مجله کنترل
ISSN 2008-8345
جلد ۸، شماره ۱، بهار ۱۳۹۳، صفحه ۱۰-۱

طراحی استراتژی کنترل بهینه آنلاین برای اتوبوس هیبرید هیدرولیک

محمدرضا حائری یزدی[۱]، علی صفائی[۲]، وحید اصفهانیان[۳]، مسعود مسیح تهرانی[۴]

[۱] دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، myazdi@ut.ac.ir

[۲] کارشناسی ارشد، سوخت و محیط زیست، دانشگاه تهران، ali.safaie@ut.ac.ir

[۳] استاد، سوخت و محیط زیست، دانشگاه تهران، evahid@ut.ac.ir

[۴] استادیار دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت، masih@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۲/۱۰/۱۴، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۲/۱۲/۵)

چکیده: در این مقاله، طراحی یک استراتژی کنترل بهینه برای سیستم قوای محرکه‌ی اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی ارائه شده‌است. این سیستم شامل یک موتور احتراق‌داخلی به‌عنوان مؤلفه‌ی اول تولید قدرت و یک پمپ-موتور هیدرولیکی به‌عنوان مؤلفه‌ی دوم می‌باشد.. طراحی یک استراتژی کنترل مناسب برای سیستم‌های قوای محرکه هیبرید، بسیار تابع روند تغییرات سرعت در سیکل رانندگی است. این تابعیت تاحدی است که روند تغییرات سرعت سیکل رانندگی در زمان‌های آتی سیکل نیز روی تصمیم کنترلی در هر گام تأثیر دارد. در اینجا برای طراحی استراتژی کنترل بهینه متناظر با سیکل رانندگی از یک الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی استفاده شده‌است. ایراد استفاده از روش برنامه‌ریزی دینامیکی نیازمندی آن به اطلاعات آینده سیکل رانندگی جهت پیاده‌سازی است. با طراحی یک استراتژی کنترل هوشمند که دارای واحدی جهت شناسایی و پیش‌بینی سیکل رانندگی است، این مشکل قابل رفع می‌باشد. یک شیوه مناسب جهت طراحی استراتژی کنترل هوشمند، استفاده از مدل آنلاین استراتژی‌های کنترلی بهینه متناظر با چندین سیکل رانندگی استاندارد در بازه‌های زمانی مختلف از یک سیکل رانندگی خاص است. در این مقاله، یک مجموعه‌مدل شامل تعدادی شبکه‌ی عصبی با هدف مدل‌سازی آنلاین استراتژی‌های کنترلی بهینه بکار رفته‌است. به‌منظور بررسی عملکرد طراحی ارائه‌شده، نتایج شبیه‌سازی مدل اتوبوس هیبرید هیدرولیک با دو استراتژی کنترل قانون‌مند و بهینه برای چهار سیکل رانندگی استاندارد مقایسه شده‌است. مشاهده می‌شود که استفاده از استراتژی کنترل بهینه به‌مقدار چشمگیری مصرف سوخت اتوبوس را کاهش داده‌است.

کلمات کلیدی: اتوبوس هیبرید هیدرولیک، استراتژی کنترل بهینه آنلاین، شبکه عصبی، برنامه‌ریزی دینامیکی.

Design of the Online Optimal Control Strategy for a Hydraulic Hybrid Bus

Mohammad Reza Ha'iri-Yazdi, Ali Safaei, Vahid Esfahanian, Masood Masih-Tehrani

Abstract: In this paper, design of an optimal control strategy for the powertrain of a parallel hydraulic hybrid bus is proposed. The powertrain includes an internal combustion engine as the first power generation source and a hydraulic pump/motor as the second one. Design procedure of a proper control strategy for the hybrid powertrains is extremely dependent on the speed trend of the driving cycle. This functionality is such that the control decision is affected by the future trend of the driving cycle speed, too. Here, a dynamic programming algorithm is used for generating the optimal control strategy in a special driving cycle. The disadvantage of the designed control strategy is that it is fully dependent to the future information of the driving cycle. This problem would be

eliminated by using an intelligent control strategy. The control strategies including an identification unit for the driving cycle are named as the intelligent. An appropriate method to design the intelligent control strategy is using the online models of the optimal control strategies for some standard driving cycles in different time periods of a special driving cycle. In this paper, a set of models contains several neural networks is applied to generate the online models of the pre-developed optimal control strategies. The generated models are used as the online optimal control strategies on the hydraulic hybrid bus. Finally, the results of the bus simulation using the online optimal control strategy and a rule-based one are compared for assessment of the proposed design. It can be seen that the fuel consumption of the bus is reduced by using the online optimal control strategy.

Keywords: Hydraulic Hybrid Bus, Online Optimal Control Strategy, Neural Network, Dynamic Programming.

۱- مقدمه

با افزایش قوانین سختگیرانه در مورد مصرف سوخت و آلودگی خودروها درسال‌های اخیر، تکنولوژی‌های جدید جهت طراحی و ساخت سیستم تولید و انتقال قدرت خودروها مورد بررسی قرار گرفته‌است. فناوری هیبرید[1] یکی از ایده‌های اصلی در این دوره به حساب می‌آید. در هیبریدهای الکتریکی [۱] به‌عنوان نوع متداول از فناوری‌های هیبرید، موتور الکتریکی و مجموعه‌ای از باتری‌ها به خودروی متداول اضافه شده‌است. در سال‌های اخیر سیستم‌های هیبرید مکانیکی[2] که در آنها ادوات مکانیکی به‌عنوان المان ذخیره‌ی انرژی به کار می‌روند نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. در میان سیستم‌های هیبرید مکانیکی، سیستم هیبرید هیدرولیک[3] باتوجه به کاربرد گسترده‌ی سیستم‌های هیدرولیکی در صنعت خودرو بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌است. در یک سیستم قوای محرکه‌ی هیبرید هیدرولیک، مجموعه‌ای از آکومولاتور[4]ها به‌عنوان منبع ذخیره‌ی انرژی بکار می‌رود و پمپ-موتور هیدرولیکی[5] نقش مبدل انرژی را دارد. هیبرید هیدرولیک نسبت به هیبرید الکتریکی دارای بازده‌ی بالاتر در انتقال توان بین مؤلفه‌های تولید و انتقال قدرت می‌باشد [۲]. علاوه‌بر این مؤلفه‌ی ذخیره‌ی انرژی در هیبرید هیدرولیکی (آکومولاتورها) نسبت به باتری‌های الکتروشیمیایی، چگالی توان بالاتری دارد که موجب بازیابی درصد بالاتری از انرژی ترمزی می‌شود [۲]. البته آکومولاتور در مقایسه با باتری دارای چگالی انرژی پایین‌تری است. مجموع دو نکته‌ی مذکور در مورد آکومولاتور منجربه گرایش به‌سمت ساختارهای هیبرید بر پایه‌ی ترمز بازیاب[6] می‌شود. همانند هیبریدهای الکتریکی، هیبریدهای هیدرولیک نیز در سه ساختار سری، موازی و سری- موازی قابل‌اجرا هستند [۲].

