هنگامی که غلظت آب در کاتد افزایش می‌یابد، گرادیان غلظت باعث می‌شود تا آب از کاتد به سمت آند نفوذ کند.

<sup>۱</sup> power Transient Response

آشفته‌گی در رطوبت پیل سوختی می‌تواند توسط مکانیزم‌های متفاوتی ایجاد شود که عبارتند از: جمع شدن آب در هنگام افزایش بار، تغییرات در فشار مطلق و نسبی واکنش دهنده‌های داخل غشا، تغییرات دبی هوا، تغییرات دمای بدنه که باعث تغییر دمای اشباع بخار می‌شود. این مکانیزم‌ها باعث می‌شوند تا یک تقابل قوی و غیرخطی بین وظایف کنترل رطوبت، حلقه مدیریت توان و حلقه مدیریت حرارت ایجاد شود. ۲۰ تا ۴۰٪ افت توان در اثر عدم رطوبت زنی مناسب ایجاد می‌شود.

### سیستم مدیریت توان

این سیستم کشتش توان را از بدنه پیل سوختی کنترل می‌کند. بدون در نظر گرفتن مدیریت قدرت جریان بار درخواستی از سیستم را می‌توان به عنوان یک آشفته‌گی برای سیستم پیل سوختی نشان داد. جریان کشیده شده از سیستم پیل سوختی تاثیر مستقیم روی تمامی زیر شاخه‌های دیگر دارد اگر یک باتری به عنوان منبع توان دیگر در سیستم به کار رود مدیریت قدرت بین دو منبع توان باید گونه‌ای باشد که پاسخ مناسبی به کشتش درخواستی وسیله نقلیه در هر شرایطی بدهد، به شرایط بازده بهینه برسد و به سیستم پیل سوختی کمک کند.

### سیستم پردازش سوخت

کامبود تجهیزات زیر بنایی برای سوخت‌گیری، پخش و ذخیره‌سازی هیدروژن این زیرشاخه را به بخش مهمی از سیستم پیل سوختی بدل می‌کند. متانول، بنزین، هیدروژن مایع و گاز طبیعی به عنوان نمونه‌هایی از سوخت‌های مورد نیاز پیل سوختی هستند.

اجزا و تنظیم کننده‌های کنترلی اضافی که با سیستم پردازش سوخت وارد مساله می‌شوند باعث پیچیدگی بیشتر مساله کنترلی ما می‌شوند. به‌علاوه متغیرهای پیل سوختی، متغیرهای پردازش سوخت نیز احتیاج به کنترل دارند که شامل دمای واکنش‌ها و نیز غلظت هیدروژن و مونواکسید کربن در جریان گاز است.

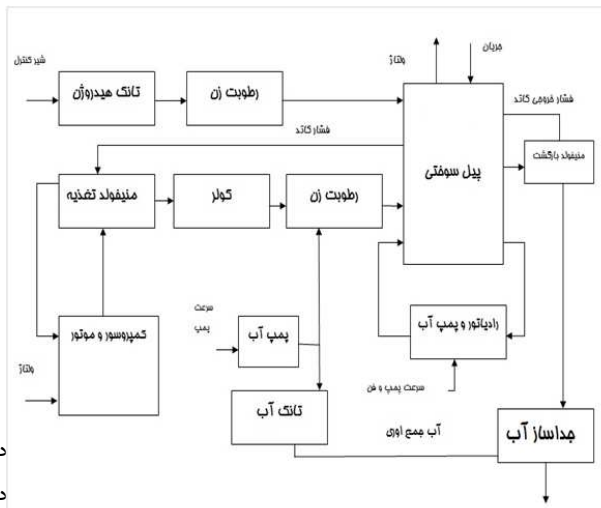
برای ساختن یک سیستم تولید توان پیل سوختی علاوه بر پیل سوختی به یک کمپرسور و موتورالکتریکی برای رسیدن به فشار و دبی هوای مورد نظر نیازمندیم. نرخ جریان واکنش دهنده‌ها، فشار کل کاتد و آند پیل سوختی، فشار جزئی واکنش دهنده‌ها، دما و رطوبت الکترولیت اصلی‌ترین پارامترهایی هستند که باید تنظیم شوند تا به اهداف زیر برسیم:

۱. پاسخ سریع سیستم به محرک‌های زودگذر، گرم شدن موفق و خاموشی مطمئن سیستم.
۲. توانایی سیستم در اصلاح کردن ولتاژ تولیدی هنگام تغییر توان [۱].

