بهینه‌سازی و کنترل خودروهای هیبریدی با در نظر گرفتن جرائم مربوط به آلایندگی و بر اساس الگوریتم PSO

محمدرضا انصاری[۱،*] و ایمان همت[۲]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۱۲
پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۱۶

واژگان کلیدی:
خودروی هیبریدی موازی،
استراتژی کنترل،
الگوریتم PSO توسعه‌یافته
مصرف سوخت،
ضرایب جریمه آلایندگی.

چکیده

در این مقاله روشی جدیدی به‌منظور بهینه کردن استراتژی کنترل در خودروهای هیبرید موازی ارائه‌شده است. با پیشنهاد یک تابع هدف جدید و به‌منظور مدیریت مؤثر تقسیم توان بین موتورهای احتراقی و الکتریکی، میزان مصرف سوخت بهینه‌شده و همچنین میزان آلایندگی‌ها نیز با در نظر گرفتن توابع جریمه به حداقل ممکن رسیده است. با استفاده از نرم‌افزار ADVISOR[3]، به‌عنوان یکی از نرم‌افزارهای متداول در زمینه شبیه‌سازی خودروهای هیبریدی و همچنین معادلات غیرخطی حاکم بر این خودروها، یک خودروی هیبرید موازی در چرخه رانندگی شهری آمریکا را شبیه‌سازی نموده و جهت بهینه کردن استراتژی کنترل از یک الگوریتم توسعه‌یافته بر اساس روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO[4]) استفاده‌شده است. در الگوریتم PSO پیشنهادی از ضرایب انقباض و اعمال اثر آینه‌ای سرعت، جهت افزایش کارایی روش استفاده می‌گردد. با محدودیت‌های جدیدی که برای الگوریتم PSO پیشنهاد گردیده، نتایج حاصله بهبودیافته است. همچنین نتایج شبیه سازی با نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های ارائه‌شده در مقالات اخیر مقایسه گردیده است. این مقایسه نیز کارایی و دقت الگوریتم پیشنهادی را در بهینه‌سازی پارامترهای کنترل که منجر به کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌های خروجی از خودرو شده است، نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

در عصر جدید که گازهای گلخانه‌ای به‌عنوان یکی از اصلی-ترین منابع آسیب‌زننده به محیط‌زیست و سلامت انسان مطرح هستند خودروها به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین تولیدکننده‌های این گازها بسیار موردتوجه قرارگرفته‌اند و اکثر شرکت‌های خودروسازی به سمت کاهش این گازهای آلاینده و یا حذف کامل آن با جایگزینی آن با سوخت‌های پاک نظیر انرژی الکتریکی رفته‌اند [۱-۲]. خودروها سهم زیادی از مصرف انرژی را در سیستم حمل و نقل به خود اختصاص داده اند. همچنین آنها تاثیر زیادی بر آلودگی هوا در شهرها دارند. با توجه به این واقعیت، دانشمندان و شرکت های خودرو سازی تلاشهای زیادی برای جایگزین کردن انرژیهای فسیلی و ارتقا خودورهای الکتریکی و همچنین خودروهای هیبریدی انجام داده اند[۳-۶].

امروزه مدیریت توان خودروهای الکتریکی و به ویژه خودروهای الکتریکی هیبریدی با موتور احتراقی، به طور خاص به افزایش بهره وری مصرف سوخت اختصاص داده شده است، در حالی که کاهش گازهای آلاینده نیز به طور چشمگیری مورد توجه قرار گرفته است[۷].

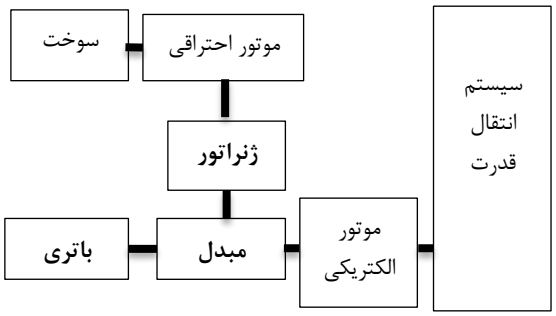
به‌منظور کاهش این آلاینده‌ها در خودروها ابتدا ایده استفاده از انرژی الکتریکی به‌عنوان انرژی جایگزین سوخت‌های فسیلی مطرح شد؛ اما این خودروها به سبب مشکلاتی ازجمله زمان شارژ شدن، جایگاه‌های شارژ، مسافت پیمایش کوتاه و میزان شتاب و سرعت کم، فراگیر

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mansari@shahreza.ac.ir
۱. استادیار، گروه مهندسی برق، مرکز آموزش عالی شهرضا، اصفهان، ایران
۲. دانشجو، گروه مهندسی برق، مرکز آموزش عالی شهرضا، اصفهان، ایران

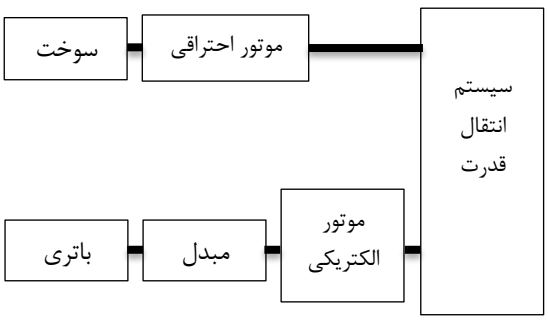
[3] ADvanced Vehicle SimulatOR
[4] Particle Swarm Optimization

نشدند و نتوانستند درصد قابل‌توجهی از خودروهای تولیدی را در اختیار بگیرند. به دلایل گفته‌شده در بالا ایده تولید خودروی دیگری به نام هیبرید مطرح شد که از ترکیب یک موتور احتراقی و یک یا چند موتور الکتریکی تشکیل‌شده بود. عملکرد این خودروها به‌گونه‌ای بود که مشکلات خودروهای الکتریکی که در بالا گفته شد را نداشته و تنها میزان تولید آلایندگی بیشتری نسبت به خودروهای الکتریکی داشتند، اما به‌عنوان یک راه‌حل سریع و قابل پیاده‌سازی در ابعاد وسیع، به‌منظور کاهش آلاینده‌ها مورداستفاده قرار گرفتند.

همچنین بخشی از انرژی مکانیکی تبدیل‌شده به انرژی الکتریکی در خودروهای هیبریدی، در باتری‌ها ذخیره و بخش دیگری از آن به‌منظور تولید گشتاور خودرو صرف موتور الکتریکی می‌شود، لذا به دلیل این‌که وظیفه تولید گشتاور خودرو مستقیماً بر عهده موتور احتراقی نیست، موتور احتراقی می‌تواند با حداکثر راندمان خودکار نماید [۸ و۹]. خودروهای هیبریدی با توجه به نوع ارتباط موتور الکتریکی و احتراقی در تولید گشتاور موردنیاز خودرو در قالب سه ساختار مختلف شامل هیبرید موازی، هیبرید سری و هیبرید سری-موازی تقسیم‌بندی می‌شوند[۱۰]. به‌طورکلی پیکربندی متداول برای خودروهای هیبریدی، پیکربندی سری و موازی است و در موارد دیگر از ترکیب این دو استفاده می‌شود [۱، ۱۱و۱۲].



شکل ۱– پیکربندی خودرو هیبرید سری [۱۲]



شکل ۲ - پیکربندی خودرو هیبرید موازی [۱]

پیکربندی خودروهای هیبرید سری و موازی در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده‌شده است.

در پیکربندی موازی (همان‌طور که در شکل (۲) نیز نشان داده) هم موتور الکتریکی و هم موتور احتراقی در به حرکت درآوردن خودرو نقش دارند. در این پیکربندی موتور الکتریکی نیز می‌تواند به‌عنوان یک ژنراتور باتری را شارژ کند که این عمل را به هنگام ترمز گیری یا جذب انرژی اضافی موتور احتراقی انجام می‌دهد. در حقیقت سیستم کنترلی دقیق موجود در این نوع پیکربندی، تصمیم‌گیری لازم را برای نحوه ارتباط این دو منبع توان انجام می‌دهد. به‌طور مثال زمانی که انتظار زیادی از شتاب نداشته باشیم و موتور احتراقی نیز روشن باشد، خودروی هیبرید موازی موتور الکتریکی را به‌عنوان ژنراتور به‌منظور شارژ باتری‌ها استفاده می‌نماید. درنتیجه در هیبرید موازی به دلیل استفاده موتور احتراقی و موتور الکتریکی کوچک‌تر با همان توان نسبت به هیبرید سری، این خودرو در مسافرت‌های طولانی بهینه‌تر می‌باشد [۹].

