نخستین کنفرانس ملی انرژی،فناوریهای خودرو، توسعه پایدار
با رویکرد توسعه فناوری خودروی هیبریدی و الکتریکی
تهران، آبان ۱۳۹۰

کنترل خودروهای هیبریدی موازی با رویکردی به منطق فازی

مهران مازندرانی
کارشناس ارشد برق - کنترل
دانشگاه فردوسی مشهد
me.mazandarani@gmail.com

مهران رفیعی
کارشناس برق - الکترونیک
دانشگاه آزاد اسلامی
mehr.rafiee.meraco@gmail.com

علی وحیدیان کامیاد
استاد - دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم ریاضی
avkamyad@yahoo.com

چکیده
در این مقاله روشهای مختلف استفاده از منطق فازی در کنترل خودروهای هیبریدی موازی مورد بررسی قرار گرفته است و چگونگی طراحی کنترلر منطق فازی در این نوع خودروها بر اساس نوع ورودی، تعداد ورودی، نوع و تعداد خروجی و اهداف کنترلی مطلوب بیان شده است. نتایج مربوط به مقایسه کنترلر فازی در برابر کنترلر های کلاسیک با اهداف کاهش مصرف سوخت و آلایندگی محیط آورده شده است. همچنین کنترلر های فازی معمولی با کنترلر های فازی بهینه مقایسه شده و پیشنهاداتی برای انجام دیگر کارهای تحقیقاتی در این عرصه ارایه شده است.

واژه‌های کلیدی: خودروی هیبریدی موازی، منطق فازی، کنترلر فازی تاکاگی- سوگنو، کنترلر تطبیقی فازی- عصبی.

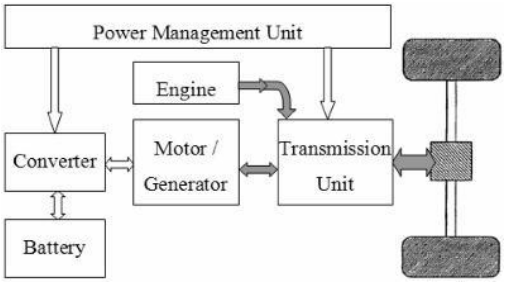
۱- مقدمه

امروزه با افزایش قیمت سوخت و همچنین لزوم رعایت استانداردهای کنترل آلایندگی محیط زیست، کاربرد خودروهای جدید با سوختهای جایگزین را بیش از پیش موردتوجه قرار دادهاست. در دهه ۹۰ میلادی خودروهای الکتریکی برای رفع این مشکلات مدنظر بودهاند ولی مشکلاتی نظیر طی مسافت کم، زمان شارژ طولانی و قیمت بالای اینگونه خودروها، خودروسازان جهان را به سمت ترکیب خودروهای احتراق داخلی و موتورهای الکتریکی(خودروهای هیبریدی) سوق داد. این نوع خودرو اولین بار توسط یک مهندس آمریکائی در ۲۳ نوامبر ۱۹۰۵ اختراع گردید که قادر بود در طی ۱۰ ثانیه تا ۲۵ مایل شتاب بگیرد که در سه سال و نیم بعد، اختراع خود را ثبت نمود؛ اما پیشرفت سریع موتورهای احتراق داخلی با قدرت و گشتاور بالا در آن دوره، همچنین قابلیت استارت بدون هندل آنها و از همه مهمتر پایین بودن قیمت سوختهای فسیلی و مطرح نبودن آلودگی محیط زیست، سبب عدم توجه به این نوع خودروها شد. در پی بحرانهای نفتی سال ۱۹۷۰ دوباره این خودروها مورد توجه قرار گرفتند ولی تا سال ۱۹۹۰ این خودروها به طور جدی پیگیری نشدند[1] .