اجزا اصلی کنترل، ولتاژ کمپرسور برای تنظیم فشار و دبی هوای ورودی، شیر کنترل فشار جزئی هیدروژن ورودی به پیل سوختی، پمپ آب یا سرعت فن رادیاتور برای تنظیم دما و رطوبت‌ساز برای کنترل رطوبت هستند. پارامترها مستقل نیستند و روی یکدیگر تاثیر می‌گذارند. مدل‌سازی پیل سوختی شامل چهار بخش است که روی همدیگر تاثیر دارند و عبارتند از: مدل ولتاژ پیل-

قطبی	
حد اکثر توان	67 kW
حد اکثر گشتاور	190 N.m
بازده نامی	91%
دور بیشینه	12500 RPM

سوختی، مدل جریان آند، مدل جریان کاتد و مدل هیدراسیون غشا شکل (۳).



شکل ۳: نمودار جعبه‌ای سیستم تولید توان

که در رابطه‌ی فوق  $R_a$ ، مقاومت آرمیچر،  $k_m$  ثابت موتور،  $\Phi_{motor}$  دبی مغناطیسی عبوری از هسته‌ی آرمیچر برحسب وبر و  $\omega_{rotor}$  سرعت دورانی روتور برحسب رادیان بر ثانیه است. مقدار گشتاور تولیدی موتور به صورت تابعی از جریان موتور در رابطه‌ی (۲) آمده است.

(۲)

$$T_{or_{motor}} = k_m \Phi_{motor} I_{motor}$$

همان گونه که از روابط (۱) و (۲) مشخص است، هنگامی که سرعت دورانی روتور صفر باشد به علت نبودن ولتاژ ضد محرکه مقدار گشتاور و جریان موتور حداکثر خواهد بود. می‌توان گشتاور موتور را با رابطه‌ی (۳) بیان نمود.

$$T_{or_{motor}} = \frac{k_m \Phi_{motor}}{R_a} V_{st} - \left( \frac{k_m \Phi_{motor}}{R_a} \right)^2 \omega_{rotor} \quad (3)$$

q را به عنوان پارامتر مشخصه‌ی موتور به شکل زیر تعریف می‌کنیم:

(۴)

$$q = \frac{k_m \Phi_{motor}}{R_a}$$

در این مطالعه برای موتور الکتریکی مقدار  $q = 1,1018$  در نظر گرفته می‌شود [۱۱]. با استفاده از روابط به دست آمده برای جریان و گشتاور موتور الکتریکی، توان تولیدی موتور الکتریکی با استفاده از رابطه‌ی (۵) به دست می‌آید.

(۵)

$$p = \eta_{motor} I_{motor} V_{st}$$

گشتاور تولیدی موتور الکتریکی از رابطه‌ی (۶) محاسبه می‌شود.

$$T_{or_{motor}} = q V_{st} - (q)^2 \omega_{rotor} \quad (6)$$

طرحواره‌ی ای از سیستم تولید توان در شکل (۴) نشان داده شده است.

### مدل سازی سیستم انتقال قدرت

ولتاژ تولیدی در پیل سوختی و ولتاژ ذخیره شده در باتری به منظور حرکت خودروی پیل سوختی به کار می‌رود. در خودروهای هیبریدی پیل سوختی از یک باتری<sup>۲</sup> برای هیبرید کردن خودرو استفاده می‌شود [۳]. سیستم انتقال قدرت خودرو شامل موتور الکتریکی، جعبه‌دنده و دیفرانسیل است. یک مدل DC/DC برای تولید جریان مناسب موتور الکتریکی نیز به کار می‌رود.

