

## ساختار کنترلی جدید برای مدیریت انرژی در خودروی برقی هیبرید پلاگین مبتنی بر نقشه‌های شناختی فازی

حسین الیاسی<sup>۱\*</sup>، مهناز قریشی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

h\_eliasi@birjand.ac.ir

<sup>۲</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

mahnazghoreshi@yahoo.com

**چکیده:** در این مقاله یک ساختار جدید کنترلی مبتنی بر نقشه‌های شناخت فازی (FCM) به منظور مدیریت مصرف انرژی در خودروهای برقی هیبرید پلاگین ارائه شده است. این کنترل‌کننده نظارتی به گونه‌ای طراحی شده است تا علاوه بر تأمین توان درخواستی راننده، سطح شارژ باتری (SOC) را در محدوده قابل قبولی نگه داشته و همزمان میزان مصرف سوخت در واحد کیلومتر نیز کاهش دهد. از آنجایی که در این روش نیاز به داشتن مدل دقیقی از سیستم وجود ندارد، حجم محاسبات در تعیین قانون کنترلی کمتر شده و پیاده‌سازی آن نسبت به روش‌های کلاسیک، پیچیدگی کمتری دارد. خودروی برقی هیبرید پلاگین در نظر گرفته شده در این مقاله، از نوع سری-موازی است. به منظور ارزیابی نتایج حاصل از به‌کارگیری ساختار کنترلی پیشنهادی، برای شبیه‌سازی، سه سیکل استاندارد رانندگی و یک سیکل رانندگی شهری تهران بزرگ در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش کنترلی پیشنهادی، ضمن تأمین توان درخواستی، میزان مصرف سوخت را نسبت به کنترل‌کننده فازی مرسوم کاهش داده و سطح شارژ باتری را در حد قابل قبولی نگه می‌دارد.

**واژه‌های کلیدی:** خودروی برقی هیبرید پلاگین، نقشه‌های شناختی فازی، کنترل نظارتی، مدیریت انرژی، سطح شارژ باطری.

## ۱. مقدمه

آلودگی ناشی از سوخت‌های فسیلی از یک سو و محدودیت ذخایر این نوع سوخت‌ها از سوی دیگر باعث شده تا توجه جامعه علمی و به تبع آن توجه خودروسازان به استفاده از منابع دیگر انرژی جلب شود و صنایع خودروسازی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و صرفه‌جویی در مصرف سوخت را یکی از اهداف اصلی خود در طراحی و ساخت خودروهای جدید قرار دهند. یکی از راهکارهایی که شرکت‌های خودروسازی از جمله شرکت تویوتا در پیش گرفته‌اند، توسعه طراحی و ساخت خودروهای برقی هیبرید<sup>۱</sup> (HEV) است.

یکی از انواع خودروهای برقی هیبرید، خودروی برقی هیبرید پلاگین<sup>۲</sup> (PHEV) است. این نوع خودرو، توان مورد نیاز برای حرکت را به کمک ترکیبی از یک موتور احتراق داخلی و یک موتور الکتریکی با یک مجموعه باتری فراهم می‌کند. این خودرو می‌تواند هم به صورت خودرو برقی (EV) و هم به صورت خودرو برقی هیبرید (HEV) عمل کند و قابلیت شارژ به وسیله شبکه الکتریکی را نیز دارد. این نوع خودرو می‌تواند نقش مؤثری در کاهش مصرف سوخت و کاهش آلودگی ایفا کند.

عمده‌ترین تفاوت یک خودروی برقی هیبریدی با یک خودروی برقی هیبرید پلاگین در اندازه باتری و ساختار کنترلی است [۱]. از آنجایی که در خودروهای پلاگین تخلیه کامل باتری نیز می‌تواند در دروساز باشد، معمولاً خودروهای پلاگین، نسبت به خودروهای برقی هیبرید معمولی، باتری بزرگ‌تر و ساختار کنترلی پیچیده‌تری دارند.

تمامی روش‌های مدیریت توان در یک خودروی پلاگین از ترکیب مختلف سه مُد کنترلی تشکیل می‌شوند. این سه مُد عبارت‌اند از: مُد الکتریکی، مُد تخلیه شارژ<sup>۳</sup> (CD) و مُد نگهداری شارژ<sup>۴</sup> (CS). در مُد الکتریکی، موتور بنزینی خاموش بوده و باتری تخلیه می‌شود و شارژ آن از طریق ترمز بازیاب امکان‌پذیر است. در مُد تخلیه شارژ، موتور بنزینی نیز کار می‌کند و می‌تواند برای لحظاتی باتری را شارژ کند ولی روند کلی تغییرات سطح شارژ باتری<sup>۵</sup> (SOC) به صورت کاهشی خواهد بود. خودرو پلاگین در مُد نگهداری شارژ به صورت یک خودروی هیبریدی عمل می‌کند به طوری که موتور بنزینی توان متوسط را تأمین کرده و مجموعه باتری، توان لحظه‌ای را تأمین می‌کند.

در نتیجه در مُد نگهداری شارژ، شارژ باتری حول سطح ویژه‌ای از شارژ باتری تغییر خواهد کرد [۲].

از آنجا که مدیریت انرژی نقش مهمی در کاهش مصرف سوخت، کاهش آلودگی و همچنین افزایش بازدهی این خودروها دارد؛ بنابراین تبیین ساختار کنترلی مناسب می‌تواند از جمله عوامل تأثیرگذار در بازدهی و مصرف سوخت این خودروها باشد.

در صورتی که تمام اطلاعات رانندگی قبل از شروع سفر مشخص شده باشد، مدیریت بهینه انرژی را می‌توان با هدف بهبود اقتصاد سوخت [۳ و ۴]، کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای [۵] و کاهش کلی هزینه‌های صرف‌شده از نظر قیمت برق و بنزین [۶] و... پیاده‌سازی کرد. همچنین در حالتی که اطلاعات کافی درباره سیکل رانندگی در اختیار نباشد، مدیریت انرژی برای خودرو برقی هیبرید پلاگین را می‌توان به صورت یک مسئله بهینه‌سازی تصادفی در نظر گرفت [۷].

بر اساس مطالعات انجام‌شده، الگوریتم‌هایی را که برای مدیریت انرژی در خودروی هیبرید پلاگین استفاده شده است، می‌توان به سه دسته اصلی تقسیم کرد:

- روش‌های مبتنی بر تئوری کنترل بهینه شامل اصل بهینگی [۸-۱۰] برنامه‌ریزی مرتبه دوم [۱۱ و ۱۲]، برنامه‌ریزی پویا [۱۳ و ۱۴]، کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل [۱۵ و ۱۶].
  - روش‌های مبتنی بر کنترل هوشمند از قبیل شبکه‌های عصبی مصنوعی [۱۷ و ۱۸]، منطق فازی [۱۹-۲۱]، الگوریتم ژنتیک [۲۲] و بهینه‌سازی تجمعی ذرات [۲۳].
  - روش‌های تحلیل مبتنی بر قاعده [۲۴ و ۲۵].
- استفاده از این روش‌های کنترلی، محدود به مدیریت توان در خودروهای برقی هیبرید پلاگین نبوده و استفاده از آن‌ها در خودروهای برقی [۲۶] و برقی هیبرید نیز مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های مبتنی بر اصل بهینگی برای مدیریت انرژی در خودرو هیبرید الکتریکی پلاگین، نیازمند یک مدل دقیق از قطار توان خودرو هستند. داشتن چنین مدلی از یک سیستم که از درجه غیرخطی بودن بالایی برخوردار است، چندان واقع‌گرایانه نیست. در مراجع [۱۷ و ۱۸] یک چهارچوب مبتنی بر شبکه عصبی ارائه شده است که برنامه‌ریزی پویا و برنامه‌ریزی مرتبه ۲ را برای پیش‌بینی کردن الگوی جاده و مدیریت کردن انرژی بین موتور و مجموعه باتری با هم ترکیب کرده است. این الگوریتم برای آموزش دادن شبکه عصبی نیازمند داده‌های فراوان برون‌خط است. این الگوریتم را فقط می‌توان به خودرو برقی هیبرید پلاگین معمولی اعمال کرد که در آن وضعیت

1. Hybrid Electric Vehicle (HEV)
2. Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)
3. Charge Depletion (CD)
4. Charge Sustained (CS)
5. State Of Charge (SOC)

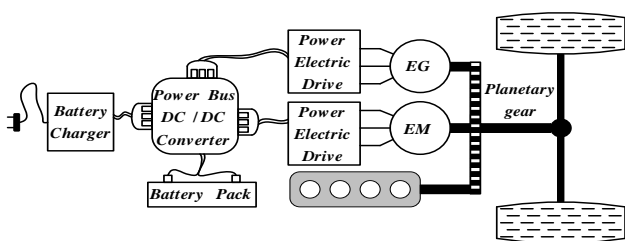
و عملکرد خودرو مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. برای تحلیل نتایج و درک بهتر عملکرد این کنترل کننده، علاوه بر شبیه سازی روش کنترلی پیشنهادی در سیکل های رانندگی استاندارد، شبیه سازی برای سیکل رانندگی واقعی در تهران بزرگ نیز انجام شده است. به منظور نشان دادن قابلیت های این ساختار کنترلی جدید، عملکرد آن با عملکرد یک کنترل کننده فازی متداول مقایسه شده است.