استراتژی‌های کنترلی موجود برای خودروهای هیبرید به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند [۳]: قانون‌مند[7] و براساس بهینه‌سازی[8]. در دسته‌ی اول، قوانین استراتژی کنترل براساس اطلاعات شهودی و تجربه‌ی فرد متخصص تنظیم می‌شوند. استراتژی‌های کنترل قانون‌مند ساده هستند و به‌صورت زمان‌واقعی[9] قابل‌استفاده می‌باشند. همچنین این استراتژی‌ها به دو صورت فازی[10] و غیرفازی قابل‌اجرا هستند [۳]. در دسته‌ی دوم، یک تابع هزینه که بیانگر مقدار مصرف سوخت خودرو یا موارد دیگر است، تعریف می‌شود. سپس با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مختلف، مقادیر بهینه برای متغیرهای خروجی استراتژی کنترل تعیین می‌گردند. روش برنامه‌ریزی دینامیکی[11] و الگوریتم ژنتیک[12] به‌عنوان روش‌های پرکاربرد برای یافتن تصمیم بهینه‌ی کلی در استراتژی‌های کنترل هیبرید کاربرد دارند. باتوجه به ماهیت دینامیک استراتژی کنترل در خودرو، روش برنامه‌ریزی دینامیکی گزینه‌ی منطقی‌تری به‌نظر می‌رسد. برای اجرای روش برنامه‌ریزی دینامیکی نیاز به اطلاعات آتی سیکل حرکتی است؛ از این‌رو یک روش آفلاین[13] محسوب می‌شود. بعضی از استراتژی‌های کنترل بهینه به‌صورت زمان‌واقعی نیز اجرا می‌شوند [۴]. درکنار تقسیم‌بندی فوق برای استراتژی کنترل خودروهای هیبرید، استراتژی کنترل هوشمند[14]، به‌صورت الگوریتمی تعریف می‌شود که براساس اطلاعات استخراج‌شده از سیکل حرکتی، قوانین خود را تعیین می‌کند [۵].

تابحال در زمینه‌ی استخراج استراتژی کنترل بهینه برای سیستم‌های قوای محرکه هیبرید هیدرولیک، تحقیقاتی انجام شده‌است. در سال ۱۹۸۵، وو [۶] یک پروژه‌ی مدل‌سازی و طراحی استراتژی کنترل بهینه را

[1] Hybrid Technology
[2] Mechanical Hybrid
[3] Hydraulic Hybrid
[4] Accumulator
[5] Hydraulic Pump/Motor
[6] Regenerative Braking

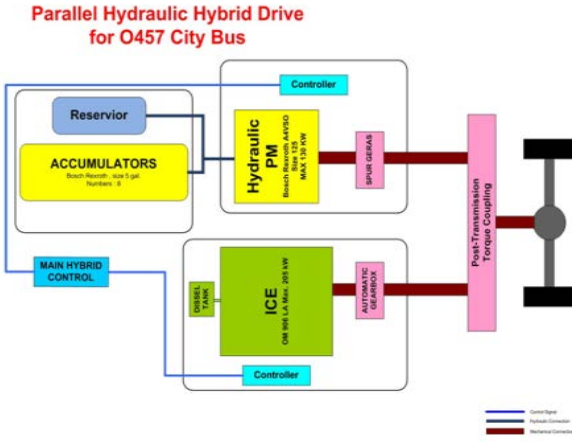
[7] Rule-Based
[8] Optimization-Based
[9] Real-Time
[10] Fuzzy
[11] Dynamic Programming
[12] Genetic Algorithm
[13] Off-line
[14] Intelligent Control Strategy

برای یک سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید هیدرولیک انجام داد. این تحقیقات روی یک خودروی سواری انجام شد. در سال ۲۰۰۴، فیلیپی [۷] یک استراتژی کنترل بهینه با استفاده از برنامه‌ریزی دینامیکی را برای یک کامیون هیبرید هیدرولیک ارائه نمود. در آن تحقیق، بازده‌ی پایین موتور احتراق‌داخلی اعمال نشده‌است. درنهایت در سال ۲۰۰۹، هوی و همکاران [۸]، یک استراتژی کنترل بهینه را با استفاده از برنامه‌ریزی دینامیکی و موتور استنتاج فازی برای یک خودروی هیبرید هیدرولیک سری-موازی ارائه نموده‌است.

در مقاله حاضر، یک استراتژی کنترل بهینه با استفاده از برنامه‌ریزی دینامیکی برای سیستم قوای محرکه هیبرید هیدرولیک اجراشده روی یک اتوبوس شهری ارائه شده‌است. همچنین جهت استفاده از استراتژی کنترل بهینه طراحی‌شده به‌صورت آنلاین، مجموعه‌ای از شبکه‌های عصبی[1] طراحی و مدل‌سازی شده‌است. مدل آنلاین استراتژی کنترل بهینه بهینه ارائه‌شده در این مقاله، قابل‌استفاده در طراحی یک استراتژی کنترل هوشمند برای اتوبوس هیبرید هیدرولیک می‌باشد [۹].

۲- مدل‌سازی سیستم قوای محرکه هیبرید هیدرولیک

در شکل ۱ شماتیک سیستم هیبرید هیدرولیک موازی استفاده‌شده در این مقاله نشان داده شده‌است. موتور احتراق داخلی، پمپ- موتور هیدرولیکی، جعبه دنده و آکومولاتورها ادوات اصلی سیستم را تشکیل می‌دهند. آکومولاتورها از نوع دیافراگمی بوده و گاز محبوس در آن نیتروژن می‌باشد. اطلاعات مربوط به اتوبوس هیبرید هیدرولیک و ادوات مختلف سیستم قوای محرکه در جدول ۱ آمده‌است.



شکل ۱- شماتیک سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید موازی هیدرولیکی [۱۰]

جدول ۱- مشخصات اتوبوس هیبرید هیدرولیک

مشخصه	مقدار
مقدار وزن اتوبوس متعارف بدون سرنشین	۹۸۲۰kg
شعاع چرخ	۰/۴۶۶ m
سطح دید اتوبوس	۲ m^2
موتور احتراق داخلی	OM906LA (Mercedes Benz)
پمپ-موتور هیدرولیک	A4VSO-125 (Busch-Rexroth)
آکومولاتور (۲ عدد)	HAB50 (Busch-Rexroth)
گیربکس اتوماتیک ۴ دنده	ZF-4HP590
ضریب دنده دیفرانسیل	۴/۲