### مدل سازی موتور الکتریکی

برای مدل سازی موتور الکتریکی به کار رفته در خودرو به مشخصات موتور نیاز داریم. اطلاعات لازم در مورد موتور الکتریکی مورد استفاده مطابق مشخصات موتور الکتریکی خودروی فورد P2000 که در جدول (۱) آمده است [۱۱].

مقدار جریان در یک موتور DC برابر اختلاف ولتاژ تغذیه (ولتاژ تولیدی پیل سوختی) و ولتاژ ضد محرکه تقسیم بر مقاومت آرمیچر است. رابطه‌ی (۱) برای محاسبه‌ی جریان به کار می‌رود.

(۱)

$$I_{motor} = \frac{V_{st}}{R_a} - \frac{k_m \Phi_{motor}}{R_a} \omega_{rotor}$$

جدول ۱: مشخصات موتور الکتریکی

نوع موتور	سه فاز و چهار
-----------	---------------

1 Membrane Hydration  
2 Ultra capacitor

$$Tor_m = \frac{Tor_w}{i_G} \quad (14)$$

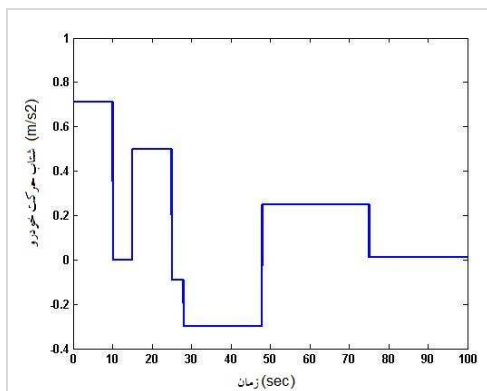
اطلاعات فنی خودرو و استفاده شده در شبیه‌سازی در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲): مشخصات فنی به کار رفته برای شبیه‌سازی خودروی سمند سورن

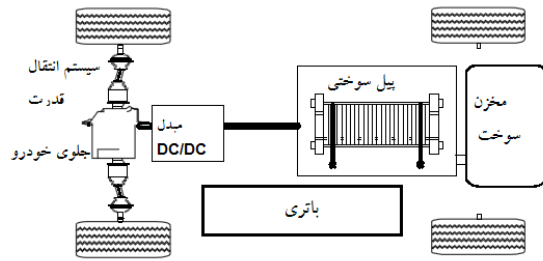
۱	نسبت دیفرانسیل	۳۲۰ سلول ۸۰ کیلو وات	پیل سوختی
۸	نسبت گیربکس	۸۰ کیلووات - ۲۸۸ ولت	موتور الکتریکی
۱۷۲۰ (mm)	عرض خودرو	۱۳،۹ آمپر - ۲۵ کیلووات	باتری
۲۶۷۱ (mm)	فاصله دو محور	۰،۲۲	ضرب درگ
۴۵۲۷ (mm)	طول خودرو	185/65 R15	نوع تایر
۱۴۶۰ (mm)	ارتفاع خودرو	۱۲۲۰ (kg)	جرم خودرو

### شبیه‌سازی حرکت خودروی پیل سوختی

به منظور شبیه‌سازی حرکت یک خودرو با قوای محرکه پیل سوختی، یک پروفیل شتاب‌گیری که در شکل (۵) نشان داده شده است، به عنوان ورودی به سیستم اعمال می‌شود. این حرکت به‌رویی مسیر بدون شیب انجام می‌شود. اطلاعات فنی به کار رفته در این شبیه‌سازی در جدول (۲) نشان داده شده است.



شکل ۵: الگوی شتاب‌گیری خودروی سمند



شکل ۴: طرحواره‌ی تولید توان خودرو

### مدل‌سازی نیروهای وارد به خودرو و سیستم انتقال قدرت

این مدل به محاسبه‌ی نیروهای وارد بر خودرو در طی یک سیکل شتاب‌گیری محدود و در ادامه محاسبه‌ی سرعت دورانی موتور و سرعت خودرو می‌پردازد. در این مدل موازنه نیروهای وارد بر خودرو به صورت زیر آمده است.

