

# بهینه‌سازی و کنترل خودروهای هیبریدی با در نظر گرفتن جرائم مربوط به آلاینده‌گی و بر

## اساس الگوریتم PSO

محمدرضا انصاری<sup>۱\*</sup> و ایمان همت<sup>۲</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۱۲	در این مقاله روشی جدیدی به منظور بهینه کردن استراتژی کنترل در خودروهای هیبریدی موازی ارائه شده است. با پیشنهاد یک تابع هدف جدید و به منظور مدیریت مؤثر تقسیم توان بین موتورهای احتراقی و الکتریکی، میزان مصرف سوخت بهینه شده و همچنین میزان آلاینده‌گی‌ها نیز با در نظر گرفتن توابع جریمه به حداقل ممکن رسیده است. با استفاده از نرم افزار <sup>۳</sup> ADVISOR، به عنوان یکی از نرم افزارهای متداول در زمینه شبیه سازی خودروهای هیبریدی و همچنین معادلات غیرخطی حاکم بر این خودروها، یک خودروی هیبرید موازی در چرخه رانندگی شهری آمریکا را شبیه سازی نموده و جهت بهینه کردن استراتژی کنترل از یک الگوریتم توسعه یافته بر اساس روش بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO <sup>۴</sup> ) استفاده شده است. در الگوریتم PSO پیشنهادی از ضرایب انقباض و اعمال اثر آینده ای سرعت، جهت افزایش کارایی روش استفاده می گردد. با محدودیت های جدیدی که برای الگوریتم PSO پیشنهاد گردیده، نتایج حاصله بهبود یافته است. همچنین نتایج شبیه سازی با نتایج به دست آمده از الگوریتم های ارائه شده در مقالات اخیر مقایسه گردیده است. این مقایسه نیز کارایی و دقت الگوریتم پیشنهادی را در بهینه سازی پارامترهای کنترل که منجر به کاهش مصرف سوخت و آلاینده های خروجی از خودرو شده است، نشان می دهد.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۱۶	
<b>واژگان کلیدی:</b> خودروی هیبریدی موازی، استراتژی کنترل، الگوریتم PSO توسعه یافته مصرف سوخت، ضرایب جریمه آلاینده‌گی.	

### ۱- مقدمه

در عصر جدید که گازهای گلخانه‌ای به عنوان یکی از اصلی ترین منابع آسیب زننده به محیط زیست و سلامت انسان مطرح هستند خودروها به عنوان یکی از اصلی ترین تولیدکننده های این گازها بسیار مورد توجه قرار گرفته اند و اکثر شرکت های خودروسازی به سمت کاهش این گازهای آلاینده و یا حذف کامل آن با جایگزینی آن با سوخت های پاک نظیر انرژی الکتریکی رفته اند [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 خودروهایی 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]. به منظور کاهش این آلاینده ها در خودروها ابتدا ایده استفاده از انرژی الکتریکی به عنوان انرژی جایگزین سوخت های فسیلی مطرح شد؛ اما این خودروها به سبب مشکلاتی از جمله زمان شارژ شدن، جایگاه های 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

<sup>۳</sup> ADvanced Vehicle SimulatOR

<sup>۴</sup> Particle Swarm Optimization

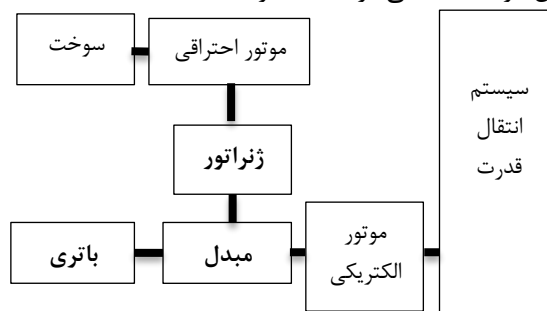
پیگیربندی خودروهای هیبرید سری و موازی در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است.

در پیگیربندی 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 پیگیربندی 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 پیگیربندی، 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. در نتیجه در هیبرید موازی به دلیل استفاده موتور احتراقی و موتور الکتریکی کوچک‌تر با همان توان نسبت به هیبرید سری، این خودرو در مسافت‌های طولانی بهینه‌تر می‌باشد [۹].

