

کنترل و مدیریت انرژی در سیستم محرکه رانشی خودروهای الکتریکی هیبریدی با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی

حسین آزادی خیرآبادی، محمد رضا ماشین چی

بخش علوم کامپیوتر، دانشگاه شهید کرمان باهنر کرمان

بخش علوم کامپیوتر، دانشگاه پیام نور مرکز کرمان، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران، ایران

چکیده

با توجه به ارتقاء فناوری، خودروهای الکتریکی هیبریدی به‌عنوان جایگزین مناسبی برای خودروهای متداول، به دلایل گوناگون مورد توجه بسیاری قرار گرفته شده‌اند. به طور کلی خودروهای الکتریکی هیبریدی به خودروهایی اطلاق می‌شوند که برای رانش از بیش از دو منبع تولید توان استفاده می‌کنند. در این عرصه رقابت اصلی تولیدکنندگان، در خصوص طراحی سیستم کنترل این نوع خودروها است. سیستم کنترل مبتنی بر مدیریت انرژی منابع چندگانه و تولید توان این خودروها است که می‌بایست الزاماتی را که وابستگی نزدیکی به ساختار سیستم محرکه رانشی، مشخصات و المان‌های خودرو دارد را برآورده کند.

در این مقاله با بهینه‌سازی توابع عضویت فازی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری جستجوی گرانشی، سطح شارژ باتری را در حد قابل قبول نگه داشته و همچنین مصرف سوخت را کاهش می‌دهد.

Mathematics Subject Classification (2010): 62A86 , Email: mashinchi@pnu.ac.ir.

عبارات و کلمات کلیدی: استراتژی مدیریت انرژی، الگوریتم جستجوی گرانشی، شبکه عصبی، خودروهای الکتریکی هیبریدی، کنترلر منطق فازی

۱ مقدمه

در دنیای امروزی وسایل نقلیه نقش اساسی را در زندگی انسان‌ها ایفا می‌کنند و همچنین می‌توان گفت که زندگی بدون آن با دشواری زیادی همراه است. نظر به اینکه اکثر خودروهای متداول از سوخت‌های فسیلی جهت رانش خود استفاده می‌کنند و با توجه به مشکلات ناشی از خودروهای سوخت فسیلی، پژوهش روی دیگر خودروها حایز اهمیت می‌گردد. در این زمینه خودروهایی با سلول سوختی هیدروژنی و یا الکتریکی می‌توانند به‌عنوان جایگزینی برای موتورهای احتراق داخلی باشند. ولی هر کدام از این خودروها مشکلات خاص خودشان را دارند. به‌عنوان مثال خودروهای الکتریکی گستره محدودی دارند و شارژ آنها زمانبر است [۱، ۳]. همچنین خودروهایی که از سلول سوختی استفاده می‌کنند، گرچه می‌توانند به راحتی سوخت‌گیری کنند ولی امنیت کار با هیدروژن پایین است زیرا این خودروها برای سوخت‌گیری باید به ایستگاه‌های سوخت هیدروژنی منتقل شوند و هیدروژن به شدت آتشگیر است [۱، ۳]. به دلایل ذکر شده فناوری‌های مربوط به این خودروها، کاملاً توسعه نیافته‌اند تا بتوانند به طور کامل جایگزین خودروهای مرسوم گردند. از این رو خودروهای الکتریکی هیبریدی فناوری نوید بخشی است که فاصله میان خودروهای با احتراق داخلی^۱ (IEC) مرسوم و خودروهایی با سوخت جایگزین را پر می‌کنند [۱، ۳]. البته با وجود اینکه بیش از ۱۰۰ سال است که از ساخت خودروهای الکتریکی هیبریدی می‌گذرد، ولی این خودروها تنها در دو دهه اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند [۸]. انتظار می‌رود که خودروهای الکتریکی هیبریدی راه حلی سریع برای مشکلات اقتصادی سوخت و کاهش انتشار گازهای خطرآفرین توسط اتومبیل‌های مرسوم باشند.