(۷)

$$F_T = m_w \cdot a_G + F_R + F_T + F_G$$

که در رابطه‌ی بالا،  $F_T$  نیروی کشش خودرو برحسب نیوتن،  $m_w$  جرم خودرو،  $F_R$  نیروی مقاومت هوا،  $F_T$  نیروی حاصل از اصطکاک و  $F_G$  نیروی حاصل از گرانش است. روابط (۸) تا (۱۰) برای محاسبه‌ی نیروهای وارد بر خودرو به کار می‌روند.

$$F_R = 0.5 \rho_a A_f C_d V_{vehicle}^2 \quad (8)$$

$$F_T = V_{vehicle} C_r m_w g \cos \theta \quad (9)$$

$$F_G = m_w g \sin \theta \quad (10)$$

در روابط فوق،  $A_f$  سطح موثر خودرو برحسب متر مربع،  $C_d$  ضریب ایرودینامیک بین هوا و سطح خودرو،  $V_{vehicle}$  سرعت خودرو برحسب متر بر ثانیه،  $C_r$  ضریب اصطکاک بین سطح جاده و تایر و  $\theta$  شیب جاده برحسب رادیان است. روابط (۱۱) و (۱۲) برای محاسبه‌ی گشتاور کششی خودرو و سرعت دورانی چرخ‌ها در زیر آمده است.

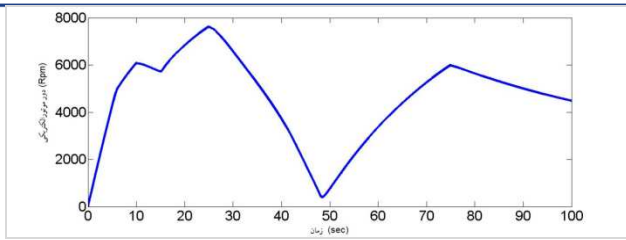
$$Tor_w = F_T r_w \quad (11)$$

$$\omega_w = \frac{V_{vehicle}}{r_w} \quad (12)$$

که در این روابط  $r_w$  شعاع دینامیکی چرخ و  $\omega_w$  سرعت دورانی چرخ است. در این خودرو سیستم انتقال قدرت شامل تنها یک مجموعه جعبه چرخ‌دنده با نسبت دنده‌ی ۱۰:۱ است.

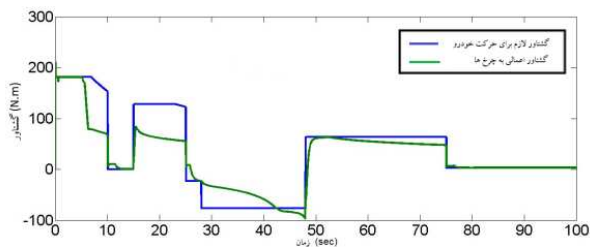
$$\omega_m = \frac{V_{vehicle}}{r_w} i_G \quad (13)$$

که در رابطه‌ی فوق  $\omega_m$  سرعت دورانی روتور و  $i_G$  نسبت دنده‌ی چرخ‌دنده است.



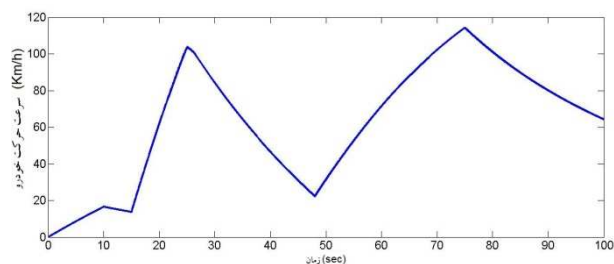
شکل ۸: دور موتور الکتریکی

دور موتور الکتریکی خوددور که تابعی از مقدار گشتاور درخواستی از موتور الکتریکی است در شکل (۸) آمده است. مقدار گشتاور لازم در چرخ ها برای حرکت خوددور و نیز گشتاور انتقالی به چرخ ها در شکل (۹) آمده است. همان گونه که مشاهده می شود گشتاور انتقالی با کمترین خطا با گشتاور لازم برابری می کند. در هنگام شتاب گیری های ناگهانی زمان لازم برای رسیدن به مقدار گشتاور لازم اندکی طولانی است.