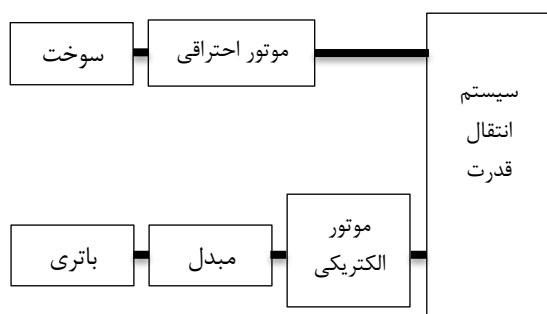
به منظور افزایش کارایی و بهره‌وری در خودروهای هیبریدی از یک استراتژی کنترل جهت مدیریت مناسب انرژی خودرو استفاده می‌گردد [۱۳]. در مقالات گذشته از روش‌های مختلفی از جمله الگوریتم ژنتیک، استراتژی کنترل فازی، الگوریتم ممیتیک و کنترل فازی به‌منظور بهینه‌سازی خودروی هیبریدی استفاده شده است. در مرجع [۱۱] با استفاده از یک استراتژی کنترلی به نام استراتژی کنترل کمک الکتریکی و با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی برخی از پارامترهای کنترلی پرداخته شده است که در نتیجه این روش منجر به کاهش نسبی میزان آلاینده‌گی‌ها شده است. در مرجع [۱۴] یک استراتژی مدیریت انرژی کارآمد سوخت ارائه شده است که جهت تقسیم توان در یک خودروی هیبریدی از حالت اصلاح شده روش تخمین شارژ استفاده می‌کند. استراتژی مدیریت انرژی در این مرجع نیز از یک الگوریتم ژنتیک اصلاح شده جهت محاسبه مقادیر بهینه پارامترهای مختلف استفاده می‌نماید. در مرجع [۹] نیز با استفاده از الگوریتمی به نام ممیتیک به بهینه‌سازی همه‌ی پارامترهای کنترلی، استراتژی کنترل پرداخته شده است که به دلیل مشکلات تابع هدف میزان قابل قبولی کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌گی‌ها را در پی نداشته است. همچنین در مرجع [۱۵] با استفاده از ترکیب برخی پارامترهای استراتژی کنترل و

نشاندن و نتوانستند درصد قابل توجهی از خودروهای تولیدی را در اختیار بگیرند. به دلایل گفته شده در بالا ایده تولید خودروی دیگری به نام هیبرید مطرح شد که از ترکیب یک موتور احتراقی و یک یا چند موتور الکتریکی تشکیل شده بود. عملکرد این خودروها به‌گونه‌ای بود که مشکلات خودروهای الکتریکی که در بالا گفته شد را نداشته و تنها میزان تولید آلاینده‌گی 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 تبدیل شده 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 و ۹]. 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]. به‌طور کلی پیگیربندی متداول برای خودروهای هیبریدی، پیگیربندی سری و موازی است و در موارد دیگر از ترکیب این دو استفاده می‌شود [۱، ۱۱ و ۱۲].



شکل ۱- پیگیربندی خودرو هیبرید سری [۱۲]



شکل ۲- پیگیربندی خودرو هیبرید موازی [۱]

استفاده نموده است.

در مقاله [۲۲] هم به بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی یک خودروی هیبریدی با مدل کردن آن در نرم‌افزار AMESim پرداخته شده 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 ارائه شده 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 می‌نماید. 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 می‌نماید. و دومین تابع نیز نسبت تقسیم گشتاور مابین موتور احتراقی و موتور الکتریکی رو تطبیق می‌دهد که در ابتدا از استراتژی کنترل بهینه در خلال بهره برداری گذار و تولید NOx، محاسبه می‌شود.