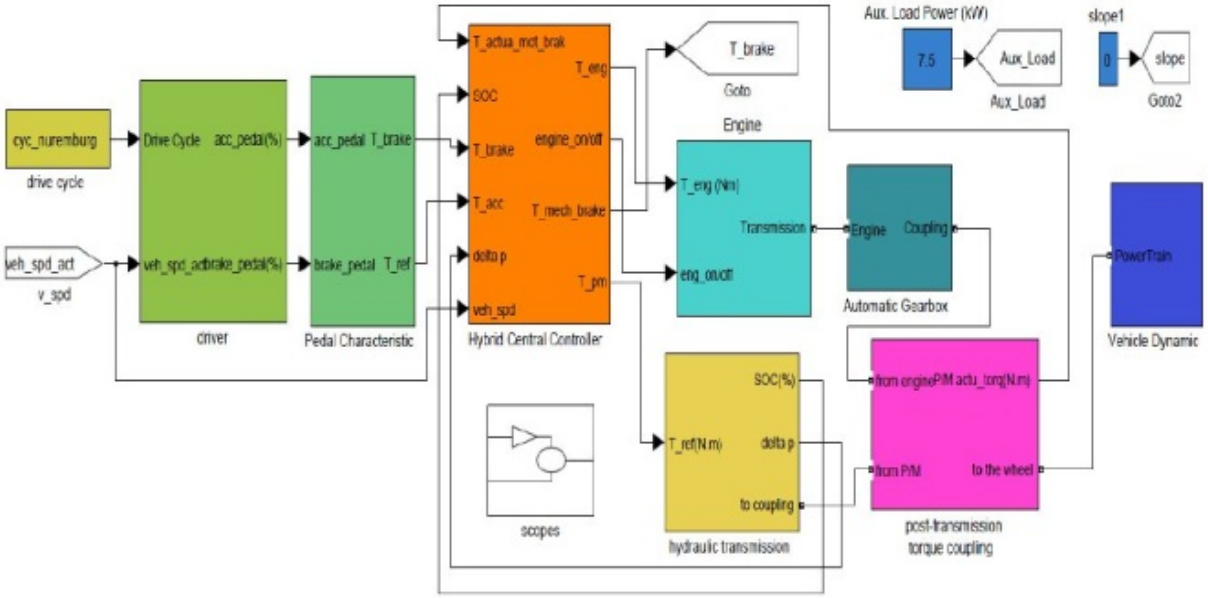
مدل سیستم قوای محرکه اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی به‌کمک نرم‌افزار MATLAB/Simulink ایجاد شده‌است. این مدل از نوع روبه جلو است که در آن راننده با توجه به اختلاف سرعت فعلی و سرعت مطلوب، پدال گاز یا ترمز را فشار می‌دهد. سپس در یک بلوک محاسباتی، این فشرده‌شدن پدال‌ها به گشتاور موردنیاز تبدیل و به کنترل مرکزی فرستاده می‌شود. کنترل‌کننده مرکزی، قسمت اصلی مدل اتوبوس هیبرید است که براساس استراتژی کنترل و متغیرهای ورودی، سهم هر یک از دو منبع قدرت را در تولید گشتاور مورد نیاز خودرو مشخص و به بلوک‌های مربوطه ارسال می‌نماید. گشتاور ارسال‌شده از طرف کنترلر مرکزی، وارد بلوک‌های موتور احتراق داخلی و پمپ- موتور هیدرولیکی می‌شود و گشتاور مورد نظر تأمین‌می‌گردد. بین موتور احتراق داخلی و کوپلینگ، بلوک گیربکس چندسرعته قرار دارد. درنهایت دو گشتاور تولیدشده توسط موتور احتراق داخلی و پمپ- موتور هیدرولیکی در بلوک کوپلینگ با یکدیگر جمع می‌شود و پس از عبور از دیفرانسیل وارد مدل دینامیک اتوبوس می‌شود. در مدل دینامیک اتوبوس، معادلات دینامیک مربوط‌به حرکت اتوبوس با درنظر گرفتن نیروهای مقاوم، مدل‌سازی شده‌است. درحالت ترمزگیری، پمپ- موتور هیدرولیکی در حالت پمپی عمل کرده و آکومولاتورها را شارژ می‌کند. اختلاف گشتاور ترمزی درخواستی با گشتاور منفی پمپ- موتور، توسط ترمز مکانیکی (ترمز اصلی اتوبوس) تأمین می‌گردد. در شکل ۲ مدل ارائه‌شده در محیط Simulink برای شبیه‌سازی اتوبوس نشان داده شده‌است. اطلاعات تکمیلی در مورد نحوه ایجاد مدل و همچنین اعتبارسنجی مدل ادوات آن در مرجع [۱۰ و ۵] آمده‌است.

۳- روش برنامه‌ریزی دینامیکی

الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی یک روش بازگشتی برای حل بهینه‌ی مسائل تصمیم‌گیری ترتیبی[2] است [۱۱]. در این الگوریتم، مسأله موردنظر به تعدادی زیرمسأله تقسیم و سپس تصمیم بهینه در هریک از زیر مسأله‌ها تعیین می‌گردد. ارتباط بین زیرمسأله‌ها، مسیر بهینه‌ی

[1] Neural Networks

[2] Sequential Decision Problems



شکل ۲- مدل اتوبوس هیبرید موازی هیدرولیکی [۱۰]

تصمیم‌گیری را در طول زمان انجام مسأله اصلی مشخص می‌کند. این ترفند، از جستجوی جامع مسیرهای موجود برای دستیابی به مسیر بهینه که نیازمند صرف زمان طولانی است، جلوگیری می‌نماید. مسیر بهینه‌ی بدست‌آمده، خروجی نهایی الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی است. الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی اولین بار در سال ۱۹۵۷ توسط بلمن [1] ارائه شد. بلمن با استفاده از قوانین موجود در حوزه‌ی کنترل بهینه، بهینگی الگوریتم ارائه‌شده را اثبات نمود [۱۲]. او برنامه‌ریزی دینامیکی را به‌صورت یک تئوری به نام اصل بهینگی [2] ارائه کرده‌است. طبق اصل بهینگی [۱۳]:

"یک مسیر بهینه دارای این مشخصه است که بدون توجه به حالت و تصمیم نقطه‌ی آغازین، تصمیمات اتخاذشده از هر نقطه‌ای در مسیر تا انتها، یک مسیر بهینه را تشکیل می‌دهد. این مورد مشروط به آن است که تصمیمات گرفته‌شده در نقاط قبل با شروع از نقطه‌ی آغاز منجربه رسیدن به نقطه‌ی موردنظر شده‌باشد."

به‌منظور مشاهده‌ی چگونگی کاربرد اصل بهینگی بلمن در مسائل، یک سیستم دینامیکی را که با استفاده از معادلات دیفرانسیل به‌صورت زیر بیان شده‌است در نظر بگیرید:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t)\,, \quad x(0) = x_0 \qquad (۱)$$

که در آن $x(t)$ بردار حالت سیستم و $u(t)$ بردار کنترل می‌باشد. طبق روند معمول یک مسأله‌ی کنترل بهینه، بایستی یک سیگنال کنترل که عضو محدوده‌ی مجاز است را طوری تعیین نمود که یک تابع هزینه‌ی اسکالر به‌صورت

$$R(u(t), t) = \phi\left(x(t_f)\right) + \int_0^{t_f} J(x(t), u(t))dt \qquad (۲)$$

کمینه شود. صورت مسأله برای یک سیستم گسسته به‌صورت روابط

$$x_{n+1} - x_n = h(x_n, u_n, n\delta t) \qquad (۳)$$

و

$$R(u_n, N) = \phi(x_n) + \sum_{n=1}^{N-1} J(x_n, U_n)\delta t \qquad (۴)$$

که N بیانگر تعداد گام‌های زمانی است، بیان می‌شود. استفاده از اصل بهینگی بلمن برای مسأله‌ی گسسته، منجربه رابطه‌ی بازگشتی [۱۱]

$$F_{N-n}(x_n) = \min_{u_n} \left(J(x_n, u_n)\delta t + F_{N-(n+1)}\, x_{n+1} \right)$$
$$F_0(x_N) = \phi(x_N, N) \qquad (۵)$$

می‌شود که در آن مقدار $F_{N-(n+1)}\, x_{n+1}$ برابر با مقدار تجمیعی تابع هزینه‌ی ارائه‌شده در رابطه‌ی (۴) در صورت استفاده از مسیر بهینه از گام n تا گام انتهایی است. به‌عبارت‌دیگر تصمیم بهینه در هر گام طوری انتخاب می‌شود که تابع هزینه‌ی تجمیعی برای مسیر از گام n تا انتهای مسیر کمترین مقدار خود را داشته‌باشد. حل مسأله‌ی بهینه از گام انتهایی مسیر شروع شده و به گام آغازین ختم می‌شود. این الگوریتم، با نام برنامه‌ریزی دینامیکی روبه‌عقب [3] شناخته می‌شود. ملاحظه می‌شود که

[1] Bellman
[2] Principle of Optimality
[3] Backward Dynamic Programming

مقدار تابع هزینه در گام نهایی برای آغاز الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی روبه‌عقب نیاز است.