بر خلاف وسایل نقلیه زمینی دیگری که از موتور احتراق داخلی استفاده می‌کنند، خودروهای الکتریکی هیبریدی از یک موتور داخلی و یک موتور الکتریکی که بوسیله باتری تغذیه می‌شود، بهره می‌گیرد. با اینکه خودروهای الکتریکی هیبریدی از موتور الکتریکی استفاده می‌کنند، در مقایسه با خودروهای الکتریکی به شارژ خارجی احتیاجی ندارند. تعبیه یک موتور الکتریکی^۲ (EM) کمک می‌کند که موتور احتراقی در زمان روشن شدن و شتاب‌گیری ناگهانی، در نقطه کاری‌اش به حالت بهینه عمل کند. چون موتور الکتریکی گشتاور مورد نیاز چرخ‌ها را در سرعت‌های نزدیک به صفر تأمین می‌کند، موجب کاهش اندازه موتور و هموارسازی با آن می‌شود و عملکرد سیستم حفظ می‌شود [۱، ۳]. علاوه بر آن انرژی حرارتی که زمان کاهش شتاب و ترمزگیری تولید می‌شود، به صورت انرژی الکتریکی بازیابی می‌شود. انرژی بازیابی شده در شارژ باتری مورد استفاده قرار می‌گیرد تا بعداً استارت و موتور الکتریکی از آن بهره بگیرند، لذا بازدهی کلی خودروهای الکتریکی هیبریدی افزایش می‌یابد [۱، ۳]. در سال ۱۸۹۸ فردیناند پورشه، خودروی مدل لوهرن

^۱Internal Combustion Engine

^۲Electric Motor

پورشه^۳ را طراحی کرد. این خودرو، اولین خودروی هیبریدی از نوع سری ۴ بود که یک موتور درون‌سوز از طریق ژنراتور، ۴ موتور الکتریکی را روی ۴ چرخ به حرکت در می‌آورد. این خودرو برای اولین بار در سال ۱۹۰۰ در نمایشگاه جهانی خودروی پاریس به نمایش گذاشته شد. از مزایای خودروهای الکتریکی هیبریدی در مقایسه با سایر خودروها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۳، ۱].

رسیدن به صرفه جویی در مصرف سوخت، کاهش آلایندگی، عملکرد رانشی خوب و کاهش تلفات انرژی. در حال حاضر سه نوع ترکیب‌بندی اصلی که در خودروهای هیبریدی موجود در بازار استفاده می‌شود، عبارتند از: ترکیب‌بندی سری، ترکیب‌بندی موازی و ترکیب‌بندی سری-موازی (تقسیم توان) [۳، ۱]. در مورد خودروهای الکتریکی هیبریدی مسأله‌ای که بسیار اهمیت دارد، مسأله کنترل این خودروها است که یکی از بروزترین چالش‌های کارشناسان صنعت خودروسازی است که تمرکز اصلی در طراحی خودروهای الکتریکی هیبریدی را از آن خود کرده است. استراتژی کنترلی تعیین می‌کند که در هر لحظه کدام منبع توان با توجه به شرایط فعلی رانش خودرو، توان مورد نیاز سیستم محرکه را تأمین نماید. در واقع می‌توان گفت هدف اصلی استراتژی کنترل، مدیریت لحظه‌ای انتقال توان بین منابع انرژی، جهت برآورده‌سازی بعضی از اهداف عملکردی خودروها مثل مینیم کردن مصرف سوخت، کاهش آلودگی، افزایش طول عمر اجزای خودرو و افزایش قابلیت اطمینان رانشی خودرو است. بنابراین می‌توان گفت که رقابت و دغدغه اصلی سازندگان خودروهای الکتروهیبریدی در خصوص طراحی سیستم کنترل این خودروها توسط الگوریتم‌های کنترلی است [۳، ۱]. مهم‌ترین الگوریتم‌های کنترلی برای حل مسائل برنامه‌ریزی غیرخطی، الگوریتم‌های مبتنی بر بهینه‌سازی هستند. از جمله الگوریتم‌های مبتنی بر بهینه‌سازی که در این مقاله نیز برای کاهش مصرف انرژی و سوخت در خودروهای هیبریدی مورد استفاده قرار گرفته است، الگوریتم‌های فراابتکاری است. امروزه انواع مختلفی از روش‌های فراابتکاری ارائه شده است. یکی از روش‌های فراابتکاری مورد نظر که در این مقاله بعنوان یک استراتژی کنترلی و مدیریت انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش فراابتکاری جستجوی گرانشی (GSA) است [۲، ۶، ۲۱، ۱۶].