در مقاله حاضر نیز با استفاده از کلیه پارامترهای استراتژی کنترل موجود در نرم‌افزار ADVISOR یک استراتژی کنترل جهت بهینه‌سازی و کنترل خودروهای هیبریدی با در نظر گرفتن جراثم مربوط به آلاینده‌گی و بر اساس الگوریتم PSO ارائه شده 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 آلاینده‌گی‌ها 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

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 پرداخته شده است. نتایج آن که به صورت کران بالا و پایین بهترین نتایج در پی چند بهینه‌سازی به‌دست آمده، کاهش نسبی آلاینده‌گی‌ها و مصرف سوخت را در پی داشته است؛ اما این نتایج به صورت 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] به منظور کاهش انتشار آلاینده‌های خودروی‌های هیبریدی، با استفاده از یک استراتژی مدیریت انرژی نوآورانه که از مزایای هیبریداسیون استفاده می‌کند به منظور 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، به منظور 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 بهینه‌سازی مصرف معادل بر طبق منطق فازی ارائه شده است که یک راه حل مدیریت هوشمند انرژی بلادرنگ را جهت خودروهای هیبرید مجهز به موتور دیزلی ارائه می‌نماید. روش پیشنهادی در این مرجع از طریق شبیه‌سازی در دو دوره رانندگی گذرا مورد تایید قرار گرفته است. در مرجع [۲۰] یک استراتژی مدیریت انرژی بهینه بر اساس برنامه ریزی پویا، نقشه‌های 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 می‌باشد. 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

جدول ۱ - پارامترهای استراتژی کنترل خودروهای هیبریدی

نام پارامتر	توضیحات
SOC <sub>L</sub>	حداقل سطح شارژ مجاز باتری.
SOC <sub>H</sub>	حداکثر سطح شارژ مجاز باتری.
T <sub>ch</sub>	گشتاور اضافی به‌منظور شارژ باتری که توسط موتور احتراقی تأمین می‌شود.
T <sub>min</sub>	ضریبی از گشتاور حداکثر است و در حالتی رخ می‌دهد که سطح شارژ باتری کمتر از SOC <sub>L</sub> باشد. در این حالت این گشتاور توسط موتور احتراقی تأمین می‌شود.
T <sub>off</sub>	ضریبی از گشتاور حداکثر است که اگر گشتاور موردنیاز در یک سرعت معین از آن کمتر باشد موتور احتراقی خاموش می‌شود.
ELS <sub>L</sub>	حداقل سرعتی که در کم‌تر از آن سرعت، خودرو کاملاً الکتریکی عمل می‌کند.
ELS <sub>H</sub>	حداکثر سرعتی که در کم‌تر از آن سرعت، خودرو کاملاً الکتریکی عمل می‌کند.
D <sub>ch</sub>	استراتژی نگهداری شارژ باتری‌ها.

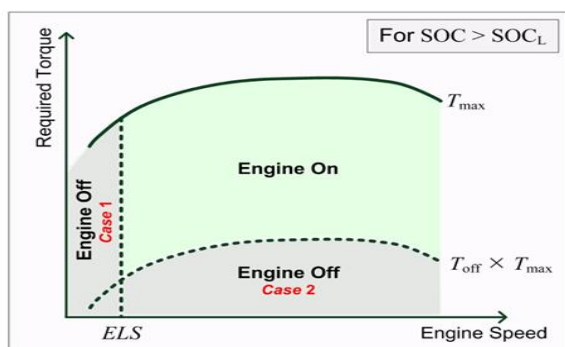
شده است.

در ادامه این مقاله در بخش دوم به بررسی استراتژی کنترلی خودروهای هیبریدی موازی و اثرات آن بر خودروی هیبریدی پرداخته شده است. در بخش سوم نیز، تابع هدف و قیود مسئله بهینه‌سازی ارائه شده است. در بخش چهارم، روش حل مسئله بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم PSO پیشنهادی و همچنین نحوه‌ی تعامل نرم‌افزار شبیه‌ساز ADVISOR و الگوریتم PSO مورد بحث قرار گرفته است. بخش پنجم نتایج شبیه‌سازی یک خودرو هیبریدی موازی را ارائه می‌نماید؛ و در نهایت بخش ششم، نتایج به‌دست آمده مورد بحث قرار گرفته است.

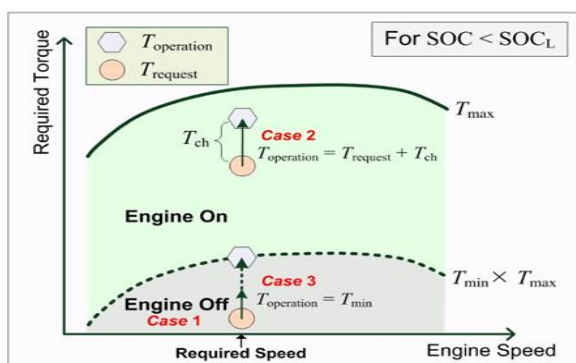
## ۲- استراتژی کنترل خودروی هیبرید موازی

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 در واقع 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 در نتیجه 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 باتری 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].