نوآوری اصلی مقاله ایجاد یک ساختار دینامیکی جدید برای نقشه شناختی فازی به منظور پایه ریزی کنترل نظارتی در یک PHEV است. در ادامه، در بخش ۲، مدل سازی خودرو برقی هیبرید پلاگین بیان می شود. در بخش ۳، نقشه شناخت فازی<sup>۲</sup> معرفی می شود. در بخش ۴، به پیاده سازی کنترل نظارتی مبتنی بر FCM پرداخته شده است. در نهایت در بخش ۵، شبیه سازی روش کنترلی پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲. مدل سازی خودرو

در طراحی خودروهای برقی هیبریدی (معمولی، پلاگین) چهار نوع سیستم انتقال قدرت استفاده می شود که عبارت اند از: سیستم انتقال قدرت سری، سیستم انتقال قدرت موازی، سیستم انتقال قدرت سری - موازی و سیستم انتقال قدرت پیچیده (ترکیبی از حالت های قبل). انتقال قدرت در خودروی مورد مطالعه در این مقاله، سری - موازی است. این نوع سیستم انتقال قدرت تلفیقی از مزایای سیستم انتقال قدرت موازی و سیستم انتقال قدرت سری را دارد [۲۸].

بخش های اصلی خودرو برقی هیبرید پلاگین، عبارت اند از: موتور الکتریکی، ژنراتور، موتور احتراق داخلی، باتری و دینامیک خودرو. شکل (۱)، یک شماتیک کلی از نحوه اتصال بخش های مختلف یک PHEV را نمایش می دهد.



شکل (۱): طرحواره کلی خودروی هیبرید پلاگین

همان طور که در این شکل مشاهده می شود، شفت های موتور الکتریکی، ژنراتور و موتور احتراق داخلی از طریق یک مجموعه گیربکس سیاره ای<sup>۳</sup> به یکدیگر متصل شده اند. همچنین موتور و

شارژر در ناحیه کوچکی نگه داشته می شود. در مرجع [۲۵]، یک روش مدیریت توان با کمک یک جفت پارامتر برای تخصیص دادن توان، یکی آستانه توان برای روشن شدن موتور احتراقی و دیگری توان بهینه باتری در حالتی که موتور الکتریکی روشن است، ارائه شده است. البته این روش برای تمام انواع خودرو هیبرید الکتریکی پلاگین قابل استفاده نیست.

در بیشتر کارهای تحقیقاتی انجام شده، یا مدلی دینامیکی تقریبی از PHEV برای طراحی کنترل کننده در نظر گرفته و یا طراحی کنترل کننده آزاد از مدل بوده است؛ به این معنی که از روابط توصیفی بین اجزای اساسی مدل در طراحی کنترل کننده بهره ای برده نشده است. هر دو حالت یک سری معایب به همراه خواهند داشت. در حالتی که از مدل دینامیکی تقریبی برای طراحی کنترل کننده استفاده می شود، قانون کنترلی پیچیدگی بالایی خواهد داشت و در حالت دوم به علت اینکه از اطلاعات کیفی کمتری در طراحی کنترل کننده استفاده شده، ممکن است پاسخ حاصل از اعمال کنترل کننده چندان مطلوب نباشد. حالتی بین این دو، می تواند عیب های هر دو حالت را تا حد خیلی زیاد و چه بسا به طور کامل برطرف کند. به عبارت دیگر، به منظور مدیریت مؤثرتر و ساده تر انرژی در PHEV، نیاز به کنترل کننده هوشمند و بهینه ای است که بتواند توزیع انرژی در خودرو را با محاسبات سریع انجام دهد. طراحی کنترل کننده باید به گونه ای باشد که در آن نیازی به مدل دقیق خودرو نباشد و با یک مدل توصیفی ساده از خودرو بتوان کنترل کننده را طراحی کرد.

نقشه های شناختی<sup>۱</sup> یک ابزار سودمند در مدل سازی سیستم های دینامیکی پیچیده است [۲۷]. این نوع نقشه ها از نحوه ارتباط بین متغیرهای مختلف در سیستم دینامیکی پیچیده کمک گرفته و یک مدل ساده شده برای توصیف سیستم دینامیکی پایه ریزی می کنند. در این مقاله از این ویژگی نقشه های شناختی، برای ایجاد یک پیکربندی جدید به منظور پایه ریزی یک کنترل کننده نظارتی برای یک سیستم پیچیده استفاده شده است. ساختار پیشنهادی برای مدیریت بهینه انرژی در یک خودروی برقی هیبرید پلاگین مورد استفاده قرار گرفته است. ساختار کنترلی پیشنهادی این امکان را فراهم می سازد تا بدون نیاز به مدل دقیقی از خودرو، علاوه بر کاهش حجم محاسبات، مدیریت انرژی به شکل مؤثرتری نسبت به روش های کنترلی هوشمندی که تاکنون معرفی شده اند، صورت پذیرد.

به منظور ارزیابی، روش کنترلی پیشنهادی در حالات کاری متفاوت روی یک خودروی برقی هیبرید پلاگین اعمال شده و مصرف سوخت

ساختار کنترلی جدید مبتنی بر نقشه‌های شناختی فازی به منظور طراحی یک کنترل‌کننده نظارتی برای PHEV ارائه شده است تا اهداف کنترلی به شکل مطلوبی برآورده شوند. در ادامه، ابتدا نقشه‌های شناختی فازی معرفی می‌شوند و سپس نحوه استفاده از آن به‌عنوان یک کنترل‌کننده نظارتی توصیف می‌شود.

### ۳. نقشه‌های شناختی فازی

مفهوم نقشه‌های شناختی، اولین بار توسط اکسلورد [۲۹] در سال ۱۹۷۶، به‌منظور ایجاد ابزاری برای توصیف ساده سیستم‌های اجتماعی پایه‌گذاری شد. کازکو در سال ۱۹۸۶، با الهام گرفتن از کار اکسلورد، FCM را به‌عنوان راهکاری برای توصیف ساده رفتار سیستم‌های دینامیکی پیچیده معرفی کرد [۳۰]. این نوع نقشه شناختی، یکی از مؤثرترین روش‌های درک و فهم رفتار یک سیستم دینامیکی از طریق در نظر گرفتن یک مجموعه از مفاهیم کیفی و ارتباط بین آن‌هاست. به کمک این ابزار، می‌توان یک سری نمودارهای رابطه علی بین دانش و داده‌ها یا رویداد و وقایع مرتبط با هم را تبیین و ترسیم کرد. نقشه شناختی فازی قابلیت یادگیری و تصحیح و گسترش دارد به این معنی که لازم نیست در ابتدا همه موارد به‌صورت کاملاً واضح و کامل در نقشه لحاظ شود؛ زیرا در بسیاری از موارد به‌دلیل پیچیدگی و تعدد متغیرها، حتی ممکن نیست که تمام نقش‌ها و وزن‌های علت و معلولی را تبیین کرد، بلکه لازم است در حین کار برخی موارد و مفاهیم را به نقشه اضافه کرد و تأثیر آن را در توصیف رفتار سیستم دینامیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار داد [۳۱].

FCM یک گراف جهت‌دار فازی شده دارای فیدبک است. یک FCM شامل تعدادی گره  $C_i$  است که هرکدام یک مفهوم از سیستم را نشان می‌دهد؛ و تعدادی کمان جهت‌دار  $e_{ij}$ ، به‌طوری که هر کمان نحوه ارتباط مفهوم  $C_i$  به مفهوم  $C_j$  را نشان می‌دهد. هر کمان  $e_{ij}$  به‌وسیله یک ضریب  $w_{ij}$  وزن‌دهی می‌شود. این وزن‌ها نوع و میزان تأثیرپذیری یک مفهوم از مفهوم دیگر را توصیف می‌کند. وزن‌ها مقداری بین -۱ تا +۱ اختیار می‌کنند. مثبت بودن وزن  $w_{ij}$  به این معنی است که افزایش (کاهش) مفهوم  $C_i$ ، منجر به افزایش (کاهش) مفهوم  $C_j$  می‌شود. در صورتی که  $w_{ij}$  منفی باشد، کاهش (افزایش) مفهوم  $C_i$ ، افزایش (کاهش) مفهوم  $C_j$  را به همراه خواهد داشت. صفر بودن  $w_{ij}$  به این معنی است که هیچ رابطه علی بین مفهوم  $C_i$  و مفهوم  $C_j$  وجود ندارد. شکل (۲) نمایی از یک FCM شامل ۵ گره را نشان می‌دهد.

به این ترتیب می‌توان گفت نقشه‌های شناختی فازی در واقع گراف‌هایی بر اساس شبکه‌های عصبی و منطق فازی هستند که

ژنراتور از طریق اینورترهای سه‌فاز به مجموعه باتری و هر دو اینورتر و سیستم شارژ به یک باس DC متصل می‌شوند که این باس DC از طریق یک مبدل DC به DC به باتری متصل شده است. مدل در نظر گرفته شده برای خودروی برقی هیبرید پلاگین مورد مطالعه، در محیط <sup>۱</sup>Advisor، پیاده‌سازی شده است. مشخصات این خودرو در جدول (۱) بیان شده است.