۲. مروری بر پژوهش‌های انجام شده

تا به حال پژوهش‌های زیادی بر روی ماشین‌های هیبریدی انجام شده است که می‌توان به‌عنوان مثال به برخی از این تحقیقات اشاره کرد مثلاً با توجه به وضعیت پدال گاز یک استراتژی قانون محور روشن-خاموش کردن موتورینزینی در [۱۱] ارائه شده است. امروزه از سیستم‌های فازی برای بهینه‌سازی سیستم عملکردی کنترلی و مدیریت انرژی در خودروهای الکتروهیبریدی به وفور استفاده شده است. از

³Lohner Porche

جمله در [۱۳، ۱۴] از منطق فازی برای مدیریت انرژی و مصرف سوخت در سیستم‌های الکتروهیبریدی استفاده کرده‌اند. استراتژی‌های بهینه‌سازی معمولاً پیچیده‌تر و دقیق‌تر از استراتژی‌های قانون‌محور هستند. بسیاری از این استراتژی‌ها، ریاضیات پیچیده و حجم محاسبات بالایی دارند. بنابراین بسیاری از استراتژی‌های بهینه‌سازی غیرعلنی می‌باشند. در این استراتژی‌ها یک تابع هزینه‌ی ریاضی تعریف شده را مینیمم کرده و متغیرهای کنترلی مورد نیاز بدست می‌آورند [۷].

یکی دیگر از استراتژی‌های بهینه‌سازی که بسیار مورد توجه است روش برنامه‌ریزی دینامیکی می‌باشد [۱۷، ۱۹]. برنامه‌ریزی دینامیکی با روش‌های عددی سعی در مینیمم کردن تابع هزینه دارد. بنابراین بسیار زمانبر بوده و حجم محاسبات بالایی دارد. بنابراین روش‌هایی نظیر برنامه‌ریزی دینامیکی دو سطحی برای کاهش این مشکلات پیشنهاد شده است [۹، ۱۰]. در [۱۲، ۱۸] به ترتیب استراتژی بهینه کلی مبتنی بر روش‌های برنامه‌ریزی دینامیکی و روش کلاسیک تغییرات^۴ پیشنهاد شده است. در [۲۰] استراتژی کنترلی بهینه‌سازی آنی بر اساس روش کمینه‌سازی مصرف سوخت معادل پیشنهاد شده است. استراتژی کنترلی بهینه‌سازی آنی انرژی مصرفی باتری را با انرژی حرارتی سوخت برابر قرار می‌دهد و در هر لحظه مصرف سوخت کلی را به‌عنوان تابع برازش در نظر می‌گیرد تا متغیرهای کنترل را حل کند و تحت شرایط سیکل رانشی نامعلوم در هر لحظه به کمینه‌سازی مصرف سوخت بپردازد [۲۰].

. دو روش مورد استفاده برای طراحی سیستم کنترلی خودروهای الکتروهیبریدی به منظور مدیریت و بهبود مصرف انرژی به صورت زیر است:

۱- استفاده از ترکیب بندی موازی خودروهای الکتروهیبریدی در طراحی سیستم کنترلی مورد نظر [۱، ۳].

۲- استفاده از کنترل کننده فازی با ۳ ورودی برای ایجاد یک کنترل کننده توزیع توان موتور به منظور بهبود مصرف سوخت و انرژی در خودروهای الکتروهیبریدی موازی [۱، ۳].

⁴ Classical Variation

۱.۲ مدل موازی خودروهای الکتروهیبریدی

در این مدل، موتور احتراقی و موتور الکتریکی هر دو هم زمان یا مستقل، بسته به شرایط حاکم، به چرخ‌ها توان می‌دهند. این سیستم به دلیل توان‌دهی موازی به چرخ‌ها، هیبرید موازی نامیده می‌شود. در این سیستم غالباً موتور احتراقی چرخ‌ها را می‌راند، مگر اینکه به آستانه توان برسد و در این موقع همچون زمان روشن شدن و شتاب‌گیری که توان زیادی مورد نیاز است، موتور الکتریکی به کمک موتور احتراقی می‌آید. مدل موازی معایب مدل سری را اصلاح می‌کند [۱۲]. شرکت‌های هوندا و هیوندا دو تولیدکننده شناخته شده اتومبیل‌های شخصی مدل موازی هستند. زمانی که خودرو به صورت مدل موازی کار می‌کند، موتور احتراقی با چرخ‌ها کوپل می‌شود لذا گشتاور کلی خروجی در چرخ‌ها به صورت زیر خواهد بود.