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

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 مورد استفاده قرار گرفته که هدف اصلی همه‌ی آن‌ها کاهش میزان مصرف سوخت و آلاینده‌ها است و فرم اصلی آن‌ها به صورت زیر است [۹، ۱۵، ۱۶، ۲۹-۳۱]:

$$F = w_1 FC + w_2 NO_x + w_3 HC + w_4 CO \quad (1)$$

در این تابع هدف ( $W_{i=1, \dots, 4}$ ) فاکتورهای وزن دهی هستند که مقادیر آن‌ها بر اساس آزمون و خطا و با توجه به میزان اولیه پارامترهای تابع هدف در خودروی مورد بررسی تعیین می‌شود. همچنین در این رابطه  $FC$  سوخت مصرف شده در هر صد کیلومتر برحسب لیتر است،  $NO_x$ ،  $HC$  و  $CO$  به عنوان گازهای آلاینده خروجی آگروز به ترتیب بیانگر اکسیدهای نیتروژن، هیدروکربن‌های نسوخته و منواکسید کربن می‌باشند. در این رابطه با توجه به وجود ۴ فاکتور وزن دهی میزان آزمون و خطا بالا است در نتیجه پیدا کردن وزن‌های که به طور 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 گفته شده بهینه شدن تابع هدف با تعیین وزن امری طاقت‌فرسا و دارای خطای زیاد است. در این مقاله یک تابع هدف پیشنهادی به منظور حل مشکلات بالا به صورت زیر تعریف می‌نماییم:

$$\min: F = FC + a[(Z_1 + Z_2 + Z_3)] \quad (2)$$

در این رابطه  $a$  یک فاکتور وزن دهی است که یک عدد مثبت خیلی بزرگ می‌باشد.  $Z_3, Z_2, Z_1$  ضرایب مربوط به جریمه آلاینده‌های سوخت می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$NO_x - Z_1 \leq NO_x \quad (3)$$

$$HC - Z_2 \leq HC$$

$$CO - Z_3 \leq CO$$

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

باتری (SOC) از حداقل میزان شارژ مجاز آن ( $SOC_L$ ) بیشتر است، در واقع در این وضعیت شارژ باتری‌ها مناسب است. در این حالت اگر سرعت مورد نیاز خودرو کمتر از سرعت ELS باشد و یا همچنین گشتاور مورد نیاز 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 همواره 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 به هیچ عنوان از آستانه حداقل گشتاور ( $T_{min} \times T_{max}$ ) کمتر نمی‌شود. اگر گشتاور مورد نیاز بالاتر از ( $T_{min} \times T_{max}$ ) باشد موتور احتراقی روشن است و گشتاور تولیدی آن شامل گشتاور مورد نیاز خودرو و گشتاور اضافی  $T_{ch}$  است و اگر گشتاور مورد نیاز کمتر از  $T_{min} \times T_{max}$  باشد باز هم 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، به منظور کاهش مصرف سوخت و همچنین آلاینده‌ها این پارامترها باید به صورت بهینه انتخاب شوند. در واقع انتخاب پارامترهای بهینه استراتژی کنترل موجب مینیمم شدن تابع هدف یعنی مصرف سوخت و گازهای آلاینده خواهد شد. این مینیمم شدن تابع هدف باید به گونه‌ای انجام شود که باعث کاهش عملکردهای دینامیکی خودرو مانند شتابگیری، سرعت و شیب‌پیمایی نشود. بدین منظور استانداردهای عملکردی برای خودروی هیبرید تعریف شده 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. به طور کلی مسائل بهینه‌سازی به این گونه است که یک تابع هدف متناسب با مسئله انتخاب شده که مینیمم کردن آن در حضور قیود

