



مدیریت انرژی برای کاهش مصرف سوخت در خودروهای هیبرید الکتریکی پلاگین موازی مبتنی بر کنترل پیش بین فازی

سامیه نجاران¹، زهرا رحمانی^{2*}، مجتبی حسنزاده³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی کنترل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

2- دانشیار، مهندسی کنترل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

3- دانشجوی دکترا، مهندسی کنترل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

* صندوق پستی 484، zrahmani@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 30 بهمن 1395

پذیرش: 29 فروردین 1396

ارائه در سایت: 23 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:

مدیریت انرژی

خودروی هیبرید الکتریکی پلاگین

کاهش مصرف سوخت

کنترل پیش بین

کنترل فازی

چکیده

امروزه خودروهای هیبرید الکتریکی برای کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌ها، مطرح شده‌اند. مسأله‌ای که در خودروهای هیبرید الکتریکی بسیار حائز اهمیت است، چگونگی تقسیم توان میان اجزاء اصلی زنجیره انتقال قدرت است. بهترین مدیریت انرژی هنگامی حاصل می‌شود که تمامی شرایط آینده در دسترس باشد. با پیشرفت سیستم‌های هوشمند تا حدی امکان دسترسی به شرایط جاده، ترافیک و دیگر اطلاعات برخط تا یک افق زمانی محدود برای خودرو فراهم شده است. در این مقاله از ترکیب روش‌های کنترل پیش‌بین و برنامه‌نویسی پویا برای به‌دست‌آوردن مسیر زیر بهینه برخط، استفاده شده است. تغییر در حالت ترافیکی موجود در مسیر حرکت، تأثیر بسیاری در میزان کاهش مصرف سوخت خودرو دارد؛ بنابراین با توجه به حالت ترافیکی، یک سیستم فازی برای تخمین برخط سرعت خودرو پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی برخلاف بسیاری از روش‌های مدیریت انرژی که از داده‌های گذشته برای پیش‌بینی مسیر استفاده می‌کنند، موجب کاهش وابستگی کنترل‌کننده به چرخه رانندگی می‌شود. شبیه‌سازی بر یک خودروی هیبرید الکتریکی پلاگین با ساختار موازی انجام شده است. روش پیشنهادی با روش برنامه‌نویسی پویا و بهینه‌سازی لحظه‌ای مقایسه شده است. ارزیابی نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در حین سادگی و پرهیز از روابط ریاضی پیچیده، می‌تواند علاوه بر کاهش مصرف سوخت نسبت به بهینه‌سازی لحظه‌ای، مدیریت مناسبی بر سطح شارژ باتری داشته باشد. نتایج حاصل از این روش شبیه به پاسخ بهینه کلی حاصل از برنامه‌نویسی پویاست.

Energy paper management in order to reduce fuel consumption for parallel Plug-in Hybrid Electric vehicles based on fuzzy predictive control

Samieh Najjaran, Zahra Rahmani*, Mojtaba HassanZadeh

Department of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

* P.O.B. 484, Babol, Iran, zrahmani@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 18 February 2017
Accepted 18 April 2017
Available Online 13 May 2017

Keywords:

Energy management
Plug-in Hybrid Electric vehicle
Fuel consumption reduction
Predictive control
Fuzzy control

ABSTRACT

Nowadays, Hybrid Electric Vehicles (HEVs) are introduced in order to reduce fuel consumption and emissions. The issue that is very important in HEVs, is how to split power between main components of powertrain. Best energy management can be obtained when all future conditions are available. With the advancement of the intelligent systems, access to the road conditions, traffic and other online information has been provided up to the limited prediction horizon. In this paper, a combination of predictive control and Dynamic Programming methods has been used for obtaining online sub-optimal trajectory. Change in the state of traffic in the path has great effect on reduction of fuel consumption. Therefore, according to the state of traffic, a fuzzy logic system is proposed for the online estimating of the vehicle speed. Unlike many energy management methods that use historical data, the proposed strategy leads to reducing the dependence of the controller on the drive cycle. The simulation is implemented on a Plug-in Hybrid Electric Vehicle with parallel structure. The proposed method is compared with Dynamic Programming and instantaneous optimization. Evaluation of results show that the proposed method, while simplistic and avoiding complicated mathematical relationships in addition to reducing fuel consumption, compared with instantaneous optimization can manage SOC properly. The results of this method are close to the global optimal solution of Dynamic Programming.

1- مقدمه

چالش‌های اساسی زندگی بشر مطرح است. خودروها یکی از مصرف‌کنندگان عمده سوخت و تولیدکننده آلاینده‌هاست. توقع فزاینده مصرف‌کنندگان، قانون‌گذاری برای کاهش آلاینده است، افزایش قیمت سوخت و آگاهی بر این

امروزه آلودگی‌های ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی به عنوان یکی از

Please cite this article using:

S. Najjaran, Z. Rahmani, M. HassanZadeh, Energy management in order to reduce fuel consumption for parallel Plug-in Hybrid Electric vehicles based on fuzzy predictive control, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 353-362, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

گانگ و همکاران یک شبکه عصبی را با استفاده از داده‌های گذشته آموزش دادند و سپس از آن برای پیش‌بینی چرخه رانندگی کنونی استفاده کرده‌اند [11]. روش پیشنهادی در [11] می‌تواند برای تخمین پروفایل سرعت طولانی‌مدت استفاده قرار گیرد، تنها در موقعیت‌های رانندگی بزرگراه به خوبی عمل می‌کند. پیشنهاد دیگر به کارگیری GPS⁵ و داده‌های برخط⁶ ترافیک است. راجاگوپالان و ویشینگتون یک استراتژی کنترل پیش‌بین برای یک خودروی هیبرید الکتریکی با استفاده از اطلاعات GPS ارائه کردند [12]. آن‌ها فرض کردند که اطلاعات مربوط به ارتفاع از سطح افق و ترافیک که در طی سفر از طریق GPS به دست می‌آید، معلوم باشد و از یک کنترل‌کننده فازی تطبیقی برای یک خودروی هیبرید الکتریکی موازی مبتنی بر موقعیت‌های رانندگی آینده به صورت لحظه‌ای استفاده کردند. این کنترل‌کننده علاوه بر کاهش مصرف سوخت، کاهش آلایندگی‌ها را نیز در نظر می‌گیرد و نتایج شبیه‌سازی، مصالحه خوبی بین آن‌ها را نشان می‌دهد، ولی روش بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی در آن منظور نشده است. در این پژوهش فرض شده که اطلاعات مربوط به جاده در بازه‌های زمانی منظم دریافت می‌شوند، این فرض به دلیل قرار گرفتن سنسورهای ترافیکی به طور یکنواخت در طی جاده و متغیر بودن سرعت خودرو غیرمحتمل است. بک و همکاران یک روش کنترل پیش‌بین برای یک خودروی هیبرید الکتریکی ارائه دادند [13]. آن‌ها ایده‌ای برای چگونگی استفاده از برنامه‌نویسی پویا برای حل مسأله بهینه‌سازی در کنترل مدل پیش‌بین طی افق دورشونده پیشنهاد کردند. اطلاعات حاصل از ابزار سنجش مسافت جهت پیش‌بینی گشتاور درخواستی آینده مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف اصلی بر کاهش زمان محاسبات برنامه‌نویسی پویا متمرکز است که معمولاً بار محاسباتی سنگینی دارد. یک پیش‌بینی دقیق از سرعت خودرو پایه‌ای برای عملکرد مؤثر الگوریتم کنترل مدل پیش‌بین است، ولی اثر موقعیت ترافیکی باید به خوبی در نظر گرفته شود. ژانگ و همکاران از کنترل مدل پیش‌بین⁷ در مسأله مدیریت انرژی خودروی الکتریکی هیبریدی پلاگین استفاده کردند [14]. در این مقاله روش پیش‌بینی چند مرحله‌ای مارکوف برای پیش‌بینی سرعت انتخاب می‌شود. پس از این‌که سرعت‌های پیش‌بینی شده در افق پیش‌بینی به دست می‌آیند، مسأله به یک مسأله بهینه‌سازی غیرخطی با افق محدود تبدیل می‌گردد و الگوریتم برنامه‌نویسی پویا به منظور حل این مسأله انتخاب می‌شود. با بررسی نتایج مشخص شده که استراتژی پیشنهادی تأثیر بسزایی در کاهش مصرف سوخت داشته است. در این روش از داده‌های لحظه حال برای ایجاد مدل پیش‌بینی سرعت استفاده شده و شرایط آینده در نظر گرفته نشده است.