$$T_W = i_f i_g T_e + i_f i_m (1) \quad (1)$$

و قید سرعت که لازمه کوپل گشتاوری است به صورت

$$\frac{v}{r_w} = \frac{w_m}{i_f i_m} = \frac{w_e}{i_f i_g} \quad (2)$$

نشان داده می‌شود که در آن T_W ، T_e ، w_e ، T_m ، w_m ، v و i_g به ترتیب گشتاور کلی خروجی در چرخ‌ها، گشتاور موتور احتراقی، سرعت دورانی موتور، گشتاور موتور الکتریکی، سرعت دورانی موتور الکتریکی، سرعت خودرو و نسبت چرخ دنده هستند. i_f نسبت چرخ دنده محرک نهایی، i_m نسبت چرخ دنده موتور الکتریکی در کوپل گشتاوری و r_w شعاع لغزش تایر است. لذا تا زمانی که v و i_g داده شده باشند، می‌توان با استفاده از معادله (۲) مقادیر w_e و w_m را متغیرهای معلومی دانست. در بخش‌های بعدی پژوهش‌های انجام شده در این مقاله ارائه داده شده است.

۲.۲ کنترل‌کننده فازی با ۳ ورودی

یک سیستم فازی از مجموعه‌ای از قواعد اگر-آن‌گاه فازی ساخته می‌شود [۴، ۵، ۲۲]. از آنجا که سیستم فازی به‌عنوان کنترل‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد، آن را کنترل‌کننده فازی نیز می‌نامند که این امر منجر به پیشرفت و شناسایی نظریه فازی شده است. به طور خلاصه نقطه شروع ایجاد یک سیستم فازی، بدست آوردن مجموعه‌ای از قواعد اگر-آن‌گاه فازی از دانش افراد خبره یا دانش حوزه مورد بررسی است. مرحله بعد، ترکیب این قواعد در یک سیستم واحد است. همانطور که اشاره شد، کنترل‌کننده‌های فازی به دلیل سادگی در طراحی و اجرا در کاربردهای مختلف گسترش یافته‌اند. با این حال به دلیل عدم وجود روشی

منظم برای طراحی و تنظیم توابع عضویت، اغلب از روش سعی و خطا برای تنظیم آن‌ها استفاده می‌شود. این امر، بویژه زمانی که تعداد توابع عضویت زیاد باشند و یا دینامیک سیستم پیچیده و غیر خطی باشد همچون مبحث خودروهای هیبریدی امری طاقت فرسا است.

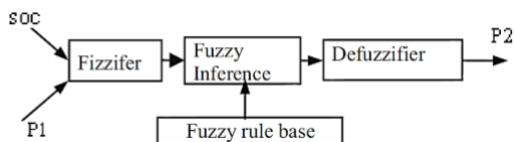
در این مقاله از یک کنترل‌کننده فازی با ۳ ورودی و یک خروجی استفاده شده است. ورودی‌ها عبارتند

از

۱- P_1 توان درخواستی زنجیره توان هیبریدی.

۲- SOC باتری.

۳- نیروی لازم برای ترمز چرخ‌های جلو و عقب و خروجی توان تولیدی موتور احتراقی مطلوب است. ورودی‌های عددی به متغیرهای فازی زبانی تبدیل می‌شوند و از طریق مقادیر فازی و قوانین فازی موجود، موتور استنتاج مقادیر کنترلی زبانی را تولید می‌نماید. چون نتایج استنتاج زبانی نمی‌توانند مستقیماً در عملگر استفاده شوند، طی فرایند غیر فازی‌سازی به خروجی‌های عددی تبدیل می‌شوند؛ به عبارتی توان مورد نیاز از موتور احتراق داخلی بدست می‌آید. در شکل ۱ ترکیب‌بندی کنترل فازی تنها با ۲ ورودی نشان داده شده است که در روش پیشنهادی ورودی سوم (نیروی لازم برای ترمز چرخ‌های جلو و عقب) نیز به آن اضافه می‌شود.



شکل ۱: ترکیب‌بندی پیشنهادی کنترل‌کننده فازی با ۳ ورودی از طریق استنتاج فازی

۳ روش پیشنهادی

روش پیشنهادی مورد استفاده برای طراحی سیستم کنترلی خودروهای الکتروهیبریدی به منظور مدیریت و بهبود مصرف انرژی به صورت زیر است:

۱- استفاده از ترکیب‌بندی موازی خودروهای الکتروهیبریدی در طراحی سیستم کنترلی مورد نظر [۳، ۱].