به منظور افزایش کارایی و بهره وری در خودورهای هیبریدی از یک استراتژی کنترل جهت مدیریت مناسب انرژی خودرو استفاده می گردد[۱۳]. در مقالات گذشته از روش‌های مختلفی ازجمله الگوریتم ژنتیک، استراتژی کنترل فازی، الگوریتم ممتیک و کنترل فازی به‌منظور بهینه‌سازی خودروی هیبریدی استفاده‌شده است. در مرجع [۱۱] با استفاده از یک استراتژی کنترلی به نام استراتژی کنترل کمک الکتریکی و با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی برخی از پارامترهای کنترلی پرداخته‌شده است که درنتیجه این روش منجر به کاهش نسبی میزان آلایندگی‌ها شده است. در مرجع [۱۴] یک استراتژی مدیریت انرژی کارآمد سوخت ارائه شده است که جهت تقسیم توان در یک خودورو هیبریدی از حالت اصلاح شده روش تخمین شارژ استفاده می کند. استراتژی مدیریت انرژی در این مرجع نیز از یک الگوریتم ژنتیک اصلاح شده جهت محاسبه مقادیر بهینه پارمترهای مختلف استفاده می نماید. در مرجع [۹] نیز با استفاده الگوریتمی به نام ممتیک به بهینه‌سازی همه‌ی پارامترهای کنترلی، استراتژی کنترل پرداخته‌شده است که به دلیل مشکلات تابع هدف میزان قابل قبولی کاهش مصرف سوخت و آلایندگی‌ها را در پی نداشته است. همچنین در مرجع [۱۵] با استفاده از ترکیب برخی پارامترهای استراتژی کنترل و

چند پارامتر از اجزای خودروی هیبریدی مانند میزان توان موتور الکتریکی و احتراقی و همچنین ظرفیت باتری‌ها به بهینه‌سازی خودروی هیبریدی با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه پرداخته‌شده است. نتایج آن‌که به‌صورت کران بالا و پایین بهترین نتایج در پی چند بهینه‌سازی به‌دست‌آمده، کاهش نسبی آلایندگی‌ها و مصرف سوخت را در پی داشته است؛ اما این نتایج به‌صورت یکجا و در یک بهینه‌سازی به دست نیامده است. در بعضی از مقالات مانند مرجع [۱۶] نیز با استفاده از چند پارامتر از اجزای خودرو یعنی میزان رنج گشتاور موتور الکتریکی و احتراقی، تعداد ماژول باتری و همچنین برخی از پارامترهای استراتژی کنترل به بهینه‌سازی خودروی هیبریدی پرداخته‌اند که نتایج آن میزان کاهش اندکی در آلاینده‌ها و مصرف سوخت را همراه داشته است. در مرجع [۱۷] به‌منظور کاهش انتشار آلاینده‌های خودروی‌های هیبریدی، با استفاده از یک استراتژی مدیریت انرژی نوآورانه که از مزایای هیبریداسیون استفاده می‌کند به‌منظور کاهش آلاینده‌ها بهره برده‌اند. این استراتژی که به کمک یک هیبریداسیون کوچک و در دو حالت پایدار و گذرا انجام می‌شود منجر به کاهش انتشار آلاینده‌ی NOx و همچنین مصرف سوخت شده است. همچنین در مرجع [۱۸] نیز با طراحی یک کنترل‌کننده‌ی فازی، به‌منظور مدیریت انرژی سیستم و استراتژی کنترل خودروی هیبرید موازی، برای کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها در این خودروها، موفق به کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌ها در چندین سیکل مختلف شده‌اند. در مرجع [۱۹] نیز یک استراتژی بهینه سازی مصرف معادل بر طبق منطق فازی ارائه شده است که یک راه حل مدیدریت هوشمند انرژی بلادرنگ را جهت خودروهای هیبرید مجهز به موتور دیزلی ارائه می نماید. روش پیشنهادی در این مرجع از طریق شبیه سازی در دو دوره رانندگی گذرا مورد تایید قرار گرفته است. در مرجع [۲۰] یک استراتژی مدیریت انرژی بهینه بر اساس برنامه ریزی پویا، نقشه های حالت ماندگار موتور و مدل انتشار ذرات گذرای معتبر برای خودروهای هیبرید الکتریکی ارائه شده است. در این نیز مرجع هدف موازنه مصرف سوخت و همچنین کاهش انتشار ذرات خام و گاز NOx در هوا می باشد. مرجع [۲۱] هم از الگوریتم مستطیل تقسیم شده جهت بهینه کردن هفت پارامتر کلیدی استراتژی مدیریت انرژی خودروهای هیبریدی و از دید کاهش مصرف سوخت استفاده نموده است.

در مقاله [۲۲] هم به بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی یک خودروی هیبریدی با مدل کردن آن در نرم‌افزار AMESim پرداخته‌شده است. در این مقاله با استفاده از میزان شارژ باتری که یکی از پارامترهای کلیدی استراتژی کنترل است و با مدل کردن یک خودروی هیبرید موازی در AMESim موفق به کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌ها شده‌اند. نوعی دیگر از بهینه‌سازی نیز در مرجع [۲۳] با طراحی و شبیه‌سازی یک استراتژی کنترلی بر اساس میزان تقاضای گشتاور در خودروی هیبریدی ارائه‌شده است. در این کار تحقیقاتی نیز توانسته‌اند میزان مصرف سوخت را نسبت به حالت قبل از بهینه‌سازی کاهش دهند. مرجع [۲۴] نیز جهت مدیریت انرژی برای خودروهای الکتریکی هیبرید موازی یک استراتژی در جهت کاهش گازهای آلاینده ارائه می نماید. در این مرجع یک تابع هدف چندگانه بر مبنای هم کاهش گازهای آلاینده و هم مصرف سوخت ارائه شده است. استراتژی به دو تابع مجزا در جهت محدود کردن NOx هم در وضعیت بهره برداری حالت ماندگار و هم گذرا تقسیم بندی شده است. اولین تابع تقسیم گشتاور مابین موتور احتراقی و موتور الکتریکی رو کنترل می نماید. و دومین تابع نیز نسبت تقسیم گشتاور مابین موتور احتراقی و موتور الکترکی رو تطبیق می دهد که در ابتدا از استراتژی کنترل بهینه در خلال بهره برداری گذار و تولید NOx، محاسبه می شود.

در مقاله حاضر نیز با استفاده از کلیه‌ی پارامترهای استراتژی کنترل موجود در نرم‌افزار ADVISOR یک استراتژی کنترل جهت بهینه‌سازی و کنترل خودروهای هیبریدی با در نظر گرفتن جرائم مربوط به آلایندگی و بر اساس الگوریتم PSO ارائه‌شده است. در این مقاله با ارائه یک تابع هدف جدید نسبت به کارهای قبلی در این زمینه، میزان مصرف سوخت در یک خودروی هیبرید موازی در چرخه رانندگی شهری آمریکا (FTP) [۲۵] را شبیه‌سازی و بهینه نموده و همچنین در این راستا میزان آلایندگی‌ها را نیز با در نظر گرفتن توابع جریمه به حداقل ممکن رسانده‌ایم. جهت حل مسئله بهینه‌سازی نیز یک الگوریتم توسعه‌یافته بر اساس الگوریتم PSO که از اثر آینه‌ای سرعت و ضرایب انقباض استفاده می‌نماید و منجر به بهبود نتایج PSO می‌گردد پیشنهاد گردیده است. الگوریتم PSO پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی

شده است.

در ادامه این مقاله در بخش دوم به بررسی استراتژی کنترلی خودروهای هیبریدی موازی و اثرات آن بر خودروی هیبریدی پرداخته‌شده است. در بخش سوم نیز، تابع هدف و قیود مسئله بهینه‌سازی ارائه‌شده است. در بخش چهارم، روش حل مسئله بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم PSO پیشنهادی و همچنین نحوه‌ی تعامل نرم‌افزار شبیه‌ساز ADVISOR و الگوریتم PSO موردبحث قرارگرفته است. بخش پنجم نتایج شبیه‌سازی یک خودرو هیبریدی موازی را ارائه می‌نماید؛ و درنهایت بخش ششم، نتایج به‌دست‌آمده موردبحث قرارگرفته است.