<sup>1</sup> Partnership for a New Generation of Vehicles

بهینه‌سازی نمی‌باشند. همچنین به منظور انجام بهینه‌سازی استراتژی کنترل، خود پارامترهای کنترلی (موجود در جدول ۱) 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 <sub>L</sub>	۰/۵	۰/۱
SOC <sub>H</sub>	۱	۰/۵۵
T <sub>ch</sub>	۸۰/۹	۱
T <sub>min</sub>	۱	۰/۰۵
T <sub>off</sub>	۱	۰/۰۵
ELSL	۱۵	۰
ELSH	۳۰	۱۰
D <sub>ch</sub>	۱	۰

#### ۴- روش حل مسئله بهینه‌سازی با استفاده از

##### الگوریتم PSO پیشنهادی

الگوریتم تجمع ذرات که به‌اختصار به آن PSO هم می‌گویند 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 بعدی 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 کلی 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- فرمول بندی الگوریتم PSO

در این الگوریتم ما nPop تا ذره داریم که در فضای مسئله به‌صورت تصادفی پخش شده‌اند 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

(با ضریب a) اضافه می‌گردد. در نتیجه برنامه بهینه‌سازی سعی می‌کند برای کاهش ضرایب جریمه در تابع هدف مقادیر آلاینده‌گی‌ها را تا حد ممکن مینیمم نماید. حتی ممکن است مقادیر آلاینده از مقادیر آلاینده اولیه نیز کمتر گردد (که در نتیجه ضرایب جریمه منفی می‌گردد). با در نظر گرفتن ضرایب جریمه مربوط به آلاینده‌گی‌ها تابع هدف درحالی که سعی می‌کند مقدار سوخت مصرفی را بهینه کرده و به کمترین میزان خود برساند در همان حال مقادیر آلاینده‌گی را نیز به کمترین مقدار خود بهینه می‌نماید که این مقدار حتی می‌تواند از میزان آلاینده‌گی 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 آلاینده‌گی کمتری منجر می‌گردد.

#### ۳-۲- قیود مسئله بهینه‌سازی

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

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

قیود	محدوده عملکرد
شتاب ۹۷-۰ (Km/h)	کمتر از ۱۲ ثانیه
شتاب ۱۳۷-۰ (Km/h)	کمتر از ۲۳ 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 مدت ۲۰ دقیقه با ۲۷۲ کیلوگرم بار اضافی)	بیش از ۶/۵٪
حداکثر شتاب (m/s <sup>2</sup> )	بیش از ۵

به‌طور کلی پارامترهایی استراتژی کنترل به شرطی مجاز به مشارکت در حل مسئله بهینه‌سازی هستند که این پارامترها ابتدا قیود حاکم بر مسئله بهینه‌سازی که در جدول ۲ 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



$$\varphi_1, \varphi_2 > 0 \quad (7)$$

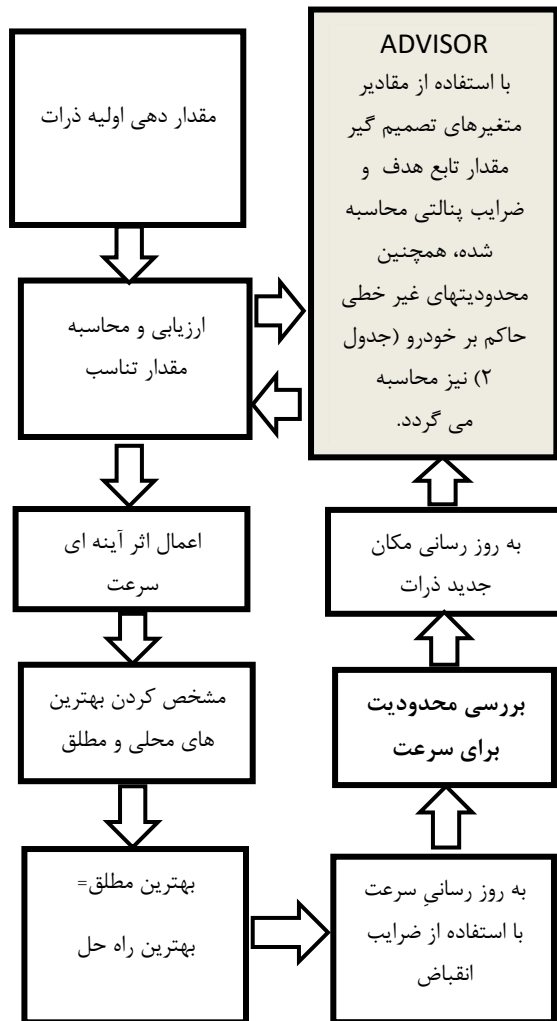
$$\varphi \triangleq \varphi_1 + \varphi_2 > 4 \quad (8)$$