۲- استفاده از کنترل‌کننده فازی با ۳ ورودی برای ایجاد یک کنترل‌کننده توزیع توان موتور به منظور بهبود مصرف سوخت و انرژی در خودروهای الکتروهیبریدی

موازی [۳، ۱].

۳- استفاده از الگوریتم فراابتکاری جستجوی گرانشی برای بهینه کردن توابع عضویت مورد استفاده در کنترل‌کننده فازی [۲۱].

۱.۳ الگوریتم جستجوی گرانشی

در اینجا به کمک الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی روشی برای تنظیم بهینه توابع عضویت ارائه شده است. الگوریتمی که در این مقاله برای تنظیم بهینه توابع عضویت در سیستم فازی خودروهای الکترو هیبریدی مورد استفاده قرار گرفته است، الگوریتم جستجوی گرانشی نام دارد [۲، ۶، ۲۱، ۱۶]. این الگوریتم در دو گام کلی زیر توضیح داده می‌شود:

الف- تشکیل یک سیستم مصنوعی با زمان گسسته در محیط مسئله، موقعیت یابی اولیه برای اجسام، وضع قوانین حاکم و تنظیم پارامترها.

ب- گذر زمان، حرکت اجسام و به‌روز رسانی پارامترها تا پیش آمدن زمان توقف سیستم را به صورت مجموعه‌ای از N جسم تصور کنید. موقعیت هر جسم، نقطه‌ای از فضا است که جوابی از مسئله است. موقعیت بعد d از جرم i با x_i^d که در (رابطه (۳)) نشان داده شده است که در آن m بعد مساله است.

$$X_i = (x_i^1, \dots, x_i^d, \dots, x_i^m), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

در این سیستم، در زمان t به جسم i از سوی جسم j در جهت بعد d نیرویی به اندازه $F_{ij}^d(t)$ وارد می‌شود. مقدار این نیرو از رابطه (۴) محاسبه می‌شود. M_{pi} و M_{aj} به ترتیب جرم گرانشی فعال جسم j و جرم گرانشی غیر فعال جسم i می‌باشند، $G(t)$ ثابت گرانش در زمان t و R_{ij} فاصله بین دو جسم i و j هستند. برای تعیین فاصله بین اجسام مطابق رابطه (۵) از فاصله اقلیدسی (نرم ۲) استفاده شده است. ε یک عدد بسیار کوچک است. p توان فاصله است که یک عدد حقیقی بزرگتر از یک می‌باشد. این مقدار غالباً برابر یک در نظر گرفته می‌شود.

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t) \times M_{aj}(t)}{R_{ij}(t)^p + \varepsilon} (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (4)$$

$$R_{ij}(t) = \|X_i(t), X_j(t)\|_p \quad (5)$$

نیروی $F_i^d(t)$ وارد بر جسم i در جهت بعد d در زمان t ، مطابق رابطه (۶) برابر مجموع ضریب‌های تصادفی نیروهایی است که K جسم برتر بر جسم وارد می‌کنند. در این رابطه j یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[0, 1]$ است.

در رابطه (۶) می‌توان مجموع تمام نیروهای وارد بر جسم را در نظر گرفت. اما برای بهبود دادن قدرت کشف الگوریتم، تنها به مجموعه K که شامل K عضو برتر است، اجازه تاثیرگذاری بر سایر اعضا داده می‌شود.

$$F_i^d(t) = \sum_{j \in K, j \neq i} \frac{d}{j} F_{ij}^d(t) \quad (۶)$$

طبق قانون دوم نیوتن، هر جسم در جهت بعد d شتابی می‌گیرد که متناسب با نیروی وارد بر آن جسم در جهت d است. شتاب جسم i در جهت بعد d در زمان t با $a_i^d(t)$ و جرم اینرسی جسم i با M_{ii} نشان داده شده است (رابطه (۷)).

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)} \quad (۷)$$

در رابطه (۸)، سرعت بعدی هر جسم با مجموع ضریبی از سرعت فعلی جسم و شتاب جسم تعریف می‌شود. موقعیت جدید بعد d از جسم i طبق رابطه (۹) محاسبه می‌شود که $v_i^d(t)$ سرعت بعد d جسم i در زمان t است.

$$v_i^d(t+1) = v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (۸)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (۹)$$

که در آن i و j اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[0, 1]$ هستند که برای حفظ خصوصیت تصادفی بودن جستجو استفاده شده‌اند.