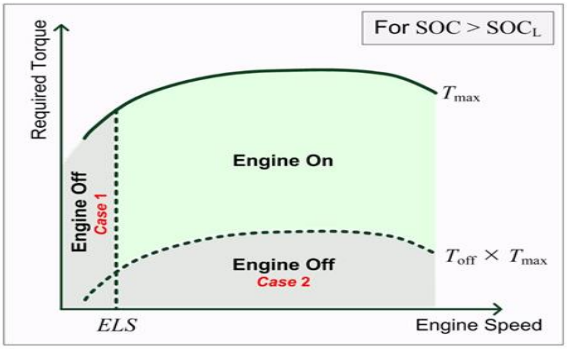
۲- استراتژی کنترل خودروی هیبرید موازی

استراتژی کنترل به‌عنوان یک بخش مهم در خودروهای هیبرید موازی وظیفه مدیریت تولید انرژی توسط هر یک از موتورهای الکتریکی و احتراقی جهت تأمین توان موردنیاز خودرو در هر موقعیت را دارد. این مدیریت منابع تولید توان که توسط استراتژی کنترلی خودرو انجام می‌شود تأثیر مستقیمی بر راندمان مصرف انرژی و میزان آلاینده‌ها دارد. استراتژی کنترل در بهترین حالت دارای هشت پارامتر کنترلی است که در جدول ۱ این پارامترها آورده شده است [۹، ۲۶ و ۲۷].

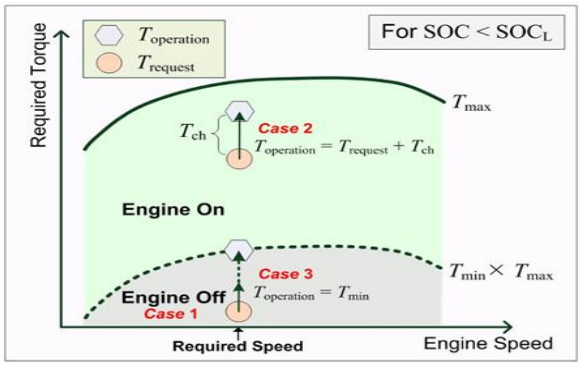
این استراتژی به‌گونه‌ای عمل می‌کند که درواقع موتور احتراقی بیشترین بازده خود را داشته باشد. به این صورت که هرگاه موتور احتراقی در بازده مناسب خودکار نکند (به‌طور مثال در حالت توقف خودرو یا در سرعت‌های پایین) در این حالت موتور احتراقی خاموش شده و تأمین گشتاور خودرو توسط موتور الکتریکی انجام می‌گردد. این عمل موجب کارکرد بهینه موتور احتراقی و درنتیجه کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌ها می‌شود. همچنین استراتژی کنترل سعی می‌کند میزان سطح شارژ باتری‌ها را در محدوده‌ای قرار دهد که در آن محدوده مقاومت شارژ و دشارژ باتری کم باشد. اگر میزان شارژ باتری‌ها کم باشد و به شارژ شدن نیاز داشته باشند، شارژ شدن آن توسط موتور احتراقی انجام می‌شود (گشتاور اضافی توسط موتور احتراقی تأمین می‌شود) که در این حالت موتور احتراقی تا شارژ شدن کامل باتری روشن خواهد بود. نحوه‌ی عملکرد استراتژی کنترل در خودروهای هیبرید موازی در دو شکل زیر آمده است [۹ و ۲۶-۲۸].

جدول ۱ - پارامترهای استراتژی کنترل خودروهای هیبریدی

نام پارامتر	توضیحات
SOC_L	حداقل سطح شارژ مجاز باتری.
SOC_H	حداکثر سطح شارژ مجاز باتری.
T_{ch}	گشتاور اضافی به‌منظور شارژ باتری که توسط موتور احتراقی تأمین می‌شود.
T_{min}	ضریبی از گشتاور حداکثر است و در حالتی رخ می‌دهد که سطح شارژ باتری کمتر از SOC_L باشد. در این حالت این گشتاور توسط موتور احتراقی تأمین می‌شود.
T_{off}	ضریبی از گشتاور حداکثر است که اگر گشتاور موردنیاز در یک سرعت معین از آن کم‌تر باشد موتور احتراقی خاموش می‌شود.
ELS_L	حداقل سرعتی که در کم‌تر از آن سرعت، خودرو کاملاً الکتریکی عمل می‌کند.
ELS_H	حداکثر سرعتی که در کم‌تر از آن سرعت، خودرو کاملاً الکتریکی عمل می‌کند.
D_{ch}	استراتژی نگهداری شارژ باتری‌ها.



شکل ۳ - استراتژی کنترل در حالت $SOC>SOC_L$



شکل ۴- استراتژی کنترل در حالت $SOC<SOC_L$

همان‌طور که در دو شکل (۳) و (۴) مشخص است موتور احتراقی در مواقعی خاموش می‌شود که در این مواقع موتور الکتریکی مسئولیت تولید گشتاور موردنیاز خودرو را بر عهده دارد. شکل (۳) حالتی را نشان می‌دهد که میزان شارژ

باتری (SOC) از حداقل میزان شارژ مجاز آن (SOC_L) بیشتر است، درواقع در این وضعیت شارژ باتری‌ها مناسب است. در این حالت اگر سرعت موردنیاز خودرو کمتر از سرعت ELS باشد و یا همچنین گشتاور موردنیاز کمتر از گشتاور آستانه خاموشی ($T_{off} \times T_{max}$) باشد موتور احتراقی خاموش می‌شود و موتور الکتریکی جایگزین آن می‌شود.
شکل (۴) حالتی را نشان می‌دهد که میزان شارژ باتری (SOC) از حداقل میزان شارژ مجاز آن (SOC_L) کمتر است. در این حالت به علت کم بودن شارژ باتری‌ها، باتری‌ها نیازمند شارژ شدن هستند، به همین دلیل هموار گشتاور اضافی T_{ch} از موتور احتراقی برای شارژ باتری از آن گرفته می‌شود. این گشتاور اضافی متناسب با میانگین اختلاف بین حداقل شارژ باتری (SOC_L) و حداکثر شارژ باتری (SOC_H) است. در این حالت گشتاور خودرو به‌هیچ‌عنوان از آستانه حداقل گشتاور ($T_{min} \times T_{max}$) کمتر نمی‌شود. اگر گشتاور موردنیاز بالاتر از ($T_{min} \times T_{max}$) باشد موتور احتراقی روشن است و گشتاور تولیدی آن شامل گشتاور موردنیاز خودرو و گشتاور اضافی T_{ch} است و اگر گشتاور موردنیاز کمتر از $T_{min} \times T_{max}$ باشد بازهم موتور احتراقی روشن است و گشتاور تولیدی آن برابر با آستانه حداقل گشتاور ($T_{min} \times T_{max}$) می‌باشد.

۳- مسئله استراتژی کنترل خودرو هیبریدی

در بهینه‌سازی پارامترهای استراتژی کنترلی خودروی هیبرید موازی که در جدول ۱ آورده شده، به‌منظور کاهش مصرف سوخت و همچنین آلاینده‌ها این پارامترها باید به‌صورت بهینه انتخاب شوند. درواقع انتخاب پارامترهای بهینه استراتژی کنترل موجب مینیمم شدن تابع هدف یعنی مصرف سوخت و گازهای آلاینده خواهد شد. این مینیمم شدن تابع هدف باید به‌گونه‌ای انجام شود که باعث کاهش عملکردهای دینامیکی خودرو مانند شتابگیری، سرعت و شیب‌پیمایی نشود. بدین منظور استانداردهای عملکردی برای خودروی هیبرید تعریف‌شده است (قیود PNGV[1]) که هر خودروی هیبریدی ملزم به رعایت این استانداردها می‌باشد؛ بنابراین خودروی هیبریدی بهینه است که این استانداردها در آن صدق کند. به‌طورکلی مسائل بهینه‌سازی به این‌گونه است که یک تابع هدف متناسب با مسئله انتخاب‌شده که مینیمم کردن آن در حضور قیود مسئله منجر به رسیدن به خواست مسئله باشد [۱۵، ۱۶، ۲۶ و ۲۶].