امروزه خودروهای هیبریدی مورد توجه کمپانیهای بزرگ جهان قرار گرفته اند که از آن جمله می‌توان به شرکتهایی مانند: تویوتا، هندا، میتسوبیشی، فورد، فیات، جنرال موتورز، دایملر کرایسلر، نیسان و پژو و ... اشاره نمود. توفیق این محصولات به حدی چشمگیر بوده که از دسامبر سال ۱۹۹۷ تا ابتدای سال ۲۰۰۰ بیش از چهل هزار محصول پریوس کمپانی تویوتا به فروش رسیده است. در راستای این تحقیقات، انواع مختلفی از این نوع خودروها بهصورت نمونه و یا تولید محدود به بازار معرفی شدهاند که اکثر آنها در دو گروه خودروهای هیبریدی سری و موازی قرار میگیرند. یکی از مهمترین قسمتهای این نوع خودروها کنترلر آن است که وظیفه تقسیم بار بین موتورالکتریکی و موتور احتراقی را با حفظ وضعیت باطری و کارایی عملکرد خودرو به عهده دارد. از آنجا که مدل سازی دینامیک های مربوط به این نوع خودروها منجر به تشکیل معادلات دیفرانسیل غیرخطی شدید و پیچیده می شود و همچنین پارامترهای مربوط به آنها درای عدم قطعیت می باشند استفاده از کنترلر های کلاسیک برای این نوع مسائل مناسب نمی باشند به همین خاطر در سالهای اخیر استفاده از کنترلرهای هوشمند بر اساس منطق فازی رشد بسیار داشته است. کنترلر منطق فازی با استفاده از دانش بشری و قواعد اگر- آنگاه فازی می تواند در مسائلی که منجر به معادلات دیفرانسیل غیرخطی با پارامترهای غیرقطعی می شوند بسیار مفید و موثر واقع شود. در این مقاله قصد داریم روشهای مختلف استفاده از کنترلرهای منطق فازی را در خودروهای هیبریدی موازی بررسی و مقایسه کنیم.

۲- خودروهای هیبریدی موازی

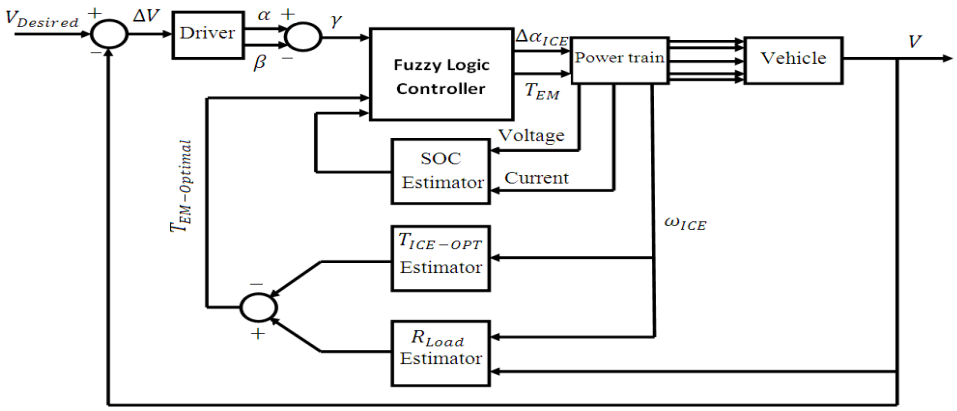
شکل (۱) نمونه ای از یک خودروی هیبریدی موازی را نشان می دهد. در این نوع خودروها، موتور احتراقی به موازات موتور الکتریکی، انرژی لازم را برای حرکت خودرو فراهم میآورند. واحد تقسیمکننده میزان انرژی، واحد انتقال نامیده میشود. عملکرد سیستم و در نتیجه وظایف هریک از اجزاء در وضعیت های مختلف خودرو متفاوت است. برای مثال در وضعیت استارت زدن چون نیروی زیادی موردنیاز است، موتور الکتریکی و در بعضی موارد به کمک موتور احتراقی سیستم را راهاندازی میکند در صورتیکه در وضعیت شتابگیری ، موتور الکتریکی نیز به کمک سیستم رانش خواهد آمد و یا در وضعیت ترمز، موتور الکتریکی تبدیل به ژنراتور شده و از طریق واحد مبدل شارژ باطریها را فراهم میآورد. در این حالت واحد انتقال، وظیفه تأمین گشتاور لازم برای ژنراتور را خواهد داشت. در حالتی که شارژ باطریها از حالت پیشفرض کمتر شدهباشد مجدداً بخشی از گشتاور موتور احتراقی، صرف شارژ باطریها خواهدشد. واحد مدیریت توان علاوه بر وظایف قبلی مسئولیت مدیریت انتقال توان مکانیکی را نیز بر عهده دارد. مزیت این نوع خودرو سبکی، راندمان بالاتر و در نتیجه حرکت در مسافتهای طولانیتر است. همچنین در این نوع خودروها بهعلت مجتمعشدن موتور و ژنراتور الکتریکی، وزن خودرو کاهش مییابد. از مشکلات این خودرو، استراتژیهای غیر خطی و پیچیده کنترل آن است که معمولاً براساس تصمیم راننده و وضعیت کاری خودرو متغیر با زمان است[2] .