جدول (۱): مشخصات خودروی مورد مطالعه

بخش	پارمتر	مقدار
	وزن (kg)	۱۷۵۰
	سطح مؤثر جلو (m <sup>2</sup> )	۲/۱۶
خودرو	شعاع چرخ‌ها (m)	۰/۳
	فاصله محور جلو از مرکز ثقل (m)	۱/۳۵
	فاصله محور عقب از مرکز ثقل (m)	۱/۵۵
	نوع موتور	انژکتوری
موتور احتراق	توان ماکزیمم (kw)	۱۱۴
داخلی	سرعت در توان ماکزیمم (rpm)	۵۰۰۰
	سرعت ماکزیمم (rpm)	۶۰۰۰
موتور الکتریکی	توان ماکزیمم (kw)	۵۰
ژنراتور	توان ماکزیمم (kw)	۱۲۰
	نوع باتری	نیکل-منال-هیدراید
	ولتاژ نامی (v)	۲۰۰
باتری	ظرفیت نامی (Ah)	۸/۱
	تعداد سلول‌ها در حالت سری	۲۰
	تعداد سلول‌ها در حالت موازی	۱۰

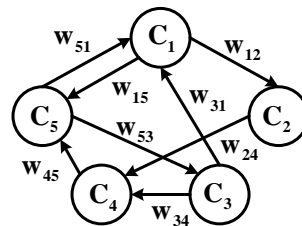
مدل دینامیکی خودروی برقی هیبرید پلاگین از پیچیدگی بالایی برخوردار است. همین امر باعث می‌شود که طراحی یک کنترل‌کننده کلاسیک یا مدرن مبتنی بر مدل برای این خودرو نسبتاً مشکل باشد. از طرفی، اگر کنترل‌کننده بر اساس یک مدل ساده شده از خودرو طراحی شود، زمانی که این کنترل‌کننده روی مدل واقعی خودرو که دارای جزئیات بیشتری است پیاده شود، پاسخ مطلوبی در اهداف کنترلی که دنبال کردن سرعت درخواستی توسط راننده و همچنین کاهش مصرف سوخت است، حاصل نخواهد شد. در اینجاست که اهمیت طراحی کنترل‌کننده‌ای که وابستگی کمتری به مدل داشته باشد، نمود پیدا می‌کند.

طراحی این نوع کنترل‌کننده وابسته به دید طراح از سیستم دینامیکی است. شبکه‌های عصبی، سیستم‌های استنتاج فازی و سیستم‌های استنتاج فازی-عصبی تطبیقی، ابزارهای مناسبی برای طراحی این نوع کنترل‌کننده‌ها می‌توانند باشند. در این مقاله یک

ویژگی‌ها و مزیت‌های هر دو را به ارث می‌برند [۳۱].

برای ترسیم نقشه شناخت فازی یک سیستم لازم است مراحل چهارگانه زیر طی شود:

۱. تعیین کردن مفاهیم شکل‌دهنده سیستم و نمایش دادن هر مفهوم با یک گره ( $C_i$ ).
۲. تعیین کردن رابطه علی و سببی بین هر دو مفهوم و نمایش دادن آن با یک کمان وزن‌دار شده که دو گره را به هم متصل می‌کند.
۳. تعیین اثرگذاری یک مفهوم روی مفاهیم دیگر با در نظر گرفتن علامت «مثبت»، «منفی» یا «خستگی» برای وزن هر کمان.
۴. تعیین مقدار ضریب وزنی هر کمان که بیانگر شدت تأثیرگذاری یک مفهوم روی مفاهیم دیگر است.



شکل (۲): شماتیک یک نقشه شناختی فازی

بعد از نمایش و بیان گرافیکی نقشه شناختی فازی، یک مدل ریاضی برای آن در نظر گرفته می‌شود. در این مدل ریاضی، هر مفهوم دارای یک مقدار عددی است که این مقدار در هر مرحله به کمک رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$A_i(k+1) = f \left( A_i(k) + \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ji} A_j(k) \right) \quad (1)$$

به طوری که  $A_i(k)$  مقدار عددی مفهوم نام (گره  $C_i$ ) در لحظه  $k$  و  $A_i(k+1)$  مقدار عددی مفهوم نام در لحظه بعدی است.  $f$

به طور معمول یک تابع سیگموئید به شکل  $f(x) = \frac{1}{1+e^{-\lambda x}}$  در نظر گرفته می‌شود. پارامتر  $\lambda$  برای تعیین شکل این تابع مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نظر گرفتن  $f$  به شکل سیگموئید باعث می‌شود تا مجموع مقادیر وزن‌یافته به محدوده  $[0,1]$  هدایت شوند. مقدار عددی مفاهیم در هر لحظه را می‌توان به شکل یک بردار  $n \times 1$  به اسم  $A(k)$  و وزن‌های بین مفاهیم را در قالب یک ماتریس  $n \times n$  به اسم  $W(k)$  نمایش داد. به این ترتیب نمایش ریاضی یک FCM به صورت زیر خواهد بود:

$$A(k+1) = f(W(k)A(k)) \quad (2)$$

رابطه (۳)، ماتریس وزنی FCM نمایش داده شده در شکل (۲) را

$$W = \begin{bmatrix} 0 & 0 & w_{31} & 0 & w_{51} \\ w_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & w_{53} \\ 0 & w_{24} & w_{34} & 0 & 0 \\ w_{15} & 0 & 0 & w_{45} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

بعد از پیکربندی FCM، باید وزن‌های کمان‌های مختلف را تعیین کرد. برای آموزش وزن‌ها، سه دسته‌بندی اصلی وجود دارد: ۱. روش‌های مبتنی بر الگوریتم هیبین<sup>۲</sup> [۳۲]، ۲. روش‌های مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی [۳۳-۳۵]، ۳. روش‌های ترکیبی [۳۶-۳۷]. در مراجع [۳۱ و ۳۸]، مروری بر این الگوریتم‌ها انجام شده است.

در اغلب FCMها، وزن کمان‌های بین مفاهیم یک مقدار ثابت در نظر گرفته می‌شود. این نوع FCMها برای مدل‌سازی رفتار حالت پایای یک سیستم مناسب‌اند و ممکن است نتوانند به خوبی با حالت‌های گذرای سیستم کنار بیایند. از آنجایی که در این مقاله از یک FCM به عنوان کنترل‌کننده نظارتی استفاده شده، لازم است این کنترل‌کننده قابلیت لحاظ کردن رفتار گذرای سیستم را نیز داشته باشد. یک راهکار برای مواجه شدن با این مورد این است که وزن‌های بیان‌شده توسط ماتریس  $W$ ، متغیر با زمان بر اساس یک جدول جست‌وجو در نظر گرفته شود [۳۹].

راهکار دیگر استفاده از درخت تصمیم‌گیری است. در این حالت، ساختار نقشه می‌تواند متناسب با حالت‌های مختلف سیستم تغییر کند [۴۰]. این نوع نقشه شناختی برای مدل کردن سیستم‌های اجتماعی مناسب است. همچنین می‌توان از تئوری اتوماتا<sup>۳</sup> برای پایه‌ریزی FCM دینامیک کمک گرفت [۴۱].

در این مقاله برای استفاده از FCM، به عنوان یک کنترل‌کننده نظارتی یک ساختار جدید برای FCM پیشنهاد شده است که در آن، تعدادی از وزن‌ها فازی و تعدادی از وزن‌ها، ترکیب خطی از مقدار مفاهیم به همراه یک بایاس وزنی است. رابطه (۴) شکل کلی یکی از وزن‌ها را برای نمونه نشان می‌دهد:

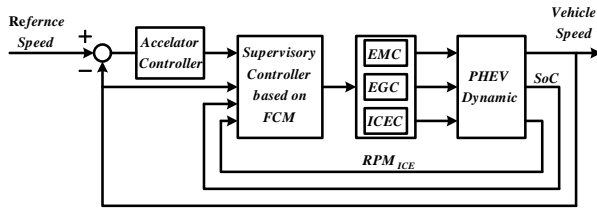
$$w_{ij}(k) = \sum_{m=1}^n \alpha_m^{ij} A_m(k) + b_{ij} \quad (4)$$

که در آن،  $n$ ، تعداد مفاهیم،  $A_m(k)$  مقدار عددی مفهوم  $m$ ام در لحظه  $k$ ،  $\alpha_m^{ij}$  ضریب اثرگذاری مفهوم  $A_m(k)$  روی وزن  $w_{ij}(k)$  و  $b_{ij}$  مقدار بایاس وزنی است.