۳-۱- تابع هدف

توابع هدف بسیاری در مقالات برای بهینه‌سازی مصرف سوخت و کاهش میزان آلاینده‌ها در خودروهای هیبریدی مورداستفاده قرارگرفته که هدف اصلی همه‌ی آن‌ها کاهش میزان مصرف سوخت و آلاینده‌ها است و فرم اصلی آن‌ها به‌صورت زیر است [۹، ۱۵،۱۶، ۲۹-۳۱]:

$$F = w1\,FC + w2\,NOx + w3\,HC + w4\,CO \qquad (۱)$$

در این تابع هدف ($w_{i\ i=1,\dots,4}$) فاکتورهای وزن دهی هستند که مقادیر آن‌ها بر اساس آزمون‌وخطا و با توجه به میزان اولیه پارامترهای تابع هدف در خودروی مورد بررسی تعیین می‌شود. همچنین در این رابطه FC سوخت مصرف‌شده در هر صد کیلومتر برحسب لیتر است، NO_X، HC و CO به‌عنوان گازهای آلاینده خروجی اگزوز به ترتیب بیانگر اکسیدهای نیتروژن، هیدروکربن‌های نسوخته و منواکسید کربن می‌باشند. در این رابطه با توجه به وجود ۴ فاکتور وزن دهی میزان آزمون‌وخطا بالا است درنتیجه پیدا کردن وزن‌های که به‌طور هم‌زمان کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌ها را در پی داشته باشد مشکل است. همچنین کاهش هر سه آلاینده باهم و در ادامه مصرف سوخت حالت مشکلی است که کم رخ می‌دهد. به دلایل گفته‌شده بهینه شدن تابع هدف با تعیین وزن امری طاقت‌فرسا و دارای خطای زیاد است. در این مقاله یک تابع هدف پیشنهادی به‌منظور حل مشکلات بالا به‌صورت زیر تعریف می‌نماییم:

$$\min: F = FC + a[\,(Z1 + Z2 + Z3)\,] \qquad (۲)$$

در این رابطه a یک فاکتور وزن دهی است که یک عدد مثبت خیلی بزرگ می‌باشد.Z3,Z2,Z1 ضرایب مربوط به جریمه آلاینده‌های سوخت می‌باشد که به‌صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$NOx - Z1 \le NOx_{\text{اولیه}} \qquad (۳)$$
$$HC - Z2 \le HC_{\text{اولیه}}$$
$$CO - Z3 \le CO_{\text{اولیه}}$$

با توجه به روابط بالا مشخص است که با افزایش آلایندگی‌ها نسبت به مقادیر آلاینده اولیه ضرایب جریمه به تابع هدف

[1] Partnership for a New Generation of Vehicles

(با ضریب a) اضافه می‌گردد. درنتیجه برنامه بهینه‌سازی سعی می‌کند برای کاهش ضرایب جریمه در تابع هدف مقادیر آلایندگی‌ها را تا حد ممکن مینیمم نماید. حتی ممکن است مقادیر آلاینده از مقادیر آلاینده اولیه نیز کمتر گردد (که درنتیجه ضرایب جریمه منفی می‌گردد). با در نظر گرفتن ضرایب جریمه مربوط به آلایندگی‌ها تابع هدف درحالی‌که سعی می‌کند مقدار سوخت مصرفی را بهینه کرده و به کمترین میزان خود برساند در همان حال مقادیر آلایندگی را نیز به کمترین مقدار خود بهینه می‌نماید که این مقدار حتی می‌تواند از میزان آلایندگی اولیه نیز کمتر باشد. تابع هدف پیشنهادی در (۲) نسبت به تابع هدف ارائه‌شده در کارهای قبلی (۱) به مقدار مصرف سوخت بهینه‌تر و همچنین میزان آلایندگی کمتری منجر می‌گردد.

۳-۲- قیود مسئله بهینه‌سازی

محدودیت‌ها یا قیود برای تابع هدف مسئله بهینه‌سازی در اینجا استانداردهای PNGV هستند که توسط کشور امریکا به‌منظور مشارکت شرکت‌های خودروسازی برای ساخت خودروهای هیبرید استاندارد بناشده‌اند. درواقع هر خودروی هیبریدی تولیدی ملزم به رعایت این محدودیت‌ها است. این محدودیت‌ها در جدول ۲ آورده شده است [۹، ۱۶ و ۳۲-۳۱]:

جدول ۲- قیود مسئله بهینه‌سازی[۹، ۱۶ و ۳۲-۳۱]

قید	محدوده عملکرد
شتاب ۹۷-۰ (Km/h)	کمتر از۱۲ثانیه
شتاب ۱۳۷-۰ (Km/h)	کمتر از۲۳ ثانیه
شتاب ۹۷-۶۴ (Km/h)	کمتر از ۵/۳ ثانیه
حداکثر سرعت (Km/h)	بیش از ۱۶۱ کیلومتر
مسافت طی شده در ۵ ثانیه	بیش از ۴۲/۷ متر
شیب روی در سرعت ۸۹ (Km/h) (به مدت۲۰ دقیقه با ۲۷۲ کیلوگرم بار اضافی)	بیش از ۶/۵ ٪
حداکثر شتاب(m/s^2)	بیش از ۵

به‌طورکلی پارامترهایی استراتژی کنترل به شرطی مجاز به مشارکت در حل مسئله بهینه‌سازی هستند که این پارامترها ابتدا قیود حاکم بر مسئله بهینه‌سازی که در جدول۲ آورده شده را بتوانند ارضا کنند (قیود جدول ۲ بر اساس پارامترهای استراتژی کنترل توسط نرم‌افزار محاسبه می‌گردد)، در غیر این صورت مجاز به حضور در مسئله بهینه‌سازی نمی‌باشند. همچنین به‌منظور انجام بهینه‌سازی استراتژی کنترل، خود پارامترهای کنترلی (موجود در جدول۱) نیز در محدوده مجاز مطابق با جدول ۳ باید قرار گیرند.

جدول ۳ - محدوده‌ی پارامترهای بهینه‌سازی[۹، ۲۶ و ۲۷]

نام پارامتر	حد بالا	حد پایین
SOC_L	۰/۵	۰/۱
SOC_H	۱	۰/۵۵
T_{ch}	۸۰/۹	۱
T_{min}	۱	۰/۰۵
T_{off}	۱	۰/۰۵
ELS_L	۱۵	۰
ELS_H	۳۰	۱۰
D_{ch}	۱	۰

۴- روش حل مسئله بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم PSO پیشنهادی

الگوریتم تجمع ذرات که به‌اختصار به آن PSO هم می گویند برگرفته از تجمع انبوهی از ذرات است. کندی و ابرهارت این روش را با مشاهده‌ی رفتار گروهی از ماهی‌ها و پرندگان کشف کردند[۳۳ و ۳۴]. بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک روش جستجوی تصادفی اجرایی تکاملی است که متشکل از برنامه‌ریزی تکاملی و الگوریتم ژنتیک بوده که یک راه‌حل بهینه را نتیجه می‌دهد [۳۳]. در الگوریتم PSO، هر عنصر که ذره نامیده می‌شود در فضای جستجوی n بُعدی حاضر بوده و از مکان خود در فضاهای جستجوی چندبعدی با یک سرعت خاص بر اساس اطلاعات خود نسبت به زمان جابه‌جا می‌شوند. هر ذره اطلاعات کافی را دارا بوده و جهت خود را به سمت بهترین مکان که Pbest نامیده می‌شود، با توجه به توانایی خود به‌روزرسانی می‌نماید و بهترین مکان کُلی معادل است با انتقال مکان ذرات همسایه که Gbest (بهترین مطلق) نامیده می‌شود. ذرات خود را با توجه به بهترین مکان به‌روزرسانی می‌نمایند [۳۵ و ۳۶].

۴-۱- فرمول‌بندی الگوریتم PSO

در این الگوریتم ما nPop تا ذره داریم که در فضای مسئله به‌صورت تصادفی پخش‌شده‌اند و هر ذره برای خود یک موقعیت و یک هزینه دارد.