با توجه به تحقیقات بهترین مدیریت انرژی هنگامی حاصل می‌شود که تمامی شرایط آینده در دسترس باشد. با پیشرفت تکنولوژی سیستم‌های هوشمند تا حدی امکان دسترسی به شرایط جاده و ترافیک و دیگر اطلاعات برخط تا یک افق زمانی محدود برای خودرو فراهم شده است. قیدهای زیادی نیز در بخش‌های مختلف سیستم مدیریت انرژی وجود دارد، در نتیجه کنترل پیش‌بین به دلیل توانایی یافتن بردار کنترل بهینه در هر لحظه تا افق محدود و همچنین در نظر گرفتن قیدهای مختلف سیستم تحت کنترل، مناسب‌ترین روش برای استفاده از داده‌های برخط هوشمند در مدیریت انرژی است. در این مقاله روش مدیریت انرژی پیش‌بین مبتنی بر کنترل فازی برای خودروهای هیبرید الکتریکی پلاگین با ساختار موازی پیشنهاد می‌شود. در این روش برخلاف بسیاری از روش‌های پیشین از پیش‌بینی برخط سرعت

موضوع که نفت خام یک منبع تمام‌شدنی است، فاکتورهایی هستند که موجب تغییرات وسیعی در صنعت اتومبیل‌سازی شده‌اند [1].

در سال 1990 تعداد بسیاری از صنایع خودرو شروع به توسعه خودروهای هیبرید الکتریکی¹ کردند. خودروی هیبرید الکتریکی توان مورد نیاز خود را به وسیله ترکیبی از دو منبع موتور احتراق داخلی و باتری/موتور الکتریکی تأمین می‌کند [3,2].

یک خودرو هیبرید الکتریکی با توجه به ماهیتش که قابلیت کاهش اندازه موتور احتراق داخلی و کاهش بار گذرا و بازیابی انرژی ترمز بازرا² را دارد، می‌تواند مصرف سوخت و آلودگی را کاهش دهد. علاوه بر این خودرو هیبرید الکتریکی می‌تواند با عملکرد در حالت‌های مختلف کاری پاسخ‌گوی توان درخواستی باشد، اما معایب این خودروها عدم قابلیت شارژ باتری توسط شبکه برق و وابستگی حرکت خودرو به موتور احتراقی است [4].

برای رفع مشکلات یادشده در خودروهای هیبرید الکتریکی معمولی، خودروهای هیبرید الکتریکی پلاگین³ طراحی شده‌اند. این خودروها، خودروهای هیبریدی به همراه باتری‌های شارژشونده هستند که می‌توانند با اتصال به منبع برق خارجی شارژ شوند و نسبت به خودروهای هیبرید الکتریکی معمولی دارای ظرفیت باتری بالاتری هستند [5].

عملکرد مناسب خودروهای هیبرید الکتریکی صرف نظر از نوع ساختار و ویژگی‌های اجزای مختلف به مقدار بسیاری وابسته به سیستم مدیریت انرژی است. وظیفه سیستم مدیریت انرژی تقسیم توان مورد نیاز برای دنبال کردن چرخه رانندگی میان اجزاء اصلی سیستم تولید و انتقال نیرو است.

با توجه به این‌که در خودروهای هیبرید بیش از یک منبع تولید انرژی وجود دارد، بهینه‌سازی مصرف سوخت و کاهش آلایندگی در این خودروها وابستگی زیادی به نحوه مدیریت این منابع انرژی دارد؛ بنابراین واحد کنترل در این خودروها که کنترل توزیع توان مورد نیاز قسمت‌های مختلف خودرو از وظایف این قسمت است، از این جهت نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند [6].

معیارهای مختلفی برای دسته‌بندی روش‌های مدیریت انرژی خودروهای هیبرید الکتریکی وجود دارد. روش‌های مدیریت انرژی برحسب استفاده یا عدم استفاده از کنترل بهینه از دیدگاه تئوری کنترل به دو دسته مبتنی بر قواعد یا تئوری کنترل بهینه تقسیم می‌شوند [7].

طراحی و اجرای روش‌های مدیریت انرژی مبتنی بر قواعد آسان است، اما میزان اقتصاد سوخت ممکن است دور از بهینگی باشد [8,9]. در مقایسه، روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی می‌توانند به طور اقتصادی مصرف سوخت مناسب‌تر و بهینه را به دست آورد. اجرای این استراتژی‌ها با چالش‌های بیشتری مواجه است، زیرا اطلاعات مسیرهای پیش‌رو باید از پیش شناخته شده باشد و بیشتر روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی بر مبنای سرعت پیش‌بینی شده خودرو در هر لحظه (پروفایل سرعت) است. روش‌های مختلفی در این زمینه پیشنهاد شده‌اند [10-14]. آرسی و همکاران از یک شبکه عصبی بازگشتی برای پیش‌بینی 20 ثانیه‌ای پروفایل سرعت یک خودرو مبتنی بر سرعت‌های حال و گذشته استفاده کردند و سپس برنامه‌نویسی پویا⁴ را برای سرعت پیش‌بینی شده اعمال کرده‌اند [10]. در این روش مسأله بهینه‌سازی کلی به چند مسأله بهینه‌سازی محلی تقسیم می‌شود. این کنترل‌کننده برای خودروهای هیبرید الکتریکی معمولی که در آن بین بهینه‌سازی کلی و بهینه‌سازی‌های محلی تفاوت اندکی وجود دارد، نسبتاً خوب عمل می‌کند.

¹ Hybrid Electric Vehicle

² Regenerative braking

³ Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)

⁴ Dynamic Programming (DP)

⁵ Global Positioning System

⁶ Online

⁷ Model Predictive Control (MPC)

مزیت دارد [7]. پارامترهای خودروی شبیه‌سازی شده مورد مطالعه در جدول 1 آورده شده است.

2-2- چرخه رانندگی

یک چرخه رانندگی شامل داده‌هایی مانند سرعت و شتاب مطلوب، شیب و ارتفاع جاده‌ای که خودرو باید طی کند برحسب زمان است. چرخه‌های استاندارد برای ایجاد شرایط مقایسه میزان مصرف سوخت و آلایندگی خودروها و یا استراتژی‌های مختلف کنترلی وجود دارند.

در این جا چرخه رانندگی JN-1015 در نظر گرفته شده است. داده‌های چرخه رانندگی مورد نظر شامل بردارهای سرعت، شتاب و شماره دنده است. پارامترهای مربوط به این چرخه رانندگی در جدول 2 آمده است.

تغییر در حالت ترافیکی موجود در مسیر حرکت (شلوغ، خلوت و یا متعادل) تأثیر بسیاری در میزان کاهش مصرف سوخت خودرو دارد [16]. با توجه به وضعیت ترافیکی موجود در مسیر حرکت، سرعت خودرو به صورت

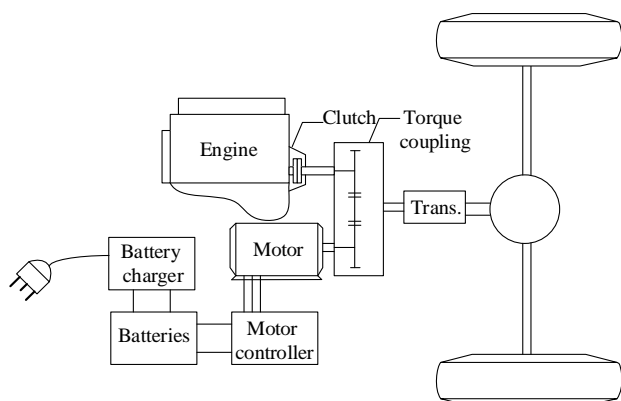


Fig. 1 Configuration of Parallel Plug-in Hybrid Electric Vehicle [15]

شکل 1 پیکربندی خودروی هیبرید الکتریکی پلاگین موزی [15]

جدول 1 پارامترهای مدل خودرو

پارامتر	مقدار	واحد
جرم خودرو	1800	kg
شعاع چرخ	0.3	m
اصطکاک غلتشی	144	N
ضریب آئرودینامیک	0.48	Ns^2m^{-2}
ظرفیت باتری	6	Ah
حداکثر گشتاور موتور درون سوز	199	Nm
حداکثر گشتاور موتور الکتریکی	130	Nm
حداکثر سرعت موتور درون سوز	503	rads^{-1}
حداکثر سرعت موتور الکتریکی	600	rads^{-1}

جدول 2 پارامترهای چرخه رانندگی JN-1015

پارامتر	مقدار	واحد
مسافت	4.1636	km
زمان	661	s
حداکثر سرعت	19.4365	ms^{-1}
متوسط سرعت	22.6760	ms^{-1}
حداکثر شتاب	0.7933	ms^{-2}
متوسط شتاب	0	ms^{-2}