با انتخاب این ساختار برای وزن‌های کمان‌های بین مفاهیم، FCM

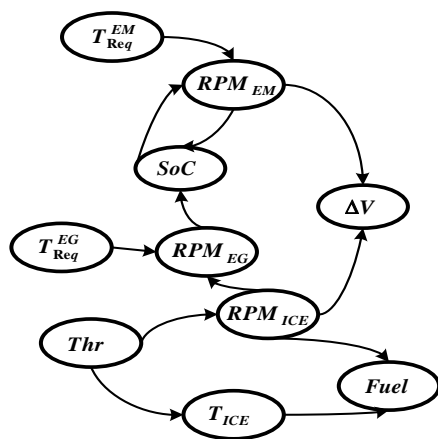
2. Hebbian  
3. Automata Theory

1. Sigmoid



شکل (۳): طرح‌واره کلی روش کنترلی پیشنهادی

پایه‌ریزی کنترل‌کننده نظارتی از دو مرحله تشکیل شده است: در مرحله اول، یک FCM اولیه بر اساس شناخت کلی که از خودروی برقی هیبرید پلاگین در دسترس است، استخراج می‌شود. مفاهیم لازم برای شکل دادن این FCM عبارت‌اند از: ۱. سطح شارژ باتری (SOC)، ۲. سرعت موتور الکتریکی برحسب دور بر دقیقه ( $RPM_{EM}$ )، ۳. سرعت ژنراتور برحسب دور بر دقیقه ( $RPM_{EG}$ )، ۴. سرعت موتور احتراقی ( $RPM_{ICE}$ )، ۵. گشتاور موتور احتراقی ( $T_{ICE}$ )، ۶. گشتاور درخواستی از موتور الکتریکی ( $T_{Req}^{Em}$ )، ۷. گشتاور درخواستی از ژنراتور ( $T_{Req}^{EG}$ )، ۸. میزان درخواستی باز بودن دریچه سوخت ( $Thr$ )، ۹. تغییرات سرعت خودرو ( $\Delta V$ )، ۱۰. مصرف سوخت (Fuel). شکل (۴)، FCM اولیه‌ای را که به منظور مدل‌سازی رفتار دینامیکی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد، نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، برای توصیف این FCM از ۱۰ مفهوم و ۱۲ واقعه استفاده شده است. وزن‌های بین مفاهیم مطابق با رابطه (۴) در نظر گرفته می‌شوند.



شکل (۴): ساختار FCM اولیه

برای تنظیم ضرایب  $\alpha_m^{ij}$  ها و  $b_{ij}$  ها از یک الگوریتم تخمین توزیع<sup>۲</sup> [۴۲] استفاده شده است. در این الگوریتم، تابع هزینه به شکل زیر در نظر گرفته شده است:

$$J = \frac{1}{(T-1)n} \sum_{k=2}^T \alpha^{(T-k)} \sum_{i=1}^n (A_i(k) - A_i^{est}(k))^2 \quad (5)$$

1. Event
2. Estimation of Distribution Algorithm (EDA)

حالت دینامیکی به خود خواهد گرفت و برای مدل‌سازی رفتار گذرای سیستم نیز مناسب خواهد بود.

#### ۴. کنترل نظارتی مبتنی بر FCM

همان‌طور که گفته شد، PHEV یک سیستم دینامیکی پیچیده است. ساختار پیچیده این سیستم باعث می‌شود که نتوان به راحتی از روش‌های کلاسیک یا مدرن برای طراحی یک کنترل‌کننده متمرکز برای چنین سیستمی بهره برد. یکی از راهکارهایی که می‌تواند برای کنترل کردن سیستم‌های دینامیکی با پیچیدگی بالا مفید واقع شود، این است که کل سیستم به چند زیرسیستم تقسیم شده و برای هر زیرسیستم، یک کنترل‌کننده مجزا طراحی شود و این کنترل‌کننده‌ها خود از طریق یک کنترل‌کننده نظارتی با هم هماهنگ شوند.

از منظر مدیریت توان، یک PHEV را می‌توان به سه زیرسیستم اساسی تقسیم کرد: ۱. موتور الکتریکی که وظیفه آن تولید بخشی از نیروی پیش‌ران خودرو است. ۲. موتور احتراقی که وظیفه آن علاوه بر تأمین بخشی از نیروی پیش‌ران، تأمین نیروی لازم برای به حرکت درآوردن ژنراتور است. ۳. ژنراتور الکتریکی که وظیفه شارژ کردن باتری در هنگام حرکت خودرو را بر عهده دارد. در ساختار کنترلی پیشنهادی برای هر یک از این سه بخش یک کنترل‌کننده محلی طراحی شده است. وظیفه کنترل‌کننده نظارتی، تعیین مقدار مرجع برای هر یک از سه کنترل‌کننده مربوط به موتور الکتریکی، موتور احتراقی و ژنراتور است.

طرح‌واره کلی روش کنترلی پیشنهادی در شکل (۳) نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده، در هر لحظه سرعت خودرو با سرعت درخواستی توسط راننده مقایسه شده و از طریق یک کنترل‌کننده، شتاب مرجع مورد نیاز برای تأمین این سرعت، تعیین می‌شود. این شتاب به همراه سرعت لحظه‌ای خودرو، سطح شارژ باتری (SOC) و سرعت موتور احتراقی برحسب دور بر دقیقه ( $RPM_{ICE}$ )، وارد کنترل‌کننده نظارتی مبتنی بر FCM شده و این کنترل‌کننده، سیگنال‌های مرجع مورد نیاز برای سه کنترل‌کننده محلی اشاره‌شده را تعیین می‌کند.

در این شکل، EMC، EGC و ICEC به ترتیب سه کنترل‌کننده PI برای کنترل گشتاور موتور الکتریکی، ژنراتور و موتور احتراقی هستند.

در این  $W_{F2}$  همانند توابع عضویت SOC در نظر گرفته شده است. در این کنترل کننده نظارتی، ضرایب مربوط به وزن های FCM اولیه، همان ضرایب به دست آمده در مرحله قبل در نظر گرفته می شود. ساختار وزن های جدید غیر از  $W_{F1}$  و  $W_{F2}$ ، همان ساختار اشاره شده در رابطه (۴) است. برای تنظیم ضرایب مربوط به وزن های جدید، نیز از الگوریتم EDA استفاده شده است. در این حالت، تابع هزینه به شکل زیر در نظر گرفته شده است:

$$J = \frac{1}{2(T-1)} \sum_{k=2}^T \alpha^{(T-k)} \left[ c_1 (0.8 - SoC(k))^2 + c_2 Fuel(k)^2 \right] \quad (6)$$

هدف از انتخاب این تابع هزینه، کمینه کردن میزان مصرف سوخت و نگه داشتن سطح شارژ باتری در یک محدوده مشخص است. به منظور عملکرد بهتر خودرو، در تنظیم ضرایب وزن های

کنترل کننده نظارتی موارد زیر منظور شده است:

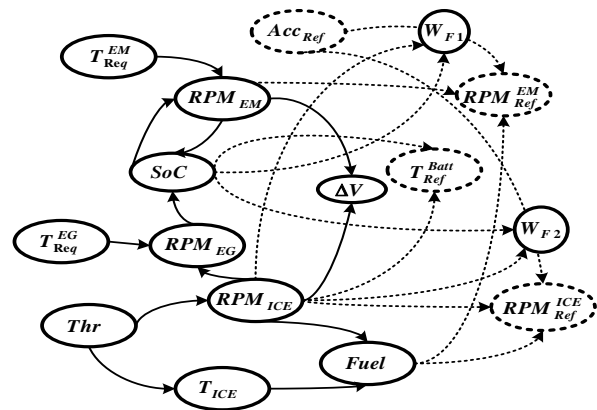
در حالت شتاب گیری، در صورتی که میزان شارژ باتری از یک آستانه مشخص بیشتر باشد (۳۰ درصد)،  $T_{Ref}^{Batt}$  صفر شده و توان موتور احتراقی به همراه توان موتور الکتریکی صرف تغییرات سرعت می شود. معیار شتاب گیری، تغییرات سرعت خودرو است که به صورت  $|\Delta V_{vehicle}| > 0.02V_{vehicle}$  در نظر گرفته شده است.

حالت کروز را با توجه به شکل تغییرات سرعت خودرو می توان تعریف کرد و مکمل حالت بالاست به این معنی که  $|\Delta V_{vehicle}| \leq 0.02V_{vehicle}$ . در این وضعیت می توان از بخشی از توان موتور احتراقی برای شارژ باتری کمک گرفت. در حالت کروز، سه وضعیت برای شارژ باتری وجود خواهد داشت: ۱. SOC کمتر از ۳۰ درصد باشد. ۲. SOC بیشتر از ۸۰ درصد باشد. ۳. SOC بین ۳۰ تا ۸۰ درصد باشد. در وضعیت اول، ضریب وزنی بین مفاهیم SOC و  $T_{Ref}^{Batt}$  برابر یک، در وضعیت دوم، ضریب وزنی بین مفاهیم SOC و  $T_{Ref}^{Batt}$  و همچنین ضریب وزنی بین مفاهیم  $RPM_{ICE}$  و  $T_{Ref}^{Batt}$  برابر صفر خواهد شد. در وضعیت سوم، مقدار مرجع  $T_{Ref}^{Batt}$  توسط FCM تعیین می شود.