برای جابجایی هر ذره از قضیه ترکیب خطی تجربیات خود و تجربیات الگو (به صورتی که در بالا گفته شد) استفاده

می‌شود و برای به‌روزرسانی موقعیت نیز از رابطه‌ی (۴) استفاده می‌گردد:

$$X_j^{k'} = X_j^k + V_j^{k+1} \quad (۴)$$

که V سرعت حرکت ذره و X موقعیت آن می‌باشد که V به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$V_j^{k+1} = w.V_j^k + c1\,.rand\left(Pbest_j^k - X_j^k\right) + c2\,.rand\left(Gbest^k - X_j^k\right) \quad (۵)$$

که Gbest بهترین مقدار تابع برازندگی برای هر فرد و Pbest بهترین مقدار تابع برازندگی است که تاکنون به آن دست پیداکرده‌ایم. C1 و C2 ضرایب تصمیم‌گیری هستند، که نشان می‌دهد کدام‌یک برای ما بیشتر اولویت دارد و با توجه به تجربیات حاصله انتخاب می‌گردد.w نیز به ضریب اینرسی معروف می‌باشد. (معمولاً w را 1 و $c1$ و $c2$ را 2 در نظر می‌گیرند) [۳۵].

همچنین برای محدودیت سرعت نیز از رابطه (۶) استفاده می‌نماییم.

$$\mathrm{VelMax} = \mathrm{VarMax} - \mathrm{VarMin} \quad (۶)$$
$$\mathrm{VelMin} = -\mathrm{VelMax}$$

VelMax و VelMin به ترتیب مقدار بیشینه و کمینه‌ی سرعت ذرات می‌باشند که به الگوریتم فضای جستجوی بیشتری را می‌دهد.

۴-۲- معرفی ضرایب انقباض در الگوریتم PSO پیشنهادی و اعمال اثر آینه‌ای سرعت[1]

همان‌طور که گفته شد در اکثر کارهایی که از الگوریتم PSO استفاده می‌نمایند مقادیر تجربی برای سه پارامتر$c1$ و $c2$ و w انتخاب می‌گردد. اما در این مقاله برای محاسبه ی $c1$ و $c2$ و w از روش جدیدی مبتنی بر ضرایب انقباض استفاده کرده‌ایم. استفاده از ضرایب انقباض در طی زمان منجر به همگرایی بیشتر ذرات می‌گردد و این بدان معنی است که دامنه‌ی نوسانات ذرات کاهش می‌یابد. این بدان خاطر است که ضرایب انقباض بر روی بهترین نقاط محلی و همسایگی متمرکز می‌شود. درصورتی‌که شرایط درستی بر مسئله حاکم گردد، ضرایب انقباض از عدم همگرایی الگوریتم جلوگیری می‌نماید. فرمول‌بندی این ضرایب به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\varphi 1, \varphi 2 > 0 \quad (۷)$$

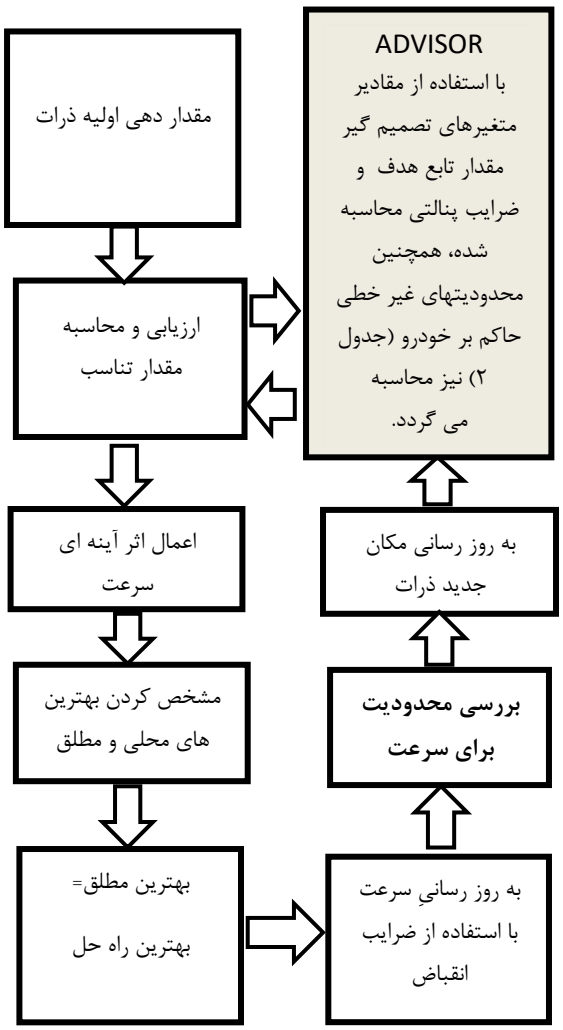
$$\varphi \triangleq \varphi_1 + \varphi_2 > 4 \quad (۸)$$

$$\chi = \frac{2}{2-\varphi+\sqrt{\varphi^2-4\varphi}} \quad (۹)$$

$$w = \chi \quad (۱۰)$$

$$c1 = \chi\varphi_1 \quad (۱۱)$$

$$c2 = \chi\varphi_2 \quad (۱۲)$$



شکل ۵ - فلوچارت الگوریتم PSO به همراه ارتباط آن با نرم-افزار ADVISOR (قسمت‌های هاشور نخورده متعلق به الگوریتم PSO می‌باشد.)

c1 و *c2* ضریب‌های تصمیم‌گیری هستند و w نیز همان ضریب اینرسی می‌باشد. همچنین χ فاکتور انقباض بوده و φ نیز یک عدد ثابت می‌باشد.

[1] Constriction Coefficients and Mirror Effects

همچنین در این مقاله اثر آینه‌ای سرعت را نیز دخالت داده ایم که درنتیجه کیفیت جواب مسئله بهینه‌سازی بهبود می یابد. اثر آینه‌ای بدین‌صورت است که هر جا که ذره از محدوده خارج گردید، آن را قرینه می‌نماییم. (درنتیجه قرینه کردن ذره دوباره در محدوده قرار می‌گیرد) رابطه‌ی اثر آینه‌ای سرعت نیز به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{If} \quad VarMin > X_j^k \quad or \quad VarMax < X_j^k$$
$$V_j^k = -V_j^k \qquad (۱۳)$$

۴-۳- ساختار استراتژی کنترل پیشنهادی و نحوه ارتباط الگوریتم PSO و نرم افزار ADVISOR

به‌منظور بهینه‌سازی تابع هدف مسئله به‌وسیله الگوریتم PSO پیشنهادی نیاز به روابط مابین قیود مسئله و پارامترهای استراتژی کنترل در تابع هدف‌داریم. روابط بین پارامترهای تابع هدف، پارامترهای استراتژی کنترل و قیود اشاره‌شده در قسمت ۳ به‌صورت توابع غیرخطی بوده که توسط خود نرم‌افزار شبیه‌ساز خودروی هیبریدی ADVISOR محاسبه می‌گردد. درواقع نرم‌افزار شبیه‌ساز با الگوریتم PSO پیشنهادی ترکیب‌شده تا بتواند تابع هدف ارائه‌شده در معادله ۲ را با توجه به قیود موجود بهینه نماید. به عبارتی در این مسیر همراه با مینیمم کردن مصرف سوخت و همچنین ضرایب جریمه مربوط به آلاینده‌ها، قیود اشاره‌شده در جدول ۲، قیود رابطه ۳ و محدودیت‌های ذکرشده برای پارامترهای استراتژی کنترل جدول ۳ را برآورده می‌سازد.

در فلوچارت شکل (۵) نحوه ارتباط الگوریتم PSO و نرم‌افزارADVISOR نمایش داده‌شده است.