خودرو استفاده شده است؛ به طوری که با توجه به حالت ترافیکی موجود در مسیر حرکت، سرعت خودرو با استفاده از یک سیستم فازی تخمین زده می‌شود و سپس مسیر مرجع تعریف شده برای سیستم توسط خروجی‌ها در افق پیش‌بینی تعریف شده برای آن دنبال می‌شود. یک روش بهینه‌سازی مناسب جهت به دست آوردن مسیر بهینه تا افق پیش‌بینی به نحوی که سرعت روش مانع از اجرای برخط آن نشود مورد استفاده قرار گرفته است. مسأله مدیریت انرژی در این خودروها به شدت غیرخطی است، از آنجایی که برنامه‌نویسی پویا برای حل مسائل غیرخطی با حالت‌ها و متغیرهای کنترلی مقید و یک افق کنترل متناهی مناسب است، برای حل مسأله بهینه‌سازی در الگوریتم کنترل پیش‌بین مورد استفاده قرار گرفته است. برنامه‌نویسی پویا جهت دستیابی به پاسخ بهینه کلی انجام شده است. این روش نیازمند مشخص بودن کل چرخه است. بار محاسباتی این روش اجازه‌ی اجرای برخط آن را نمی‌دهد. روش بهینه‌سازی لحظه‌ای نیز که مسأله بهینه‌سازی را برای گام کنونی حل می‌کند، اعمال شده است، اما پاسخ حاصل از این روش بسیار دور از پاسخ بهینه کلی است. ارزیابی نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در حین سادگی و پرهیز از روابط پیچیده، کاهش چشمگیر مصرف سوخت نسبت به بهینه‌سازی لحظه‌ای، مدیریت مناسبی بر سطح شارژ باتری¹ دارد. برخلاف بسیاری از روش‌های مدیریت انرژی که از داده‌های گذشته برای پیش‌بینی ادامه مسیر استفاده می‌کنند، موجب کاهش وابستگی کنترل‌کننده به چرخه رانندگی می‌شود. پاسخ حاصل از این روش شبیه به پاسخ بهینه کلی است.

نوآوری مهم روش پیشنهادی برای خودروی هیبرید الکتریکی پلاگین این است که روش کنترل ترکیبی پیشنهاد شده تاکنون بر خودروی مورد نظر اعمال نشده و در روش‌هایی که تا به حال مطرح شده از روش فازی برای تخمین سرعت استفاده نشده است.

ساختار مقاله در ادامه به این صورت است که مدل خودروی مورد مطالعه در بخش دوم، روش حل تابع هزینه با استفاده از برنامه‌نویسی پویا و بهینه‌سازی لحظه‌ای در بخش سوم، روش پیشنهادی در بخش چهارم، شبیه‌سازی روش پیشنهادی بر خودروی مورد نظر در بخش پنجم و نتیجه‌گیری نیز در بخش ششم ارائه می‌شود.

2- توصیف اجزاء خودرو

2-1- مدل خودرو

برای خودروهای هیبرید الکتریکی سه ساختار مختلف پیشنهاد می‌شود. این ساختارها عبارت از ساختار سری، موزی و سری-موزی است که در این مقاله از ساختار موزی استفاده شده است. در خودروهای هیبرید الکتریکی پلاگین با ساختار موزی هر دو منبع تولید توان (موتور الکتریکی و موتور احتراقی) به طور مستقل به چرخ‌ها متصل شده‌اند و در تأمین نیروی رانشی نقش دارند. در این ساختار توان حاصل شده از هر دو منبع موتور احتراقی و موتور الکتریکی به وسیله کوپلینگ مکانیکی با هم جمع می‌شود و به چرخ‌ها فرستاده می‌شوند. ساختار کلی خودروهای هیبرید موزی به صورت شکل 1 در نظر گرفته می‌شود. محورهای خروجی هر دو موتور الکتریکی و موتور احتراقی وارد یک کوپلینگ مکانیکی می‌شوند. با وجود سیستم کنترل پیچیده‌تر نسبت به خودروهای سری، ساختار موزی از نظر نیاز به موتور الکتریکی با توان و حجم کمتر، بازده بالاتر و حذف ژنراتور بر ساختار سری

¹ State Of Charge (SOC)

رابط بین مسیر موتور درون‌سوز و مسیر الکتریکی در خودروهای هیبرید الکتریکی موازی مکانیکی است. در پیکربندی خودرو دو جریان توان در یک رابط گشتاور ترکیب می‌شوند. تعادل توان در رابط گشتاور توسط کنترل‌کننده تقسیم توان تنظیم می‌شود که حالت عملیاتی و نسبت توان از/ به موتور الکتریکی و توان کلی در رابط را انتخاب می‌کند [18]؛ بنابراین ورودی کنترل به صورت رابطه (3) تعریف می‌شود که متناسب با گشتاور به صورت مستقیم نیست.

$$\underline{u}(k) = \frac{T_m}{T_{total}} \quad (3)$$

بسته به مقدار u حالت‌های عملیاتی مختلف ممکن هستند. در طول راه‌اندازی¹ یا افزایش سرعت، موتور درون‌سوز تنها یک بخش از توان کلی در رابط را تأمین می‌کند، باقی توان توسط موتور الکتریکی توزیع می‌شود، در این حالت ($0 < u < 1$) است. این حالت عملیاتی حالت کمکی² نامیده می‌شود. موتور در طول ترمزگیری یا کاهش سرعت در حالت ژنراتوری عمل می‌کند و انرژی را در باتری احیا می‌کند ($u=1$). شیفت نقطه کار به سمت بازده بالاتر امکان‌پذیر است. موتور درون‌سوز در بار سبک بیش از آن‌چه که درخواست شده توان تولید می‌کند و توان اضافی از طریق موتور الکتریکی برای شارژ باتری استفاده خواهد شد ($u < 0$). هر دو عملکرد موتور درون‌سوز ($u=0$) و عملکرد تمام الکتریکی ($u=1$) امکان‌پذیر است [18].

قیدهای در نظر گرفته شده برای متغیر حالت و ورودی کنترل به صورت رابطه (4) است.

$$0.4 \leq SOC \leq 0.7 \quad (4)$$

$$-1 \leq \underline{u}(k) \leq 1$$

توجه شود که حد پایین برای ورودی کنترل ممکن است با توجه به سایز موتور درون‌سوز تغییر کند. ناحیه مجاز برای حالت شارژ شامل حدود بالا و پایین برای تغییرات حالت شارژ باتری است، در صورتی که حالت شارژ باتری از مرز بالایی و یا پایینی این ناحیه عبور کند، موتور درون‌سوز به ترتیب خاموش شده و یا با توان بالا کار خواهد کرد.

پیدا کردن کنترل $\underline{u}(k)$ در هر گام برای کمینه‌سازی تابع هزینه هدف از بهینه‌سازی به صورت رابطه (5) است [17].

$$J_0(\underline{x}(0)) = J_0$$

$$J_k(\underline{x}(k)) = \min_{u_k \in U_k} [\dot{m}_{fuel}(\underline{x}(k), \underline{u}(k)) + J_{k-1}(\underline{x}(k-1))] \quad (5)$$

قیدها به صورت رابطه (6) در طول بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند.

$$\omega_e \min \leq \omega_e(k) \leq \omega_e \max$$

$$T_e \min(\omega_e(k)) \leq T_e(k) \leq T_e \max(\omega_e(k))$$

$$T_m \min(\omega_m(k), SOC(k)) \leq T_m \max(\omega_m(k), SOC(k))$$

$$SOC_{\min} \leq SOC(k) \leq SOC_{\max} \quad (6)$$

در رابطه (6)، ω_m سرعت زاویه‌ای موتور الکتریکی، ω_e سرعت زاویه‌ای موتور درون‌سوز، T_e گشتاور موتور درون‌سوز است.

مصرف سوخت با واحد (Liter/100 km) به صورت نسبت بین مقدار سوخت مصرف‌شده توسط خودرو و مسافت طی شده است.

