



## طراحی و پیاده‌سازی یک شبیه‌ساز مدل در حلقه برای صحت‌گذاری نرم‌افزار کنترل خودرو در یک اتوبوس هیبرید الکتریکی سری

محمدجواد اسفندیاری<sup>1</sup>، وحید اسفهانیان<sup>2</sup>، محمدرضا حائری یزدی<sup>3</sup>، حسن نهضتی<sup>1</sup>، امین صالحی<sup>4</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، پژوهشکده خودرو، سوخت و محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

4- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، پژوهشکده خودرو، سوخت و محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران

\* تهران، صندوق پستی 11155-4563، پست الکترونیکی myazdi@ut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 25 فروردین 1393

پذیرش: 23 اردیبهشت 1393

ارائه در سایت: 08 مهر 1393

کلید واژگان:

هیبرید الکتریکی

شبیه‌ساز

مدل در حلقه

نرم‌افزار کنترل خودرو

### چکیده

پیشگیری‌های موجود در سیستم‌های کنترل خودروهای هیبرید اهمیت استفاده از بسترهای تست مناسب جهت ارزیابی واحدهای کنترل الکترونیکی در این خودروها را بیشتر کرده است. در مراحل اولیه طراحی سیستم‌های کنترلی امکان انجام شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه وجود ندارد چرا که هنوز اجزا نمونه‌سازی نشده‌اند. در این شرایط از شبیه‌سازی مدل در حلقه استفاده می‌شود که در آن بدون نیاز به سخت‌افزار واقعی، مدل طراحی شده برای سیستم کنترلی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این مقاله، شبیه‌سازی مدل در حلقه برای تأیید صحت عملکرد نرم‌افزار کنترل خودرو در یک اتوبوس هیبرید الکتریکی سری انجام شده است. بدین منظور متناسب با ورودی/خروجی‌های نرم‌افزار کنترل خودرو و با در نظر گرفتن دینامیک حاکم بر اجزا مختلف خودرو یک شبیه‌ساز جامع برای اتوبوس هیبرید طراحی شده است. بوسیله این بستر تست، کاربر می‌تواند به شکل راننده واقعی عمل کرده و رژیم‌های مختلف رانندگی را ارزیابی کند. در این شبیه‌ساز، همه زیرسیستم‌ها به صورت ماژولار در محیط نرم‌افزار لیبویو مدل‌سازی شده‌اند و شبیه‌ساز طراحی شده می‌تواند با دقت قابل قبولی به شکل بلادرنگ اجرا شود. بنابراین، می‌توان از آن در بستر تست سخت‌افزار در حلقه برای توسعه هر جز از خودرو استفاده کرد. از این طریق، با کمترین هزینه و در کوتاه‌ترین زمان ممکن مسیر توسعه سیستم کنترلی در اتوبوس هیبرید طی خواهد شد. شبیه‌ساز طراحی شده بوسیله نتایج حاصل از تست‌های تجربی راستی‌آزمایی شده است. نتایج نشان می‌دهد که تمامی الگوریتم‌های کنترلی موجود در نرم‌افزار کنترل خودرو بوسیله این بستر تست قابل ارزیابی و راستی‌آزمایی است.

## Design and Implementation of a Model-in-the-Loop Simulator for Verification of the Vehicle Control Software in a Series Hybrid Electric Bus

Mohammad Javad Esfandyari<sup>1</sup>, Vahid Esfahanian<sup>2</sup>, Mohammad Reza Hairi Yazdi<sup>3\*</sup>, Hassan Nehzati<sup>1</sup>, Amin Salehi<sup>4</sup>

1- Fuel and Environment Research Institute, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Fuel and Environment Research Institute, University of Tehran, Tehran, Iran

3- School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

4- Fuel and Environment Research Institute, University of Tehran, Tehran, Iran

\*P.O.B. 11155-4563, Tehran, myazdi@ut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 14 April 2014

Accepted 13 May 2014

Available Online 30 September 2014

Keywords:

Hybrid electric

Simulator

Model-in-the-loop

Vehicle control software

### ABSTRACT

Due to the complexity in the control system of hybrid vehicles, the electronic control units should go through extensive testing before getting installed in a prototype vehicle. In the first stages of the development process, Hardware-in-the-Loop (HiL) simulation can not be performed because the hardware components of the vehicle are not yet available. In this case, Model-in-the-loop (MiL) simulation is used which couples the designed control software with an environment simulation with no need for a special hardware. In this paper, the MiL simulation is introduced for verification of the vehicle control software in a series hybrid electric bus. To do so, considering the dynamic behavior of various components of the vehicle, a simulator of the hybrid bus is designed by going through with the input/outputs of the vehicle control software. Using the designed test bench, the user can act as a real driver and experience different driving regimes and analyze the control software commands. In the designed simulator, all subsystems are simulated separately in LabVIEW environment and real-time simulation is achieved with an acceptable error. Therefore, it can be used in a HiL test bench for testing each of the vehicle components. The designed simulation model has been validated using real test results. Using that, results show that all control functions in the vehicle control software can be tested and verified with no cost and in the shortest possible time.

Please cite this article using:

M.J. Esfandyari, V. Esfahanian, M.R. Hairi Yazdi, H. Nehzati, A. Salehi, Design and Implementation of a Model-in-the-Loop Simulator for Verification of the Vehicle Control Software in a Series Hybrid Electric Bus, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 12, pp. 13-22, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M.J. Esfandyari, V. Esfahanian, M.R. Hairi Yazdi, H. Nehzati, A. Salehi, Design and Implementation of a Model-in-the-Loop Simulator for Verification of the Vehicle Control Software in a Series Hybrid Electric Bus, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 12, pp. 13-22, 2014 (In Persian)

## 1- مقدمه

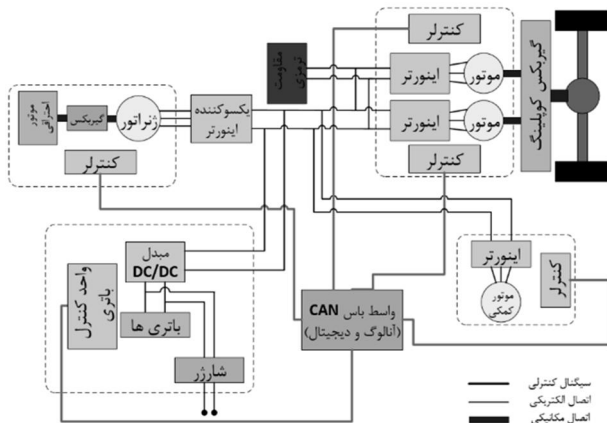
مراحل طراحی و ساخت آن در پژوهشکده خودرو، سوخت و محیط زیست دانشگاه تهران انجام شده است. در قسمت 2، قسمت‌های تشکیل‌دهنده نرم‌افزار کنترل خودرو و وظایف هر قسمت به اختصار توضیح داده می‌شود. در قسمت 3 به طراحی شبیه‌سازی که با نرم‌افزار کنترل خودرو ارتباط حلقه‌بسته ایجاد می‌کند، می‌پردازیم. نتایج راستی‌آزمایی مدل طراحی شده برای شبیه‌ساز و همچنین نمونه‌هایی از نتایج تست مدل در حلقه در قسمت 4 آمده است.

## 2- نرم‌افزار کنترل خودرو در اتوبوس هیبرید الکتریکی سری

اتوبوس هیبرید الکتریکی درون شهری در پژوهشکده خودرو، سوخت و محیط زیست دانشگاه تهران با هدف کسب دانش فنی طراحی و ساخت خودروهای هیبرید در داخل کشور طراحی و نمونه‌سازی شده است (شکل 1). موتورهای کششی که با یک جعبه‌دنده کوپلینگ به چرخ‌ها متصل هستند، رانش اتوبوس هیبرید را به عهده داشته و توسط درایوهای طراحی شده که انرژی الکتریکی آن‌ها توسط مجموعه موتور دیزل-ژنراتور یا 168 سلول باتری لیتیوم پلیمری تأمین می‌گردد، کنترل می‌شوند. موتور دیزل توسط یک جعبه‌دنده افزایشنده به ژنراتور متصل شده و با درایو طراحی‌شده کنترل می‌شود. مجموعه باتری‌های یک شده در 12 جعبه نصب‌شده و با آب خنک‌کاری می‌شوند. انرژی ترمزی بازیاب شده و در باتری ذخیره می‌شود. مجموعه موتور کمکی وظیفه رانش تمامی تجهیزات جانبی اعم از کمپرسور، پمپ باد، دینام و غیره را دارد. کنترل‌کننده‌های هر قسمت به وسیله پروتکل CAN<sup>6</sup> با کنترل‌کننده مرکزی خودرو در ارتباط هستند. در سامانه توزیع انرژی الکتریکی، هر قسمت توسط کنترکتور و فیوز مربوطه واقع در جعبه کنترکتورها حفاظت می‌شوند. مشخصات اتوبوس هیبرید الکتریکی سری در جدول 1 آمده است.

جدول 1 مشخصات اتوبوس هیبرید الکتریکی سری

داده‌های اتوبوس هیبرید	
جرم موثر (بدون مسافر)	11500 کیلوگرم
سطح جلویی	6/75 مترمربع
ضریب پسا	0/79
ضریب مقاومت غلظتی	0/01
شعاع چرخ	0/466 متر
راندمان کلی گیربکس و دیفرانسیل	0/9
نسبت سرعت بین موتور و چرخ	17/415



شکل 1 نمایی از چیدمان اجزاء مختلف و ارتباط بین آن‌ها در اتوبوس هیبرید

آلودگی هوا و کاهش منابع سوخت‌های فسیلی دو معضلی است که دولت‌ها را به سمت استفاده از زنجیره‌های قدرت هیبرید در ناوگان حمل و نقل سوق داده است. افزایش تقاضا برای خودروهای هیبرید مستلزم کاهش مدت زمان طراحی و توسعه این خودروهاست. افزون بر آن، با توجه به اینکه در خودروهای هیبرید بیش از یک منبع انرژی وجود دارد، سیستم‌های کنترلی در این خودروها نسبتاً پیچیده است.

شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه<sup>1</sup> به عنوان راهکاری مطمئن برای کم کردن فاصله زمانی بین مدل‌سازی سیستم کنترلی و پیاده‌سازی نمونه واقعی از آن شناخته می‌شود [2,1]. به عنوان نمونه، در مرجع [3]، از شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه برای طراحی و راستی‌آزمایی سیستم مدیریت انرژی در یک اتوبوس هیبرید الکتریکی سری-موازی استفاده شده است. همچنین در مرجع [4]، نمونه‌ای از بکارگیری شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه برای توسعه درایو موتورهای کششی در خودروهای هیبرید در شرکت فورد<sup>2</sup> آمده است. در مراحل اولیه توسعه سیستم‌های کنترلی امکان انجام تست سخت‌افزار در حلقه وجود ندارد چرا که هنوز نمونه‌های واقعی از اجزا در دسترس نیستند. در این شرایط، راستی‌آزمایی نرم‌افزارهای کنترلی بوسیله تست مدل در صورت می‌پذیرد. در این نوع تست، بدون نیاز به نمونه‌های واقعی از اجزا و هزینه‌های ناشی از استفاده از آن‌ها در حلقه کنترلی می‌توان عملکرد نرم‌افزارهای کنترلی طراحی‌شده را مورد ارزیابی و راستی‌آزمایی قرار داد. مثلاً در [5]، یک محیط شبیه‌سازی مدل در حلقه برای خودروی پیل سوختی طراحی و راستی‌آزمایی شده است.

در این مقاله، تست مدل در حلقه برای راستی‌آزمایی عملکرد نرم‌افزار کنترل خودرو<sup>4</sup> در یک اتوبوس هیبرید الکتریکی سری انجام شده است. بدین منظور، متناسب با ورودی/خروجی‌های نرم‌افزار کنترل خودرو و با در نظر گرفتن دینامیک حاکم برای اجزا مختلف خودرو که در ارتباط با واحد کنترل هستند، یک شبیه‌ساز جامع برای اتوبوس هیبرید در شش بخش طراحی شده است. شبیه‌سازی به شکل ماژولار و در محیط نرم‌افزار LabVIEW<sup>5</sup> انجام شده است و در نتیجه، با استفاده از قابلیت‌های گرافیکی این نرم‌افزار کاربر می‌تواند به شکل راننده واقعی عمل کرده و با اعمال فرمان مختلف، رژیم‌های مختلف رانندگی را مورد ارزیابی قرار دهد. بستر تست مدل در حلقه‌ی طراحی‌شده روی هر رایانه تحت ویندوز قابل اجرا است. در مقایسه با سایر پژوهش‌های انجام شده در زمینه شبیه‌سازی مدل در حلقه که در بالا به برخی از آن‌ها اشاره شد، شبیه‌ساز طراحی شده می‌تواند با دقت قابل قبولی به شکل بلادرنگ اجرا شود و بنابراین، می‌توان از آن در بستر تست سخت‌افزار در حلقه برای توسعه هر جز از خودرو، از جمله واحد کنترل مرکزی که نرم‌افزار کنترل خودرو روی آن پیاده‌سازی خواهد شد، استفاده کرد. از این طریق، با کمترین هزینه و در کوتاه‌ترین زمان ممکن مسیر توسعه سیستم کنترلی در اتوبوس هیبرید طی خواهد شد. شبیه‌ساز طراحی‌شده بوسیله نتایج حاصل از تست‌های تجربی صحنه‌گذاری شده است. نتایج نشان می‌دهد که تمامی الگوریتم‌های کنترلی موجود در نرم‌افزار کنترل خودرو، بوسیله این بستر تست قابل ارزیابی و راستی‌آزمایی است.

خودروی هیبرید مورد نظر یک اتوبوس هیبرید الکتریکی سری است که

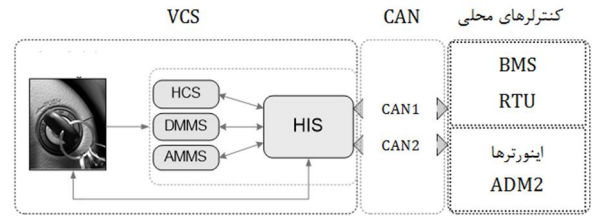
- 1- Hardware-in-the-loop simulation
- 2- Ford
- 3- Model-in-the-loop
- 4- Vehicle Control Software (VCS)
- 5- LabVIEW

6- Controller Area Network

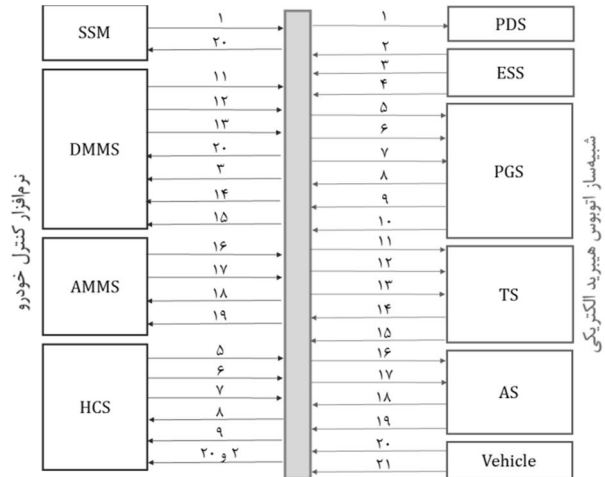
مربوط به هر قسمت، که بیانگر وضعیت کارکرد آن قسمت است، کنترل‌های لازم را با ارسال فرامین مختلف انجام می‌دهد. واحد کنترل مربوط به هر قسمت وظیفه ترجمه و اعمال فرمان دریافتی از واحد کنترل مرکزی را دارد. ساختار داخلی نرم‌افزار کنترل خودرو و ارتباط آن با اجزای خودرو در شکل 2 مشاهده می‌شود. با چرخش کامل سویچ خودرو، نرم‌افزار شروع به پردازش و تبادل داده‌ها می‌کند. با توجه به شکل 2، VCS از پنج بخش تشکیل شده است:

- ✓ مدیریت سویچ (SSM1)
- ✓ نرم‌افزار کنترل موتورهای کششی (DMMS2)
- ✓ نرم‌افزار کنترل موتور احتراقی و ژنراتور (HCS3)
- ✓ نرم‌افزار کنترل موتور کمکی (AMMS4)
- ✓ نرم‌افزار ارتباطی هیبرید (HIS5)

بخش مدیریت سویچ در نرم‌افزار VCS با توجه به وضعیت سویچ خودرو، وظیفه قطع و وصل کردن کنتاکتورهای مجموعه باتری و مجموعه قدرت را به عهده دارد. نرم‌افزار DMMS برقراری ارتباط بین راننده و موتورهای کششی و اعمال ملاحظات حفاظتی مربوط به موتور و باتری‌ها را عهده‌دار می‌باشد. نرم‌افزار HCS نیز شرایط کاری موتور احتراقی و ژنراتور را مشخص می‌نماید. نرم‌افزار AMMS فرم ساده‌شده نرم‌افزار DMMS است که برای کنترل موتور کمکی اتوبوس بکار می‌رود. نرم‌افزار HIS نیز ارتباط بین نرم‌افزار و اجزای خودروی هیبرید را برقرار می‌سازد.



شکل 2 ساختار داخلی VCS و ارتباط آن با اجزای خودرو



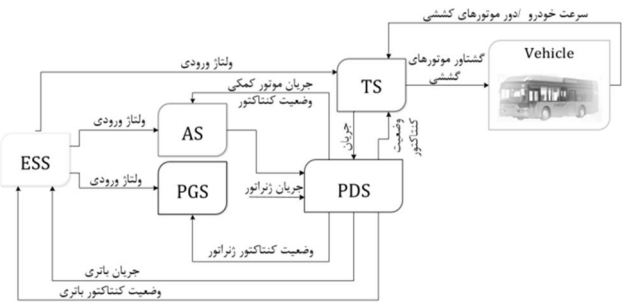
شکل 3 قسمت‌های مختلف شبیه‌ساز و VCS و پیام‌های مربوط به هر قسمت

### 3- طراحی شبیه‌ساز اتوبوس هیبرید

برای انجام تست مدل در حلقه به شبیه‌سازی از خودرو نیاز است که رفتار دینامیکی اجزا مختلف را در پاسخ به فرامین دریافتی از نرم‌افزار کنترل خودرو شبیه‌سازی کند و به شکل حلقه بسته در ارتباط با آن قرار گیرد. به عنوان یک گام مهم، فرامین ارسالی/دریافتی از/به نرم‌افزار کنترل خودرو شناسایی شده‌اند. طراحی شبیه‌ساز بر اساس این ورودی/خروجی‌ها و با در نظر گرفتن رفتار دینامیکی اجزاء در شش قسمت انجام شده است: سیستم ذخیره انرژی<sup>6</sup>، سیستم تولید قدرت<sup>7</sup>، سیستم کمکی<sup>8</sup>، سیستم توزیع توان<sup>9</sup>، سیستم کششی<sup>10</sup> و خودرو<sup>11</sup>. شکل 3 قسمت‌های مختلف شبیه‌ساز و نرم‌افزار کنترل خودرو و جدول 2 ورودی/خروجی‌های مربوط به هر قسمت را با توجه به شماره‌گذاری موجود در شکل 3 نشان می‌دهد. همچنین در شکل 4 ارتباط بین قسمت‌های مختلف شبیه‌ساز نشان داده شده است.