شکل(۱). خودروی هیبریدی موازی [3]

۳- منطق فازی

با اینکه در این مقاله، منطق فازی صرفاً برای کنترل فازی بهکار رفته - است، کاربرد آن به کنترل، محدود نمیشود بلکه این منطق، روشی برای فکر کردن است. در مقایسه با منطق دودویی که متغیرها به دو سطح صفر و یک تقسیم میشوند، در منطق فازی سطح هر متغیر توسط مجموعهای از توابع تعلق بیان میشود که در آن درجه عضویت هر متغیر در تابع تعلق عددی بین صفر تا یک می باشد. اختصاص این توابع به متغیرها را فازیسازی میگویند. در کنترل فازی، قوانین فازی که معمولاً قوانین لفظی میباشند در سیستم بهصورت مجموعهای از قواعد «اگر- آنگاه» تعریف میگردند. قوانین تعریفشده در این بخش، بر اساس دانش افراد خبره که سیستم را کاملاً میشناسند تعریف می شود. کنترلر های فازی را می توان به دو نوع تقسیم بندی نمود: کنترلر فازی ممدانی و کنترلر فازی تاکاگی – سوگنو .



شکل (۲). کنترلر فازی به همراه ورودی ها و خروجی ها [3]

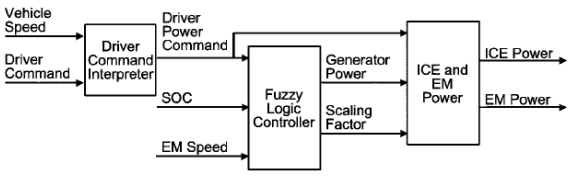
در کنترلر فازی ممدانی قواعد اگر- آنگاه فازی طی یک فرآیند با یکدیگر ترکیب و خروجی به صورت یک مجموعه فازی بیان می شود. از آنجا که ما به یک مقدار معین به عنوان خروجی نیاز داریم لازم است که مجموعه فازی را به یک عدد معین برگردانیم به این عمل نافازی سازی می گوییم. متداول ترین نافازی سازها عبارتند از نافازی ساز مرکز ثقل و نافازی ساز میانگین مراکز. اما در کنترلر تاکی- سوگنو خروجی بر اساس تابعی خطی از ورودی ها بیان می شود که خود یک مقدار قطعی و معین است بنابراین برخلاف کنترلر ممدانی نیازی به نافازی سازی خروجی نیست. به همین خاطر کاهش حجم و پیچیدگی محاسبات و افزایش سرعت پاسخگویی از مزیت های کنترلر تاکاگی- سوگنو محسوب می شود[5,4] .