علاوه بر الگوریتم فوق، روند دیگری نیز برای کاربرد عملی برنامه‌ریزی دینامیکی ارائه شده‌است. دریفوس[1] در سال ۱۹۶۵ برنامه‌ریزی دینامیکی روبه‌جلو[2] را پیشنهاد داد [۱۴]. در این الگوریتم، حالت اولیه‌ی مسأله و مقدار تابع هزینه‌ی آن مشخص هستند و بهینه‌سازی به‌صورت روبه‌جلو از گام اول شروع و به گام انتهایی ختم می‌شود. رابطه‌ی بازگشتی الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی روبه‌جلو به‌صورت

$$H_n(x_n) = \min_{u_{n-1}} \left(J(x_{n-1}, u_{n-1})\delta t + H_{n-1}\, x_{n-1} \right) \qquad H_0(x_N) = 0 \qquad (۶)$$

بیان می‌شود که در آن مقدار $H_{n-1}x_{n-1}$ برابر با مقدار تجمیعی تابع هزینه در صورت استفاده از مسیر بهینه از گام آغازین تا گام n است. ملاحظه می‌شود که در این حالت، به مقدار تابع هزینه در گام انتهایی مسیر نیازی نمی‌باشد. این مورد برتری الگوریتم روبه‌جلو نسبت به الگوریتم روبه‌عقب است. در مقاله حاضر از الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی روبه‌جلو جهت استخراج استراتژی کنترل بهینه استفاده شده‌است.

٤- طراحی استراتژی کنترل بهینه با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی روبه‌جلو

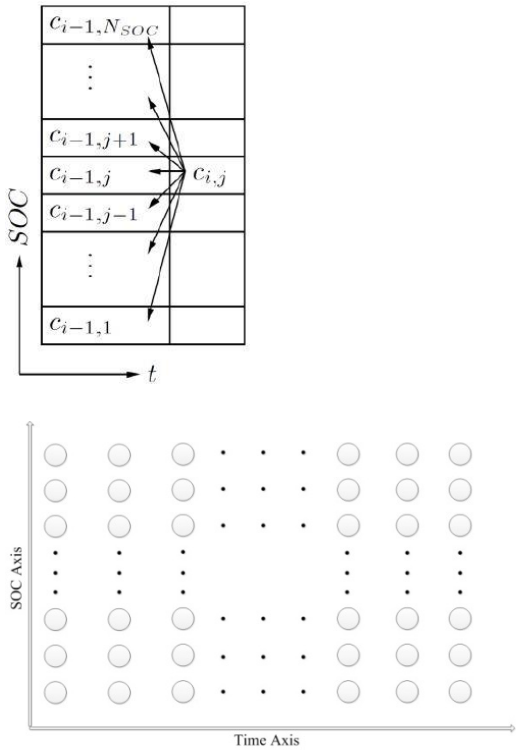
طراحی استراتژی کنترل بهینه برای یک سیستم تولید و انتقال قدرت هیبرید هیدرولیک، یک مسأله‌ی دینامیکی است. هدف مسأله، طراحی سیگنال‌های مناسب به‌عنوان گشتاور موتور احتراق‌داخلی و پمپ-موتور هیدرولیکی به‌منظور دستیابی به مسیر بهینه‌ی مقدار سطح‌شارژ آکومولاتورها می‌باشد. در اینجا برای تعیین استراتژی کنترل بهینه متناظر با یک سیکل رانندگی مشخص از الگوریتم برنامه‌ریزی دینامکی روبه‌جلو استفاده شده‌است. متغیر حالت مسأله، مقدار سطح شارژ آکومولاتورهای مجموعه در طول زمان سیکل رانندگی است. مقدار متغیر حالت در گام‌های آغاز و پایان ثابت و برابر درنظر گرفته شده‌است. برابری مقدار سطح شارژ آکومولاتورها در ابتدا و انتهای مسیر، نیاز به محاسبه‌ی مقدار انرژی مصرف‌شده در آکومولاتورها در طول مسیر و اضافه نمودن آن به مقدار مصرف سوخت موتور احتراق‌داخلی به‌منظور تعیین مقدار مصرف سوخت واقعی خودروی هیبرید را از بین می‌برد. همچنین متغیرهای کنترلی، مقادیر گشتاور موتور احتراق‌داخلی و گشتاور پمپ-موتور هیدرولیکی در طول زمان سیکل رانندگی هستند. مقدار مصرف‌سوخت موتور احتراق‌داخلی در کل زمان سیکل رانندگی به‌عنوان تابع هزینه‌ی مسأله درنظر گرفته شده‌است:

$$R_n = \sum_{n=1}^{N} \dot{m}_f \qquad (۷)$$

باتوجه به آنکه مسأله حاضر گسسته است، بایستی فضای حل گسسته‌سازی شود. به‌این منظور علاوه‌بر مرزهای بالا و پایین سطح شارژ آکومولاتورها (SoC)، به طول گام در طول دو محور زمان و SoC نیز نیازمندیم (

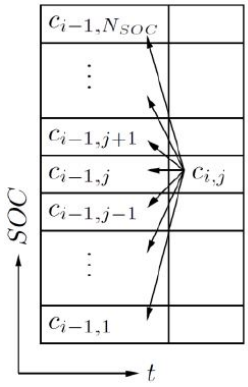
شکل ۳). هرچه طول گام‌ها کمتر باشد، فضای حل به فضای پیوسته نزدیک‌تر می‌شود که افزایش تعداد گزینه‌ها برای انتخاب تصمیم بهینه را به همراه دارد. افزایش تعداد گزینه‌ها منجربه تعیین یک مسیر بهینه‌تر می‌گردد. ازطرف دیگر، کاهش طول گام‌ها، افزایش پیچیدگی محاسباتی حل را به‌همراه خواهدداشت. برای اجرای الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی یک کامپیوتر با چهار پردازنده و ۸ گیگابایت حافظه‌ی کوتاه مدت در اختیار بوده‌است. کاهش طول گام‌ها محدود به قدرت پردازش این کامپیوتر می‌شود. درنهایت طول گام یک ثانیه برای متغیر زمان و طول گام ۰/۰۰۱ برای SoC درنظر گرفته شده‌است.