جدول 2 ورودی/خروجی‌های قسمت‌های مختلف شکل 3

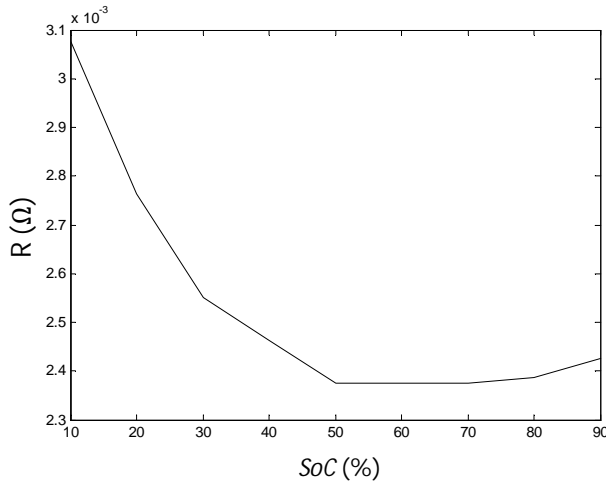
توضیحات	شماره	زیرسیستم ورودی/خروجی
وضعیت کنتاکتورها (تغذیه، پیش‌شارژ، اصلی)	1	PDS
SoC	2	
ضریب تصحیح شارژ/دشارژ	3	ESS
جریان شارژ/دشارژ	4	
موتور احتراق داخلی-ژنراتور روشن/خاموش	5	
مود کنترلی موتور احتراق داخلی-ژنراتور	6	
فرمان دور/گشتاور برای موتور احتراق داخلی-ژنراتور	7	PGS
دور/گشتاور واقعی موتور احتراق داخلی-ژنراتور	8	
ولتاژ/جریان ژنراتور	9	
مصرف سوخت موتور احتراق داخلی	10	
موتور کششی فعال/غیرفعال	11	
جهت چرخش موتور کششی	12	
فرمان گشتاور موتور کششی	13	TS
دور/گشتاور واقعی موتور کششی	14	
ولتاژ/جریان موتور کششی	15	
موتور کمکی فعال/غیرفعال	16	
فرمان دور موتور کمکی	17	AS
دور/گشتاور واقعی موتور کمکی	18	
ولتاژ/جریان موتور کمکی	19	
فرامین راننده	20	Vehicle
دور موتور کششی/سرعت خودرو	21	



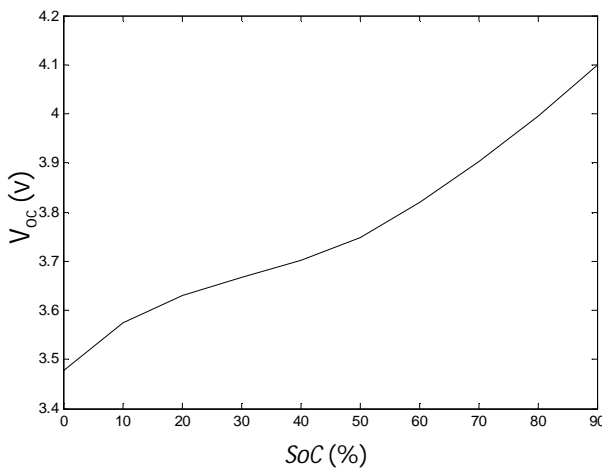
شکل 4 قسمت‌های مختلف شبیه‌ساز و ارتباط بین آن‌ها

- 1- Start Switch Manager
- 2- Drive Motor Management Software
- 3- Hybrid Control Software
- 4- Auxiliary Motor Management Software
- 5- Hybrid Interfacing System
- 6- Energy Storage System (ESS)
- 7- Power Generation System (PGS)
- 8- Auxiliary System (AS)
- 9- Power Distribution System (PDS)
- 10- Traction System (TS)
- 11- Vehicle

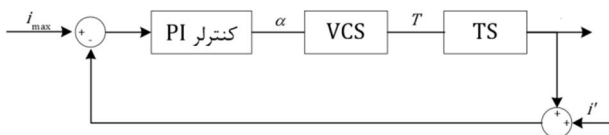
نرم‌افزار کنترل خودرو در اتوبوس هیبرید الکتریکی که روی واحد کنترل مرکزی پیاده‌سازی می‌شود، وظیفه کنترل عملکرد تمامی قسمت‌های خودرو را بر عهده دارد و این کار را از طریق ارسال پیام‌های مختلف به واحد کنترل مربوط به هر قسمت انجام می‌دهد. به عبارت دیگر، واحد کنترل مرکزی با دریافت پیام‌های



شکل 5 منحنی تغییرات مقاومت داخلی باتری بر حسب SoC



شکل 6 منحنی تغییرات ولتاژ مدار باز باتری بر حسب SoC



شکل 7 حلقه کنترلی طراحی شده برای محدودسازی جریان حداکثر باتری

جدول 3 ضرایب کنترلرهای مورد استفاده در سیستم مدیریت باتری طراحی شده کنترلرهای مورد استفاده در سیستم مدیریت باتری

نوع محدودسازی	بهره تناسبی	بهره انتگرال‌گیر
حداکثر جریان شارژ	0/3	0/3
حداکثر جریان تخلیه	0/001	0/008
حداکثر ولتاژ	0/1	0/001
حداقل ولتاژ	0/001	0/3

سیستم مدیریت باتری برای انجام این محدودسازی از کنترلرهای PI استفاده می‌کند که ورودی این کنترلرها میزان خطا بین مقدار کنونی و مقدار مجاز و خروجی آن برابر ضریب تصحیح شارژ/تخلیه می‌باشد. شکل 7 حلقه کنترلی طراحی شده برای شبیه‌سازی عمل محدودسازی جریان حداکثر باتری را نشان می‌دهد. در این شکل،  $\alpha$  ضریب تصحیح شارژ/تخلیه است که به نرم‌افزار کنترل خودرو ارسال می‌شود. مقدار گشتاور موتورهای کششی از نرم‌افزار کنترل خودرو دریافت شده و جریان موتورهای کششی محاسبه شده و پس از جمع جبری با جریان مصرفی یا تولیدی سایر اجزا به سیستم ذخیره انرژی

همان‌طور که در شکل 4 دیده می‌شود، جریان مصرفی یا تولیدی اجزا مختلف وارد قسمت سیستم توزیع توان یا PDS شده و از آنجا جریان موردنیاز از باتری مشخص می‌شود. همچنین، ولتاژ ورودی به موتور/ژنراتورها از روی این جریان محاسبه شده و به اجزا ارسال می‌شود.

شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار لیبو انجام شده است. از قابلیت‌های این محیط برنامه‌نویسی گرافیکی، امکان اجرای همزمان کدهای مختلف است که برنامه‌ریزی موازی<sup>1</sup> اطلاق می‌شود. این کار با قرار دادن چند حلقه مجزا در قسمت بلوک دیگرام صورت می‌پذیرد و از این طریق می‌توان قسمت‌های مختلف کد را به شکل مجزا با تعداد تکرارهای مشخص در هر ثانیه اجرا کرد. بدین وسیله دستیابی به شبیه‌سازی بلادرنگ تا حدی امکان‌پذیر خواهد شد. برای این کار، تعداد دفعات تکرار حلقه‌های while در لیبو به نحوی تنظیم شده است که زمان واقعی اجرای هر تکرار<sup>2</sup> در حلقه‌های while، با دقتی قابل قبول (به قسمت 4 مراجعه کنید) برابر با گام زمانی در نظر گرفته شده برای حل معادلات باشد. بنابراین، زمان حل معادلات تقریباً با زمان واقعی تطابق دارد و می‌توان از شبیه‌ساز طراحی شده در بستر تست سخت‌افزار در حلقه نیز استفاده کرد. همچنین، کاربر قادر است ورودی‌ها و پارامترهای کد را در حین اجرا تغییر دهد و به شکل همزمان اثر تغییر پارامترها را مشاهده کند. در بخش‌های بعد به تشریح قسمت‌های تشکیل‌دهنده شبیه‌ساز می‌پردازیم.

### 3-1- سیستم ذخیره انرژی

سامانه ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی از مجموعه جعبه باتری و سیستم مدیریت باتری (BMS) تشکیل شده است. مجموعه جعبه باتری از 168 سلول باتری لیتیوم پلیمر 3/7 ولت ساخت شرکت کوکم<sup>3</sup> با ظرفیت 40 آمپر ساعت تشکیل شده است. سیستم مدیریت باتری وظیفه دیده‌بانی شارژ و سلامت باتری‌ها، حفاظت آن‌ها در مقابل شرایط نامطلوب کاری، برابرسازی شارژ سلول باتری‌ها و ارتباط با نرم‌افزار کنترل خودرو در سامانه هیبرید را بر عهده دارد [6]. با توجه به شکل 3 و شکل 4، مدل طراحی شده برای سیستم ذخیره انرژی با دریافت جریان باتری و وضعیت کنتاکتورهای آن از سیستم توزیع توان به عنوان ورودی، مقادیر سطح شارژ باتری، ضرایب تصحیح شارژ/تخلیه، جریان شارژ/تخلیه و خطاها را به نرم‌افزار کنترل خودرو و ولتاژ باتری را به مدل ماشین‌های الکتریکی ارسال می‌کند. برای مدل‌سازی باتری از یک مدار معادل منبع تغذیه و مقاومت داخلی سری با آن استفاده شده است. مقادیر ولتاژ مدار باز و مقاومت داخلی تابعی از SoC می‌باشند که در شکل 5 و شکل 6 تغییرات این دو پارامتر بر حسب SoC نشان داده شده است که از داده‌های شرکت سازنده استخراج شده‌اند.