در مسئله بهینه‌سازی، پارامترهای استراتژی کنترل که در جدول ۳ تعریف‌شده است، به‌عنوان پارامترهای تصمیم گیر و با هدف کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌ها به صورت بهینه انتخاب می‌شوند. این پارامترها را در غالب بردار x به صورت زیر نشان می‌دهیم.

x= {SOC_L SOC_H T_{ch} T_{min} T_{off} ELS_L ELS_H D_{ch}}

همچنین با توجه به این‌که کاهش سوخت لزوماً منجر به کاهش آلایندها نمی‌شود و این قیود در تضاد با یکدیگر بوده و در یک موقعیت مشابه ارضا نمی‌شوند، بنابراین دستیابی به کمینه‌ی مطلق مصرف سوخت و آلاینده‌ها به صورت هم‌زمان امکان‌پذیر نیست و چاره‌ای جز مصالحه بین آن‌ها وجود ندارد. از طرف دیگر کمینه کردن مصرف سوخت و آلاینده‌های خروجی خودرو منجر به کاهش عملکردهای دینامیکی خودرو مانند شتابگیری و شیب پیمایی می‌شود، به همین دلیل استانداردهای عملکردی نیز برای سنجش کمی رفتار خودرو به‌صورت محدودیت‌های مسئله بهینه‌سازی تعریف‌شده است (قیود جدول ۲). بدین ترتیب با توجه به استراتژی کنترل و استفاده از الگوریتم PSO و نرم‌افزار ADVISOR پارامترهای تصمیم گیر بردار x در هر تکرار به صورتی انتخاب می‌شوند که مصرف سوخت و گازهای آلاینده به سمت مینیمم شدن پیش برود و همچنین قیود غیرخطی حاکم بر خودرو نیز ارضا گردد. مراحل انجام کار و همچنین طریقه ارتباط بین الگوریتم بهینه‌سازی PSO و نرم‌افزار ADVISOR را می‌توان به‌صورت الگوریتم قدم‌به‌قدم زیر تعریف نمود.

۱- تولید تصادفی جمعیت اولیه به‌طور ساده عبارت است از تعیین تصادفی محل اولیه ذرات با توزیع یکنواخت در فضای حل (فضای جستجو). برای این کار به‌طور فرضی تعداد جمعیت و تعداد تکرار را انتخاب می‌نماییم. مرحله تولید تصادفی جمعیت اولیه تقریباً در تمامی الگوریتم‌های بهینه‌سازی احتمالاتی وجود دارد. اما در این الگوریتم علاوه بر محل تصادفی اولیه ذرات، مقداری برای سرعت اولیه ذرات نیز اختصاص می‌یابد. پس از تعیین تعداد جمعیت، به همین تعداد ذره یا متغیر ایجاد می‌شود که مقدار این ذره‌بین کران بالا و کران پایین متغیر موردنظر ما قرار دارد و مقدار این ذره همان موقعیت ذره است. همچنین منظور از موقعیت هر ذره همان تعیین مقدار متغیرهای تصمیم‌گیرنده بردار x استراتژی کنترل با توجه به کران بالا و پایین هر یک طبق جدول ۳ می‌باشد.

۲- در این مرحله با فراخوانی نرم‌افزار ADVISOR پارامترهای تصمیم گیر بردار x که در مرحله قبلی به‌دست‌آمده به نرم‌افزار داده می‌شود و تابع هدف تعریف‌شده در ۲ برای هر ذره محاسبه می‌شود و همچنین قیود مسئله بهینه‌سازی نیز با توجه به مقادیر انتخاب‌شده برای متغیرهای تصمیم‌گیرنده در مرحله قبل برای هر ذره از جمعیت را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم و نتایج را به الگوریتم PSO بر می‌گردانیم.

۳- مقدار تناسب (fitness) را برای هر ذره با توجه به مقدار تابع هدف و ضرایب پنالتی محاسبه می‌نماییم و P_{best} و G_{best} تولید جاری را نیز تعیین می‌نماییم.
۴- موقعیت و سرعت هر ذره را مطابق با فرمول‌های داده‌شده در بخش ۴-۱ و ۴-۲ به‌روز می‌نماییم.
۵- الگوریتم متوقف می‌شود اگر شاخص همگرایی ارضا گردد. یا تعداد تکرارها به اتمام برسد. در غیر این صورت پس از محاسبه کردن مقادیر متغیرهای تصمیم گیر جدید (به‌روزرسانی مکان جدید ذرات) به گام دو می‌رویم.

۵- نتایج بهینه‌سازی

در این قسمت جهت ارزیابی مدل و الگوریتم PSO پیشنهادی، یک خودروی هیبرید موازی را مورد تست قرار داده‌ایم. مشخصات خودروی تست مورداستفاده در جدول ۴ آمده است. همچنین ازآنجایی‌که در الگوریتم بهینه‌سازی ارائه‌شده از نرم‌افزار ADVISOR استفاده‌شده است، نیاز به یک چرخه رانندگی می‌باشد. چرخه رانندگی درواقع یکسری مسیرهای مشخص با مکان و کشور معلوم، همچنین شتاب و سرعت مشخص می‌باشند که به منظور تست خودروی هیبریدی مورداستفاده قرار می‌گیرند، این چرخه‌ها در نرم‌افزار موجود و قابل انتخاب می‌باشند. در این بهینه‌سازی از چرخه FTP که یک چرخه رانندگی استاندارد شهری امریکا است، استفاده می‌نماییم. مشخصات این چرخه نیز در جدول ۵ آمده است.

جدول ۴ - مشخصات خودروی تست[۳۷]

جرم شاسی	۱۰۷۴کیلوگرم
ضریب آیرودینامیکی	۰/۳۳
سطح جلوی خودرو	۲ مترمربع
نوع باتری	باتری سرب-اسید دارای ۱۴ماژول و ظرفیت هر ماژول ۲۶ آمپر ساعت
نوع موتوربرقی و توان آن	موتور PM (آهنربای دائم) با بازده ۰/۹۲ و توان ۵۸ کیلووات و گشتاور ۴۰۰ نیوتن بر متر
نوع موتور احتراقی و توان آن	موتور اشتعال جرقه‌ای با توان ۴۱ کیلووات و بازده ۰/۳۴ و گشتاور ۸۲ نیوتن بر متر
جعبه‌دنده	۵ دنده دستی
شعاع چرخ	۰/۲۸۲ متر

جدول ۵- مشخصات چرخه رانندگی FTP [۲۵]

نام سیکل	FTP آمریکا
زمان	۲۴۷۷ ثانیه
مسافت	۱۷/۷۷ کیلومتر
بیشترین سرعت	۹۱ /۲۵ کیلومتر
میانگین سرعت	۲۵/۸۲ کیلومتر
بیشترین شتاب	۱/۴۸ متر بر مجذور ثانیه
زمان توقف	۳۶۰ ثانیه
تعداد توقف	۲۲

۵-۱- نتایج شبیه‌سازی

با استفاده از الگوریتم PSO پیشنهادی و نرم‌افزار ADVISOR، پارامترهای استراتژی کنترل برای یک خودروی هیبرید موازی با مشخصات جدول ۴ و چرخه رانندگی FTP ارائه‌شده در جدول ۵، محاسبه گردیده است. نتایج حاصله را می‌توان در جدول ۶ مشاهده نمود. در این جدول بهترین مقادیر بهینه برای پارامترهای استراتژی کنترل ارائه‌شده است.

جدول ۶ - نتایج بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم PSO

نام پارامتر	مقدار بهینه
SOC_L	۰/۳۰۲۳
SOC_H	۰/۶۹۹۷
T_{ch}	۳۸/۷۸۸۹
T_{min}	۰/۱۶۳۹
T_{off}	۰/۵۹۲۵
ELS_L	۲/۰۴۹۱
ELS_H	۱۰/۲۲۲۵
D_{ch}	۰/۴۹۴۲

با در نظر گرفتن این پارامترها برای خودروی مورد تست و شبیه‌سازی عملکرد این خودرو با استفاده از نرم‌افزار ADVISOR مقدار مصرف سوخت و میزان تولید آلاینده‌ها مطابق جدول ۷ (ستون سوم) به‌دست‌آمده است. ستون دوم جدول ۷ نیز میزان مصرف سوخت و آلاینده‌ها را برای حالت بدون بهینه‌سازی پارامترهای استراتژی کنترل نشان می‌دهد(در خودرو بهینه نشده از مقادیر قراردادی نرم‌افزارADNISOR برای پارامترهای استراتژی کنترل استفاده‌شده است). در ستون چهارم این جدول نیز میزان کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌ها حالت خودرو بهینه‌شده نسبت به خودرو بهینه نشده به‌صورت درصدی ارائه‌شده است. نتایج این جدول و مقایسه نتایج به‌روشنی نشان می‌دهد که الگوریتم PSO پیشنهادی توانسته است

پارامترهای استراتژی کنترل را به صورتی بهینه نماید که میزان مصرف سوخت و تولید آلاینده‌ها به میزان قابل‌توجهی کاهش یابد.