این قوانین در حین آموزش کنترل کننده نظارتی منظور شده است. برای آموزش وزن های دو FCM، از نتایج حاصل از اعمال یک کنترل کننده فازی [۴۳] و یک کنترل کننده کلاسیک غیرنظارتی متشکل از کنترل کننده های PI، روی سیکل های حرکتی استاندارد EUDC، EUDC\_LPV<sup>۱</sup> و ECE15 که سیکل های حرکتی منطبق بر استانداردهای رانندگی در اروپا می باشند استفاده شده است [۴۴]. سیکل EUDC\_LPV یک سیکل درون شهری و دو سیکل دیگر

در رابطه (۵)،  $A_i(k)$  مقدار واقعی مفهوم نام و  $A_i^{est}(k)$  مقدار تخمین زده شده مفهوم نام در لحظه  $k$  است. همچنین  $T$  پنجره زمانی است که از مقادیر مفاهیم در آن برای تنظیم ضرایب استفاده شده است.  $\alpha$  یک فاکتور فراموشی و  $n$ ، تعداد مفاهیم اولیه است. با کمینه کردن تابع هدف داده شده به کمک الگوریتم EDA، ضرایب مورد نظر به دست می آید. ضرایب به دست آمده در انتهای هر پنجره زمانی به عنوان مقادیر اولیه ضرایب در ابتدای پنجره زمانی بعدی مورد استفاده قرار می گیرد.

در مرحله دوم، برای شکل دادن کنترل کننده نظارتی، چهار مفهوم جدید به FCM اولیه اضافه می شود تا از طریق این مفاهیم، مراجع لازم برای سه کنترل کننده ای که در ابتدای همین بخش به آن ها اشاره شد، فراهم شود. این مفاهیم جدید عبارت اند از: ۱. سرعت مرجع برای موتور الکتریکی بر حسب دور بر دقیقه ( $RPM_{Ref}^{EM}$ )، ۲. سرعت مرجع برای موتور احتراقی بر حسب دور بر دقیقه ( $RPM_{Ref}^{ICE}$ )، ۳. گشتاور مرجع برای ژنراتور به منظور شارژ باتری ( $T_{Ref}^{Batt}$ )، ۴. شتاب مرجع تولید شده توسط کنترل کننده سرعت ( $Acc_{Ref}$ ). شکل (۵) ساختار کنترل کننده نظارتی مبتنی بر FCM اولیه را نشان می دهد.

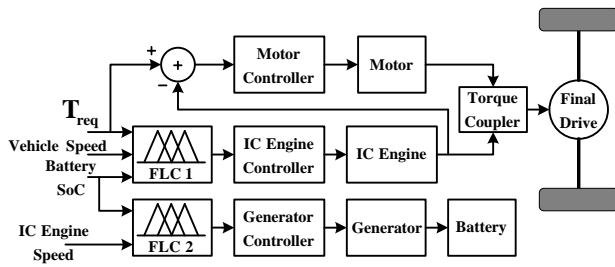


شکل (۵): ساختار کنترل کننده نظارتی مبتنی بر FCM اولیه

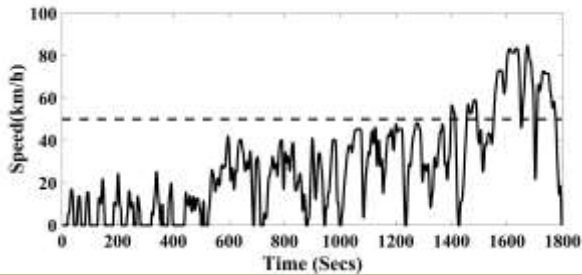
در شکل (۵)، مفاهیم جدید به همراه ارتباط علی بین این مفاهیم و مفاهیم FCM اولیه با خط چین نشان داده شده است. همچنین وزن های  $W_{F1}$  و  $W_{F2}$  وزن های فازی هستند که مقادیر آن ها با توجه مقدار SOC و  $RPM_{ICE}$  تعیین می شود. از آنجایی که در FCM، مقدار مفاهیم به بازه [۰,۱] نگاشته می شوند، توابع عضویت برای SOC،  $RPM_{ICE}$ ،  $W_{F1}$  و  $W_{F2}$  در همین بازه در نظر گرفته می شود.

جدول تخصیص وزن های فازی به همراه توابع عضویت مربوط به SOC، برای نمونه در شکل (۶) نمایش داده شده است. توابع عضویت اختصاص یافته به مفهوم  $RPM_{ICE}$  و وزن های فازی  $W_{F1}$

<sup>1</sup> Low Power Vehicles (LPV)

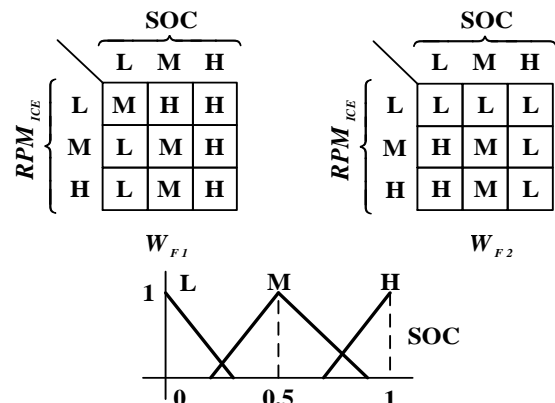


شکل (۷): بلوک دیاگرام کنترل کننده فازی متداول



شکل (۸): نمودار سیکل رانندگی تهران بزرگ [۴۵]

ترکیبی از سیکل‌های درون شهری و رانندگی در اتوبان است [۴۴]. در بخش بعدی، عملکرد روش کنترلی پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۶): جدول تخصیص وزن‌های  $W_{F1}$  و  $W_{F2}$  به همراه توابع عضویت مربوط به SOC

### ۵. نتایج شبیه‌سازی

(۵) و (۶)، به ترتیب ۰/۹ و ۳۰ نمونه زمانی در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی برای سیکل‌های واقعی و استاندارد ECE15، EUDC و EUDC\_LPV و همچنین یک نمونه سیکل رانندگی تهران بزرگ [۴۵] که در شکل (۸) نمایش داده شده، انجام شده است. در ادامه، نتایج عملکرد روش کنترلی پیشنهادی و کنترل کننده فازی متداول، برای سیکل‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا مقایسه‌ای از نظر مدیریت مصرف سوخت بین این دو روش کنترلی مطابق جدول (۲) انجام شده است. همان طور که نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد، در شرایط یکسان کنترل کننده FCM عملکرد مطلوبی داشته و میزان مصرف سوخت را در حد قابل قبولی کاهش داده است. در ادامه به بررسی نتایج مربوط به عملکرد موتور احتراقی، موتور الکتریکی و ژنراتور الکتریکی، در دو حالت استفاده از کنترل کننده فازی و استفاده از کنترل کننده FCM پرداخته می‌شود. با توجه به اینکه بررسی نتایج فوق برای تمام سیکل‌های ذکر شده، خارج از حوصله این

در این بخش، روش کنترلی پیشنهادی برای مدیریت انرژی در یک PHEV، در محیط Advisor پیاده‌سازی و عملکرد آن با عملکرد یک کنترل کننده فازی متداول مقایسه شده است. در کنترل کننده فازی متداول مورد استفاده، گشتاور درخواستی، سرعت خودرو و سطح شارژ باتری به عنوان ورودی‌های کنترل کننده فازی و گشتاور مرجع برای موتور احتراق داخلی به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است. گشتاور مرجع برای موتور الکتریکی، به صورت اختلاف بین گشتاور درخواستی و گشتاور تأمین شده توسط موتور احتراق داخلی منظور شده است. همچنین گشتاور مرجع برای ژنراتور بر اساس یک سیستم استنتاج فازی که ورودی آن سطح شارژ باتری و سرعت موتور احتراق داخلی، و خروجی آن، گشتاور مرجع برای ژنراتور است، تعیین شده است. بلوک دیگر این استراتژی کنترلی، در شکل (۷) نمایش داده شده است. در روش کنترلی پیشنهادی، برای آموزش ضرایب وزنی FCM اولیه و کنترل کننده نظارتی مبتنی بر FCM، پارامترهای  $\alpha$  و  $T$  در هر دو رابطه

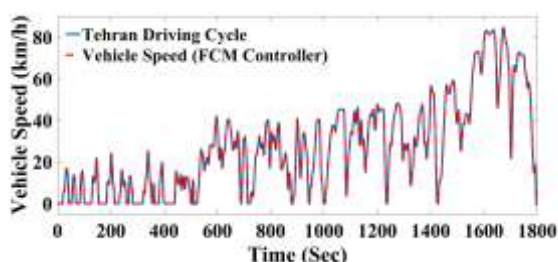
جدول (۲): مقایسه مصرف سوخت بین کنترل کننده فازی متداول و کنترل کننده FCM پیشنهادی در سیکل‌های رانندگی مختلف