۴- کنترل خودروهای هیبریدی موازی بر اساس منطق فازی

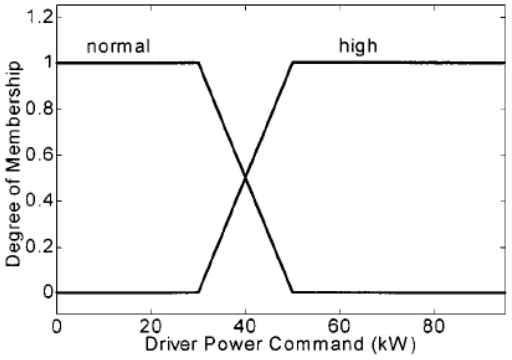
در این بخش انواع مختلف استفاده از کنترلر های منطق فازی در خودروهای هیبریدی موازی توضیح داده می شود. استفاده از کنترلر منطق فازی در خودروهای هیبریدی موازی بر اساس نوع ورودی، تعداد ورودی، نوع و تعداد خروجی، چگونگی تعیین خروجی نهایی (بر اساس نافازی سازی و یا استفاده از روشهایی دیگر همچون شبکه های عصبی) و اهداف کنترلی برای رسیدن به خروجی مطلوب متفاوت می باشند. در سال ۲۰۰۰ کنترلر فازی با هدف کاهش میزان مصرف سوخت و افزایش ضریب کیفیت آلایندگی بر اساس استانداردهای شهری طراحی شد به گونه ای که خودرو قادر بود مسافتی را که پیش از این با میزان بنزین مشخص در ۶۴.۳۷ کیلومتر طی می کرد اکنون با همین میزان بنزین در ۸۹.۶۴ کیلومتر طی کند. که این به معنای افزایش کارکرد خودرو به میزان ۴۰٪ از لحاظ طی مسیر با کاهش مصرف سوخت می باشد. علاوه بر آن ضریب کیفیت آلایندگی بر اساس استانداردهای حمل و نقل شهری از ۲۳٪ به ۳۵٪ افزایش داشت. در این طرح از کنترلر منطق فازی با سه ورودی و دو خروجی استفاده شده بود که ورودی ها بر اساس وضیعت شتاب خودرو (مثبت، منفی، صفر) ، گشتاور موتور الکتریکی ، وضعیت شارژ باتری و خروجی ها بر اساس وضعیت دنده خودرو و تعیین وضعیت گشتاور موتور الکتریکی (مثبت بودن به معنی کارکرد به صورت موتور، منفی بودن به معنی کارکرد به صورت ژنراتور) تعریف شده بودند. این کنترلر از استدلال ممدانی برای بدست آوردن خروجی فازی و از نافازی ساز مرکز ثقل برای بدست آوردن یک مقدار قطعی استفاده می کرد. شکل (۲) طرح کلی از کنترلر را به همراه ورودی ها وخروجی ها نشان می دهد. در سال ۲۰۰۲ با هدف افزایش ضریب کیفیت کارکرد موتور و بهینه سازی مصرف انرژی در خودرو کنترلر فازی براساس استدلال تاکاگی- سوگنو با سه ورودی و دو خروجی به کارگرفته شد. طراحی کنترلر بر این اصل استوار بود که بتواند قدرت مورد نیاز را به نحو مطلوبی بین موتور درون سوز و الکتریکی تقسیم کند تا خودرو به حداکثر بازده ای خود نزدیک شود. ورودی های کنترلر میزان شارژ باتری، سرعت موتور الکتریکی و وضعیت پدال گاز و خروجی مطلوب نیز، بر اساس تعیین میزان توان موتور درون سوز و تعیین وضعیت موتور الکتریکی (۱ به معنی کارکرد در حالت موتور و ۰ به معنی کارکرد در حالت ژنراتور) تعریف شده بودند. بکارگیری کنترلر فازی با استفاده از قواعد اگر-آنگاه فازی در مقایسه با کنترلر های معمولی دیگر بهبود قابل ملاحظه ای در کاهش اتلاف انرژی و افزایش ضریب کیفیت کارکرد خودرو بر اساس استانداردهای حمل و نقل درون شهری و برون شهری حاصل آورد. جدول (۱) نتایج حاصله را نشان می دهد. شکل (۳) واحد کنترل را به همراه ورودی ها و خروجی ها نشان می دهد. در شکل های (۴)، (۵)و (۶) توابع تعلق فازی مربوط به ورودی ها نشان داده شده است.