جدول ۷ - نتایج شبیه‌سازی خودرو بهینه‌شده و خودرو بهینه نشده

پارامتر	خودروی هیبرید بدون بهینه‌سازی	خودروی هیبرید بهینه‌سازی شده	درصد کاهش
مصرف سوخت در ۱۰۰ کیلومتر	۶ لیتر	۴ لیتر	۳۳/۳
میزان آلاینده NOx (اکسیدهای نیتروژن)	۰/۲۲ گرم بر کیلومتر	۰/۱۴۷ گرم بر کیلومتر	۳۴/۱
میزان آلاینده HC (هیدروکربن‌های نسوخته)	۰/۲۵۷ گرم بر کیلومتر	۰/۲۰۸ گرم بر کیلومتر	۱۹/۱
میزان آلاینده CO (مونوکسید کربن)	۱/۲۶۶ گرم بر کیلومتر	۱/۰۶۷ گرم بر کیلومتر	۱۶

۵-۲- مقایسه نتایج حاصله از الگوریتم پیشنهادی با نتایج ارائه‌شده در کارهای تحقیقاتی گذشته

در این قسمت به‌منظور نشان دادن کارایی الگوریتم پیشنهادی، نتایج حاصله را با نتایج به‌دست‌آمده از چند الگوریتم دیگر که در کارهای گذشته ارائه‌شده است مورد مقایسه قرار داده‌ایم. جدول ۸ نتایج الگوریتم‌های گذشته را نشان می‌دهد. نتایج این الگوریتم‌ها به‌طور مستقیم از مراجع ذکرشده آمده است. ازآنجایی‌که خودروهای مورداستفاده در همه الگوریتم‌ها باهمدیگر متفاوت می‌باشند (البته چرخه رانندگی‌ها در همه خودروهای مورد مقایسه یکسان و همان FTP می‌باشد)، برای مقایسه نتایج، درصد کاهش میزان مصرف سوخت و تولید آلاینده‌ها در حالت خودرو بهینه‌شده نسبت به حالت بهینه نشده موردتوجه قرارگرفته است. نتایج این مقایسه در جدول ۹ ارائه‌شده است. در اینجا نیز با توجه به نتایج جدول ۹ مشخص است که الگوریتم PSO پیشنهادی توانسته است در اکثر موارد به درصد کاهش قابل‌ملاحظه‌تری در میزان مصرف سوخت و تولید آلاینده‌ها منجر گردد.

همچنین جهت نشان دادن تأثیر در نظر گرفتن تابع هدف پیشنهادی در معادله ۲ و استفاده از ضرایب جریمه نسبت به در نظر گرفتن تابع هدف رابطه ۱ در مسئله بهینه‌سازی و در نتایج حاصله، تابع هدف الگوریتم PSO پیشنهادی را از رابطه ۲ به رابطه ۱ تغییر داده‌ایم. در جدول ۱۰ نتایج حاصله برای در نظر گرفتن تابع هدف شماره ۱ ارائه‌شده و با نتایج در نظر گرفتن تابع هدف شماره ۲ مورد مقایسه قرارگرفته است. مقایسه درصد کاهش میزان مصرف سوخت و تولید آلاینده‌ها در این دو حالت نیز نشان می‌دهد، در نظر گرفتن تابع هدف شماره ۲ و ضرایب جریمه در الگوریتم PSO پیشنهادی، تأثیر زیادی در بهبود نتایج حاصله دارد.

جدول ۸ - مقایسه نتایج مقاله‌های ۱ و ۲

پارامتر	خودروی هیبرید بدون بهینه‌سازی		خودروی هیبرید بهینه‌سازی شده	
	مقاله ۱ با الگوریتم ممتیک [۹]	مقاله ۲ با الگوریتم ژنتیک[۱۱]	مقاله۱	مقاله۲
FC	۸/۸	۵/۷۷	۷/۳	۵/۱۸
NOx	۰/۱۸۷	۰/۱۸۶	۰/۲۸۰	۰/۱۳
HC	۰/۳۱۱	۰/۲۵۸	۰/۲۹۲	۰/۱۵۷
CO	۶/۷۳	۰/۷۲۲	۲/۰۰۱	۰/۷۳

جدول ۹- مقایسه درصد بهینه‌سازی مقاله ۱و ۲ با مقاله ارائه‌شده

پارامتر	مقاله۱ با الگوریتم ممتیک	مقاله۲ با الگوریتم ژنتیک	مقاله با تابع هدف پیشنهادی
درصد بهینه-سازیFC	۱۷/۰۴	۱۰/۲۲	۳۳/۳
درصد بهینه-سازیNOx	-۵۰/۵	۳۰/۱	۳۴/۱
درصد بهینه-سازیHC	۶/۱	۳۹	۱۹/۱
درصد بهینه-سازیCO	۳۰۰	-۱	۱۶

همچنین جهت نشان دادن کارایی الگوریتم PSO پیشنهادی با استفاده از چرخه‌های رانندگی دیگر، یک‌بار هم مسئله بهینه‌سازی را برای خودرویی با چرخه رانندگی UUDS حل نموده‌ایم. مشخصات این چرخه در مرجع [۹] آمده است. نتایج حاصله نیز در جدول ۱۱ ارائه‌شده است. نتایج نشان می‌دهد الگوریتم برای چرخه‌های رانندگی دیگر نیز به‌خوبی قادر است موجب بهبود و بهینه‌تر شدن نتایج گردد.

جدول ۱۰ : مقایسه درصد بهینه‌سازی تابع هدف اولیه با تابع هدف پیشنهادی

پارامتر	خودروی هیبرید بهینه-سازی شده		درصد کاهش	
	با تابع هدف اولیه	با تابع هدف پیشنهادی	با تابع هدف اولیه	با تابع هدف پیشنهادی
FC	۴/۵	۴	۲۵	۳۳/۳
NOx	۰/۱۸۷	۰/۱۴۷	۱۵	۳۴/۱
HC	۰/۲۳۵	۰/۲۰۸	۸/۵	۱۹/۱
CO	۱/۲۸۴	۱/۰۶۷	-۴/۵	۱۶

جدول ۱۱- نتایج حاصله برای چرخه رانندگی UUSD

پارامتر	خودروی هیبریدی بدون بهینه‌سازی	خودروی هیبریدی بهینه‌سازی شده	در صد بهبود
FC	۶/۲	۴	۳۵/۳
NOx	۰/۳۴۵	۰/۱۸۷	۵۴/۲
HC	۰/۷۴۳	۰/۶۲	۱۶/۵۵
CO	۳/۳۴۹	۳/۱۹۷	۴/۵

۶- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله به بهینه‌سازی پارامترهای استراتژی کنترل یک خودروی هیبریدی موازی با استفاده از روش PSO پرداخته‌شده است. در این جهت با انتخاب یک خودروی هیبرید موازی و همچنین چرخه رانندگی FTP و به کمک نرم‌افزار ADVISOR و MATLAB خودروی هیبریدی موردنظر شبیه‌سازی‌شده و پارامترهای بهینه استراتژی کنترل به‌دست‌آمده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن ضرایب جرائم مربوط به آلایندگی‌ها در تابع هدف مسئله بهینه‌سازی، در حین آنکه مصرف سوخت به حداقل رسیده، همچنین میزان آلایندگی‌های مختلف نیز به مقدار قابل‌توجهی کاهش‌یافته است. به‌علاوه در نظر گرفتن ضرایب انقباض و اعمال اثر آینه‌ای سرعت، کیفیت نتایج حاصل از الگوریتم PSO را در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های استفاده‌شده در این زمینه بهبود بخشیده است. الگوریتم پیشنهادی می تواند به میزان قابل قبولی، موجب بهبود عملکرد خودرو حتی در چرخه های دیگر رانندگی نیز گردد و در نتیجه شرکت های خودرو سازی را در زمینه کاهش مصرف سوخت و کاهش گازهای گلخانه-ای، به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع آسیب‌زننده به محیط‌زیست و سلامت انسان، یاری نماید.