یک فاکتور مهم که باید هنگام به‌دست‌آوردن مصرف سوخت در نظر گرفته شود، مقدار اولیه سطح شارژ باتری است. برای این‌که عملکرد الگوریتم برنامه‌نویسی پویا را به درستی تست کنیم، باید مقدار اولیه سطح شارژ را برابر با کمترین مقدار سطح شارژ مجاز در نظر گرفت. بدیهی است که هر مقدار

برخط تخمین زده می‌شود. برای تخمین سرعت توسط یک سیستم فازی که در بخش چهارم به تفصیل شرح داده خواهد شد، سرعت لحظه‌ای خودرو در طی چرخه مورد نظر و سرعت خودرو در 10 ثانیه بعد که توسط GPS دریافت می‌شود و تعیین‌کننده وضعیت ترافیک است، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

3- روش حل تابع هزینه

3-1- برنامه‌نویسی پویا

پیش از یک استراتژی کنترل قابل اجرای یک محک برای هر استراتژی کنترل لازم است. برای دستیابی به پاسخ بهینه کلی برای مدیریت انرژی خودروهای هیبرید از روش‌هایی مانند برنامه‌نویسی خطی، برنامه‌نویسی پویا و الگوریتم‌های تکاملی استفاده می‌شود. روش برنامه‌نویسی پویا پرکاربردترین روش برای به‌دست آوردن نتایج بهینه کلی در مدیریت انرژی خودروها در حالت برون‌خط است [19,18]. نزدیک بودن رفتار سیستم به نتایج حاصل از برنامه‌نویسی پویا در حالت برون‌خط برای روش‌هایی که به صورت برخط در خودروهای هیبریدی انجام می‌گیرند معیار مناسب بودن روش است. تکنیک برنامه‌نویسی پویا یک راه مؤثر است که یک راه‌حل بهینه کلی را برای خودروهای هیبریدی الکتریکی در چرخه رانندگی داده شده تضمین می‌کند. برنامه‌نویسی پویا که قابل اجرا بر خودروهای هیبریدی الکتریکی است می‌تواند برای خودروهای هیبرید الکتریکی پلاگین اعمال شود، تنها با این تفاوت که در بهینه‌سازی یک خودروی هیبرید الکتریکی پلاگین حالت شارژ نهایی با حالت شارژ اولیه متفاوت خواهد بود.

اگر مدل خودرو و تابع معیار هزینه را به ترتیب به صورت رابطه (1) در نظر آوریم.

$$\underline{x}(k+1) = \underline{f}(\underline{x}(k), \underline{u}(k), k)$$

$$J = g_N(\underline{x}(N)) + \sum_{k=0}^{N-1} g_k(\underline{x}(k), \underline{u}(k)), k = 1, \dots, N \quad (1)$$

در رابطه (1) بردار حالت $\underline{x}(k)$ شامل سرعت خودرو، حالت شارژ، سرعت موتور درون‌سوز، سرعت موتور الکتریکی و غیره است. بردار $\underline{u}(k)$ بردار کنترل و شامل شماره دنده، گشتاور ژنراتور، گشتاور موتور درون‌سوز، گشتاور موتور الکتریکی و غیره است. توجه شود که پارامترهای یادشده به عنوان بردار حالت بسته به الگوریتم کنترلی می‌توانند به‌عنوان پارامترهای کنترل در نظر گرفته شوند [17]. \underline{f} تابع فضای حالت سیستم، g_k تابع معیار برای سیستم و متغیر k زمان است.

مسئله کنترلی برنامه‌نویسی پویا برای خودروی مورد نظر به صورت رابطه (2) تعریف شده است [18].

$$\underline{x}(k) = SOC(k)$$

$$\underline{u}(k) = (T_m, T_{total})$$

$$J = \dot{m}_{fuel}(\underline{x}(k), \underline{u}(k))$$

$$SOC(k) = \frac{-I_{batt}}{Q_0 \cdot 3600} + SOC(k-1) \quad k = 1, \dots, n \quad (2)$$

در رابطه (2) متغیر حالت، SOC یعنی حالت شارژ باتری در نظر گرفته شده است. T_m گشتاور موتور الکتریکی و T_{total} گشتاور کلی، مجموع گشتاور موتور الکتریکی و گشتاور موتور درون‌سوز است. \dot{m}_{fuel} دبی جرم سوخت که به عنوان معیار هزینه در نظر گرفته شده است. n زمان چرخه رانندگی مورد نظر، I_{batt} جریان باتری و Q_0 ظرفیت باتری است.

حالت شارژ باتری یکی از مهم‌ترین و در اغلب روش‌ها تنها متغیر حالت در مدیریت انرژی است.

¹ Start up

² Power Assist

و برنامه‌نویسی پویا مشاهده می‌شود که پاسخ بهینه‌سازی لحظه‌ای به مسأله دور از پاسخ بهینه است. نتایج حاصل در جدول 4 آورده شده است. مسیر سطح شارژ باتری حاصل از بهینه‌سازی لحظه‌ای در شکل 3 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که شارژ باتری تا حداقل مقدار مجاز در طی چرخه رانندگی تخلیه شده است. در نواحی که نمودار سطح شارژ باتری تقریباً مسطح است، درخواست توان خودرو تنها توسط موتور درون‌سوز تأمین می‌شود.

بهترین قانون کنترل و مسیر بهینه کلی برای متغیر حالت با روش برنامه‌نویسی پویا که در آن کل چرخه رانندگی معلوم فرض می‌شود، به دست می‌آید. در روش بهینه‌سازی لحظه‌ای محدودیت دسترسی به اطلاعات وجود دارد. چون در این روش از اطلاعات آینده نمی‌توان استفاده کرد و چرخه رانندگی نامشخص است و در نتیجه امکان دارد نتایجی دور از پاسخ بهینه برای سیستم به وجود آید. در واقع بدون داشتن اطلاعاتی مانند شدت ترافیک، سرعت مجاز و در نتیجه سرعت درخواستی در آینده، نزدیک شدن به پاسخ بهینه کلی غیرممکن است. برای رفع مشکل دسترسی به اطلاعات در حالت برخط در بخش چهارم روش پیشنهادی ارائه می‌شود.

4- روش پیشنهادی

اگر راننده یک خودرو اطلاعات مقصد مورد نظرش را به یک سیستم جهت‌یابی وارد کند و سرعت طی این مسافت به درستی پیش‌بینی شود، آن‌گاه مشخصات کامل درخواست گشتاور چرخ خودرو $T_{wheel}(t_0, t_p)$ در بازه زمانی $[t_0, t_p]$ مشخص خواهد بود. با استفاده از این اطلاعات یک راه حل بهینه با توجه به تابع معیار هزینه برای توزیع درخواست گشتاور در موتور الکتریکی و موتور درون‌سوز قابل حصول است. تابع معیار هزینه در واقع یک معیار از هزینه تلاش کنترلی است که باید حداقل شود. هنگام حداقل‌سازی مصرف سوخت یک خودروی هیبرید الکتریکی، معیار هزینه باید مصرف سوخت و همچنین شارژ باتری را در نظر بگیرد.

در عمل مشکلات مختلفی وجود دارند که دنبال کردن این روش را غیرممکن می‌سازند؛ به دلیل اغتشاش‌های بسیاری به واسطه ترافیک و غیره

جدول 4 نتایج بهینه‌سازی لحظه‌ای

Table 4 Instantaneous optimization results

حالت شارژ	مصرف سوخت
0.4008	4.8926

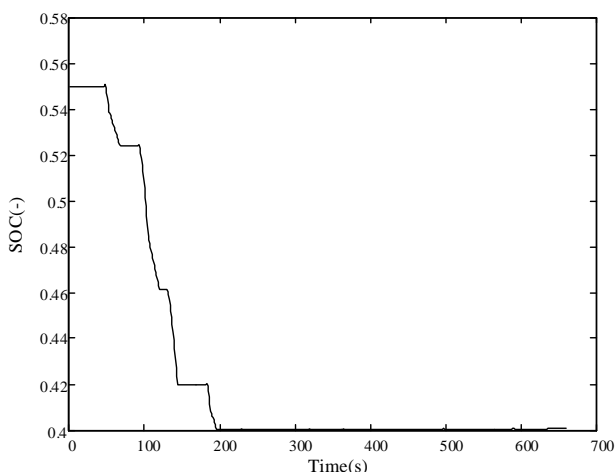


Fig. 3 State of charge in instantaneous optimization

شکل 3 سطح شارژ باتری در بهینه‌سازی لحظه‌ای

اولیه بالاتری منجر به اقتصاد سوخت بهتری خواهد شد. در این مقاله مقدار اولیه سطح شارژ 0.55 در نظر گرفته شده است.

برای پیاده‌سازی روش برنامه‌نویسی پویا از مراجع [19,18] استفاده شده است که قابل پیاده‌سازی برای کلیه خودروهای هیبریدی است. برنامه‌نویسی پویای برون‌خط پاسخ بهینه کلی مسأله را به دست می‌دهد که لازمه آن مشخص بودن کل چرخه رانندگی است. این روش به دلیل زمان محاسبات زیاد و فرض مشخص بودن چرخه برای کنترل برخط خودرو قابل اجرا نیست. از پاسخ آن می‌توان به عنوان معیاری برای بهترین عملکرد قابل حصول برای مقایسه استفاده کرد. نتایج حاصل در جدول 3 آورده شده است. مسیر سطح شارژ باتری حاصل از بهینه‌سازی برون‌خط در شکل 2 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در چرخه رانندگی شارژ باتری تا حداقل مقدار مجاز تخلیه شده است.