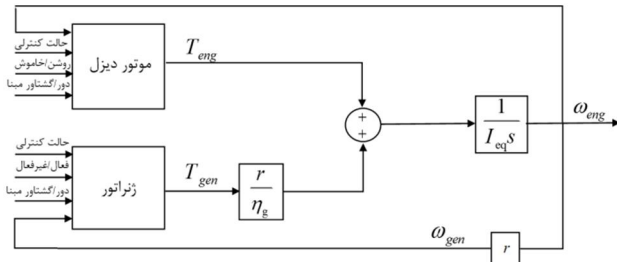
برای محاسبه SoC مجموعه باتری در هر لحظه از رابطه 1 استفاده می‌شود [7]:

$$SoC = SoC_0 + \int_0^t \frac{i(t)}{Q} dt \quad (1)$$

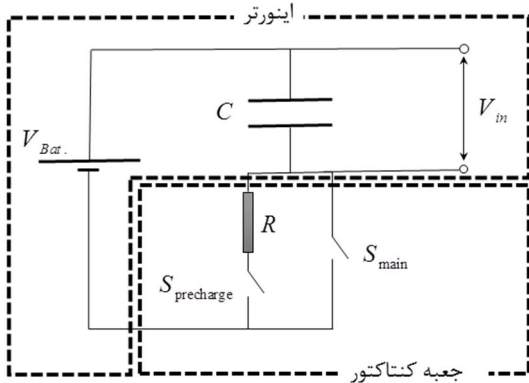
در رابطه 1،  $Q$  و  $SoC_0$  به ترتیب مقادیر ظرفیت باتری و سطح شارژ اولیه باتری را نشان می‌دهند.

برای حفاظت از باتری‌ها در برابر جریان زیاد و یا افزایش و کاهش بیش‌ازحد ولتاژ حین شارژ و تخلیه، گشتاور درخواستی از موتورهای کششی محدود می‌شود. گشتاور درخواستی در ضرایب تصحیح شارژ و تخلیه ضرب می‌شوند که این ضریب توسط سیستم مدیریت باتری ارسال می‌شوند.

1- Parallel Programming  
2- Iteration  
3- Kokam



شکل 8 بلوک دیاگرام مجموعه موتور احتراق داخلی - ژنراتور



شکل 9 مدار معادل RC برای شبیه‌سازی شارژ اولیه خازن موجود در اینورتر

ضرایب کنترل‌های طراحی شده برای موتور احتراق داخلی و ژنراتور در جدول 4 آمده است. در موتور احتراق داخلی، با توجه به اینکه طراحی کنترلر PID که برای تمام حالات عملکرد خوبی داشته باشد قابل حصول نبود، بسته به مثبت یا منفی بودن مبنای گشتاور در ژنراتور دو رابطه برای کنترلر در نظر گرفته شده است. جریان الکتریکی موتور/ژنراتورها با فرض راندمان ثابت برای آن‌ها محاسبه شده است. بنابراین، اندازه جریان الکتریکی از روابط 4 و 5 بدست می‌آید:

$$P_1 = T_1 \omega_1, P_2 = v i, \eta = \frac{P_2}{P_1} \Rightarrow i = \frac{\eta T_1 \omega_1}{v} \quad \text{حالت ژنراتوری} \quad (4)$$

$$P_1 = v i, P_2 = T_1 \omega_1, \eta = \frac{P_2}{P_1} \Rightarrow i = \frac{T_1 \omega_1}{\eta v} \quad \text{حالت موتوری} \quad (5)$$

که در معادله 4 و 5،  $\eta$  راندمان عملکردی موتور/ژنراتور است. لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی، جریان مصرفی با علامت مثبت و جریان تولیدی با علامت منفی لحاظ شده‌اند. بنابراین جریان در حالت ژنراتوری با علامت منفی و جریان در حالت موتوری با علامت مثبت نشان داده می‌شوند.

برای تأمین ولتاژ ورودی به موتور/ژنراتور از یک سیستم پیش‌شارژ استفاده می‌شود. مجموعه پیش‌شارژ در اتوبوس هیبرید متشکل از یک رله و یک مقاومت اهمی است و وظیفه شارژ اولیه خازن‌های اینورترها را بر عهده دارد. عملکرد این مجموعه به این شکل است که در ابتدا مسیر جریان از طریق مجموعه پیش‌شارژ بسته می‌شود. وجود مقاومت پیش‌شارژ مانع از کشیدن جریان بسیار زیاد توسط خازن‌ها از مجموعه باتری‌ها در لحظه اولیه شارژ می‌شود. پس از مدت زمان مشخصی این مجموعه از مسیر خارج شده و مسیر جریان از طریق کنتاکتورهای اصلی بسته می‌شود. برای شبیه‌سازی عمل پیش‌شارژ در شارژ خازن اینورتر از یک مدار معادل RC استفاده شده است. با ارسال فرمان پیش‌شارژ از واحد کنترل مرکزی، خازن موجود در اینورتر شروع به شارژ شدن می‌کند و وقتی شارژ تمام شد، ولتاژ دو سر خازن برابر ولتاژ مجموعه باتری شده و به عنوان ولتاژ ورودی به ژنراتور اعمال می‌شود. شکل 9 مدار معادل مربوطه را نشان می‌دهد.

بازخورد داده می‌شود. مدارهای مشابهی برای محدودسازی ولتاژ مجموعه باتری طراحی شده است. ضرایب بهره کنترل‌های طراحی شده برای هر قسمت در جدول 3 آمده است.

### 3-2- سیستم تولید قدرت

این قسمت در اتوبوس هیبرید شامل موتور احتراق داخلی به‌همراه کنترلر موتور، ژنراتور به‌همراه اینورتر مربوطه و یک گیربکس تک‌سرعت می‌باشد. موتور احتراق داخلی مورد استفاده در اتوبوس هیبرید از نوع دیزل با توان 130 کیلووات و ژنراتور مورد استفاده از نوع مغناطیس دائم با توان 135 کیلووات است که می‌تواند در حالت موتوری نیز کار کند. اینورتر وظیفه تبدیل ولتاژ متناوب به ولتاژ مستقیم و بالعکس و همچنین کنترل ژنراتور را بر عهده دارد.

همان‌طور که در شکل 3 و شکل 4 نشان داده شده است، شبیه‌ساز سیستم تولید قدرت با دریافت ورودی‌های گشتاور یا سرعت مینا، وضعیت کنترلی هر کدام از اجزا، روشن یا خاموش بودن آن‌ها و همچنین وضعیت کنتاکتور ژنراتور و ولتاژ ورودی آن، باید مقادیر سرعت و گشتاورهای واقعی اجزا، جریان مصرفی یا تولیدی موتور/ژنراتور و مصرف سوخت موتور احتراق داخلی را محاسبه کند. معادله دینامیک حاکم بر مجموعه تولید قدرت به شکل رابطه 2 است:

$$\sum T = I_{eq} \alpha \quad (2)$$

که در معادله 2،  $I_{eq}$  ممان اینرسی معادل و  $\alpha$  شتاب زاویه‌ای است. سمت چپ معادله بالا شامل دو جمله است: یکی گشتاور مربوط به ژنراتور و دیگری گشتاور مربوط به موتور احتراق داخلی است. گشتاور خروجی موتور احتراق داخلی از دو جمله تشکیل می‌شود که یکی گشتاور حاصل از احتراق و دیگری گشتاور منفی مربوط به اتلافات موجود در موتور است. بنابراین، معادله 2، به شکل رابطه 3 در می‌آید:

$$T_{eng} + \frac{r T_{gen}}{\eta_g} = I_{eq} \alpha_{eng} \quad (3)$$

که در معادله 3،  $r$  نسبت دنده گیربکس و  $\eta_g$  راندمان مربوط به آن است. لازم به ذکر است که  $T_{gen}$  و  $T_{eng}$  می‌توانند مقادیر مثبت یا منفی اختیار کنند. موتور احتراق داخلی و ژنراتور با توجه به وضعیت کنترلی خود می‌توانند مبنای سرعت یا گشتاور بگیرند.

طراحی مدلی که بتواند رفتارهای دینامیکی موتور احتراق داخلی و ژنراتور را دقیقاً نشان دهد، دشوار است. بدین منظور برای شبیه‌سازی گشتاور حاصل از احتراق در موتور احتراق داخلی و همچنین گشتاور خروجی ژنراتور در حالتی که مبنای سرعت دریافت می‌کنند، یک حلقه کنترلی شامل یک کنترلر PID طراحی شده است که ورودی آن خطای موجود در دور و خروجی آن گشتاور آن عضو است. بلوک دیاگرام سیستم کنترلی مربوطه در شکل 8 نشان داده شده است. به منظور اعمال گشتاور منفی ناشی از اتلاف‌های موجود در موتور احتراق داخلی از منحنی‌های شرکت سازنده استفاده شده است که توان اتلافی را بر حسب دور موتور در اختیار قرار می‌دهد.