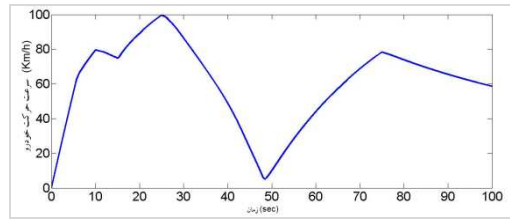


شکل ۹: گشتاور انتقالی به چرخ ها و گشتاور سر چرخ لازم برای حرکت خودرو

شکل (۱۰) سرعت خوددور تحت همان الگوی شتاب (تنها تفاوت الگوی شتاب این است که در بازه ی ۱۰ ثانیه ای شروع حرکت شتاب حرکت  $0.1 (m/s^2)$  است و شتاب ترمزگیری  $-0.1 (m/s^2)$  است) و در سطحی با شیب ۳ درجه نشان می دهد. به علت استفاده شدن از باتری در هر لحظه توان در دسترس بیشتری برای موتور الکتریکی وجود دارد. این خوددور در مقایسه با خوددوری مورد تحلیل شده در فصل چهارم دارای پیل سوختی با سلول کمتری است، اما در هر لحظه توانایی تولید توان بیشتری را دارد.

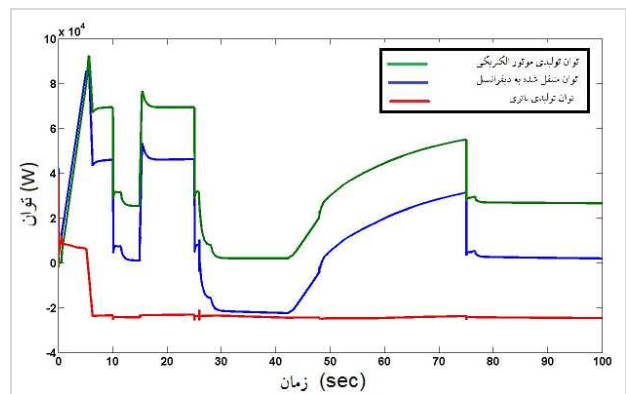


شکل ۱۰: سرعت حرکت خودرو در سطح شیب دار



شکل ۶: سرعت خوددوری سمند در ۱۰۰ ثانیه حرکت

سرعت خوددور تحت پروفیل شتاب گیری ارائه شده در شکل (۵) در شکل (۶) نشان داده شده است. این خوددور به علت داشتن جرم کم دارای خاصیت شتاب گیری سریع تر و نیز ترمز مطمئن تری است. در این خوددور و با استفاده از تجربیات بدست آمده سیستم تولید توان خوددور به گونه ای طراحی شده است، که در هر لحظه توانایی تولید توان برای شرایط شتاب گیری سریع یا حرکت روی شیب تند به مقدار کافی وجود دارد.



شکل ۷: توان تولیدی در خوددور

شکل (۷) توان تولیدی موتور الکتریکی، توان منتقل شده به دیفرانسیل خوددور و نیز جریان توان در باتری را نشان می دهد. در ۶ ثانیه اولیه حرکت و برای غلبه بر اینرسی سکون خوددور باتری و موتور الکتریکی در حال تولید توان برای حرکت خوددور هستند و پس از آن همواره مقداری از توان تولیدی موتور الکتریکی در حال ذخیره در باتری (توان منفی باتری در شکل نشان گر انتقال توان به باتری) است. توان ذخیره شده در باتری هنگام شتاب گیری های سریع و نیز شیب روی به کمک سیستم تولید توان پیل سوختی می آید.



[3] J.J. Hwang, D.Y. Wang, N.C. Shih "Development of a lightweight fuel cell vehicle" Journal of Power Sources, 141, 108–115, 2005.

[4] N. Yamaguchi, A. Iwai, T. Fukushima, H. Shinoki "New Drive Motor for Fuel Cell Vehicle FCX Clarity" SAE Paper, 2009-01-1001, 2009.

[5] H. Morikawa, H. Kikuchi, N. Saito "Development and Advances of a V-Flow FC Stack for FCX Clarity" SAE Paper, 2009-01-1010, 2009.