2-3- بهینه‌سازی لحظه‌ای

کنترل‌کننده در استراتژی‌های کنترل بهینه با توجه به یک تابع هزینه بهینه‌سازی می‌شود. کنترل‌کننده‌های بهینه حساس به تغییرات پارامتری و همچنین نویز هستند. برای انجام بهینه‌سازی تمامی رفتارهای استاتیک و دینامیک اجزای سیستم در نظر گرفته می‌شوند. محاسبات معمولاً توسط مفروضات ساده‌سازی می‌شوند، به این معنی که پاسخ تنها تحت این مفروضات بهینه است [20].

تکنیک برنامه‌نویسی پویا، همان‌طور که پیشتر توضیح داده شد، یک راه‌حل بهینه کلی را ارائه می‌کند، اما اجرای این استراتژی زمان‌بر است؛ بنابراین اجرای برخط این روش بسیار دشوار است و عملاً قابل استفاده در کاربردهای واقعی نیست. بهینه‌سازی لحظه‌ای که یک مسأله بهینه‌سازی را برای گام کنونی حل می‌کند، قابل اجراست.

مسأله کنترلی دوباره به صورت روابط (2,3) و قیدهای مسأله به صورت رابطه (4) تعریف می‌شود. در هر لحظه تابع هزینه به ازای ورودی کنترل حداقل‌سازی می‌شود.

با مقایسه مقدار مصرف سوخت حاصل از استراتژی بهینه‌سازی لحظه‌ای

جدول 3 نتایج برنامه‌نویسی پویا

Table 3 Dynamic Programming results

حالت شارژ	مصرف سوخت
0.4004	2.3206

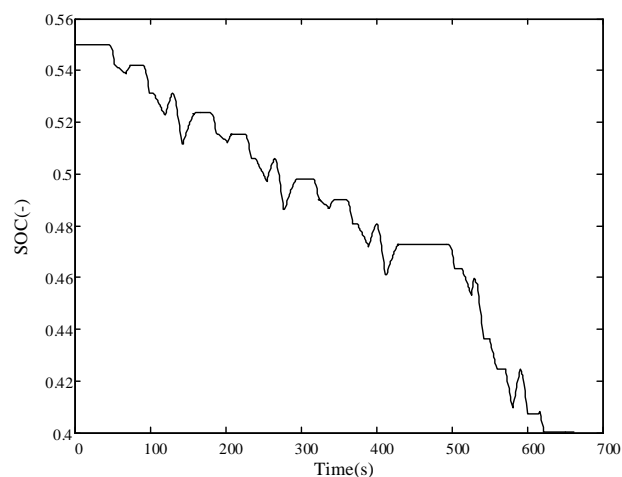


Fig. 2 State of charge in dynamic programming

شکل 2 سطح شارژ باتری در برنامه‌نویسی پویا

برای پیش‌بینی سرعت خودرو باید یک روش پیش‌بینی انتخاب شود. با توجه به این که تغییر در حالت ترافیکی موجود در مسیر حرکت (شلوغ، خلوت و یا متعادل)، تأثیر بسیاری در میزان کاهش مصرف سوخت خودرو دارد، فرض می‌شود که سرعت خودرو در آینده به سرعت کنونی و وضعیت ترافیک در افق پیش‌بینی بستگی دارد؛ بنابراین شرایط آینده مستقل از گذشته و این روش قابل اجرا به صورت برخط است. با پیش‌بینی سرعت، شتاب و شماره‌دنده متناظر با آن به‌دست خواهد آمد.

روش استنتاج فازی ممدانی چند ورودی-تک خروجی به دلیل سادگی و اجرای آسان مورد استفاده قرار گرفته است. سرعت لحظه کنونی به عنوان ورودی اول و شدت ترافیک به عنوان ورودی دوم در نظر گرفته شده است. شدت ترافیک با توجه به میزان سرعت در 10 ثانیه بعد (افق پیش‌بینی) تعیین شده است. چنین اطلاعاتی از طریق سامانه‌های هوشمند مانند GPS قابل دست‌یابی است. در این مقاله از داده‌های حاصل از چرخه رانندگی مورد نظر استفاده شده است. شتاب خودرو به عنوان خروجی سیستم فازی در نظر گرفته شده است. در واقع با توجه به میزان سرعت در لحظه کنونی و شدت ترافیک در آینده تصمیم‌گیری می‌شود که شتاب افزایشی، کاهش‌ی و یا ثابت باشد، سپس مقدار شتاب در هر لحظه تا افق پیش‌بینی به‌روز می‌شود.

ساختار یک سیستم فازی در شکل 5 نشان داده شده است. در واقع هر سیستم فازی از چهار قسمت که عبارت است از فازی ساز، موتور استنتاج، قواعد فازی و فازی‌زدا تشکیل شده است. در یک سیستم فازی برای نمونه برای یک قاعده فازی از عملگرهای اجتماع (یا) و اشتراک (و) فازی

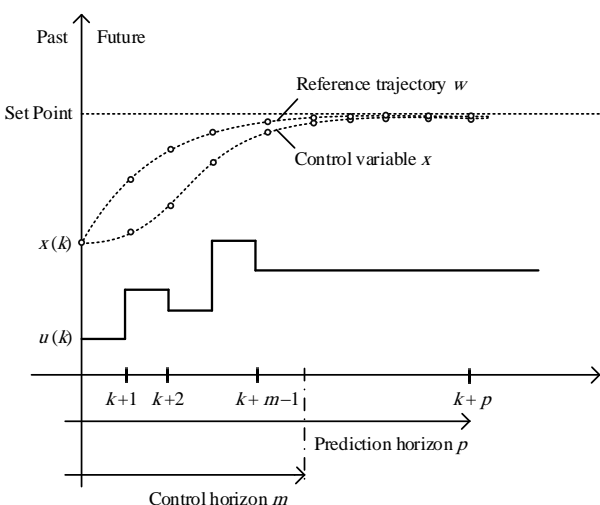


Fig. 4 Graphical illustration of model predictive control [13]

شکل 4 طرح گرافیکی از کنترل مدل پیش‌بین [13]

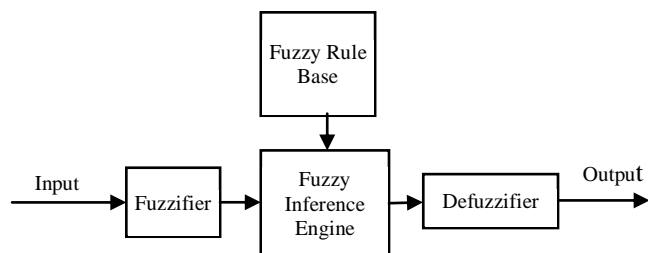


Fig. 5 Structure of fuzzy logic system [21]

شکل 5 ساختار سیستم فازی [21]

امکان دستیابی به یک پیش‌بینی مناسب از وضعیت سرعت در تمام مسافت پیش‌رو وجود ندارد. حتی اگر سرعت قابل پیش‌بینی باشد، نیاز به حل یک مسأله بهینه‌سازی دینامیکی غیرخطی وجود خواهد داشت. این منجر به تلاش محاسباتی فوق‌العاده زیاد می‌شود که پاسخ‌گوی کاربردهای برخط نیست؛ بنابراین روش کنترل پیش‌بین اعمال می‌شود. عملکرد کنترل پیش‌بین در شکل 4 توصیف شده است. بسته به پیش‌بینی سرعت مطلوب یک مسیر مرجع در طول p گام زمانی برای خودرو حاصل می‌شود. p افق پیش‌بینی نامیده می‌شود. ایده اصلی به‌دست‌آوردن ورودی کنترلی با حداقل‌سازی یک تابع معیار هدف است که می‌تواند وابسته به انحراف از مرجع و مقادیر متغیرهای کنترل باشد. خودروی هیبرید الکتریکی پلاگین در این مقاله یک سیستم غیرخطی زمان گسسته است. فرم فضای حالت زمان گسسته خودروی مورد نظر به صورت رابطه (7) تعریف می‌شود [13].

$$\begin{aligned} \underline{x}(k+1) &= \underline{f}(\underline{x}(k), \underline{u}(k), k) \\ \dim \underline{u} &= m \\ \dim \underline{x} &= n \end{aligned} \quad (7)$$

در رابطه (7) بردار حالت و ورودی کنترل و تابع فضای حالت زمان گسسته سیستم است.

تابع معیار به شکل رابطه (8) تعریف خواهد شد [13].

$$\begin{aligned} J &= \sum_{v=k+1}^{v=k+p} \xi(\|\underline{x}_r(v) - \hat{\underline{x}}(v|k)\|) \\ &+ \sum_{\mu=k}^{\mu=k+m} \zeta(\underline{u}(\mu), \hat{\underline{x}}(\mu|k)) \end{aligned} \quad (8)$$

در رابطه (8) $\hat{\underline{x}}(v|k)$ به معنی \underline{x} پیش‌بینی‌شده در گام زمانی v است. هنگامی که پیش‌بینی در گام زمانی k انجام می‌شود. مسیر مرجع مطلوب $\underline{x}_r(k)$ به نامیده می‌شود. افق کنترلی که m نامیده شده، به طور معمول مساوی با افق پیش‌بینی انتخاب می‌شود. توابع $\xi(\cdot)$ و $\zeta(\cdot)$ تابع وزن هستند و وزندهی تأثیر متغیرهای حالت و متغیرهای کنترل را ممکن می‌سازند.