نوع سیکل	با کنترل کننده فازی متداول			با کنترل کننده FCM پیشنهادی		
	میزان مصرف سوخت در مسافت ۱۰۰ کیلومتر برحسب لیتر	توان پیمایش برحسب کیلومتر	میزان مصرف سوخت در مسافت ۱۰۰ کیلومتر برحسب لیتر	توان پیمایش برحسب کیلومتر	میزان مصرف سوخت در مسافت ۱۰۰ کیلومتر برحسب لیتر	میزان مصرف سوخت در مسافت ۱۰۰ کیلومتر برحسب لیتر
EUDC	۱/۵۲	۶۵/۷۸	۰/۱۰۶۳	۸۶/۷۰	۱/۱۵	۰/۰۸۰۲
ECE15	۴/۵۱	۲۲/۱۷	۰/۰۴۴۸	۲۸/۳۰	۳/۵۳	۰/۰۳۵۱
EUDC_LPV	۱/۴۶	۶۸/۶۹	۰/۰۹۶۷	۸۱/۱۸	۱/۲۳	۰/۰۸۱۴
تهران بزرگ	۴/۴۲	۲۲/۶۳	۰/۳۶۸۶	۲۵/۸۵	۳/۸۷	۰/۳۲۲۶

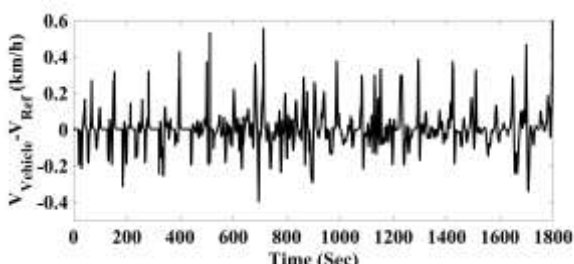


مقدار این شاخص برابر ۰/۳۰۴ و در حالتی که از کنترل کننده پیشنهادی استفاده شود، مقدار شاخص ذکر شده برابر ۰/۲۰۳ است.

نمودارهای مربوط به عملکرد موتور احتراقی شامل دور موتور برحسب دور در دقیقه (RPM)، گشتاور موتور برحسب نیوتن-متر (N.m)، توان انتقالی موتور برحسب وات (w)، و میزان باز شدن دریچه سوخت، برای سیکل رانندگی تهران بزرگ در دو حالت استفاده از کنترل کننده فازی و استفاده از کنترل کننده FCM به ترتیب در شکل های (۱۱) و (۱۲) مشاهده می شود. همان طور که در جدول (۲) نشان داده شده، میزان کل مصرف سوخت در سیکل واقعی تهران بزرگ، در دو حالت استفاده از کنترل کننده فازی و استفاده از کنترل کننده FCM، به ترتیب برابر ۰/۳۶۸۶ و ۰/۳۲۲۶ لیتر است.



(الف)

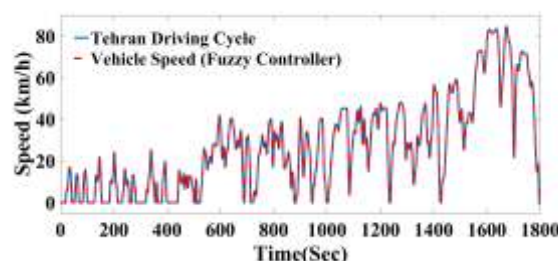


(ب)

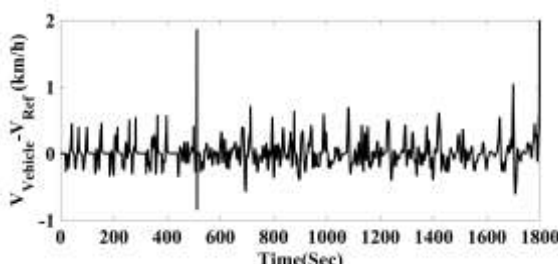
شکل (۱۰): سیکل رانندگی تهران با کنترل کننده FCM پیشنهادی؛ الف. سرعت درخواستی و سرعت خودرو، ب. خطای ردیابی سرعت درخواستی

مقاله است، در این قسمت تنها به بررسی این نتایج در سیکل رانندگی واقعی تهران بزرگ پرداخته می شود.

نتایج مربوط به سرعت درخواستی و سرعت خودرو برای کنترل کننده فازی و کنترل کننده پیشنهادی به ترتیب در شکل های (۹) و (۱۰) نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در هر دو روش کنترلی، سرعت خودرو به شکل قابل قبولی سرعت درخواستی را تعقیب کرده است؛ با این تفاوت که در حالتی که از روش کنترلی پیشنهادی استفاده شده، اختلاف بین سرعت درخواستی و سرعت خودرو نسبت به حالتی که از کنترل کننده فازی استفاده شده، کمتر است. به منظور مقایسه بهتر خطای ردیابی سرعت در دو استراتژی کنترلی، می توان از شاخص  $RMSE^1$  (ریشه میانگین مربعات خطا) استفاده کرد. در حالتی که از کنترل کننده فازی متداول استفاده شود،

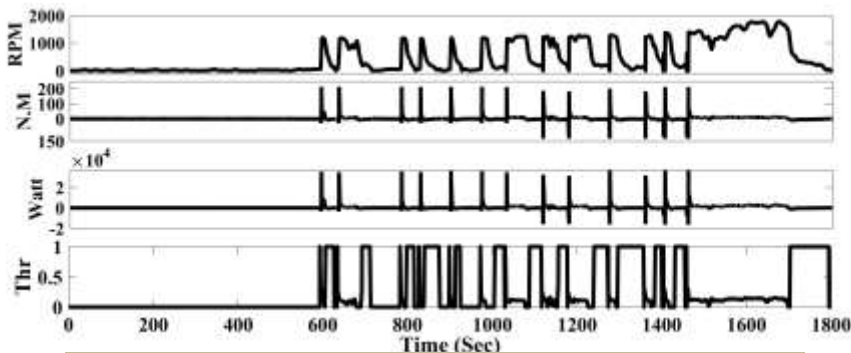


(الف)



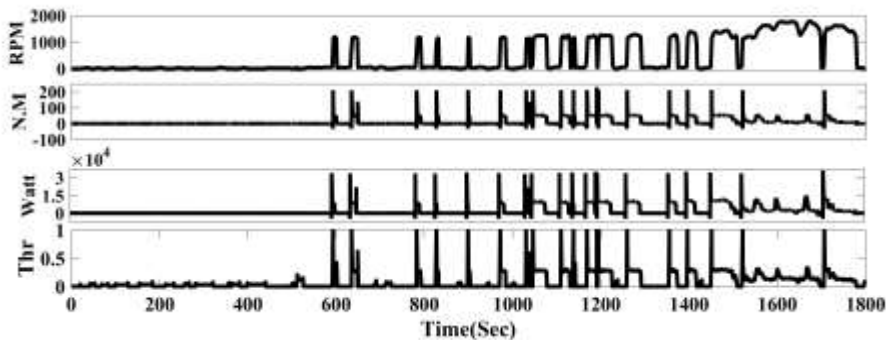
(ب)

شکل (۹): سیکل رانندگی تهران با کنترل کننده فازی متداول؛ الف. سرعت درخواستی و سرعت خودرو، ب. خطای ردیابی سرعت درخواستی

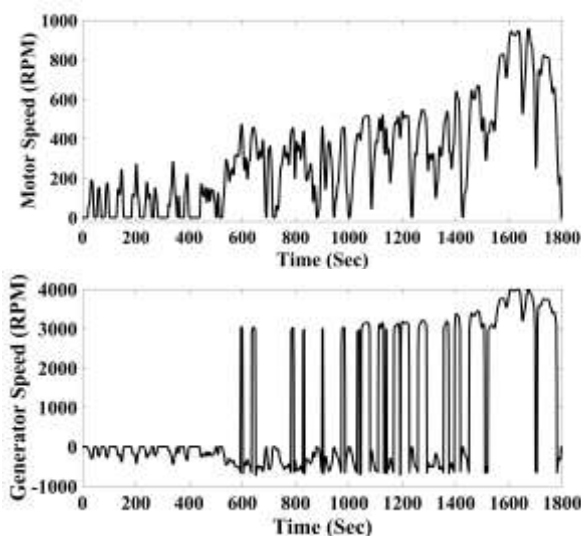


شکل (۱۱): عملکرد موتور احتراقی در سیکل رانندگی تهران با کنترل کننده فازی متداول

1. Root Mean Square Error



شکل (۱۲): عملکرد موتور احتراقی در سیکل رانندگی تهران با کنترل کننده FCM پیشنهادی



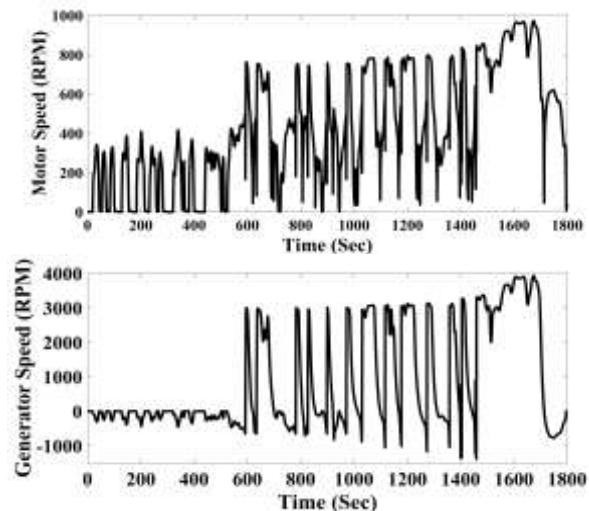
شکل (۱۴): عملکرد موتور و ژنراتور الکتریکی در سیکل رانندگی تهران با روش کنترلی پیشنهادی

مقدار متوسط کارایی موتور الکتریکی در لحظاتی که موتور الکتریکی در حال کار است، در استراتژی کنترلی پیشنهادی برابر  $0.8537$  و در حالتی که از کنترل کننده فازی متداول استفاده شود، برابر  $0.8157$  است. به این ترتیب استراتژی کنترلی پیشنهادی علاوه بر کاهش مصرف سوخت، بهبود کارایی موتور الکتریکی را نیز به همراه دارد.