شبه کد الگوریتم جستجوی گرانشی در شکل ۲ آورده شده است.

۴ شبیه‌سازی

در این مقاله برای بررسی دقیق‌تر مطالب تئوری ارائه شده، یک سیستم کامل خودروهای الکتروهیبریدی موازی در نرم افزار متلب [۱۵] پیاده‌سازی شده است و نتایج عددی بدست آمده بر اساس وضعیت مصرف

- ۱- تعیین محیط سیستم و مقدار دهی اولیه.
- ۲- جایابی اولیه اجسام.
- ۳- ارزیابی اجسام.
- ۴- به روز رسانی مقادیر G ،
- ۵- محاسبه جرم هر عامل.
- ۶- محاسبه نیروی وارد بر هر جسم.
- ۷- محاسبه شتاب و سرعت هر جسم.
- ۸- به روز رسانی موقعیت اجسام.
- ۹- در صورتی که شرط توقف برآورده نشده، به مرحله ۳ برمی‌گردیم. در غیر این صورت بهترین جواب دیده شده تاکنون به خروجی داده شده و الگوریتم متوقف می‌شود.

شکل ۲: شبه کد مربوط به الگوریتم جستجوی گرانشی

سوخت و مصرف انرژی ثبت می‌شود.

۱.۴ نتیجه استفاده از کنترل کننده فازی با ۳ ورودی در استراتژی مدیریت انرژی

در این بخش یک کنترل کننده طراحی شده است که دارای ۳ ورودی است و نیروی لازم برای ترمز چرخ‌های جلو و عقب را نیز دریافت می‌نماید. نتیجه بدست آمده در این حالت در جدول ۱ مشاهده می‌شود. همانگونه که مشخص است میزان شارژ باتری در این حالت بدون بهینه‌سازی مقدار ۰/۵۴۵ درصد است.

جدول ۱: جدول میزان شارژ باتری نهایی و مصرف سوخت در سیکل رانشی $USSD$ با استفاده از کنترلر فازی

Control Strategy	Fuel Consumption ($L/100 Km$)	State Of Charge(SOC)
This Strategy (Fuzzy)	۴/۵	۰/۵۴۵

کنترل و مدیریت انرژی در سیستم محرکه رانشی خودروهای الکتریکی هیبریدی ————— ۲۰۰

۲.۴ تاثیر الگوریتم جستجوی گرانشی در استراتژی مدیریت انرژی

حال با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی اقدام به بهبود وضعیت کنترل‌کننده و تنظیم توابع عضویت فازی آن می‌نماییم. این الگوریتم به بهترین جواب با ۶۰ بار تکرار الگوریتم نمایش داده می‌شود. نتیجه نشان می‌دهد که با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی و بعد از ۲۷ مرحله تکرار، میزان شارژ باتری^۵ به بهبود ۰/۱۴۶ درصدی نسبت به زمانی که فقط از فازی استفاده می‌شد، رسیده است (جدول ۲).

جدول ۲: جدول میزان شارژ باتری نهایی و مصرف سوخت با استفاده از کنترلر فازی

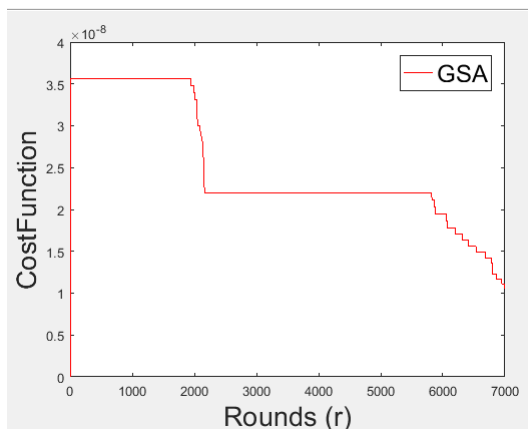
Control Strategy	Fuel Consumption ($L/100 Km$)	State Of Charge(SOC)
This Strategy (Fuzzy)	۴,۵	۰/۵۴۵
This Strategy (Fuzzy-GSA)	۶,۵	۰/۶۹۱