در مرحله بعد، مقدار مصرف سوخت تجمیعی موتور احتراق‌داخلی متناظر با تمامی تصمیم‌های مجاز برای هر گره در هر گام زمانی تعیین شده‌است. ابتدا با استفاده از معادلات استفاده‌شده در مدل‌سازی پمپ-موتور هیدرولیکی [۵] و باتوجه به مقدار جابجایی بیشینه‌ی پمپ، تمامی گزینه‌های مجاز برای تصمیم‌گیری مشخص می‌گردد. توجه شود که منظور از تصمیم‌گیری، انتخاب گره‌ی مبدأ در گام قبلی برای حرکت به‌سمت هر گره در گام حاضر می‌باشد (شکل ۴).



شکل ۳ – گسسته‌سازی فضای حل [۵]

[1] Dreyfus
[2] Forward Dynamic Programming

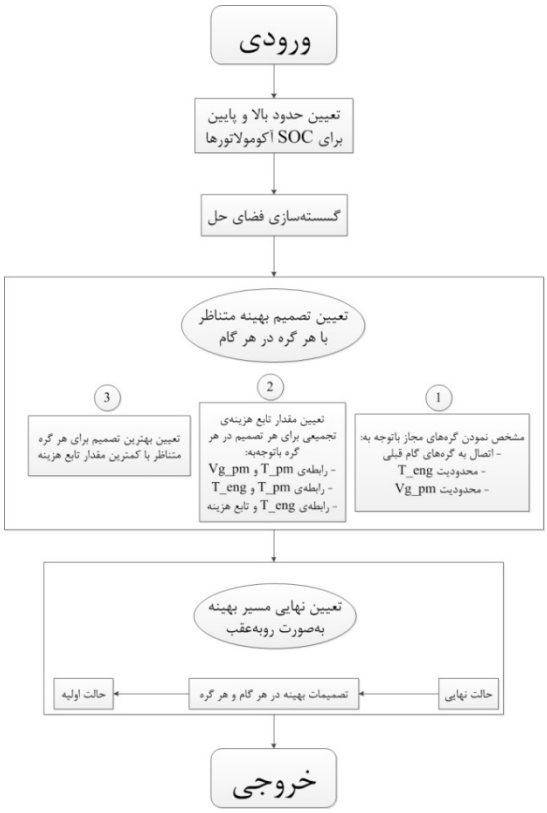


شکل ۴ – انتخاب تصمیم بهینه برای هر گره در گام حاضر از میان گزینه‌های موجود در گام قبلی [۱۵]

هریک از گزینه‌های موجود متناظر با یک گشتاور مشخص برای پمپ-موتور هیدرولیکی است. با داشتن گشتاور پمپ-موتور هیدرولیکی و با درنظر گرفتن حالت شتاب‌گیری یا ترمزگیری اتوبوس، مقدار گشتاور موتور احتراق‌داخلی از رابطه‌ی

$$T_{eng} = T_{dem} - T_{pm}\,,\ T_{dem} > 0 \qquad T_{eng} = 0\,,\ T_{dem} \le 0 \qquad (۸)$$

بدست می‌آید. مقدار گشتاور موتور احتراق‌داخلی نیز محدود به محدوده مجاز می‌باشد. با داشتن مقدار گشتاور موتور احتراق‌داخلی برای هر گزینه، می‌توان مقدار مصرف سوخت موتور را با استفاده از نمودار مصرف سوخت موتور در سرعت‌ها و گشتاورهای مختلف بدست آورد.



شکل ۵ – فلوچارت الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی روبه‌جلو استفاده‌شده [۵]

مقدار تابع هزینه متناظر با هر گزینه از جمع مصرف سوخت موتور در گام حاضر با مقدار مصرف سوخت تجمیعی موتور در حالات قبل بدست می‌آید (رابطه‌ی (۵)). در نهایت از میان گزینه‌های موجود، تصمیمی که منجربه کمترین مقدار مصرف سوخت موتور می‌شود به‌عنوان تصمیم بهینه متناظر با هر گره در گام موردنظر مشخص می‌گردد. توجه شود در این قسمت، پیشرفت الگوریتم به‌صورت روبه‌جلو می‌باشد. در پایان، مسیر بهینه برای متغیر حالت در طول زمان سیکل رانندگی تعیین می‌شود. در این قسمت با مشخص بودن حالت نهایی سیستم، الگوریتم از انتهای مسیر آغاز و به‌سمت ابتدای مسیر حرکت می‌کند. با داشتن تصمیم بهینه برای هر گره در هر گام که در قسمت دوم الگوریتم بدست آمده‌است، الگوریتم به‌صورت روبه‌عقب پیشرفت کرده و در نهایت مسیر بهینه مشخص می‌شود. توجه شود که در این حالت دیگر نگرانی درخصوص انتخاب حالتی به‌عنوان حالت بهینه که به حالات قبل متصل نباشد، وجود ندارد. روند اجرای الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی ارائه‌شده در نشان داده شده‌است. بهینگی این روش، در اصل بهینگی بلمن به‌صورت تئوری ثابت شده‌است [۱۲]. هرچند درکاربردهای مختلف، بسته به شرایط پیاده‌سازی الگوریتم این امکان وجود دارد که قدری از پاسخ بهینه مطلق فاصله بگیریم؛ اما اصل بهینگی الگوریتم همچنان بر جای خود باقی است. در اینجا، امکان عملی برای تعیین بهینگی مطلق مسیر تعیین‌شده برای SOC وجود ندارد. با تأیید صحت مراحل اجرای الگوریتم، می‌توان به نزدیکی مسیر بدست‌آمده به پاسخ بهینه امیدوار بود. همچنین نتایج ارائه‌شده در بخش شبیه‌سازی (جدول ۴) می‌تواند تأییدی بر این مدعا باشد.

۵- طراحی مجموعه‌ای از شبکه‌های عصبی جهت مدل‌سازی استراتژی کنترل بهینه

الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی، یک الگوریتم آفلاین است. به‌این معنی که تنها با در اختیار بودن تمامی یک سیکل رانندگی می‌توان الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی را روی سیکل اعمال نمود و استراتژی کنترل بهینه را برای آن بدست آورد. در اینجا، با استفاده از مجموعه‌ای از شبکه‌های عصبی یک مدل آنلاین متناظر با استراتژی کنترل بهینه‌ی بدست‌آمده برای هر سیکل رانندگی ارائه شده‌است. با استفاده از مدل ارائه‌شده می‌توان مدل اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی را تحت هریک از سیکل‌های رانندگی به‌صورت آنلاین شبیه‌سازی نمود و تأثیر استراتژی کنترل بهینه را برآن مشاهده کرد. توجه شود با بکارگیری مدل مذکور دسترسی به اطلاعات سیکل رانندگی پیش از شبیه‌سازی لزومی ندارد. مجموعه‌مدل شبکه عصبی با استفاده از اطلاعات مربوطبه استراتژی کنترل بهینه استخراج‌شده از برنامه‌ریزی دینامیکی، آموزش دیده‌است.