جدول 4 ضرایب مربوط به کنترل‌های استفاده شده در مجموعه موتور احتراق داخلی - ژنراتور

کنترل‌های مورد استفاده در مجموعه موتور احتراق داخلی - ژنراتور	ضرایب بهره	بهره تناسبی بهره انتگرال‌گیر بهره مشتق‌گیر
موتور احتراق کنترلر شماره 1	3	0/01
داخلی کنترلر شماره 2	12	5
ژنراتور	5	7

جدول 5 ضرایب کنترلر مورد استفاده در سیستم کمکی

ضرایب کنترلر مورد استفاده در سیستم کمکی			
بهره	بهره تناسبی	بهره انترگال‌گیر	بهره مشتق‌گیر
مقدار	1	2	0/1

$S_{precharge}$  و  $S_{main}$  به ترتیب بیانگر کنتاکتورهای پیش‌شارژ و اصلی هستند.  $V_{in}$  و  $V_{Bat}$  به ترتیب ولتاژ مجموعه باتری و ولتاژ ورودی به موتور/ژنراتور را نشان می‌دهند. در حالتی که  $S_{precharge}$  وصل و  $S_{main}$  قطع باشند، یک مدار RC خواهیم داشت که در آن ولتاژ و جریان از روابط 6 و 7 بدست می‌آیند:

$$i(t) = \frac{V_{Bat}}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (6)$$

$$V_{in}(t) = V_{Bat} (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (7)$$

پس از آنکه عمل پیش‌شارژ تمام شد، کلید  $S_{main}$  وصل و کلید  $S_{precharge}$  قطع می‌شود و ولتاژ ورودی به موتور/ژنراتور برابر ولتاژ مجموعه باتری خواهد شد. اگر به دلیلی کنتاکتورهای اصلی قطع شوند، گشتاور موتور/ژنراتور و در نتیجه جریان آن صفر خواهد شد.

### 3-3- سیستم کمکی

با توجه به اینکه موتور احتراق داخلی در قسمتی از سیکل حرکتی خودرو هیبرید می‌تواند خاموش باشد، تمامی تجهیزات جانبی خودرو مانند پمپ آب، دینام، کمپرسور و غیره باید محرکه‌ای مستقل داشته باشند. بنابراین برای رانش تجهیزات جانبی اتوبوس هیبرید از یک موتور AC القایی 11 کیلووات دو محوره استفاده شده است. تجهیزات متصل به این موتور شامل کمپرسور هوا، کمپرسور کولر باتری، پمپ آب، دینام و پمپ روغن می‌باشند که به وسیله تسمه-پولی یا کویلینگ مناسب نصب گردیده‌اند. این قسمت از شبیه‌ساز که شامل موتور کمکی و اینورتر مربوط به آن است، با دریافت مبنای دور و وضعیت موتور کمکی (فعال یا غیرفعال بودن) که از نرم‌افزار کنترل خودرو ارسال می‌شوند، وضعیت کنتاکتورها و ولتاژ ورودی به آن، مقادیر دور و گشتاور واقعی موتور کمکی و همچنین جریان مصرفی آن را محاسبه می‌کند. موتور کمکی همواره در حالت کنترلی دور-مبنا کار می‌کند. بنابراین، به منظور شبیه‌سازی گشتاور خروجی موتور کمکی، مشابه آنچه در قسمت قبل توضیح داده شد، از یک کنترلر PID استفاده شده است که ورودی آن خطای موجود در دور موتور و خروجی آن گشتاور موتور است. ضرایب کنترلر PID مورد استفاده در جدول 5 آمده است که با سعی و خطا بدست آمده‌اند. مقدار گشتاور ناشی از بارهای جانبی برابر مقدار ثابت 50 نیوتون‌متر در نظر گرفته شده است که از تقسیم توان مصرفی بارهای جانبی در حالت کارکرد عادی به دور درخواستی از نرم‌افزار کنترل خودرو بدست آمده است.

### 3-4- سیستم توزیع توان

سیستم توزیع توان در اتوبوس هیبرید شامل مجموعه جعبه کنتاکتور است که یک عملگر و حد واسط بین نرم‌افزار کنترل خودرو اتوبوس و اجزای الکتریکی می‌باشد که وظیفه آن تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز اجزای مختلف است، که این انرژی الکتریکی از باتری‌ها تأمین می‌شود. علاوه بر آن، این مجموعه وظیفه بررسی صحت کارکرد قطعات الکتریکی و همچنین وظیفه تأمین ایمنی مسافران از خطر برق‌گرفتگی را بر عهده دارد. این قسمت، با دریافت فرامین ارسال شده از نرم‌افزار کنترل خودرو و تحلیل آن‌ها فرامین لازم را برای اجزای مختلف صادر می‌کند. همچنین با بررسی پیام‌های

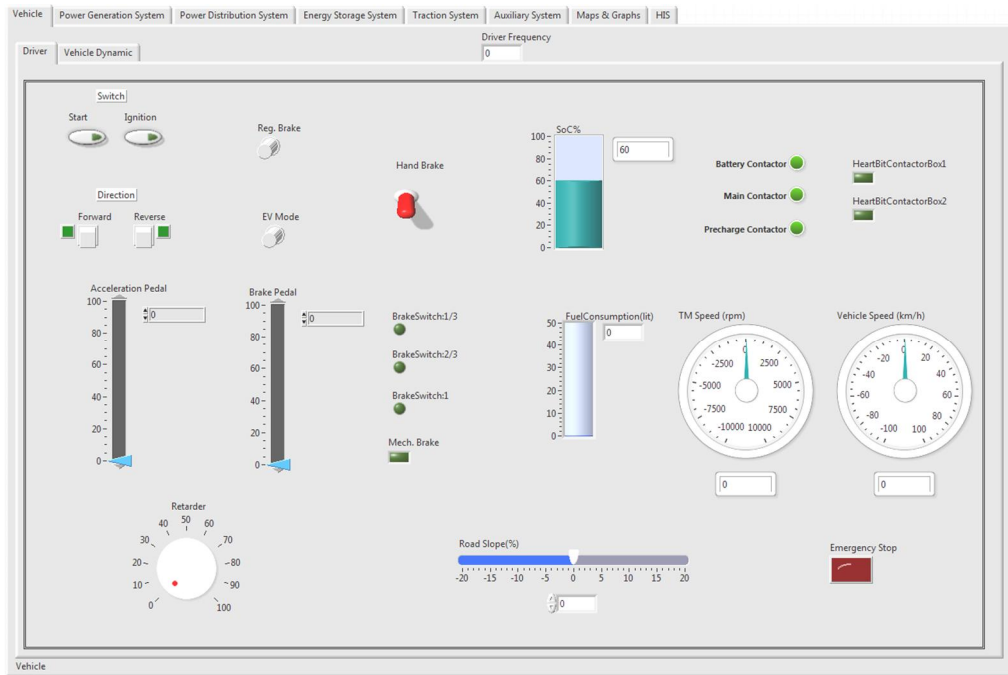
بازخورد شده از قطعات، اطلاعات لازم را به نرم‌افزار کنترل خودرو ارسال می‌نماید. با توجه به شکل 3 و شکل 4، این قسمت از شبیه‌ساز اتوبوس هیبرید با دریافت جریان تولیدی یا مصرفی اجزا مختلف و فرمان وصل یا قطع کنتاکتورهای هر کدام از اجزا، مقدار جریان مورد نیاز شارژ یا تخلیه باتری را محاسبه و وضعیت کنتاکتورهای اجزا مختلف را تعیین کرده و به آن‌ها ارسال می‌کند و همچنین امنیت تجهیزات الکتریکی را بوسیله تعدادی نشانگر اخطار مشخص می‌کند. شبیه‌ساز سیستم توزیع توان شامل موارد زیر است:

- کنتاکتورهای اصلی که برای قطع و وصل کردن جریان موتورهای کششی ( $EM1+$  و  $EM1-$  برای موتور اول و  $EM2+$  و  $EM2-$  برای موتور دوم)، موتور کمکی ( $AM+$  و  $AM-$ )، ژنراتور ( $Gen+$  و  $Gen-$ )، باتری ( $Bat+$  و  $Bat-$ ).
  - مجموعه پیش‌شارژ که متشکل از یک رله و یک مقاومت اهمی است و وظیفه شارژ اولیه خازن‌های اینورترها را بر عهده دارد که عملکرد آن‌ها در قسمت 2-3 توضیح داده شد. در جعبه کنتاکتور چهار مجموعه پیش‌شارژ وجود دارد که برای هر کدام از موتورهای کششی، موتور کمکی و ژنراتور در نظر گرفته شده‌اند.
  - فیوزها که عناصر حفاظتی در مدار هستند که هرگونه اضافه جریانی را که بیشتر از یک مقدار مجاز باشد تشخیص داده و آن را سریع قطع می‌کند.
  - ایزومتر که در هر لحظه مقاومت بین گذرگاه قدرت و بدنه اتوبوس (اتصال به زمین) را اندازه می‌گیرد و در صورتی که این مقاومت از مقدار مشخص شده کمتر باشد اخطار داده و برق مجموعه را قطع می‌کند و بدین طریق از خطر برق‌گرفتگی مسافران جلوگیری می‌کند.
- شرایط ذکر شده برای هر عضو بوسیله کلیدهای منطقی صفر و یک در محیط لپ‌ویو شبیه‌سازی شده است.