$$\chi = \frac{2}{2 - \varphi + \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}} \quad (9)$$

$$w = \chi \quad (10)$$

$$c1 = \chi\varphi_1 \quad (11)$$

$$c2 = \chi\varphi_2 \quad (12)$$



شکل ۵ - فلوچارت الگوریتم PSO به همراه ارتباط آن با نرم افزار ADVISOR (قسمت های هاشور نخورده متعلق به الگوریتم PSO می باشد).

$c1$  و  $c2$  ضرایب های تصمیم گیری هستند و  $w$  نیز همان ضریب اینرسی می باشد. همچنین  $\chi$  فاکتور انقباض بوده و  $\varphi$  نیز یک عدد ثابت می باشد.

می شود و برای به روزرسانی موقعیت نیز از رابطه (۴) استفاده می گردد:

$$X_j^{k'} = X_j^k + V_j^{k+1} \quad (4)$$

که  $V$  سرعت حرکت ذره و  $X$  موقعیت آن می باشد که به صورت زیر به دست می آید:

$$V_j^{k+1} = w.V_j^k + c1.rand(Pbest_j^k - X_j^k) + c2.rand(Gbest^k - X_j^k) \quad (5)$$

که  $Gbest$  بهترین مقدار تابع برازندگی برای هر فرد و  $Pbest$  بهترین مقدار تابع برازندگی است که تاکنون به آن دست پیدا کرده ایم.  $C1$  و  $C2$  ضرایب تصمیم گیری هستند، که نشان می دهد کدام یک برای ما بیشتر اولویت دارد و با توجه به تجربیات حاصله انتخاب می گردد.  $w$  نیز به ضریب اینرسی معروف می باشد. (معمولاً  $w$  را 1 و  $c1$  و  $c2$  را 2 در نظر می گیرند) [۳۵].

همچنین برای محدودیت سرعت نیز از رابطه (۶) استفاده می نمایم:

$$VelMax = VarMax - VarMin \quad (6)$$

$$VelMin = -VelMax$$

$VelMin$  و  $VelMax$  به ترتیب مقدار بیشینه و کمینه سرعت ذرات می باشند که به الگوریتم فضای جستجوی بیشتری را می دهد.

#### ۴-۲- معرفی ضرایب انقباض در الگوریتم PSO پیشنهادی و اعمال اثر آینه ای سرعت<sup>۱</sup>

همان طور که گفته شد در اکثر کارهایی که از الگوریتم PSO استفاده می نمایند مقادیر تجربی برای سه پارامتر  $c1$  و  $c2$  و  $w$  انتخاب می گردد. اما در این مقاله برای محاسبه  $c1$  و  $c2$  و  $w$  از روش جدیدی مبتنی بر ضرایب انقباض استفاده کرده ایم. استفاده از ضرایب انقباض در طی زمان منجر به همگرایی بیشتر ذرات می گردد و این بدان معنی است که دامنه ی نوسانات ذرات کاهش می یابد. این بدان خاطر است که ضرایب انقباض بر روی بهترین نقاط محلی و همسایگی متمرکز می شود. در صورتی که شرایط درستی بر مسئله حاکم گردد، ضرایب انقباض از عدم همگرایی الگوریتم جلوگیری می نماید. فرمول بندی این ضرایب به صورت زیر تعریف می گردد:

<sup>1</sup> Constriction Coefficients and Mirror Effects

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 به صورت محدودیت‌های مسئله بهینه‌سازی تعریف شده است (قیود جدول ۲). بدین ترتیب با توجه به استراتژی کنترل و استفاده از الگوریتم PSO و نرم‌افزار ADVISOR پارامترهای تصمیم‌گیر 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 به صورت الگوریتم قدم‌به‌قدم زیر تعریف نمود.