مجموعه‌مدل شبکه عصبی ارائه‌شده در این مقاله، شامل ۵ شبکه عصبی است. این شبکه‌ها، براساس مقادیر تعدادی متغیر ورودی، مقدار گشتاور فرمان موتور احتراق‌داخلی را به‌عنوان خروجی تعیین می‌کنند. برای انتخاب متغیرهای ورودی مجموعه‌مدل، سیگنال‌های ورودی و همچنین سیگنال متغیر حالت در الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی در

دسترس می‌باشد. باتوجه‌به ماهیت دینامیک الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی، استفاده از متغیرهایی که به تاریخچه‌ی سیکل رانندگی مرتبط باشد به‌عنوان ورودی مدل مناسب می‌باشد. از این‌رو، سرعت اتوبوس و گشتاور مطلوب راننده به‌عنوان متغیرهای ورودی مدل‌های شبکه عصبی در نظر گرفته شده‌اند. متغیر ورودی سوم، متغیر حالت در الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی یعنی SoC آکومولاتور می‌باشد. باتوجه به ماهیت بسیار غیرخطی الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی، تنها استفاده از یک شبکه‌ی عصبی توانایی مدل‌سازی الگوریتم را ندارد. ازاین‌رو داده‌ها برای هر سیکل رانندگی به 5 مجموعه‌ی مستقل تقسیم‌بندی شده‌اند. این تقسیم‌بندی براساس تغییرات SoC صورت گرفته‌است. به‌عنوان‌مثال برای داده‌های با SoC بین ۰/۶ و ۰/۷ یک شبکه‌ی عصبی با دو ورودی سرعت اتوبوس و گشتاور مطلوب راننده ایجاد شده‌است. برای سایر بازه‌های SoC نیز این روند با حفظ گام ۰/۱ تکرار شده‌است. در جدول ۲، تعداد شبکه‌های عصبی و گروه‌های SOC برای هریک از سیکل‌های رانندگی استاندارد نشان داده شده‌است. هریک از شبکه‌های عصبی شامل دو لایه‌ی درونی و در هر لایه دارای ۲۰ تا ۶۰ نرون (متغیر در بازه‌های مختلف) می‌باشد. نمونه‌ای از تعداد نرون‌ها برای شبکه‌های عصبی متناظر با سیکل رانندگی Local Road درجدول ۳ ارائه شده‌است. داده‌های موردنیاز برای آموزش شبکه‌های عصبی از نتایج طراحی استراتژی‌های کنترلی بهینه روی ۴ سیکل رانندگی استاندارد بدست آمده‌است. ۸۰ درصد داده‌ها به‌عنوان داده‌های آموزش و مابقی برای تست شبکه‌ها استفاده می‌شود. ایجاد شبکه‌ها با استفاده از جعبه‌ابزار *nntool* در نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته‌است. برای تعیین بهترین تعداد نرون در هر لایه، یک جستجوی جامع در میان گزینه‌های موجود انجام شده‌است. شماتیک مجموعه‌مدل شبکه‌ی عصبی ارائه‌شده در

آمده‌است. قابل‌ذکر است که جهت تأثیر یکسان متغیرهای ورودی در شبکه‌های عصبی ایجادشده، مقادیر دو متغیر ورودی نرمال‌سازی شده‌است.

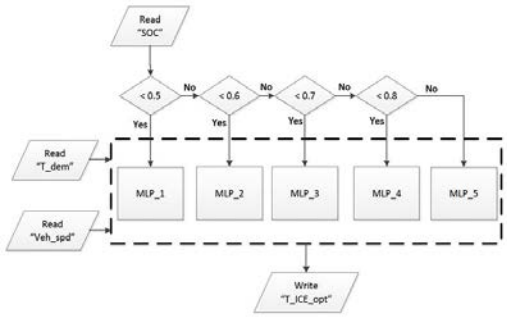
جدول ۲ – تعداد شبکه‌های عصبی و محدوده SOC برای هر سیکل رانندگی

سیکل رانندگی	محدوده SOC	تعداد گروه‌های SOC	تعداد شبکه‌های عصبی
Local Road	۰/۲ – ۰/۵ ، ۰/۵ – ۰/۶ ، ۰/۶ – ۰/۷ ، ۰/۷ – ۰/۸ ، ۰/۸ – ۰/۹	۵	۵
Collector-Arterial E-F	۰/۲ – ۰/۴ ، ۰/۴ – ۰/۵ ، ۰/۵ – ۰/۶ ، ۰/۶ – ۰/۷ ، ۰/۷ – ۰/۸ ، ۰/۸ – ۰/۹	۶	۶
Collector-Arterial C-D		۶	۶
Collector-Arterial A-B		۶	۶

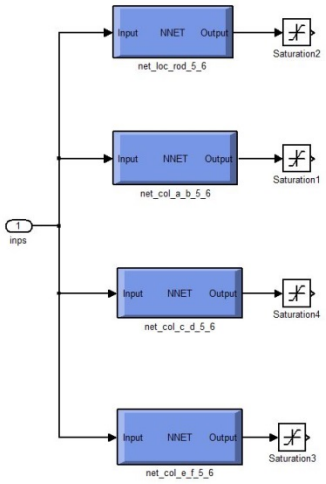
جدول ۳ – مشخصات شبکه‌های عصبی برای سیکل رانندگی Local Road

محدوده SOC	تعداد نرون در لایه پنهان اول	تعداد نرون در لایه پنهان دوم	MSE برای خروجی داده‌های اعتبارسنجی
۰/۲ – ۰/۵	۱۰	۱۵	۰/۰۰۵
۰/۵ – ۰/۶	۳۰	۶۰	۰/۰۳۱
۰/۶ – ۰/۷	۴۰	۶۰	۰/۰۲۵
۰/۷ – ۰/۸	۳۰	۶۰	۰/۰۱۱
۰/۸ – ۰/۹	۳۰	۴۰	۰/۰۱

مجموعه مدل ارائه‌شده به‌عنوان جایگزین یک استراتژی کنترل بهینه برای سیستم قوای محرکه بکار می‌رود. ازاین‌رو خروجی مدل بایستی متناظر با خروجی استراتژی کنترل بهینه موجود باشد. همان‌طورکه در مشاهده می‌شود. گشتاور موتور احتراق‌داخلی به‌عنوان متغیر خروجی مجموعه‌مدل شبکه‌ی عصبی درنظر گرفته‌شده‌است. با این انتخاب، روی مقدار گشتاور موتور احتراق داخلی کنترل وجود دارد و مقدار گشتاور پمپ–موتور هیدرولیکی با تغییر مقدار گشتاور مطلوب راننده تغییر می‌کند. پس از طراحی ساختار مجموعه‌مدل شبکه‌ی عصبی، یک مدل متناظر با هر شبکه برای هر بازه از SoC در محیط Simulink ایجاد شده‌است. نمونه‌ای از مدل‌های ایجادشده در شکل ۸ نشان داده شده‌است.