### 3-5- سیستم کششی

سیستم کششی در شبیه‌ساز، فرمان گشتاور موتورها و وضعیت فعال یا غیرفعال آن‌ها را از نرم‌افزار کنترل خودرو، وضعیت کنتاکتورهای موتورهای کششی را از سیستم توزیع توان، دور موتورها را از قسمت خودرو (دینامیک خودرو) و ولتاژ ورودی را از سیستم ذخیره انرژی دریافت می‌کند و با استفاده از این اطلاعات مقدار گشتاور واقعی موتورها و جریان مصرفی یا تولیدی آن‌ها (در حالت ترمز بازیاب) محاسبه کرده و به ترتیب به قسمت خودرو (دینامیک خودرو) و سیستم توزیع توان ارسال می‌کند. به منظور اعمال تأخیر در رسیدن به گشتاور درخواستی از نرم‌افزار کنترل خودرو، یک تابع تبدیل با ثابت زمانی 0/1 ثانیه برای موتورهای کششی در نظر گرفته شده است که گشتاور حاصل از آن بوسیله منحنی گشتاور-دور موتور در دوره‌های مختلف محدودسازی شده و خروجی آن به عنوان گشتاور واقعی موتور به قسمت خودرو در شبیه‌ساز ارسال می‌شود. در صورتی که کنتاکتورهای موتور کششی قطع شود یا فرمان غیرفعال شدن موتور کششی داده شود، گشتاور خروجی و در نتیجه جریان مصرفی یا تولیدی آن صفر می‌شود.

برای موتور کششی، گشتاور و دور می‌توانند مقادیر منفی اختیار کنند که رفتار شبیه‌ساز موتور کششی در دور و گشتاور منفی قرینه رفتار آن در دور و گشتاور مثبت است و در محاسبه جریان، علامت دور و گشتاور حائز اهمیت هستند. به عنوان نمونه اگر گشتاور درخواستی از نرم‌افزار کنترل خودرو مثبت و دور مثبت باشد، حرکت روبه‌جلو و پدال گاز فشرده شده است. در این حالت توان خروجی (حاصل‌ضرب دور و گشتاور) مثبت و در نتیجه جریان موتور کششی مثبت است و این به معنی کشیدن جریان از باتری (حالت تخلیه در باتری) است.



شکل 10 پانل جلویی شبیه‌ساز راننده

که نسبت دنده گیربکس (بین موتورهای کششی و چرخ‌ها)،  $\eta$  راندمان گیربکس،  $r_w$  شعاع چرخ و  $T$  گشتاور خروجی موتورهای کششی است. در روابط 8 و 9، در هر تکرار برای محاسبه نیروی پسا از بازخورد مقدار سرعت خودرو استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی عملکرد ترمز دستی، زمانی که راننده ترمز دستی را فعال می‌کند، نیرویی برابر مقدار ثابت 45 کیلو نیوتون سر چرخ اعمال می‌شود. لازم به ذکر است که در حرکت روبه‌جلو، نیروی کششی  $F_t$  در حالتی که پدال گاز فشرده است مقداری مثبت و در ترمزگیری مقداری منفی است. در حرکت روبه‌عقب علامات برعکس هستند، یعنی زمانی که پدال گاز فشرده است و جهت حرکت روبه‌عقب است، نیروی کششی منفی و در ترمزگیری در حرکت روبه‌عقب، این نیرو مثبت است. با محاسبه سرعت خودرو، دور موتورهای کششی (دور بر دقیقه) از رابطه 11 بدست می‌آید:

$$\omega_m = \frac{30v i_g}{\pi r_w} \quad (11)$$

#### 4- نتایج

به منظور بررسی اعتبار مدل‌های مورد استفاده در طراحی شبیه‌ساز، دو تست روی خودروی واقعی تعریف شده است و نتایج این تست‌ها با نتایج مدل شبیه‌سازی شده مقایسه شده است. تست اول روی موتور احتراق داخلی تعریف شده است. با اعمال چند فرمان دور به کنترلر موتور، تغییرات دور آن ذخیره شده و نتایج آن با نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی شده در شکل 11 نشان داده شده است (دور خلاص موتور برابر 550 دور بر دقیقه است). مقادیر دورهای درخواستی به ترتیب برابر 1250، 950 و 1850 دور بر دقیقه می‌باشند. همان‌طور که دیده می‌شود، شبیه‌ساز طراحی شده رفتاری نزدیک به نتایج واقعی از خود نشان می‌دهد. در این تست حداکثر خطا برابر 5 درصد است که در بیشترین تغییر دور (تغییر دور از 1250 به 1850 دور بر دقیقه) بوجود آمده است. برای حل معادلات از گام زمانی یک میلی‌ثانیه استفاده شده است.

در تست دوم مدل مجموعه باتری مورد ارزیابی قرار گرفته است. با تغییر جریان شارژ/تخلیه باتری بوسیله منبع جریان، ولتاژ ترمینال باتری ذخیره و با نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی شده مقایسه شده است.

اگر در حالت قبل گشتاور منفی باشد، حرکت روبه‌جلو و پدال ترمز فشرده شده است. در این حالت جریان منفی و باتری‌ها در حال شارژ شدن هستند که این معرف حالت ترمز بازیاب در خودروهای هیبرید الکتریکی است. در دو حالت قبل اگر دور موتور منفی باشد، حرکت روبه‌عقب است.

#### 3-6- خودرو

در این قسمت از شبیه‌ساز، فرامین راننده و دینامیک خودرو شبیه‌سازی شده است. فرامین راننده همان‌طور که در شکل 10 نشان داده شده است، عبارت‌اند از: موقعیت سوئیچ، پدال گاز و ترمز، جهت حرکت، فرمان امکان بازیاب انرژی ترمزی، فرمان امکان حرکت در حالت تمام برقی، ترمز دستی و ریتارد.

در قسمت دینامیک خودرو، معادله دینامیک حاکم بر خودرو پیاده‌سازی شده است. نیروهای مقاوم در برابر حرکت خودرو به طور کلی به سه دسته تقسیم می‌شوند: نیروی مقاومت هوا (نیروی پسا)، نیروی مقاومت غلتشی چرخ‌ها، نیروی مقاوم ناشی از شیب جاده. با در نظر گرفتن قانون دوم نیوتن معادله دینامیک خودرو برای حرکت روبه‌جلو و روبه‌عقب به شکل روابط 8 و 9 خواهد بود:

$$\delta M \frac{dv}{dt} = F_t - F_{mb} - \frac{1}{2} \rho C_D A_f v^2 - Mg \sin \theta - Mgf_r \cos \theta \quad (8)$$

$(v > 0)$

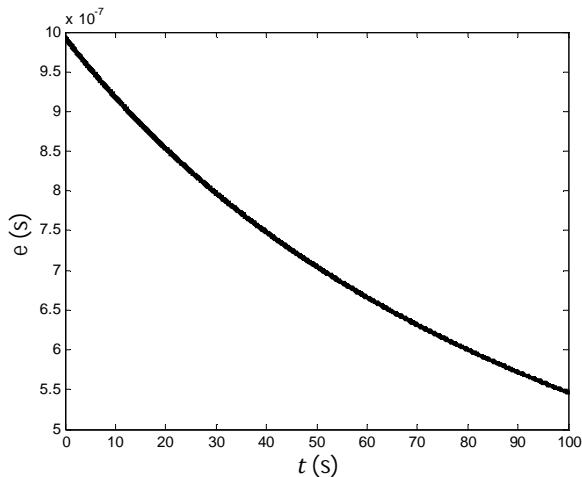
$$\delta M \frac{dv}{dt} = F_t + F_{mb} + \frac{1}{2} \rho C_D A_f v^2 - Mg \sin \theta + Mgf_r \cos \theta \quad (9)$$

$(v < 0)$

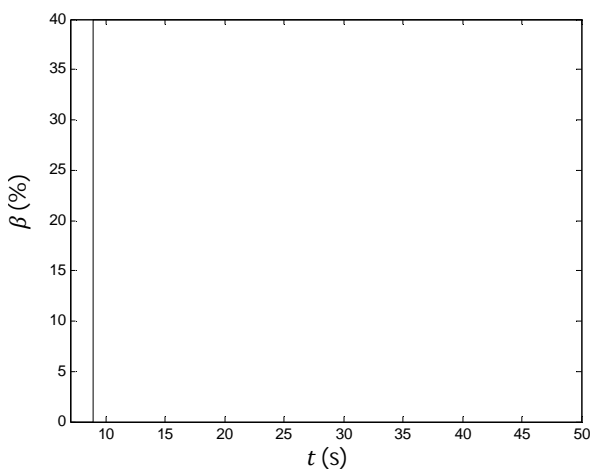
که  $v$  سرعت خودرو،  $M$  جرم خودرو،  $\delta$  بیانگر اثر اجزا چرخان [8] (مقدار  $\delta M$  جرم موثر خودرو نامیده می‌شود)،  $F_{mb}$  بیانگر نیروی ترمزی حاصل از ترمز مکانیکی است که متناسب با میزان فشرده‌گی پدال ترمز، نیرویی مخالف حرکت خودرو اعمال می‌کند و  $F_t$  نیروی کششی حاصل از موتورهای کششی روی چرخ‌ها است که با استفاده از رابطه 10 از روی گشتاور خروجی موتورهای کششی بدست می‌آید:

$$F_t = \frac{T_i \eta_g}{r_w} \quad (10)$$

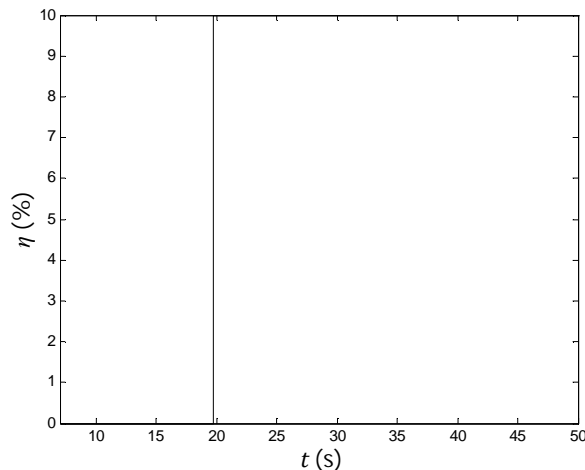




شکل 14 خطا در اجرا به شکل بلادرنگ

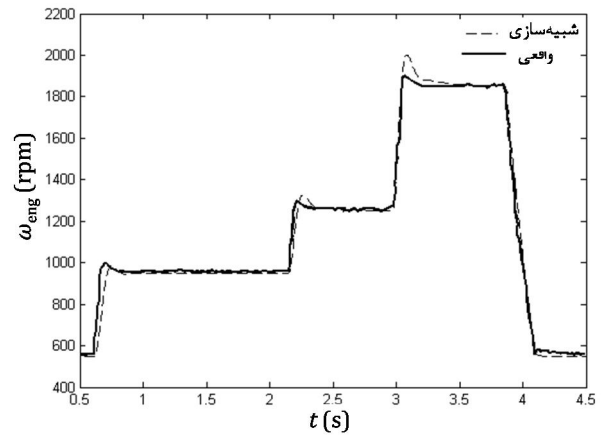


شکل 15 درصد فشردگی پدال گاز در تست راستی‌آزمایی

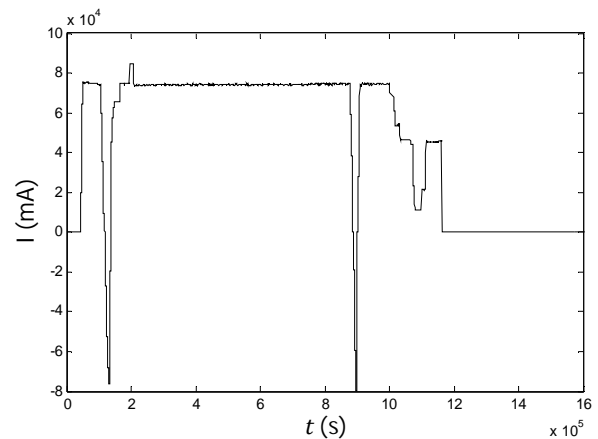


شکل 16 درصد فشردگی پدال ترمز در تست راستی‌آزمایی

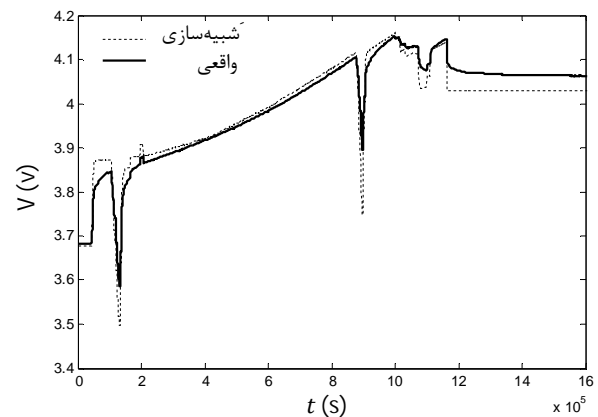
برای بررسی عملکرد نرم‌افزار کنترل خودرو بوسیله شبیه‌ساز طراحی شده، فرامینی توسط کاربر یا راننده اعمال شده و نتایج بررسی شده است. در زیر نمونه‌ای از تست‌های صورت گرفته آمده است. در حالی که سوئیچ در وضعیت فعال قرار دارد و کنتاکت‌های قدرت وصل شده‌اند، کاربر (راننده) فرمان فشردگی پدال گاز و ترمز را مطابق شکل 15 و شکل 16 اعمال می‌کند. منحنی تغییرات گشتاور موتورهای کششی، جریان و ولتاژ سلول باتری، دور موتورهای کششی، ضریب تصحیح تخلیه و شارژ و سطح شارژ



شکل 11 تغییر دور موتور دیزل با اعمال چند فرمان دور



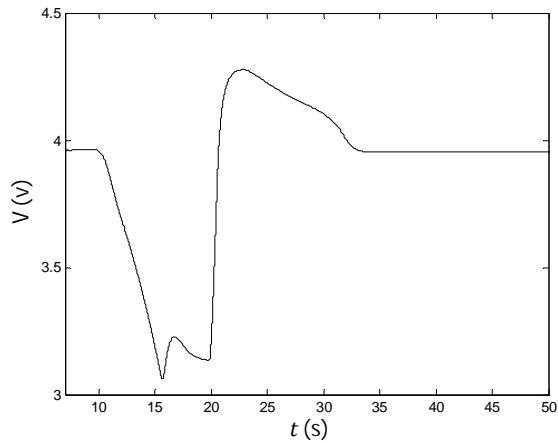
شکل 12 جریان شارژ/تخلیه باتری در تست مدل باتری



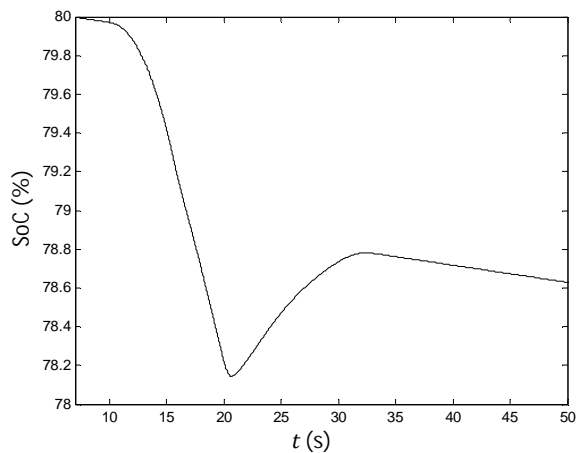
شکل 13 ولتاژ ترمینال باتری در تست مدل باتری

شکل 12 منحنی جریان باتری و شکل 13 نتایج این تست را نشان می‌دهد. حداکثر خطا در شکل 13 برابر 4/1 درصد است و این بیانگر صحت مدل مورد استفاده برای سیستم ذخیره انرژی در شبیه‌ساز اتوبوس هیبرید است. برای نشان دادن قابلیت اجرای بلادرنگ، اختلاف بین گام زمانی در نظر گرفته شده (که برابر 0/001 ثانیه است) و مدت زمان اجرای هر تکرار از برنامه محاسبه شده است و بر حسب زمان در شکل 14 نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، شبیه‌ساز طراحی شده قادر است با حداکثر خطایی برابر یک میکروثانیه به شکل بلادرنگ اجرا شود که استفاده از آن را در بستر تست سخت‌افزار در حلقه ممکن می‌سازد چرا که چنین دقتی در کاربرد حاضر قابل قبول است.

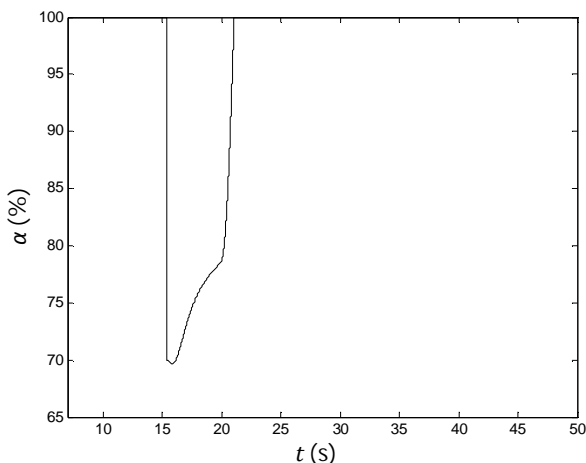




شکل 20 ولتاژ یک سلول باتری در تست راستی‌آزمایی



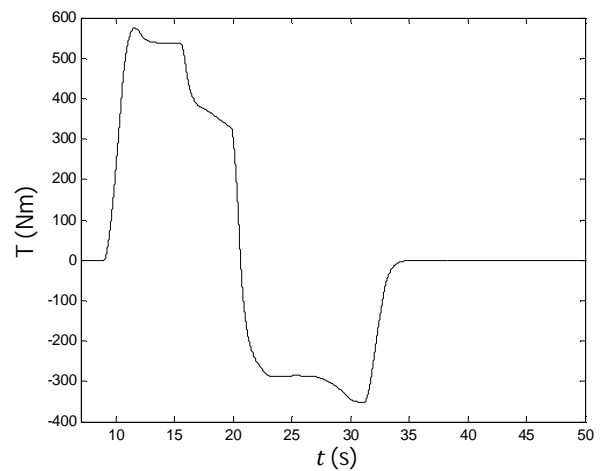
شکل 21 تغییرات SoC مجموعه باتری در تست راستی‌آزمایی



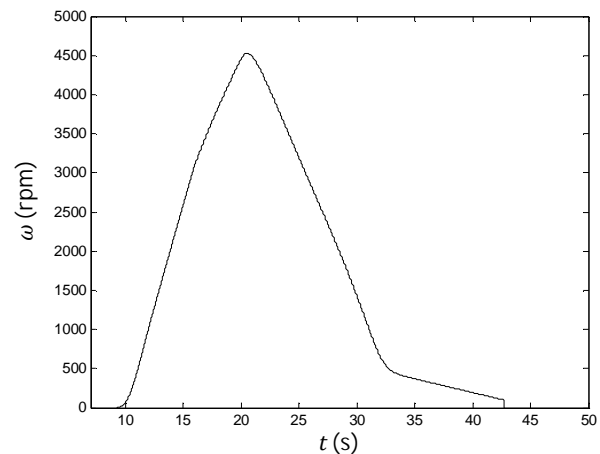
شکل 22 ضریب تصحیح تخلیه باتری در تست راستی‌آزمایی

همانطور که در شکل 20 و شکل 22 دیده می‌شود، پس از مدت زمانی ولتاژ در محدوده مجاز قرار می‌گیرد و بتدریج ضریب تصحیح تخلیه مجدداً به 100 می‌رسد. زمانی که راننده پدال ترمز را فشار می‌دهد، گشتاور موتورهای کششی منفی شده و باتری در وضعیت شارژ قرار می‌گیرد (بازیاب انرژی ترمزی). در این حالت زمانی که جریان شارژ مجموعه باتری از محدوده مجاز فراتر می‌رود (این مقدار برابر 80 آمپر است)، واحد مدیریت باتری که در شبیه‌ساز سیستم ذخیره انرژی مدل‌سازی شده است، ضریب تصحیح شارژ را به نرم‌افزار کنترل خودرو ارسال می‌کند و عمل محدودسازی گشتاور موتورهای کششی توسط نرم‌افزار DMMS انجام می‌شود.