استراتژی مدیریت انرژی برای خودروهای هیبرید الکتریکی پلاگین بر کاهش مصرف سوخت متمرکز است؛ بنابراین هدف بهینه‌سازی کاهش مصرف سوخت است و $\zeta(\cdot)$ به عنوان یک تابع انتخاب خواهد شد که بیان‌کننده مصرف و $\xi(\cdot)$ تابعی است که تضمین می‌کند مسیر مرجع توسط متغیرهای حالت دنبال می‌شود. هنگامی که J حداقل می‌شود، یک سلسله از مقادیر ورودی کنترلی بهینه به‌دست خواهند آمد. اعمال این مقادیر به رابطه (7) منجر به یک کنترل حلقه باز می‌شود. کنترل حلقه باز در حضور اغتشاشات مطلوب عمل نخواهد کرد؛ بنابراین الگوریتم زیر برای کنترل حلقه بسته اعمال می‌شود [13].

1- مسیر سیستم در طول افق پیش‌بینی، پیش‌بینی می‌شود. این مسیر به متغیرهای کنترلی ناشناخته $[\underline{u}(k), \underline{u}(k+1), \dots, \underline{u}(k+m)]$ و همچنین حالت کنونی $\underline{x}(k)$ بستگی دارد.

2- مسأله بهینه‌سازی توسط رابطه‌های (7,8) بیان و حل و منجر به تولید ورودی‌های کنترلی بهینه می‌شود.

3- نخستین مقدار از متغیرهای کنترلی به‌دست‌آمده به سیستم اعمال می‌شود.

4- دوباره با آغاز از مرحله 1 الگوریتم با حالت کنونی اندازه‌گیری‌شده تکرار می‌شود.

با اعمال نخستین عضو بردار کنترل زیربهینه و به‌روزرسانی حالت کنونی یک کنترل‌کننده حلقه بسته به دست می‌آید.

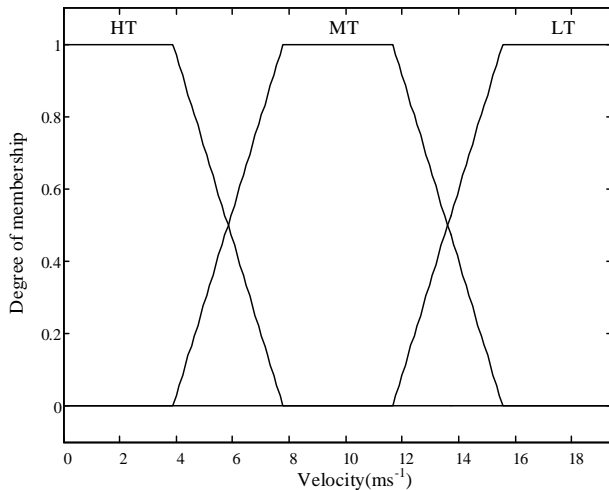


Fig. 7 Membership functions of second input (Traffic intensity)

شکل 7 توابع عضویت ورودی دوم (شدت ترافیک)

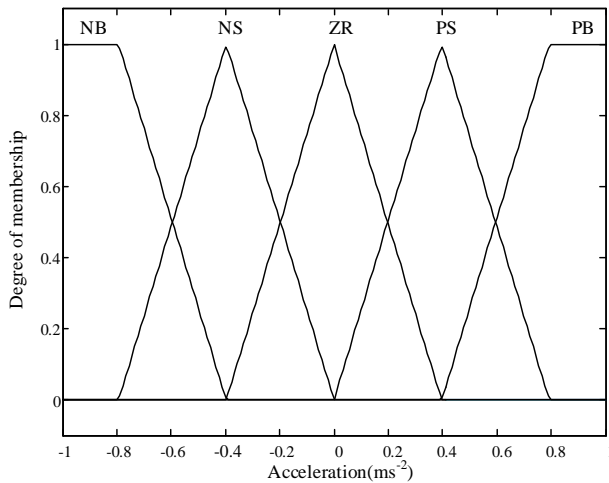


Fig. 8 Membership functions of output (Acceleration)

شکل 8 توابع عضویت خروجی (شتاب)

در شکل‌های 6 و 7، LS سرعت پایین، MS سرعت متوسط، HS سرعت بالا، HT ترافیک سنگین، MT ترافیک متعادل و LT ترافیک سبک را نشان می‌دهند. در شکل 8، NB در اصطلاح شتاب خیلی منفی، NS شتاب کمی منفی، ZR شتاب صفر (عدم تغییر سرعت)، PS شتاب کمی مثبت و PB شتاب خیلی مثبت را نشان می‌دهد.

قوانین فازی به صورت رابطه (9) در نظر گرفته می‌شود. این قوانین در جدول 6 آمده است.

if x_1 is A_{1,i_1} AND x_2 is A_{2,i_2} AND ... AND x_n is A_{n,i_n}
then $y_i = f_{i_1 i_2 \dots i_n}(x_1, x_2, \dots, x_n)$, for $i = 1, \dots, M$ (9)

قوانین فازی براساس دانش انسان خبره و به صورت تجربی تعیین می‌شود. قوانین فازی با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مختلف به صورت تجربی به دست آمده است. برای نمونه یکی از قواعد به این صورت در نظر گرفته شده که اگر سرعت اتومبیل HS و شدت ترافیک LT باشد، شتاب

جدول 6 قوانین فازی

Table 6 Fuzzy rules

Velocity/Traffic	HT	MT	LT
LS	ZR	PS	PB
MS	NS	ZR	PS
HS	NB	NS	ZR

برای ارتباط بین ورودی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در اغلب موارد برای اجتماع از عملگر ماکزیمم و برای اشتراک از عملگر مینیمم استفاده می‌شود. در این مقاله برای اشتراک (AND) از عملگر مینیمم استفاده شده است. با توجه به شکل 5 ساختار کنترل کننده فازی مطابق با جدول 5 برای سیستم مورد مطالعه در نظر گرفته شده است.

شدت ترافیک و سرعت لحظه کنونی در سیستم فازی به عنوان ورودی در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به این که تغییر در حالت ترافیکی موجود در مسیر حرکت (شلوغ، خلوت و یا متعادل)، تأثیر بسیاری در میزان کاهش مصرف سوخت خودرو دارد و مصرف سوخت از معیارهای مهم در این نوع از خودروهاست، این دو پارامتر به عنوان ورودی در سیستم فرض شده‌اند. سرعت خودرو در آینده به سرعت کنونی و وضعیت ترافیک در افق پیش‌بینی بستگی دارد. سرعت خودرو در آینده با توجه به در اختیار بودن سرعت لحظه پیشین به کمک شتاب پیش‌بینی شده به راحتی قابل تعیین است. به همین جهت شتاب به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است.

توابع عضویت مربوط به ورودی‌ها و خروجی به ترتیب در شکل‌های 6-8 نشان داده شده است. ورودی اول یعنی سرعت لحظه‌ای خودرو از مقدار صفر تا حداکثر سرعت درخواستی در چرخه رانندگی مورد نظر تنظیم شده است. ورودی دوم یعنی شدت ترافیک نیز با توجه به سرعت خودرو در 10 ثانیه بعد تنظیم شده است؛ به این صورت که در سرعت‌های پایین ترافیک سنگین، در سرعت‌های متوسط ترافیک متعادل و در سرعت‌های بالا ترافیک سبک در نظر گرفته شده است. خروجی یعنی شتاب بین منفی یک و مثبت یک تنظیم شده است. شتاب منفی نشان‌دهنده سرعت کندشونده و شتاب مثبت نشان‌دهنده سرعت تندشونده است.