جدول (۱). تلفات نرمال شده کنترلر معمولی و کنترلر منطق فازی برای حرکت خودرو در شهر[6]

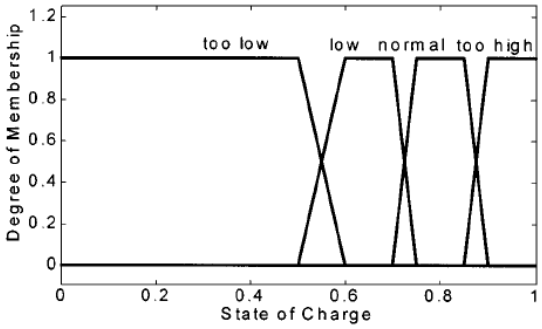
تلفات نرمال شده	کنترلر معمولی	کنترلر منطق فازی
موتور درونسوز	۶۶/۵	۶۴/۵
موتور الکتریکی	۵/۲	۳/۲
باتری	۰/۶	۰/۳
خودرو	۱۰/۸	۱۰/۹
میل گاردن	۱۲/۳	۹/۴
سیستم ترمز	۲/۵	۲/۸
سایر قطعات	۲/۱	۲/۱
مجموع	۱۰۰	۹۳/۲



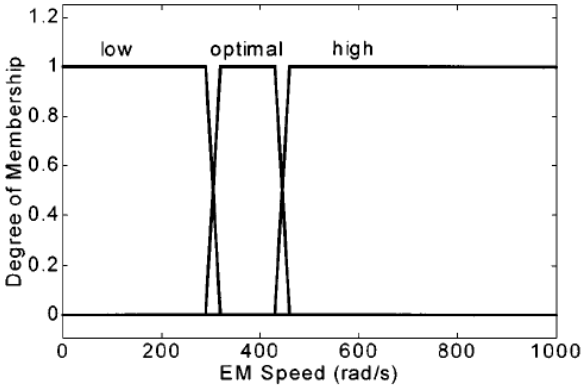
شکل (۳). واحد کنترل منطق فازی [6]



شکل (۴). توابع تعلق فازی وضعیت پدال گاز- ورودی کنترلر [6]

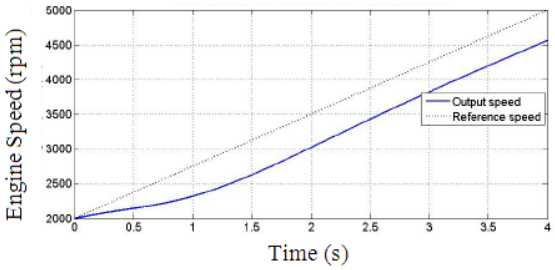


شکل (۵). توابع تعلق میزان شارژ باتری – ورودی کنترلر [6]

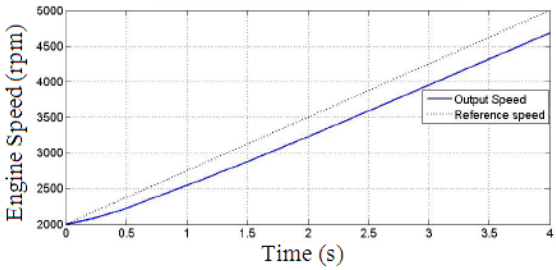


شکل (۶). توابع تعلق سرعت موتور الکتریکی – ورودی کنترلر[6]

در سال های اخیر پیشرفت هایی در طراحی کنترلرهای فازی حاصل گردید به نحوی که این کنترلر ها را با روشهای دیگر کنترلی همچون کنترل تطبیقی، کنترل بهینه و روشهای مبتنی بر یادگیری همچون شبکه های عصبی تلفیق نمودند. طراحی کنترلر تطبیقی فازی- عصبی با هدف کنترل سرعت موتور درون سوز در سال ۲۰۰۹ مورد نظر قرار گرفته شد. این کنترلر با دو ورودی ویک خروجی در مقایسه با کنترلر کلاسیک تناسبی-انتگرالی قرارگرفت که نتایج بهتری را بدست آورد. ورودی ها به صورت میزان اختلاف سرعت موتور درون سوز با سرعت مطلوب و مشتق این خطا در نظر گرفته شده بودند و خروجی به صورت زاویه دریچه بنزین ورودی برای سوخت موتور درون سوز تعریف شده بود. این کنترلر از الگوریتم یادگیری شبکه عصبی بهره می برد که داده های ورودی برای آموزش شبکه عصبی از کنترلر تناسبی- انتگرالی گرفته شده بود. شکل های (۷)و (۸) مقایسه بین میزان پاسخگویی حاصل از این نوع کنترلر با کنترلر تناسبی- انتگرالی به یک ورودی یکسان را نشان می دهند.