با توجه به نوسانات زیاد سرعت درخواستی در سیکل درون شهری پرتراپیک تهران، مشاهده می شود که کنترل کننده فازی توانسته سطح شارژ باتری را در حد مطلوب نگه دارد. به همین دلیل نمودار سطح شارژ باتری با افت بیش از حد، به مقداری نزدیک ۵ درصد رسیده است. این تغییرات در شکل (۱۵) نشان داده شده است. از آنجایی که در این شبیه سازی، هدف تأمین سرعت درخواستی است، با وجود افت سطح شارژ باتری، موتور خاموش نشده و به عملکرد خود ادامه می دهد و همان طور که در شکل (۹) مشاهده می شود، سرعت درخواستی به خوبی تعقیب شده است. با این حال افت بیش از حد شارژ باتری نشان می دهد که با مشخصات خودرو طراحی شده، اگر با کنترل کننده فازی به تأمین سرعت مرجع در سیکل تهران پرداخته شود، برای جلوگیری از افت بیش از حد سطح شارژ باتری، باید یا توان نامی باتری ها یا تعداد آن ها افزایش یابد.

استفاده بیشتر از موتور الکتریکی باعث افت بیشتر سطح شارژ باتری می شود. مدیریت بهتر انرژی در روش کنترل نظارتی، میزان استفاده از موتور الکتریکی را با در نظر گرفتن سطح شارژ باتری بهینه کرده است. در نتیجه، افت کمتری برای سطح شارژ باتری رخ داده است. افت کمتر سطح شارژ باتری باعث کاهش شارژ باتری توسط ژنراتور خواهد شد. بنابراین در مجموع مصرف سوخت کاهش پیدا خواهد کرد. از سوی دیگر، در حالتی که از کنترل کننده فازی متداول استفاده می شود، برای جبران افت بیش از حد سطح شارژ، ژنراتور باید با توان بیشتری کار کند و این خود مصرف سوخت را افزایش می دهد. همان طور که در شکل (۱۱) مشاهده می شود، در بعضی از لحظات، برای مثال از ثانیه ۱۴۶۶ به بعد، با اینکه موتور احتراقی در حال کار بوده، گشتاور و توان تغییری نکرده است. در این لحظات، انرژی تولید شده توسط موتور احتراقی صرف به حرکت درآوردن ژنراتور و شارژ شدن باتری ها شده است.

شکل (۱۳) سرعت موتور الکتریکی و ژنراتور را در حالتی که از کنترل کننده فازی استفاده شده است، نشان می دهد. در شکل (۱۴)، سرعت موتور الکتریکی و ژنراتور در حالتی که از کنترل کننده نظارتی مبتنی بر FCM استفاده شده، نمایش داده شده است.



شکل (۱۳): عملکرد موتور و ژنراتور الکتریکی در سیکل رانندگی تهران با کنترل کننده فازی متداول

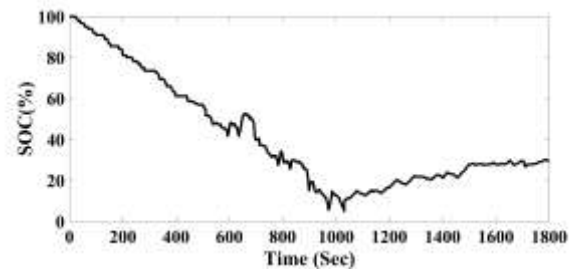
ارائه شد. از آنجایی که این روش به داشتن مدل دقیقی از سیستم نیاز ندارد، حجم محاسبات کمتری در تعیین قانون کنترلی داشته و پیاده‌سازی آن نسبت به روش‌های کلاسیک ساده‌تر است.

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، این روش کنترلی باعث می‌شود که میزان سوخت مصرفی خودرو در هر کیلومتر به مقدار مناسبی کاهش یابد. از آنجایی که میزان آلودگی تولیدشده توسط خودرو با میزان سوخت مصرف‌شده متناسب است، کاهش مصرف سوخت، کاهش آلودگی را به همراه خواهد داشت. همچنین تحلیل نتایج نشان می‌دهد که این کنترل‌کننده و منطق تصمیم‌گیری هوشمند آن ضمن تأمین توان درخواستی راننده مطابق با سیکل حرکتی مورد آزمایش، مصرف سوخت را نسبت به کنترل‌کننده فازی کمیته می‌کند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، این ساختار کنترلی برای سیکل‌های رانندگی پرتراфик و سرعت کم و دارای تغییرات سرعت زیاد، مناسب بوده و نتایج مطلوبی در خصوص میزان مصرف سوخت و بالا نگه داشتن سطح شارژ باتری به همراه دارد.

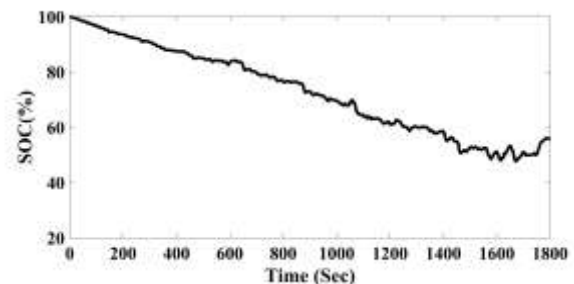
با توجه به اینکه در FCM برخلاف سیستم استنتاج فازی متداول، از مفاهیم شکل‌دهنده سیستم مورد بررسی و ارتباط آن‌ها با یکدیگر بهره گرفته می‌شود، می‌توان از آن به‌عنوان یک روش و راه‌حل مناسب برای طراحی کنترل‌کننده برای یک سیستم پیچیده مانند خودرو برقی هیبرید پلاگین استفاده کرد. همچنین با در نظر گرفتن وزن‌های بین مفاهیم FCM، به شکل دینامیک، می‌توان از آن برای مدل‌سازی و کنترل طیف وسیع‌تر و پیچیده‌تری از سیستم‌های دینامیکی بهره برد.

در مطالعات بعدی، می‌توان نوع سیکل رانندگی را به‌عنوان یک مفهوم جدید به نقشه شناختی اضافه کرد، به‌طوری که ساختار نقشه و ضرایب وزنی آن متناسب با نوع سیکل رانندگی تعیین شوند. سپس میزان تأثیر این ساختار جدید بر مدیریت انرژی در خودروهای هیبرید الکتریکی را مورد مطالعه قرار داد.

با توجه به اینکه در کنترل‌کننده طراحی شده مبتنی بر FCM، می‌توان از قابلیت‌های ارتباط مفهومی بین بخش‌های مختلف خودرو بهتر استفاده کرد، این مشکل در شبیه‌سازی انجام‌شده با کنترل‌کننده نظارتی مبتنی بر FCM وجود نداشته و سطح شارژ باتری در حد مطلوبی حفظ می‌شود و این خود نشان‌دهنده عملکرد مطلوب روش کنترلی پیشنهادی است. تغییرات SOC در حالتی که از کنترل‌کننده نظارتی مبتنی بر FCM استفاده شده، در شکل (۱۶) نمایش داده شده است.



شکل (۱۵): مسیر شارژ باتری در سیکل رانندگی تهران با کنترل‌کننده فازی متداول



شکل (۱۶): مسیر شارژ باتری در سیکل رانندگی تهران با کنترل‌کننده FCM پیشنهادی

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک ساختار کنترلی جدید مبتنی بر نقشه‌های شناختی فازی، برای مدیریت بهینه انرژی در یک خودروی برقی هیبرید پلاگین

## مراجع

- [1] Gao, Y., Ehsani, M., "Design and Control Methodology of Plug-in Hybrid Electric Vehicles", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 2, pp. 633-640, 2010.
- [2] Wirasingha, S. G., Emadi, A., "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.
- [3] Gong, Q., Li, Y., Peng, Z. R., "Trip-Based Optimal Power Management of Plug-in Hybrid Electric Vehicles", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 57, No. 6, pp. 3393-3401, 2008.
- [4] Gong, Q., Li, Y., Peng, Z. R., "Trip Based Power Management of Plug-in Hybrid Electric Vehicle with Two-Scale Dynamic Programming", 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 12-19, Arlington, TX, 2007.
- [5] Kum, D., Peng, H., Bucknor, N. K., "Optimal Energy and Catalyst Temperature Management of Plug-in Hybrid Electric Vehicles for Minimum Fuel Consumption and Tail-Pipe Emissions", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 21, No. 1, pp. 14-26, 2013.
- [6] Markel, T., Simpson, A., "Cost-benefit Analysis of Plug-in Hybrid Electric Vehicle Technology", World Electric Vehicle Journal, Vol. 1, No. 1, pp. 294-301, 2007.
- [7] Moura, S. J., Fathy, H. K., Callaway, D. S., Stein, J. L., "A Stochastic Optimal Control Approach for Power Management in Plug-in Hybrid Electric Vehicles", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 19, No. 3, pp. 545-555, 2011.
- [8] Kim, N., Cha, S., Peng, H., "Optimal Control of Hybrid Electric Vehicles Based on Pontryagin's Minimum Principle", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 19, No. 5, pp. 1279-1287, 2011.
- [9] Xu, K., Qiu, B., Liu, G., Chen, Q., "Energy Management Strategy Design of Plug-in Hybrid Electric Bus Based on Pontryagin's Minimum Principle", 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), pp. 1-6, Beijing, 2014.
- [10] Geng, B., Mills, J. K., Sun, D., "Energy Management Control of Microturbine-Powered Plug-in Hybrid Electric Vehicles Using the Telemetry Equivalent Consumption Minimization