جدول 5 ساختار کنترل کننده فازی

Table 5 Structure of fuzzy controller

اجزا	نوع
نوع ساختار استنتاجی	ممدانی
عملگر AND	مینیمم
عملگر OR	مینیمم
روش استنتاج	مینیمم
روش تجمع	ماکزیمم
روش غیرفازی سازی	نیمساز

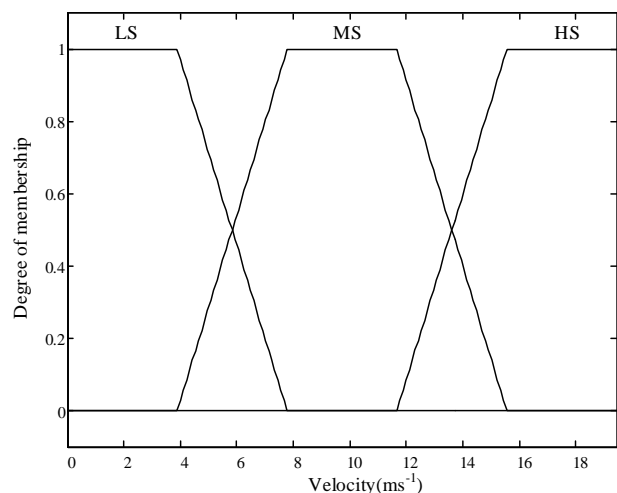


Fig. 6 Membership functions of first input (Instant speed)

شکل 6 توابع عضویت ورودی اول (سرعت لحظه کنونی)

5- شبیه‌سازی

سیستم خودروی هیبرید الکتریکی پلاگین با ساختار موازی و پارامترهایی که در جدول 1 آمده شبیه‌سازی شده است. متغیر حالت سیستم، متغیر کنترلی، قیدهای مربوط به این متغیرها و نیز تابع هزینه طبق روابط (2-4) تعریف شده‌اند. ابتدا تابع هزینه به دو روش برنامه‌نویسی پویا و بهینه‌سازی لحظه‌ای حل شده و سپس روش پیشنهادی یعنی مدیریت انرژی هوشمند مبتنی بر کنترل فازی ارائه شده است. نتایج حاصل در ادامه آمده است.

شکل 9 مسیر سطح شارژ را در استراتژی‌های مدیریت انرژی پیش‌بین هوشمند، بهینه‌سازی لحظه‌ای و برنامه‌نویسی پویا نشان می‌دهد. پاسخ حاصل از برنامه‌نویسی پویا، پاسخ بهینه کلی است. نتیجه حاصل از روش پیشنهادی شبیه به نتیجه برنامه‌نویسی پویاست، نواحی که نمودار سطح شارژ تقریباً مسطح است، نشان‌دهنده آن است که توان درخواستی خودرو توسط موتور درون‌سوز تأمین می‌شود. باتری انرژی خود را تا نزدیکی سطح پایین سطح شارژ مجاز خالی می‌کند. در طی مسیر انرژی قابل توجهی در باتری وجود دارد که به تدریج با توجه به مسیر حرکت و مسافت پیموده شده مصرف می‌شود. در نتیجه بخش قابل توجهی از تأمین توان مورد نیاز از طریق منبع الکتریکی صورت می‌گیرد. شکل 10 ورودی کنترل را در استراتژی مدیریت انرژی پیش‌بین هوشمند نشان می‌دهد. ورودی کنترل توسط قید در تابع معیار محدود شده است. این قید به صورت رابطه (4) در نظر گرفته شده و به همین جهت حدود ورودی کنترل بین بازه $[-1, 1]$ قرار گرفته است.

میزان مصرف سوخت و سطح شارژ نهایی باتری حاصل از استراتژی مدیریت انرژی پیش‌بین هوشمند، بهینه‌سازی لحظه‌ای و برنامه‌نویسی پویا در جدول 7 ارائه شده است.

با توجه به جدول 7 مصرف سوخت با استفاده از استراتژی مدیریت انرژی پیش‌بین هوشمند نسبت به استراتژی بهینه‌سازی لحظه‌ای، بهبود چشم‌گیر به میزان 31.8869% داشته است.

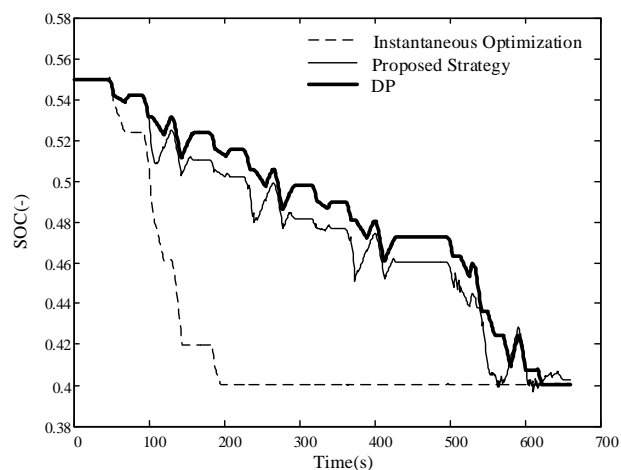


Fig. 9 State of charge

شکل 9 سطح شارژ باتری

جدول 7 نتایج شبیه‌سازی

Table 7 Simulation results

استراتژی/ پارامتر	مصرف سوخت	سطح شارژ نهایی
برنامه‌نویسی پویا	2.3206	0.4004
مدیریت انرژی پیش‌بین هوشمند	3.3325	0.4028
بهینه‌سازی لحظه‌ای	4.8926	0.4008

ZR در نظر گرفته شود؛ به این صورت که وقتی مسیر خلوت و سرعت بالاست نیازی به تغییر سرعت و افزایش یا کاهش شتاب نباشد.

اگر چرخه رانندگی تغییر کند باید حدود بالا و پایین توابع عضویت ورودی اول (سرعت لحظه کنونی) و توابع عضویت ورودی دوم (شدت ترافیک) که به ترتیب بیانگر حداکثر و حداقل سرعت در چرخه رانندگی مورد نظر و نیز حدود بالا و پایین توابع عضویت خروجی (شتاب) که به ترتیب بیانگر حداکثر و حداقل شتاب در چرخه رانندگی است تغییر کنند. سرعت لحظه بعدی با داشتن مقدار شتاب و سرعت لحظه کنونی طبق رابطه (10) محاسبه می‌شود.

$$a(k) = \frac{v(k) - v(k-1)}{\Delta k}, \quad k = 1, \dots, N \quad (10)$$

a شتاب و v سرعت خودرو است، همچنین با توجه به داده‌های چرخه رانندگی مورد نظر (سرعت و شماره دنده) شماره‌دهنده متناظر با مقادیر سرعت به‌دست‌آمده درون‌یابی می‌شود، سپس مقادیر شتاب، سرعت و شماره‌دهنده در هر لحظه تا افق پیش‌بینی به‌روز می‌شود.

پس از به‌دست آوردن سرعت‌های پیش‌بینی‌شده در افق پیش‌بینی مسأله بهینه‌سازی تبدیل به یک مسأله بهینه‌سازی غیرخطی افق محدود همراه با قیدها می‌شود. عموماً محدودیتی برای روشی که به منظور حل مسأله بهینه‌سازی استفاده می‌شود وجود ندارد، اما چون مسأله واقعی غیرخطی و تعداد حالت‌ها کم است، برنامه‌نویسی پویا مناسب به نظر می‌رسد. برنامه‌نویسی پویا یک پیشنهاد استاندارد برای حل عددی مسأله‌های بهینه‌سازی برای سیستم‌های دینامیکی زمان-گسسته توصیف شده با معادله دیفرانسیل (7) با توجه به تابع معیار (8) است [13]. در گام k بردار کنترل بهینه با استفاده از روش برنامه‌نویسی پویا به‌دست می‌آید و تنها اولین متغیر کنترل قابل اعمال به سیستم خودرو است. در گام $k+1$ ، برنامه‌نویسی پویا مجدداً برای به‌دست آوردن بردار کنترل بهینه جدید اجرا می‌شود.

در روش کنترل پیش‌بین خروجی‌ها در فاصله زمانی p که افق پیش‌بینی نامیده می‌شود، با استفاده از مدل پروسه در هر لحظه زمانی k پیش‌بینی می‌شود. خروجی‌های پیش‌بینی‌شده به مقادیر معلوم (ورودی‌ها و خروجی‌ها تا لحظه k) و سیگنال کنترل در زمان آینده وابسته هستند که باید محاسبه و به سیستم اعمال شوند. مجموعه سیگنال‌های کنترلی در زمان آینده با مینیمم کردن تابع معیار مقید به‌دست می‌آید.