۷- مراجع

[۱] محمود سعادت فومنی و علی امین بیدختی،بررسی اثرات سیکل شهری بر روی میزان مصرف سوخت خودرو، مجله مدل سازی در مهندسی، دوره ۵، شماره ۱۹، زمستان ۱۳۸۸، صفحه ۴۷-۵۶.

[2] Zhang S, Xiong R, Sun F, "Model predictive control for power management in a plug-in hybrid electric vehicle with a hybrid energy storage system", Applied Energy, Vol. 185, 2017, pp. 1654-1662.

[3] Poullikkas A, "Sustainable options for electric vehicle technologies". Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 41, 2015, pp. 1277–1287.

[4] Yang Y, Hu X, Pei H, Peng Z, "Comparison of power-split and parallel hybrid powertrain architectures with a single electric machine: dynamic programming approach", Applied Energy, Vol. 168, 2016, pp. 683–690.

[5] Castaings A, Lhomme W, Trigui R, Bouscayrol A, "Comparison of energy management strategies of a battery/super capacitors system for electric vehicle under real-time constraints", Applied Energy, Vol. 163, 2016, pp. 190–200.

[6] Wieczorek M, Lewandowski M. "A mathematical representation of an energy management strategy for hybrid energy storage system in electric vehicle and real time optimization using a genetic algorithm", Applied Energy, Vol. 192, 2017, pp. 222-233.

[7] Thibault L, Sciarretta A, Degeilh P, “Reduction of pollutant emissions of diesel mild hybrid vehicles with an innovative Energy Management Strategy”, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). 2017.

[۸] علی اکبر نیرومندفر، آرش کیومرثی و حمیدرضا هوشیارمنش، کنترل و بهینه‌سازی سوخت در خودروهای هیبریدی، چهارمین کنفرانس ملی ایده‌های نو در مهندسی برق، ۱۳۹۴.

[9] Yu-Huei Cheng, Ching-Ming Lai, “Control Strategy Optimization for Parallel Hybrid Electric Vehicles Using a Memetic Algorithm”, Energies, Vol. 10, No. 3. March 2017.

[10] Capata, R. “Urban and Extra-Urban Hybrid Vehicles: A Technological Review”, Energies, Vol. 11, No. 11, 2018.

[۱۱] صفیه‌السادات شیخعلیشاهی، مهدی میرزایی، سجاد آقاسی زاده و رحیم خوشبختی، بهینه‌سازی کنترل کننده خودروی هیبریدالکتریکی با در نظر گرفتن استاندارد آلایندگی یورو ۳، نشریه سامانه‌های غیرخطی در مهندسی برق،۱۳۹۲.

[۱۲] مجتبی دری و امیر حسین شامخی، بهینه‌سازی مصرف سوخت در یک خودروی هیبرید موازی دارای سیستم انتقال قدرت CVT، هجدهمین همایش سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک ایران، ۱۳۸۹.

[13] Yu H, Kuang M, McGee R, “Trip-oriented energy management control strategy for plug-in hybrid electric vehicles”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 22, 2014, pp. 1323–1336.

[14] Panday A, Bansal H.O, “Energy management strategy implementation for hybrid electric vehicles using genetic algorithm tuned Pontryagin’s minimum principle controller”, International Journal of Vehicular Technology, Vol. 3, 2016, pp. 1-13.

[15] Lincun Fang, Shiyin Qin, Gang Xu, Tianli Li and Kemin Zhu. “Simultaneous Optimization for Hybrid Electric Vehicle Parameters Based on Multi-Objective Genetic Algorithms”, Energies, Vol. 4, No. 3, 2011, pp. 1-13.

[16] Montazeri-Gh, M.; Poursamad, A.; Ghalichi, B. “Application of genetic algorithm for optimization of control strategy in parallel hybrid electric vehicles”, Journal of the Franklin Institute, Vol. 343, No. 4, 2006, pp. 420-435.

[17] M· Wust, M. Kruger, D. Naber, “Operating strategy for optimized CO2 and NOx emissions of diesel-engine mild-hybrid vehicles”, 15. Internationales Stuttgarter Symposium, 2015, pp. 93-111.

[18] Ali Behzadpour and Hossein Eliasi. “Fuzzy Based Controller Design for Parallel Hybrid Electric Vehicle an appoach to fuel consumption and emission reduction”, 2nd International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI), 2015

[19] Z. Dezong Z, Richard S, Guangyu D , Edward w, “Real-time energy management for diesel heavy duty hybrid electric vehicles”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 23, No. 3, 2015, pp.829-841.

[20] Nuesch T,Wang M, Isenegger P, Onder C, Steiner R, “Optimal energy management for a diesel hybrid electric vehicle considering transient PM and quasi-static NOx emissions”, Control Engineering Practice, Vol. 9, 2014, pp. 266-276.

[21] Hao J, Yu Z, Zhao Z, Shen, P, Zhan X, “Optimization of key parameters of energy management strategy for hybrid electric vehicle using DIRECT algorithm”, Energies, Vol. 9, No. 12, 2016, pp. 1-24.

[22] Daowei Zhu, Hongrui Chen, Shishun Zhu and Gang Yang. “Optimization of Control parameters for a Parallel hybrid electric vehicle Based on AMESim”, IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2014.

[23] GUO Yi-feng, Fan Jian-wen, LIN Chuan and HUANG Li-min. “Control Strategy Simulation of Hybrid Electric Vehicle”, IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific, 2014.

[24] Grondin O, Thibault L, Quérel C, “Energy Management Strategies for Diesel Hybrid Electric Vehicle”, Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles, Vol. 70, No. 1, 2015, pp. 125-141.

[25] Heavy-Duty FTP Transient Cycle. Available:

Online https://www.dieselnet.com/standards/cycles/ftp_trans.php

[26] Johnson, V.H.; Wipke, K.B.; Rausen, D.J. “HEV control strategy for real-time optimization of fuel economy and emissions”, Society of Automotive Engineers, 2000.

[27] Zhang X. and Mi C., “Vehicle Power Management: Modeling, Control and Optimization”, Springer, 2011.

[28] Deng T, Chunsong L, Luo J and Chen B, “NSGA-II multi-objectives optimization algorithm for energy management control of hybrid electric vehicle”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2018.

[29] Martorell, S.; Carlos, S.; Sanchez, A.; Serradell, V. “Constrained optimization of test intervals using a steady-state genetic algorithm”, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 67, No. 3, 2000, pp. 215-232.

[30] Wu, J.; Zhang, C.-H.; Cui, N.-X. “PSO algorithm-based parameter optimization for HEV powertrain and its control strategy”, International Journal of Automotive Technology, Vol. 9, No. 1, 2008, pp. 53-59.

[31] Long, V.; Nhan, N. “Bees-algorithm-based optimization of component size and control strategy parameters for parallel hybrid electric vehicles”, International Journal of Automotive Technology, Vol. 13, No. 7, 2012, pp. 1177–1183.

[32] Moore, T.C.; Lovins, A.B. “Vehicle design strategies to meet and exceed PNGV goals”, SAE Technical Papers, 1995.

[۳۳] علی قدوسیان و مجتبی شیخی، بهینه کردن موقعیت تکیه‌گاه های سازه جهت حداقل کردن ممان خمشی با الگوریتم گروه ذرات تحت بارگذاری چندگانه، مجله مدل سازی در مهندسی،دوره ۸، شماره ۲۲، پاییز ۱۳۸۹، صفحه ۵۹-۶۷.

[۳۴] مسعود احمدی گرجی و نیما امجدی، برنامه ریزی توسعه پویای شبکه های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید دو سطحی، مجله مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴۴، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۱۴۳-۱۵۷.

[۳۵] حسین شریف زاده ونیما امجدی، توزیع بهینه توان راکتیو با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات، مجله مدل سازی در مهندسی،دوره ۴، شماره ۱۸، پاییز ۱۳۸۸، صفحه ۶۷-۷۳.

[۳۶] حسین همتیان ، عبدالحسین فریدون و مرتضی رجب پور، بهینه سازی پانل ساندویچی هسته منشوری بر اساس الگوریتم گروه ذرات، مجله مدل سازی در مهندسی،دوره ۸، شماره ۲۰، بهار ۱۳۸۹، صفحه ۱۷-۲۶.

[37] ADVISOR Help on Version and Type (Software)