۱- تولید تصادفی جمعیت اولیه به طور ساده عبارت است از تعیین تصادفی محل اولیه ذرات با توزیع یکنواخت در فضای حل (فضای جستجو). برای این کار به طور 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 ذره بین 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 تصمیم‌گیر بردار  $x$  که در مرحله قبلی به دست آمده به نرم‌افزار داده می‌شود و تابع هدف تعریف شده در ۲ برای هر ذره محاسبه می‌شود و همچنین قیود مسئله بهینه‌سازی نیز با توجه به مقادیر انتخاب شده برای متغیرهای تصمیم‌گیرنده در مرحله قبل برای هر ذره از جمعیت را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم و نتایج را به الگوریتم PSO بر می‌گردانیم.

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

$$\text{If } VarMin > X_j^k \text{ or } VarMax < X_j^k \\ V_j^k = -V_j^k \quad (13)$$

#### ۳-۴ ساختار استراتژی کنترل پیشنهادی و نحوه

##### ارتباط الگوریتم PSO و نرم‌افزار ADVISOR

به منظور بهینه‌سازی تابع هدف مسئله به وسیله الگوریتم PSO پیشنهادی نیاز به روابط مابین قیود مسئله و پارامترهای استراتژی کنترل در تابع هدف داریم. روابط بین پارامترهای تابع هدف، پارامترهای استراتژی کنترل و قیود اشاره شده در قسمت ۳ به صورت توابع غیرخطی بوده که توسط خود نرم‌افزار شبیه‌ساز خودروی هیبریدی ADVISOR محاسبه می‌گردد. در واقع نرم‌افزار شبیه‌ساز با الگوریتم PSO پیشنهادی ترکیب شده تا بتواند تابع هدف ارائه شده 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 اشاره شده در جدول ۲، قیود رابطه ۳ و محدودیت‌های ذکر شده برای پارامترهای استراتژی کنترل جدول ۳ را برآورده می‌سازد.

در فلوچارت شکل (۵) نحوه ارتباط الگوریتم PSO و نرم‌افزار ADVISOR نمایش داده شده است.

در مسئله بهینه‌سازی، پارامترهای استراتژی کنترل که در جدول ۳ تعریف شده است، به عنوان پارامترهای تصمیم‌گیر 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.

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

همچنین با توجه به این که کاهش سوخت لزوماً منجر به کاهش آلاینده‌ها 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



جدول ۵- مشخصات چرخه راندگی 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

## ۱-۵- 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 راندگی 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
SOCL	۰/۳۰۲۳
SOCH	۰/۶۹۹۷
T <sub>ch</sub>	۳۸/۷۸۸۹
T <sub>min</sub>	۰/۱۶۳۹
T <sub>off</sub>	۰/۵۹۲۵
ELSL	۲/۰۴۹۱
ELSH	۱۰/۲۲۲۵
D <sub>ch</sub>	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) به دست آمده 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 نرم‌افزار ADVISOR برای پارامترهای استراتژی کنترل استفاده شده است). در ستون چهارم این جدول نیز میزان کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌ها حالت خودرو بهینه‌شده نسبت به خودرو بهینه نشده به صورت درصدی ارائه شده است. نتایج این جدول و مقایسه نتایج به روشنی نشان می‌دهد که الگوریتم PSO پیشنهادی توانسته است

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 به روز 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 تصمیم‌گیر 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 مورد استفاده در جدول ۴ آمده است. همچنین از آنجایی که در الگوریتم بهینه‌سازی ارائه‌شده از نرم‌افزار ADVISOR استفاده شده است، نیاز به یک چرخه راندگی می‌باشد. چرخه راندگی در واقع یکسری مسیرهای مشخص با مکان و کشور معلوم، همچنین شتاب و سرعت مشخص می‌باشند که به منظور تست خودروی هیبریدی مورد استفاده قرار می‌گیرند، این چرخه‌ها در نرم‌افزار موجود و قابل انتخاب می‌باشند. در این بهینه‌سازی از چرخه FTP که یک چرخه راندگی استاندارد شهری آمریکا است، استفاده می‌نماییم. مشخصات این چرخه نیز در جدول ۵ آمده است.