[6] M. Matsunaga, T. Fukushima, K. Ojima "Advances in the Power train System of Honda FCX Clarity Fuel Cell Vehicle" SAE Paper, 2009-01-1012, 2009.

[7] N. Yamaguchi, A. Iwai, T. Fukushima, H. Shinoki "New Drive Motor for Fuel Cell Vehicle FCX Clarity" SAE Paper, 2009-01-1001, 2009.

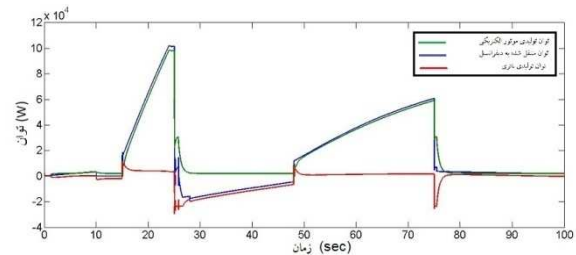
[8] A. Schell, H. Peng, D. Tran, E. Stamos, C.C. Lin, M.J. Kim "Modelling and Control Strategy Development for FC Electric Vehicles" Annual Reviews in Control, 29, 159–168, 2005.

[9] J. Marshall, M. Kazerani "Design of an Efficient Fuel Cell Vehicle Drive train, Featuring a Novel Boost Converter" IEEE Control Systems Magazine, 0-7803-9252-3, 2005.

[10] T. Yalcinoz, M. Alam "Improved Dynamic Performance of Hybrid PEM Fuel Cells and Ultra Capacitors for Portable Applications" International Journal of Hydrogen Energy, 33, 1932-1940, 2008.

[11] J.A. Adams, W.C Yang, K.A. Oglesby, K.D. Osborne "The Development of Ford's P2000 FC Vehicle" SAE Paper, 2000-01-1061, 2000.

شکل (۱۱) توان تولیدی خودرو هنگام شیب‌روی را نشان می‌دهد. از آن‌جایی که هنگام شیب‌روی توان بیشتری برای حرکت خودرو لازم است در این حرکت شارژ باتری فقط هنگام ترمزگیری انجام می‌شود و در سایر شرایط تمام توان تولیدی صرف حرکت خودرو می‌شود. در ثانیه های ۱۶ و ۲۵ که خودرو ناگهان شتاب مثبت می‌گیرد از توان ذخیره شده در باتری برای تامین توان خودرو استفاده می‌شود.



شکل ۱۱: توان تولیدی در خودرو هنگام حرکت در سطح شیب‌دار

### نتیجه‌گیری

برنامه ریزی کمپانی‌های خودروسازی بزرگ جهان برای تولید انبوه خودروهای پیل سوختی تا سال ۲۰۲۰ است. از این رو تلاش زیادی در سال‌های اخیر برای پیشرفت و بسترسازی برای تولید این خودروها انجام شده است. در این مقاله و با استفاده از اطلاعات خودروی سمند سورن یک خودروی ساخت ایران مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده است و از نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود که این خودرو قابلیت نصب تجهیزات پیل سوختی و حرکت با این منبع انرژی را دارد.

در این تحقیق با استفاده از اطلاعات خودروی سمند سورن یک خودروی پیل سوختی ساخت ایران مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده است و از نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که این خودرو قابلیت نصب تجهیزات پیل سوختی و حرکت با این منبع انرژی را دارد.

در خودروهای هیبرید با قوای محرکه‌ی پیل سوختی در هنگام شتاب‌گیری خودرو، بخشی از توان مورد نیاز توسط باتری خودرو تامین می‌شود و این باعث دوری سیستم از چگالی جریان بالا می‌شود. پاسخ سیستم به تغییرات شتاب حداکثر ۰/۴۵ ثانیه است که برای یک خودرو زمان مناسبی می‌باشد.

### مراجع

- [1] J.T. Pukrushpan, A.G. Stefanopoulou, H. Peng "Control of FC Breathing" IEEE Control Systems Magazine, 0272-1708, 30 – 46, 2004.  
[2] [http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel\\_cell\\_vehicle](http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell_vehicle).