شکل ۶ – ساختار مجموعه‌مدل شبکه عصبی ایجادشده [۵]

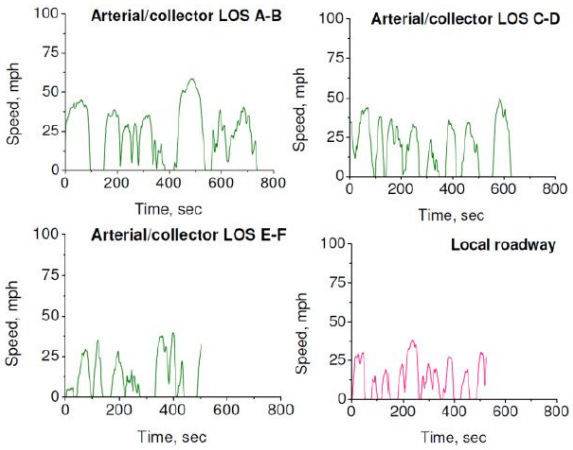


شکل ۷ – نمونه‌ای از مدل شبکه‌های عصبی در نرم‌افزار [Simulink]

٦- نتایج شبیه‌سازی‌ها

با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی ارائه‌شده در این مقاله، استراتژی کنترل بهینه متناظر با چهار سیکل رانندگی استاندارد بدست آمده‌است. این چهار سیکل توسط مؤسسه سیرا در سال ۱۹۹۷ بعنوان سیکل‌های رانندگی استاندارد جهت حرکت خودرو در مسیرهای شهری معرفی شده‌اند [۱۶]. در این‌جا باتوجه‌به مسیر حرکت اتوبوس‌های شهری که دارای شروع-توقف‌های بسیاری می‌باشد، این سیکل‌ها انتخاب شده‌اند. چهار سیکل رانندگی موردنظر در شکل ۸ نشان داده شده‌است.

به‌منظور بررسی عملکرد الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی روبه‌جلو، نتایج شبیه‌سازی مدل اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی با یک استراتژی کنترل قانون‌مند [۱۰] و استراتژی کنترل بهینه ارائه‌شده در این مقاله در جدول ۴ مقایسه شده‌است. همان‌طورکه در مقدمه اشاره شد، در یک استراتژی کنترل قانون‌مند هیچ روند بهینه‌سازی وجود ندارد و اصول آن براساس نظرات افراد خبره آشنا به سیستم موردنظر تعیین می‌گردد.



شکل ۸ – ساختار مجموعه‌مدل شبکه عصبی ایجادشده [۵]

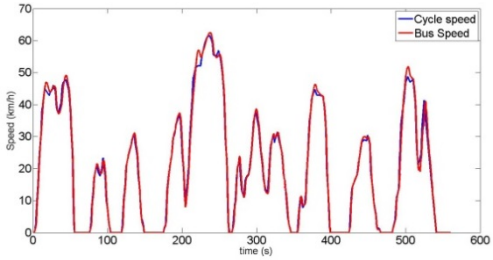
مشاهده می‌شود که استفاده از استراتژی کنترل بهینه به مقدار چشمگیری مصرف سوخت اتوبوس را کاهش داده‌است.

جدول ۴- مقایسه نتایج مصرف سوخت اتوبوس هیبرید هیدرولیک با استفاده از استراتژی کنترل‌های بهینه و قانون‌مند

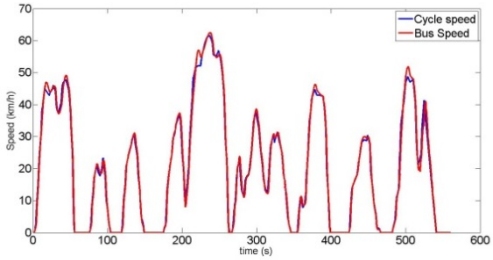
سیکل رانندگی	استراتژی کنترل	مقدار مصرف سوخت (لیتر بر ۱۰۰ کیلومتر)	درصد کاهش مصرف سوخت	خطای سرعت (mse)
Col/Art a-b	قانون‌مند	۳۸/۳۵	۰	۰/۰۱۲
Col/Art a-b	بهینه	۳۴/۳۹	۱۰/۳۳	۰/۰۲۴۶
Col/Art c-d	قانون‌مند	۴۶/۳	۰	۰/۰۱۸۸
Col/Art c-d	بهینه	۴۱/۹۶	۹/۳۷	۰/۰۲۶۶
Col/Art e-f	قانون‌مند	۵۴/۴۸	۰	۰/۰۱۳۳
Col/Art e-f	بهینه	۴۹/۸۵	۸/۵	۰/۰۱۶۵
Loc Rod	قانون‌مند	۴۶/۲۱	۰	۰/۰۰۶۷
Loc Rod	بهینه	۴۳/۰	۶/۹۵	۰/۰۱۴۳

باتوجه به نتایج جدول ۴ مشاهده می‌شود که با استفاده از استراتژی کنترل بهینه‌ی بدست‌آمده از الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی، مقدار متوسط مربعات خطا بین سرعت اتوبوس و سرعت سیکل رانندگی افزایش یافته‌است. باید درنظر داشت که در الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی ارائه‌شده، تابع هزینه تنها شامل مصرف سوخت اتوبوس می‌باشد. از این‌رو، الگوریتم پیشنهادشده هیچ ضمانتی در مورد کاهش خطای سرعت اتوبوس ارائه نمی‌کند. بعلاوه مقدار خطای سرعت ناچیز است و می‌توان از آن صرفنظر نمود. نمودار سرعت اتوبوس و سیکل رانندگی برای سیکل Local RoadWay با استفاده از استراتژی کنترل‌های قانون‌مند و بهینه در شکل ۹ و شکل ۱۰ نشان داده شده‌است.

به‌منظور درک دلیل کاهش مصرف سوخت اتوبوس هیبرید با استفاده از استراتژی کنترل بهینه، نمودار نقاط عملکردی موتور احتراق‌داخلی در این حالت در شکل ۱۱ برای سیکل رانندگی Art./Col. A-B نشان داده شده‌است. این نمودار برای شبیه‌سازی با استراتژی کنترل قانون‌مند در شکل ۱۲ آمده‌است. مشاهده می‌شود که با اعمال استراتژی کنترل بهینه، موتور احتراق داخلی در محدوده‌ی با بازده‌ی عملکردی بالاتر فعالیت می‌کند. همین امر موجب کاهش مصرف سوخت اتوبوس شده‌است. بایستی توجه داشت که نتایج شبیه‌سازی ارائه‌شده در اینجا،



شکل ۹ – مقایسه سرعت اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی (استراتژی کنترل قانون‌مند) با سرعت سیکل رانندگی



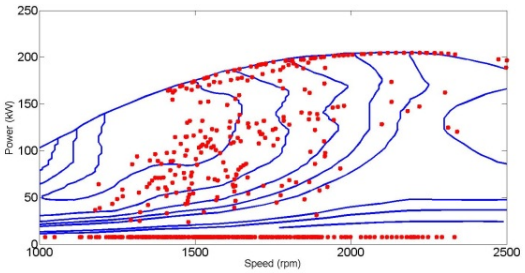
شکل ۱۰ – مقایسه سرعت اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی (استراتژی کنترل بهینه) با سرعت سیکل رانندگی

برای یک سیستم قوای محرکه هیبرید هیدرولیک می‌باشد. در این سیستم، باتوجه به پایین بودن چگالی انرژی منبع دوم قدرت، استفاده از موتور احتراق‌داخلی در محدوده‌ی گسترده‌تری نسبت به میزان معمول در خودروهای هیبرید الکتریکی می‌باشد. از این‌رو امکان قرارگیری کامل نقاط کارکرد روی خط ماکزیمم بازده، وجود ندارد.