۳.۴ نتایج الگوریتم جستجوی فازی در بهینه‌سازی توابع فازی در ۷۰۰۰ تکرار

در این بخش با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی اقدام به بهبود وضعیت کنترل‌کننده و تنظیم توابع فازی آن می‌نماییم. در این بخش جمعیت اولیه برای الگوریتم جستجوی گرانشی برابر با ۵۰ و میزان حداکثر تکرار برابر ۷۰۰۰ در نظر گرفته شده است. در این حالت ۲۵ متغیر برای بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. همانطور که از نمودار شکل ۳ مشخص است تا تکرار ۲۰۰۰ الگوریتم جستجوی گرانشی تابع هزینه ۳/۶ است و در تکرارهای بین ۶۰۰۰ تا ۷۰۰۰ الگوریتم جستجوی گرانشی بسیار موفق عمل کرده و توانسته تابع هزینه را تا ۱/۱ کاهش دهد. تابع هزینه در واقع مجموع وزن دار میزان مصرف سوخت و تغییرات میزان شارژ باتری است. زمانی تابع هزینه مینیمم خواهد شد که هم مصرف سوخت کم باشد و هم میزان تغییرات میزان شارژ باتری نسبت به مقدار اولیه‌اش حداقل باشد. در این بخش برای تابع هزینه، ضریب مصرف سوخت w برابر با ۰/۲ در نظر گرفته شده است.

در نهایت در جدول ۳ میزان شارژ باتری نهایی و مصرف سوخت در روش‌های پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌ها نشان داده شده است.

⁵State Of Charge(SOC)



شکل ۳: نتایج الگوریتم جستجوی گرانشی در بهینه کردن تابع هزینه با ۷۰۰۰ تکرار

جدول ۳: مقایسه میزان سوخت مصرفی و میزان شارژ باتری نهایی بین روش‌های پیشنهادی و دیگر روش‌های انجام شده

Control Strategy	Fuel Consumption ($L/100 Km$)	State Of Charge(SOC)
Fuzzy-PSO with 2 inputs	۶٫۸	۰٫۶۴۵
Fuzzy-GA with 2 inputs	۷٫۲	۰٫۶۶۳
This Strategy (Fuzzy with 3 inputs)	۴٫۵	۰٫۵۴۵
Fuzzy-PSO with 3 inputs	۶٫۵	۰٫۶۸۹
Fuzzy-GA with 3 inputs	۶٫۶	۰٫۶۸۴
This Strategy (Fuzzy-GSA with 3 inputs)	۶٫۵	۰٫۶۹۱

۵ نتیجه‌گیری

تاکنون الگوریتم‌های کنترلی زیادی برای مدیریت بهینه انرژی در خودروهای هیبریدی الکتریکی ارائه شده است. بسیاری از این روش‌ها به علت حجم بالای محاسبات آن، قابل پیاده‌سازی در شرایط واقعی حرکت نیستند زیرا سیکل رانشی از قبل مشخص نیست، از این رو باید کنترل‌کننده‌ای طراحی نمود تا بتواند بر اساس شرایط واقعی حاکم بر سیستم، عملکرد بهینه را انتخاب نماید. در این مقاله، ابتدا با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی اقدام به یافتن توابع عضویت فازی بهینه برای دو استراتژی مختلف کنترلی شده است. در روش پیشنهادی از یک کنترل‌کننده فازی با ۳ ورودی استفاده شده که دو ورودی به ترتیب شامل میزان شارژ باتری و توان مورد نیاز خودرو و ورودی سوم شامل نیروی لازم جهت ترمزگیری است و

همچنین از الگوریتم فراابتکاری جستجوی گرانشی برای عملیات بهینه‌سازی استفاده شده است. نتایج بدست آمده از بهینه‌سازی توابع عضویت فازی با استفاده از روش الگوریتم جستجوی گرانشی نشان می‌دهد که میزان مصرف سوخت بهتر از دو روش ازدحام جمعیت ذرات و الگوریتم ژنتیک با دو ورودی و همچنین الگوریتم ژنتیک با ۳ ورودی بوده ولی با روش ازدحام جمعیت ذرات با ۳ ورودی برابر می‌باشد و این نشان می‌دهد که میزان مصرف سوخت توسط الگوریتم جستجوی گرانشی با میزان مصرف سوخت توسط الگوریتم ازدحام جمعیت ذرات یکسان بوده و به میزان ۴/۴ درصد نسبت به دیگر روش‌ها کاهش یافته است و از طرفی میزان تغییرات SOC به مقدار ۰/۰۷٪ نسبت به بهترین روش (PSO-3 inputs) بهبود داشته است.