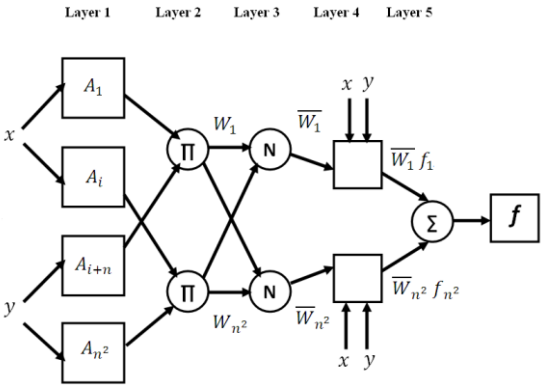


شکل (۷). پاسخ موتور درون سوز به کنترلر تناسبی – انتگرالی[7]



شکل (۸). پاسخ موتور درون سوز به کنترلر تطبیقی فازی- عصبی[7]

در سال ۲۰۱۰ تلفیق کنترلر فازی با شبکه عصبی و کنترل تطبیقی به منظور بهینه سازی این نوع کنترلر با هدف کاهش مصرف سوخت و آلایندگی محیط در خودروهای هیبریدی مورد استفاده قرار گرفت . در این تحقیق برای مدل سازی خودروی هیبریدی موازی از نرم افزار ادوایزر استفاده شده بود [8]. و بر اساس این مدل مقایسه ای بین کنترلر فازی معمولی و کنترلر تطبیقی فازی-عصبی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان دهنده آن بودند که کنترلر تطبیقی فازی- عصبی با مدیریت بهتر تقسیم توان بین منابع تولیدی نسبت به کنترلر فازی معمولی باعث کاهش بیشتر مصرف سوخت و گازهای تولیدی می شود. ورودی ها در این کنترلر که از نوع تاکاگی – سوگنو می باشد، به صورت گشتاور مورد نیاز و میزان شارژ باتری و خروجی، به صورت میزان گشتاوری که موتور درون سوز باید تامین کند تعریف شده اند. شکل (۹) ساختار کلی کنترلر تطبیقی فازی- عصبی را نشان می دهد. در این شکل x و y ورودی، f خروجی، $A_i,\ldots, A_n^2$ توابع تعلق فازی ورودی ها، $W_i,\ldots,W_n^2$ وزن های مربوط به قواعد اگر- آنگاه فازی می باشند. در نهایت جدول (۲) مقایسه ای را بین کنترلر منطق فازی معمولی با کنترلر منطق فازی بهینه شده (کنترلر تطبیقی فازی- عصبی) از نظر میزان کاهش مصرف سوخت و تولید گازهای آلاینده محیطی نشان می دهد.



شکل (۹). ساختار کلی کنترلر تطبیقی فازی- عصبی [9]

جدول (۲). مقایسه کنترلر فازی متداول با کنترلر فازی بهینه شده از لحاظ کاهش در مصرف سوخت و آلایندگی محیط [9]

تلفات نرمال شده	کنترلر فازی متداول	کنترلر بهینه شده
مصرف بنزین		
(لیتر در ۱۰۰کیلومتر)	۴/۹۶	۴/۷۳
هیدروکربن تولیدی		
(گرم در کیلومتر)	۰/۲۸۱	۰/۲۷۷
منواکسیدکربن تولیدی		
(گرم در کیلومتر)	۱/۳۰۵	۱/۲۹۶
انواع اکسید نیتروژن تولیدی		
(گرم در کیلومتر)	۰/۱۴۸	۰/۱۵۱