جدول ۴- مشخصات خودروی تست [۳۷]

جرم شاسی	۱۰۷۴ کیلوگرم
ضریب آیرودینامیکی	۰/۳۳
سطح جلوی خودرو	۲ مترمربع
نوع باتری	باتری سرب-اسید دارای ۱۴ ماژول و ظرفیت هر ماژول ۲۶ آمپر ساعت
نوع موتور برقی 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

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 ارائه شده و با نتایج در نظر گرفتن تابع هدف شماره ۲ مورد مقایسه قرار گرفته 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

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

جدول ۹ - مقایسه درصد بهینه‌سازی مقاله ۱ و ۲ با مقاله ارائه شده

مقاله با تابع هدف پیشنهادی	مقاله ۲ با الگوریتم ژنتیک	مقاله ۱ با الگوریتم ممتیک	پارامتر
۳۳/۳	۱۰/۲۲	۱۷/۰۴	درصد بهینه‌سازی FC
۳۴/۱	۳۰/۱	-۵/۵	درصد بهینه‌سازی NOx
۱۹/۱	۳۹	۶/۱	درصد بهینه‌سازی HC
۱۶	-۱	۳۰۰	درصد بهینه‌سازی CO

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 ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد الگوریتم برای چرخه‌های رانندگی دیگر نیز به خوبی قادر است موجب بهبود و بهینه‌تر شدن نتایج گردد.

پارامترهای استراتژی کنترل را به صورتی بهینه نماید که میزان مصرف سوخت و تولید آلاینده‌ها به میزان قابل توجهی 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 ارائه شده در کارهای تحقیقاتی گذشته

در این قسمت به منظور نشان دادن کارایی الگوریتم پیشنهادی، نتایج حاصله را با نتایج به دست آمده از چند الگوریتم دیگر که در کارهای گذشته ارائه شده است مورد مقایسه قرار داده‌ایم. جدول ۸ نتایج الگوریتم‌های گذشته را نشان می‌دهد. نتایج این الگوریتم‌ها به طور مستقیم از مراجع ذکر شده آمده است. از آنجایی که خودروهای مورد استفاده 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 مورد توجه قرار گرفته است. نتایج این مقایسه در جدول ۹ ارائه شده است. در اینجا نیز با توجه به نتایج جدول ۹ مشخص است که الگوریتم PSO پیشنهادی توانسته است در اکثر موارد به درصد کاهش قابل ملاحظه‌تری 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

## ۶- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله به بهینه‌سازی پارامترهای استراتژی کنترل یک خودروی هیبریدی موازی با استفاده از روش PSO پرداخته شده است. در این جهت با انتخاب یک خودروی هیبرید موازی و همچنین چرخه رانندگی FTP و به کمک نرم‌افزار ADVISOR و MATLAB خودروی هیبریدی مورد نظر شبیه‌سازی شده و پارامترهای بهینه استراتژی کنترل به دست آمده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن ضرایب جرائم مربوط به آلاینده‌گی‌ها در تابع هدف مسئله بهینه‌سازی، در حین آنکه مصرف سوخت به حداقل رسیده، همچنین میزان آلاینده‌گی‌های مختلف نیز به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. به علاوه در نظر گرفتن ضرایب انقباض و اعمال اثر آینه‌ای سرعت، کیفیت نتایج حاصل از الگوریتم PSO را در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های استفاده شده در این زمینه بهبود بخشیده است. الگوریتم پیشنهادی می‌تواند به میزان قابل قبولی، موجب بهبود عملکرد خودرو حتی در چرخه‌های دیگر رانندگی نیز گردد و در نتیجه شرکت‌های خودرو سازی را در زمینه کاهش مصرف سوخت و کاهش گازهای گلخانه‌ای، به عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع آسایش‌زنده به محیط‌زیست و سلامت انسان، یاری نماید.

جدول ۱۰: مقایسه درصد بهینه‌سازی تابع هدف اولیه با تابع

هدف پیشنهادی

پارامتر	خودروی هیبرید بهینه-سازی شده			
	با تابع هدف اولیه پیشنهادی	با تابع هدف اولیه	با تابع هدف پیشنهادی	با تابع هدف
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 USD

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

## 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] Wiczorek 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 آلاینده‌گی 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 approach to fuel consumption and emission reduction", 2nd International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI), 2015

[19] Z. Dezhong 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](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 تکیه‌گاه‌های 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 شبکه‌های 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 و نیما 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)