مراجع

- [۱] ا. لطفی. ارائه روش پیشنهادی جدید استراتژی کنترل و مدیریت انرژی در سیستم محرکه رانشی خودرو الکتریکی هیبریدی، پایان‌نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد، رشته مهندسی برق، گرایش کنترل، دانشگاه شهید باهنر کرمان، بهمن ماه ۱۳۹۳.
- [۲] م. ب. دولتشاهی، ح. نظام آبادیپور، م. ماشین‌چی، حل نمونه‌های بزرگ مسئله فروشنده دوره گرد متقارن با استفاده از یک الگوریتم جستجوی گرانشی گسسته ترکیبی، علوم و مهندسی کامپیوتر، نشریه علمی پژوهشی انجمن کامپیوتر ایران، ۹(۱) (۱۳۹۰)، ۱۱-۱.
- [۳] م. ح. رنجبر، ا. لطفی، س. م. علی محمدی، طراحی یک استراتژی کنترلی و مدیریت انرژی سلسله مراتبی در خودروی برقی هایبرید) بیست و نهمین کنفرانس بین‌المللی برق تهران. ایران، (۱۴۰۲).
- [۴] س. م. طاهری، آشنایی با نظریه مجموعه‌های فازی، انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد، ۱۳۷۵.
- [۵] م. ماشین‌چی، مجموعه‌های مشکک، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان، شماره ۱۳۳، سال ۱۳۷۹.
- [۶] ح. نظام‌آبادی‌پور، الگوریتم وراثتی: مفاهیم پایه و مباحث پیشرفته، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۸۹.

[7] H. Alipour and B. Asaei, A heuristic power management strategy for plug-in hybrid electric vehicles, In *Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS)*, (2011), 1-6.

[8] H. Azadi Kherabadi, S. Ebrahimi Mood and M. M. Javidi, Mutation: A New Operator in Gravitational Search Algorithm Using Fuzzy Controller, *Cybernetics and Information Technologies* 17(1) (2017), 72-86.

- [9] Y. Gao and M. Ehsani, Design and control methodology of plug-in hybrid electric vehicles, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57 (2)(2010), 633-640.
- [10] Q. Gong, Y. Li and Z. Peng, Trip based power management of plug-in hybrid electric vehicle with two-scale dynamic programming, In *Vehicle Power and Propulsion Conference*, (2007), 12-19.
- [11] Q. Gong, Y. Li and Z. Peng, Computationally efficient optimal power management for plug-in hybrid electric vehicles based on spatial-domain two-scale dynamic programming, In *Vehicular Electronics and Safety*, (2008) 90-95.
- [12] X. Hui, and D. Yunbo, The study of plug-in hybrid electric vehicle power management strategy simulation, In *Vehicle Power and Propulsion Conference*, (2008), 1-3.
- [13] S. Li, S. Sharkh, F. Walsh, and C. Zhang, Energy and battery management of a plug-in series hybrid electric vehicle using fuzzy logic, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 60 (8) (2011), 3571-3585.
- [14] Y. Li, Q. Zeng, C. Wang and Y. Li, Research on fuzzy logic control strategy for a plug-in hybrid electric city public bus, In *Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA)*, (2010), 88-91.
- [15] B. Liaw, and M. Dubarry, From driving cycle analysis to understanding battery performance in real-life electric hybrid vehicle operation, *Journal of power sources*, 174(1) (2007), 76-88.
- [16] MATLAB and Statistics Toolbox Release 2016a The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.
- [17] E. Rashedi, H. Nezamabadi-Pour and S. Saryazdi, GSA: a gravitational search algorithm, *Information sciences* 179(13) (2009), 2232-2248.
- [18] C. Shen and C. Xia, Notice of Retraction Optimal Power Split in a Hybrid Electric Vehicle Using Improved Dynamic Programming, In *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, (2010), 1-4.

- [19] A. Soltani Sarvestani and A. Safavi, A novel optimal energy management strategy based on fuzzy logic for a hybrid electric vehicle, In *Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, (2009), 141-145.
- [20] C. Yang, J. Li, W. Sun, B. Zhang, Y. Gao and X. Yin, Study on global optimization of plug-in hybrid electric vehicle energy management strategies, In *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, (2010), 1-5.
- [21] Sh. Xu, Investigation of EMS based on fuzzy logic controller for an ICE/battery/UC hybrid electric vehicle, In *Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC)*, (2011), 4041-4044.
- [22] L. A. Zadeh, Fuzzy sets, *Information and control* 8 (3) (1965) 338-353.