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشهای مختلف بکارگیری کنترل فازی در خودروهای هیبریدی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس مقایسات به عمل آمده بین کنترل فازی و کنترل کلاسیک شاهد آن بودیم که کنترل فازی نتایج بهتری را در مقایسه با کنترل کلاسیک کسب کرده است. یکی از نکات حائز اهمیت در موفقیت کنترل فازی در برابر کنترل کلاسیک مربوط به ساختار خودروی هیبریدی می شود که دینامیک آن شامل معادلات دیفرانسیل غیر خطی شدید همراه با پارامترهای متغیر با زمان است که دارای عدم قطعیت نیز می باشند. همچنین از آنجا که کنترل فازی مبتنی بر استدلال ممدانی بر خلاف کنترل فازی مبتنی بر استدلال تاکاگی- سوگنو نیاز به نافازی سازی دارد تا بتواند خروجی قطعی را تولید نماید بنابراین حجم محاسبات آن بیشتر و سرعت پاسخگویی آن نسبت به کنترلر تاکاگی- سوگنو پایین تر می باشد. بر اساس نتایج تحقیقات در سال های اخیر می توان نتیجه گیری کرد که استفاده از کنترلر های فازی به تنهایی نمی تواند اهداف کنترلی را به نحوی مطلوب پیاده سازی نماید به همین خاطر استفاده از روشهای دیگر برای تلفیق با منطق فازی در طراحی کنترلر امری ضروری می باشد. آنچه تا کنون محققان به آن نپرداخته اند بررسی روشهای دیگر غیر از شبکه عصبی در تلفیق با منطق فازی می باشد. پیشنهاد می شود از روشهای یادگیری ماشینی همچون روشهای مبتنی بر یادگیری تقویتی برای تلفیق با منطق فازی در طراحی کنترلر استفاده شود. همچنین از آنجا که در سال های اخیر مدل سازی خودرو های هیبریدی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [10-12] پیشنهاد می شود که برای آزمودن عملکرد کنترلر تنها از یک مدل استفاده نشود.

۶- مراجع

[1] A. Sciarretta, L. Guzzella, *Control of hybrid electric vehicles*,IEEE Control systems Magazine, April, 2007.

[2]B. Mashadi, B. A. Emadi, *Dual-Mode Power-Split Transmission for Hybrid Electric Vehicles*, IEEE Trans. On VEHICULAR TECHNOLOGY, vol. 59, no. 7, Sep. 2010.

[3] B. M. Baumann, G. Washington, B. C. Glenn, and G. Rizzoni, *"Mechtronic design and control of Hybrid Electric Vehicles,"* IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 5, No. 1, March 2000.

[4] Mehran Mazandarani, Ali Vahidian Kamyad , Naser Pariz, *Fuzzy Optimal Control under Generalized Differentiability of Fuzzy-number-valued Functions*, 4th International Conference of Iranian Operations Research Society, 2011.

[5] Mehran Mazandarani, Ali Vahidian Kamyad, *Numerical Solution of Fuzzy Linear Non-Autonomous Systems by AVK Method*, 4th International Conference of Fuzzy Information & Engineering, 14-15 October, 2010.

[6] N. J. Schouten, M. A. Salman, N. A. Kheir, *Fuzzy Logic Control for Parallel Hybrid Vehicles*, IEEE Trans. On Control Systems Technology, Vol. 10, NO. 3, May 2002.

[7] J. Balakrishnan, Indulal. S., *Adaptive Neuro-Fuzzy Control of Internal Combustion Engine for Hybrid Electric Vehicle*, 10th National Conference on Technological Trends (NCTT09) 6-7 Nov 2009.

[8] National Renewable Energy Laboratory, ADVISOR Documentation, 30 April, 2002.

[9] Xia MENG, N. LANGLOIS, *Optimized Fuzzy Logic Control Strategy of Hybrid Vehicles Using ADVISOR*, International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), 2010.

[10] K. L. Butler, M. Ehsani, *A Matlab-Based Modeling and Simulation Package for Electric and Hybrid Electric Vehicle Design*, IEEE Trans. On Vehicular Tech., vol. 48, NO. 6, NOV. 1999.

[11] D. Wenzhong Gao Chris Mi , Ali Emadi *Modeling and Simulation of Electric and Hybrid Vehicles*, Proceedings of the IEEE, vol. 95, No. 4, April 2007.

[12] Juan José Valera, Iñaki Iglesias, Alberto Peña ,*Integrated Modeling Approach for Highly electrified HEV. Virtual Design and Simulation Methodology for Advanced Powertrain Prototyping*, EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium,2009.