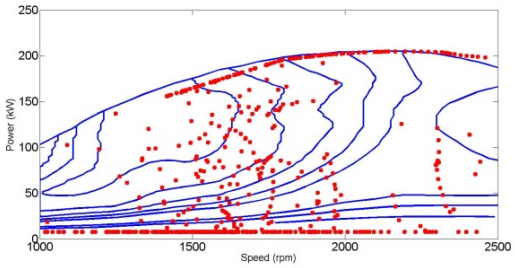
کیفیت عملکرد مجموعه‌مدل‌های شبکه عصبی را نیز می‌توان با شبیه‌سازی مدل اتوبوس به‌صورت آنلاین مشاهده نمود. در جدول ۵ مقادیر مصرف‌سوخت اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی با استفاده از استراتژی کنترل بدست‌آمده از الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی بصورت

آفلاین و آنلاین مقایسه شده‌است. همان‌طورکه اشاره شد، اعمال استراتژی کنترل بهینه بصورت آنلاین با استفاده از مجموعه‌مدل شبکه‌ی عصبی انجام گرفته‌است. مشاهده می‌شود که اختلاف مقادیر مصرف سوخت ناچیز است. بنابراین مجموعه‌مدل‌های شبکه عصبی به‌عنوان جایگزین استراتژی کنترل‌های بهینه برای شبیه‌سازی مدل اتوبوس هیبرید در چهار سیکل موردنظر قابل‌استفاده می‌باشند.

همان‌طورکه در جدول ۵ دیده می‌شود، تفاوت میان مقادیر دو گروه مصرف سوخت برای ۴ سیکل رانندگی بسیار ناچیز است. این نزدیکی پاسخ‌ها، صحت مدل‌سازی صورت‌گرفته را نشان می‌دهد. اینکه چرا در دو مورد، مصرف سوخت آنلاین از آفلاین کمتر است، ناشی از ماهیت روبه‌جلو بودن مدل قوای محرکه هیبرید هیدرولیک ایجادشده در محیط Simulink است. به‌عبارت‌دیگر، این امکان وجود دارد که براساس سیگنال کنترلی ایجادشده، میزان مسافت پیموده‌شده توسط هریک از سیستم‌ها قدری متفاوت باشد. این تفاوت در میزان مصرف سوخت محاسبه‌شده تأثیر خود را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ – نقاط کارکرد موتور احتراق‌داخلی در اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی (استراتژی کنترل بهینه)



شکل ۱۲- نقاط کارکرد موتور احتراق‌داخلی در اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی (استراتژی کنترل قانون‌مند)

جدول ۵ – مقایسه نتایج مصرف سوخت اتوبوس هیبرید هیدرولیک با استفاده از استراتژی کنترل بهینه به‌صورت آنلاین و آفلاین

استراتژی کنترل	سیکل Col/Art a-b	سیکل Col/Art c-d	سیکل Col/Art e-f	سیکل Loc/Rod
بهینه‌ی آفلاین	۳۴/۳۹	۴۱/۹۶	۴۹/۸۵	۴۳/۰
بهینه‌ی آنلاین	۳۴/۴۲	۴۰/۹۵	۴۹/۰۹	۴۲/۹۶

جمع‌بندی

طراحی یک استراتژی کنترل مناسب برای سیستم قوای محرکه هیبرید، بسیار وابسته به نوع سیکل رانندگی است. در این مقاله، یک استراتژی کنترل بهینه با استفاده از روش برنامه‌ریزی دینامیکی روبه‌جلو برای اتوبوس هیبرید هیدرولیک موازی طراحی شده‌است. همچنین به‌منظور استفاده آنلاین از استراتژی کنترل بهینه بدست‌آمده، مجموعه‌ای از شبکه‌های عصبی با استفاده از نتایج روش برنامه‌ریزی دینامیکی آموزش دیده‌اند. سپس مدل‌های متناظر شبکه‌های عصبی ایجاد و در مدل کلی اتوبوس هیبرید هیدرولیک قرار داده شده‌است. نتایج شبیه‌سازی‌ها برتری استراتژی کنترل بهینه را نسبت به یک استراتژی کنترل قانون‌مند نشان می‌دهد. همچنین براساس این نتایج، مجموعه‌مدل شبکه عصبی توانایی مدل‌سازی استراتژی کنترل بهینه را داراست و با استفاده از این مجموعه می‌توان استراتژی کنترل بهینه را به‌صورت آنلاین روی مدل اتوبوس اجرا نمود.

تقدیر و تشکر

لازم است در اینجا از مرکز تحقیقات خودرو، سوخت و محیط زیست دانشگاه تهران تشکر شود.

مراجع

[1] Ehsani, M., Gao, Y., and Emadi, A., Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory and Design, 2nd ed., CRC Press, USA, 2009.

[2] Kim, Y. J., “Integrated Modelinh and hardware-in-the-loop study for systematic evaluation of hydraulic hybrid propulsion options”. PhD Thesis, University of Michigan, USA, 2008.

[3] Ragaei Salmasi, F., “Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles: Evolution, Classification, Comparison and Future Trends,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56(5), pp. 2393-2402, September 2007.

[4] Dosthosseini R., Kouzani A. Z. and Sheikholeslam F., “Direct Method for optimal Power Management in Hybrid Electric Vehicles,” *International Journal of Automotive Technology*, 12(6), pp. 943-950, 2011.

[5] صفائی، علی، مدل‌سازی و طراحی استراتژی کنترل هوشمند برای اتوبوس هیبرید هیدرولیک، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۹۱.

[6] Wu, P., Luo, N., Fronczak, F. J. and Beachly N. H., “Fuel economy and operating characteristics of a hydropneumatic energy storage automobile,” *SAE paper 851678*, 1985.

[7] Wu B., Lin CC., Filipi Z., *et al*, "Optimal power management for hydraulic hybrid delivery truck," *Vehicle Syst Dyn*, pp. 23-40, 2004.

[8] Hui S., Ji-Hai J. and Xin W., "Torque Control strategy for a parallel hydraulic hybrid vehicle," *Journal of Terramechanics*, 46, pp. 259-265, 2009.

[9] Safaei, A., Esfahanian, V., Ha'iri-Yazdi, M. R. *et al*, "Optimized Control Strategy Based on the Driving Cycle Type for a hydraulic hybrid bus," Proceedings of ASME 11th biennial conference on Engineering Systems Design and Analysis, Nantes, France, July 2012.

[10] Esfahanian V., Safaei A. *et al*, 2012, "Design and Modeling of a Parallel Hydraulic Hybrid Bus," Proceedings of International Conference Applications and Design in Mechanical Engineering (ICADME2012), Penang, Malaysia, February 2012.

[11] Seinfeld J. H. and Lapidus L., "Aspects of Forward Dynamic Programming Algorithm," *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 7, pp. 475-478, 1968.

[12] Bellman R., "Dynamic Programming," *Princeton University Press*, Princeton, USA, 1957.

[13] Kirk, D. E., *Optimal Control Theory: An Introduction*, Dover Publications Inc., USA, 1970.

[14] Dreyfus, S. E., "Dynamic Programming and Calculus of Variations," *Academic Press*, New York City, USA, 1965.

[15] Wegleiter, H. *et al*, "Fast Quasi Optimal Control of Hybrid Electric Vehicles considering Limiting Conditions," European Electric Vehicle Congress, Brussels, Belgium, 2011.

[16] Carlson, T. R. and Austin, R. C., "Development of Speed Correction Cycles," Sierra Research Inc., Sacramento, California, Report SR97-04-01, 1997.