کنترل پیش‌بین به دلیل توانایی یافتن بردار کنترل بهینه در هر لحظه تا افق محدود و همچنین در نظر گرفتن قیدهای مختلف سیستم تحت کنترل مناسب‌ترین روش برای استفاده از داده‌های برخط هوشمند در مدیریت انرژی است. در این مقاله از کنترل پیش‌بین همراه با قیدها استفاده شده است. در این روش حالت و ورودی کنترل محدود هستند. به کمک این قیدها تابع معیار تأمین می‌شود. معیار پایداری در این مقاله تابع معیار مقید است. از یک روش بهینه‌سازی مناسب برای به‌دست آوردن مسیر بهینه تا افق پیش‌بین به گونه‌ای که سرعت روش مانع اجرای برخط آن نشود، استفاده شده است. با توجه به حالت ترافیکی موجود در مسیر حرکت، سرعت خودرو با استفاده از یک سیستم فازی تخمین زده می‌شود و سپس مسیر مرجع تعریف شده برای سیستم توسط خروجی‌ها در افق پیش‌بینی تعریف شده برای آن دنبال می‌گردد. روش پیشنهادی برخلاف بیشتر سیستم‌های مدیریت انرژی برخط که به دلیل استفاده از داده‌های گذشته برای پیش‌بینی ادامه مسیر محدود به چرخه‌های رانندگی خاصی هستند موجب کاهش وابستگی کنترل‌کننده به مسیر یا چرخه رانندگی می‌شود.

v	سرعت (ms^{-1})
\underline{x}	متغیر حالت
$\hat{\underline{x}}$	متغیر حالت پیش بینی شده
علایم یونانی	
ω	سرعت زاویه‌ای (rads^{-1})
ξ	تابع مصرف سوخت
ζ	تابع مسیر مطلوب
زیر نویس‌ها	
batt	باتری
e	موتور درون سوز
fuel	سوخت
m	موتور الکتریکی
max	حداکثر
min	حداقل
r	مرجع مطلوب
Total	کلی

8- مراجع

- [1] S. G. Wirasingha, A. Emadi, Classification and review of control strategies for plug-in hybrid electric vehicles, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 60, No. 1, pp. 111-122, 2011.
- [2] M. Mohebbi, M. Charkhgard, M. Farrokhi, Optimal neuro-fuzzy control of parallel hybrid electric vehicles, *Proceedings of The 2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Chicago, IL, USA, September 7-9, 2005.
- [3] M. Mohebbi, M. Farrokhi, Adaptive neuro control of parallel hybrid electric vehicles, *Electric and Hybrid Vehicles*, Vol. 1, No. 1, pp. 3-19, 2007.
- [4] I. Husain, *Electric and hybrid vehicles: Design fundamentals*, Second Edition, pp. 96-97, CRC press, 2011.
- [5] G. Gong, Y. Li, Z. R. Peng, Trip-based optimal power management of plug-in hybrid electric vehicles, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 57, No. 6, pp. 3393-3401, 2008.
- [6] M. J. Esfandyari, M. R. Ha'iri Yazdi, V. Esfahanian, H. Nehzati, Design of a real-time simulator of the engine-generator for a series hybrid electric bus, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 200-206, 2014. (in Persian فارسی)
- [7] H. Alipour, B. Asaei, G. Farivar, Fuzzy logic based power management strategy for plug-in hybrid electric vehicles with parallel configuration, *Proceedings of The International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Santiago de Compostela, Spain, March 28-30, 2012.
- [8] V. Larsson, L. Johannesson, B. Egardt, A. Lasso, Benefit of route recognition in energy management of plug-in hybrid electric vehicles, *Proceedings of The American Control Conference*, Montreal, QC, Canada, 27-29 June, 2012.
- [9] S. Overington, R. Sumedha, Review of PHEV and HEV operation and control research for future direction, *Proceedings of The 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, Aalborg, Denmark, June 25-28, 2012.
- [10] I. Arsie, M. Graziosi, C. Pianese, G. Rizzo, et al. Optimization of supervisory control strategy for parallel hybrid vehicle with provisional load estimate, *Proceedings of The 7th Advanced Vehicle Control Conference*, Arnhem, Netherlands, August 23, 2004.
- [11] G. Gong, Y. Li, Z. R. Peng, Power management of plug-in hybrid electric vehicles using neural network based trip modeling, *Proceedings of American Control Conference*, St. Louis, MO, USA, June 10-12, 2009.
- [12] A. Rajagopalan, G. Washington, Intelligent control of hybrid electric vehicles using GPS information, *Proceedings of the 2002 Future Car Congress on CD-ROM*, Arlington, Virginia, USA, June 3-5, 2002.
- [13] M. Back, M. Simons, F. Kirschaum, V. Krebs, Predictive control of drivetrains, *Proceedings of the IFAC 15th Triennial World Congress*, Barcelona, Spain, July 21-26, 2002.
- [14] J. Zhang, H. Hongwen, X. Wang, Model predictive control based energy management strategy for a plug-in hybrid electric vehicle, *Proceedings of the 3rd International Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Systems*, Yinchuan, China, August 15-16, 2015.
- [15] Y. Gao, M. Ehsani, Design and control methodology of plug-in hybrid electric vehicles, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 2, pp. 633-640, 2010.
- [16] A. Safaei, M. R. Ha'iri-Yazdi, V. Esfahanian, M. Masih-Tehrani, Design of a fuzzy driving cycle identification unit for intelligent control strategy of hybrid vehicles, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 12, pp. 134-143, 2014. (in Persian فارسی)

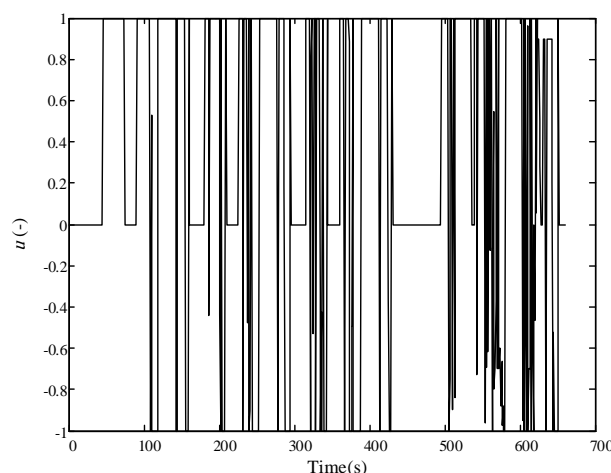


Fig. 10 Control input for proposed strategy

شکل 10 ورودی کنترل برای استراتژی پیشنهادی

کاهش مصرف سوخت در خودروهای هیبرید الکتریکی و همچنین کاهش آلاینده‌ها یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های صنایع خودرو است. آلاینده‌های خروجی از خودروها موجب افزایش گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه گرمایش جهانی می‌شود. طراحی یک سیستم مدیریت انرژی مناسب که با در نظر گرفتن قیدهای مختلف سیستم تحت کنترل و حفظ عملکرد آن مصرف سوخت را بهبود دهد بسیار حائز اهمیت است. روش پیشنهادی در این مقاله با موفقیت به این هدف تحقق بخشیده است؛ به طوری که علاوه بر کاهش چشم‌گیر مصرف سوخت مدیریت مناسبی بر سطح شارژ باتری داشته است.

6- نتیجه گیری

در این پژوهش استراتژی جدیدی جهت کاهش مصرف سوخت و مدیریت مناسب بر سطح شارژ باتری در خودروهای هیبرید الکتریکی پلاگین با ساختار موزی ارائه شده است. با توجه به این‌که هر دو مفهوم کنترل پیش‌بین و مفهوم خودروی هیبریدی موجبات صرفه‌جویی قابل توجه در سوخت را فراهم می‌آورند؛ بنابراین ترکیب این دو منجر به نتیجه بهتر می‌شود. ترکیب روش کنترل پیش‌بین با منطق فازی ترکیبی جدید برای رسیدن به پاسخی مناسب‌تر ایجاد کرده است. ارزیابی نتایج نشان می‌دهد که اثر کنترلی استراتژی مدیریت انرژی پیش‌بین هوشمند بهتر از استراتژی بهینه‌سازی لحظه‌ای و شبیه به نتایج برنامه‌نویسی پویا است. مصرف سوخت با استفاده از استراتژی پیشنهادی نسبت به استراتژی بهینه‌سازی لحظه‌ای، بهبودی چشم‌گیری داشته است.

7- فهرست علایم

a	شتاب (ms^{-2})
\underline{f}	تابع فضای حالت زمان گسسته
g	تابع معیار برای سیستم
J	تابع هزینه
k	زمان (s)
\dot{m}	دبی جرمی (kgs^{-1})
p	افق پیش‌بینی (s)
SOC	حالت شارژ باتری
T	گشتاور (Nm)
\underline{u}	ورودی کنترل

- university of technology, Gothenburg, 2009.
- [20] C. Zhang, A. Vahidi, P. Pisu, X. Li, K. Tennant, Role of terrain preview in energy management of hybrid electric vehicles, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 59, No. 3, pp. 1139-1147, 2010.
- [21] L. Wang, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, International Edition, pp. 7-8, USA: Prentice-Hall press, 1999.
- [17] R. Wang, *A Real-time, Robust Control Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicles*, PhD Thesis, North Carolina State University, Raleigh, 2015.
- [18] L. Guzzella, A. Sciarretta, *Vehicle Propulsion Systems, Introduction to Modeling and Optimization*, Third Edition, pp. 253-255, Springer, 2013.
- [19] F. Irani, *On Dynamic Programming Technique Applied to A Parallel Hybrid Electric Vehicle*, PhD Thesis, Department of Signals and Systems, Chalmers