- Strategy", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 60, No. 9, pp. 4238-4248, 2011.
- [11] Bashash, S., Fathy, H. K., "Cost-Optimal Charging of Plug-in Hybrid Electric Vehicles Under Time-Varying Electricity Price Signals", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 15, No. 5, pp. 1958-1968, 2014.
- [12] Chen, Z., Mi, C. C., Xiong, R., Xu, J., You, C., "Energy Management of a Power-split Plug-in Hybrid Electric Vehicle Based on Genetic Algorithm and Quadratic Programming", Journal of Power Sources, Vol. 248, pp. 416-426, 2014.
- [13] Wang, R., Lukic, S. M., "Dynamic Programming Technique in Hybrid Electric Vehicle Optimization", 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference, pp. 1-8, Greenville, SC, 2012.
- [14] Patil, R. M., Filipi, Z., Fathy, H. K., "Comparison of Supervisory Control Strategies for Series Plug-in Hybrid Electric Vehicle Powertrains through Dynamic Programming", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 22, No. 2, pp. 502-509, 2014.
- [15] Vajedi, M., Azad, N. L., "Ecological Adaptive Cruise Controller for Plug-in Hybrid Electric Vehicles Using Nonlinear Model Predictive Control", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 17, No. 1, pp. 113-122, 2016.
- [16] Hsieh, Y. M., Liu, Y. C., "Model Predictive Control Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicles", 2016 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), pp. 1-6, Phuket, 2016.
- [17] Chen, Z., Mi, C. C., Xu, J., Gong, X., You, C., "Energy Management for a Power-split Plug-in Hybrid Electric Vehicle Based on Dynamic Programming and Neural Networks", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 63, No. 4, pp. 1567-1580, 2014.
- [18] Gong, Q., Li, Y., Peng, Z., "Power Management of Plug-in Hybrid Electric Vehicles Using Neural Network Based Trip Modeling", 2009 American Control Conference, pp. 4601-4606, St. Louis, MO, 2009.
- [19] Li, S. G., Sharkh, S. M., Walsh, F. C., Zhang, C. N., "Energy and Battery Management of a Plug-in Series Hybrid Electric Vehicle Using Fuzzy Logic", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 60, No. 8, pp. 3571-3585, 2011.
- [20] Denis, N., Dubois, M. R., Desrochers, A., "Fuzzy-based Blended Control for The Energy Management of A Parallel Plug-in Hybrid Electric Vehicle", IET Intelligent Transport Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 30-37, 2015.
- [21] Zhang, Y., Liu, H., Guo, Q., "Varying-Domain Optimal Management Strategy for Parallel Hybrid Electric Vehicles", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 63, No. 2, pp. 603-616, 2014.
- [22] Huang, B., Wang, Z., Xu, Y., "Multi-Objective Genetic Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Parameter Optimization", 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 5177-5182, Beijing, 2006.
- [23] Wu, X., Cao, B., Wen, J., Bian, Y., "Particle Swarm Optimization for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Control Strategy Parameter", 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 1-5, Harbin, 2008.
- [24] Banvait, H., Anwar, S., Chen, Y., "A Rule-based Energy Management Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)", 2009 American Control Conference, pp. 3938-3943, St. Louis, MO, 2009.
- [25] Sorrentino, M., Rizzo, G., Arsie, I., "Analysis of A Rule-Based Control Strategy for On-board Energy Management of Series Hybrid Vehicles", Control Engineering Practice, Vol. 19, No. 12, pp. 1433-1441, 2011.
- [26] اجتهاد، سید حسین، خوبی آران، سعید، حلوائی نیاسر، ابوالفضل، حاجی زاده، امین، «مدیریت بهینه توان در خودروی برقی با دو منبع انرژی با استفاده از کنترل کننده فازی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک»، نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ششم، شماره ۳، ۴۵-۳۴، ۱۳۹۵.
- [27] Stylios, C.D., Groumpos, P.P., "Modeling Complex Systems Using Fuzzy Cognitive Maps", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, Vol. 34, No.1, pp.155-162, 2004.
- [28] Williamson, S. S., "Energy Management Strategies for Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles", Springer, 2013.
- [29] Axelord, R., "Structure of Decision: The Cognitive Maps of Political Elites", Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1976.
- [30] Kosko, B., "Fuzzy Cognitive Maps", International journal of man-machine studies, Vol. 24, No. 1, pp. 65-75, 1986.
- [31] Papageorgiou, E. I., "Learning Algorithms for Fuzzy Cognitive Maps—A Review Study", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), Vol. 42, No. 2, pp. 150-163, 2012.
- [32] Dickerson, J. A., Kosko, B., "Virtual Worlds as Fuzzy Cognitive Maps", Presence, Vol. 3, No. 2, pp. 173-189, 1994.
- [33] Koulouriotis, D. E., Diakoulakis, I. E., Emiris, D. M., "Learning Fuzzy Cognitive Maps Using Evolution Strategies: A Novel Schema for Modeling and Simulating High-level Behavior", 2001 Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation, IEEE, Vol. 1, pp. 364-371, Seoul, South Korea, 2001.
- [34] Alizadeh, S., Ghazanfari, M., Jafari, M., Hooshmand, S., "Learning FCM by Tabu Search", International Journal of Computer Science, Vol. 2, No. 2, pp. 142-149, 2007.
- [35] Alizadeh, S., Ghazanfari, M., Fathian, M., "Using Data Mining for Learning and Clustering FCM", International journal of computational intelligence, Vol. 4, No. 2, pp. 118-125, 2008.
- [36] Papageorgiou, E. I., Groumpos, P. P., "A New Hybrid Learning Algorithm for Fuzzy Cognitive Maps Learning", Applied Soft Computing, Vol. 5, No. 4, pp. 409-431, 2005.
- [37] Zhu, Y., Zhang, W., "An Integrated Framework for Learning Fuzzy Cognitive Map Using RCGA and NHL Algorithm", 2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, pp. 1-5, Dalian, China, 2008.
- [38] Stach, W., Kurgan, L. A., Pedrycz, W., "A Survey of Fuzzy Cognitive Maps Learning Methods", Issues in Soft Computing: Theory and Applications, pp. 71-84, 2005.
- [39] Miao, Y., Liu, Z. Q., Siew, C. K., Miao, C. Y., "Dynamical Cognitive Network - An Extension of Fuzzy Cognitive Map", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 9, No. 5, pp. 760-770, Oct 2001.
- [40] Papageorgiou, E. I., "A Novel Approach on Constructed Dynamic Fuzzy Cognitive Maps Using Fuzzified Decision Trees and Knowledge-Extraction Techniques", Fuzzy Cognitive Maps: Advances in Theory, Methodologies, Tools and Applications, Studies in Fuzziness and Soft Computing, Springer-Verlag, Vol. 247, Chapter 3, pp. 43-70, 2010.
- [41] Acampora, G., Loia, V., "On the Temporal Granularity in Fuzzy Cognitive Maps", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 19, No. 6, pp. 1040-1057, 2011.
- [42] Larrañaga, P., Lozano, J. A., "Estimation of Distribution Algorithms: A New Tool for Evolutionary Computation", Vol. 2. Springer, 2002.
- [43] Behzadpour, A., Eliasi, H., "Fuzzy Based Controller Design for Parallel Hybrid Electric Vehicle: An Approach to Fuel Consumption and Emission Reduction", 2015 2nd International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEDI), pp. 640-649, Tehran, Iran, 2015.
- [44] [https://www.dieselnet.com/standards/cycles/ece\\_eudc.php](https://www.dieselnet.com/standards/cycles/ece_eudc.php)
- [45] Barmaki, R., Ilkhani, M., Salehpour, S., "Investigation of Energy Usage and Emissions on Plug-in and Hybrid Electric Vehicle", Tehnicki Vjesnik, Vol. 23, No. 3, pp. 899-906, 2016.

[26] اجتهاد، سید حسین، خوبی آران، سعید، حلوائی نیاسر، ابوالفضل، حاجی زاده، امین، «مدیریت بهینه توان در خودروی برقی با دو منبع انرژی با

استفاده از کنترل کننده فازی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک»، نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ششم، شماره ۳، ۴۵-۳۴، ۱۳۹۵.