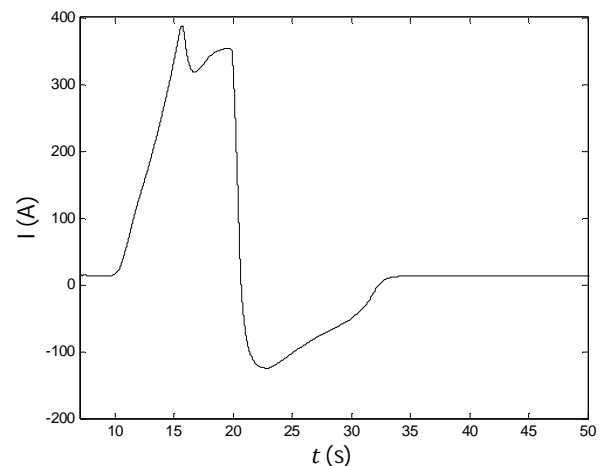
باتری در شکل 17 تا شکل 23 نشان داده شده‌اند. با دریافت میزان فشاردهی پدال گاز، نرم‌افزار کنترل خودرو این سیگنال را به فرمان گشتاور از موتورهای کششی تبدیل کرده و به شبیه‌ساز (سیستم کششی) ارسال می‌کند و در نتیجه سرعت خودرو افزایش یافته و باتری‌ها در وضعیت تخلیه قرار می‌گیرند. زمانی که ولتاژ سلول باتری از کمترین حد مجاز (که برابر 3/2 ولت است) پایین‌تر می‌آید، عمل محدودسازی گشتاور موتورهای کششی بوسیله ضریب تصحیح تخلیه انجام می‌شود که عددی بین صفر تا یک است و در گشتاور موتورهای کششی ضرب می‌شود.



شکل 17 گشتاور کل موتورهای کششی در تست راستی‌آزمایی



شکل 18 دور موتورهای کششی در تست راستی‌آزمایی



شکل 19 جریان باتری در تست راستی‌آزمایی

## 6- فهرست علائم

سطح جلویی خودرو	$A_f$
ضریب پسا	$C_D$
مقاومت داخلی باتری	$R_{in}$
سرعت ( $ms^{-1}$ )	$U_f$
ولتاژ	$V$
ولتاژ مدار باز باتری	$V_{oc}$

علائم یونانی

سرعت زاویه‌ای	$\omega$
چگالی ( $kgm^{-3}$ )	$\rho$
سرعت خودرو	$v$
درصد فشردگی پدال گاز	$\beta$
درصد فشردگی پدال ترمز	$\eta$
ضریب تصحیح شارژ باتری	$\mu$
ضریب تصحیح تخلیه باتری	$\alpha$

## زیر نویس‌ها

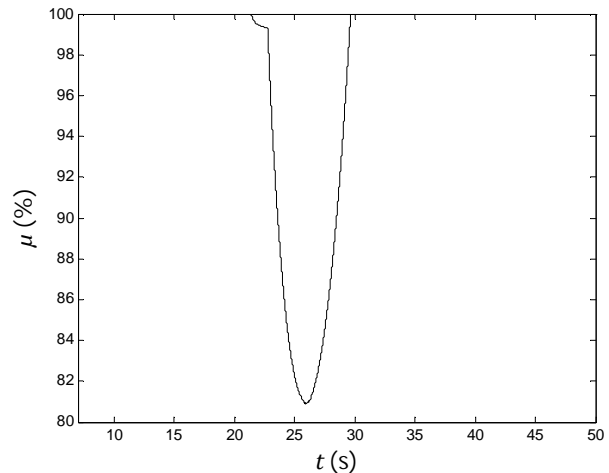
موتور احتراق داخلی	eng
ژنراتور	gen
پیش‌شارژ	precharge
اصلی	main
معادل	eq
باتری	Bat.

## 7- تقدیر و تشکر

نگارندگان این مقاله، از مجموعه پژوهشکده خودرو، سوخت و محیط زیست دانشگاه تهران که بستر مناسبی جهت انجام این پژوهش فراهم آورده‌اند کمال تشکر و قدردانی می‌نمایند.

## 8- مراجع

- [1] H. K. Fathy, Z. S. Filipi, J. Hagen, and J. L. Stein, Review of hardware-in-the-loop simulation and its prospects in the automotive area, in *Defense and Security Symposium*, 2006, p. 62280E-62280E-20.
- [2] A. Dhaliwal, S. Nagaraj, and S. Ali, Hardware-in-the-loop simulation for hybrid electric vehicles-an overview, lessons learnt and solutions implemented, *SAE Pap.*, no. 0901, 2009.
- [3] L. Wang, Y. Zhang, C. Yin, H. Zhang, and C. Wang, Hardware-in-the-loop simulation for the design and verification of the control system of a series-parallel hybrid electric city-bus, *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 25, pp. 148-162, Jun. 2012.
- [4] J. Wu, C. Dufour, and L. Sun, Hardware-in-the-loop testing of hybrid vehicle motor drives at Ford Motor Company, in *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2010 IEEE, 2010, pp. 1-5.
- [5] M. Cakmakci, Y. Li, and S. Liu, Model-in-the-loop development for fuel cell vehicle, in *American Control Conference (ACC)*, 2011, 2011, pp. 2462-2467.
- [6] F. V. Conte, Battery and battery management for hybrid electric vehicles: a review, *e i Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 123, no. 10, pp. 424-431, Oct. 2006.
- [7] J. Liu and H. Peng, Modeling and Control of a Power-Split, vol. 16, no. 6, pp. 1242-1251, 2008.
- [8] M. Ehsani, Y. Gao, and A. Emadi, *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design*. CRC press, 2009.



شکل 23 ضریب تصحیح شارژ باتری در تست راستی‌آزمایی

همان‌طور که در شکل 19 و شکل 23 مشخص است، پس از آن که جریان مجموعه باتری مجدداً در محدوده مجاز قرار گرفت، ضریب تصحیح شارژ به مقدار 100 درصد نزدیک می‌شود.

نتایج این تست و سایر تست‌های تعریف‌شده نشان می‌دهد که با استفاده از شبیه‌ساز طراحی شده در بستر تست مدل در حلقه می‌توان تمامی الگوریتم‌های کنترلی موجود در نرم‌افزار کنترل اتوبوس هیبریدی را در کوتاه‌ترین زمان و بدون هزینه مورد ارزیابی و صحنه‌گذاری قرار داد. همچنین، قابلیت اجرا به شکل بلادرنگ، استفاده از شبیه‌ساز طراحی‌شده را در بستر تست سخت‌افزار در حلقه نیز ممکن می‌سازد.

## 5- جمع‌بندی

در خودروهای هیبریدی، کنترل و هماهنگی قسمت‌های مختلف خودرو بوسیله واحد کنترل مرکزی صورت می‌گیرد که نرم‌افزار کنترل خودرو روی آن پیاده‌سازی می‌شود. برای تست عملکرد نرم‌افزار کنترل خودرو از تست مدل در حلقه استفاده می‌شود که در آن مدل طراحی شده برای نرم‌افزار کنترل خودرو به شکل حلقه بسته در ارتباط با شبیه‌ساز از سایر قسمت‌های خودرو قرار می‌گیرد. در این مقاله به تست و بررسی عملکرد نرم‌افزار کنترل خودرو برای یک اتوبوس هیبریدی الکتریکی سری بوسیله بستر شبیه‌سازی مدل در حلقه پرداخته شده است. در این راستا، یک شبیه‌ساز اتوبوس هیبریدی طراحی شده است که رفتار دینامیکی اجزا مختلف خودرو را در پاسخ به فرامین دریافتی از نرم‌افزار کنترل خودرو شبیه‌سازی می‌کند. این شبیه‌ساز در شش قسمت به شکل ماژولار طراحی شده است: سیستم ذخیره انرژی، سیستم تولید قدرت، سیستم کمکی، سیستم توزیع توان، سیستم کششی و خودرو. بستر تست مدل در حلقه طراحی‌شده روی هر رایانه تحت ویندوز قابل اجرا است و می‌تواند با دقت قابل قبولی به شکل بلادرنگ اجرا شود. بنابراین، می‌توان از شبیه‌ساز طراحی‌شده در بستر تست سخت‌افزار در حلقه برای توسعه اجزا مختلف خودرو استفاده کرد. شبیه‌ساز طراحی‌شده بوسیله نتایج حاصل از تست‌های تجربی صحنه‌گذاری شده است. نتایج نشان می‌دهد که تمامی الگوریتم‌های کنترلی موجود در نرم‌افزار کنترل خودرو، بوسیله این بستر تست با کمترین هزینه و در کوتاه‌ترین زمان ممکن قابل ارزیابی و راستی‌آزمایی است.