

عملکرد یک خودروی سواری با قوای محرکه موتور احتراقی، در مقایسه با تمام هیبرید با ساختار سری و نیمه هیبرید با ساختار موازی

علی میرمحمدی*
استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران
زهره توکلی
کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

چکیده

موضوع مصرف سوخت‌های فسیلی و آلودگی هوا امروزه یکی از چالش‌های بزرگ جهانی می‌باشد. خروجی آگروز خودروهای با سوخت‌های فسیلی مهمترین عامل آلودگی هوا مخصوصاً در کلان شهرها است. خودروهای هیبرید الکتریکی به دلیل استفاده از باتری و موتور الکتریکی در کنار موتور احتراقی ضمن امکان کار موتورهای احتراقی در شرایط بهینه عملکردی و قابلیت بازیابی انرژی ترمزی یکی از فناوری‌های نوین در کاهش مصرف سوخت و آلودگی هوا می‌باشد. در این راستا هدف اصلی این مقاله مقایسه عملکرد خودروهای هیبرید الکتریکی با خودروهای بنزینی معمول با کمک شبیه‌سازی کامپیوتری می‌باشد. ابتدا خودروی سواری بنزینی در چرخه‌های رانندگی شهری و بزرگراهی اروپایی و تهران برای صحت‌گذاری نتایج، شبیه‌سازی شد و مصرف سوخت آن محاسبه گردید و با نتایج تجربی مصرف سوخت خودرو مقایسه شد. همچنین برای اطمینان بیشتر از نتایج شبیه‌سازی، نتایج مصرف سوخت خودرو با نتایج مرجعی دیگر که همین خودرو را با نرم افزار دیگری در چرخه‌های رانندگی شهری و بزرگراهی اروپایی شبیه‌سازی کرده بود، مقایسه گردید. بعد اطمینان از صحت نتایج، خودروی تمام‌هیبرید با ساختار سری و خودروی نیمه‌هیبرید با ساختار موازی به صورت کامپیوتری طراحی و در چرخه‌های رانندگی شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که خودروی تمام‌هیبرید سری نسبت به خودروی نیمه‌هیبرید موازی مقدار مصرف سوخت را در چرخه شهری اروپایی ۶/۶٪ و در چرخه بزرگراهی اروپایی ۹/۷٪ و در چرخه ترکیبی تهران ۲۹٪ بیشتر کاهش می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که در چرخه تهران کاهش مقدار مصرف سوخت در خودروی تمام‌هیبرید سری نسبت به خودرو بنزینی ۴۹٪ و در خودروی نیمه‌هیبرید موازی ۲۰٪ است.

کلمات کلیدی: خودرو هیبرید الکتریکی، تمام‌هیبرید سری، نیمه‌هیبرید موازی، عملکرد، شبیه‌سازی.

An Hybrid with Series Structure and Mild Hybrid with Parallel Structure internal Combustion Engine Car powertrain Performance, in Comparison with Full

A. Mirmohammadi
Z. Tavakoli

Department, of Mechanical Engineering Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran
Department, of Mechanical Engineering Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

Abstract

The subject of fossil fuel consumption and air pollution is one of the important Challenges in the world now, and the most important consumption and pollution reduction, since it use battery and electric motor beside combustion engine and because of this the engine can work with optimum its performance and brake energy regeneration. In this regard, this article main purpose is the performance comparison between electric hybrid and common gasoline cars using computer simulation. First common gasoline car was simulated for ECE and EUDC and Tehran highway driving cycles for the results validation and its fuel consumption was compared with the experimental. Also for more confidence of simulation results, the fuel consumption compared with results of another reference results that this vehicle had been simulated with other software in ECE and EUDC driving cycle's. After ensuring software validation, full hybrid car with series structure and mild hybrid car with parallel structure designed and simulated in considered driving cycles. Results of simulation showed that the series full hybrid car fuel consumption in comparison with parallel mild hybrid one has 68.6% greater reduction in ECE driving cycle and 9.7% greater reduction in EUDC driving cycle and 29% greater reduction in Tehran driving cycle. Also the results of simulation showed that the series full hybrid car fuel consumption in comparison with gasoline car is 49% and in comparison with parallel mild hybrid one is 20% factor specific in big cities is fossil fuel cars exhaust emissions. Hybrid electric cars are one of the new technologies in fuel.

Keywords: Hybrid electric car, Series Full hybrid, parallel mild hybrid, Performance, simulation.

۱- مقدمه

توجه به مشکلات موجود در خودروهای برقی خالص^۱ شامل: تکنولوژی ساخت باتری‌ها و تخلیه‌ی سریع آن‌ها و زمان شارژ طولانی و عمر کم باتری‌ها، به استفاده از انرژی الکتریکی در کنار انرژی فسیلی در خودروها توجه بیشتری شده است [۱]. این پژوهش مصرف سوخت خودرو با

تولید خودروهای هیبریدی راهی برای کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌ها است. کاهش مصرف سوخت با روش‌های مکانیکی محدود است. از این رو پژوهشگران به استفاده از انرژی الکتریکی در خودرو روی آورده‌اند. با

^۱EV

برای دستیابی به نتایج قابل سنجش تعداد زیادی تست با کمک شبیه‌سازی باید انجام شود. بدون استفاده از کامپیوتر حداقل سه نمونه از خودرو را می‌توان ساخت که نیروی انسانی و هزینه تحقیقاتی زیادی نیاز دارد. این پروژه می‌تواند توسط یک نفر با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری در چند ماه انجام گیرد و این مهمترین و بزرگترین مزیت شبیه‌سازی کامپیوتری و مهمترین دلیل استفاده از آن در دنیاست. در این راستا حاجی نجفی و همکاران خودروی سمند هیبرید با ساختار سری را در نرم‌افزار ADVISOR با دو چرخه رانندگی شهری و بزرگراهی اروپا شبیه‌سازی کرده و نشان داده‌اند که خودروی هیبرید سری مصرف سوخت را کاهش می‌دهد [۲]. از این مرجع برای اعتبارسنجی نتایج این مقاله استفاده شد. حدادی و همکاران خودروی اتوبوس هیبرید سری را طراحی و کاهش مصرف سوخت آن را در نرم‌افزار AVL/CRUISE بررسی کرده‌اند [۳]. میرمحمدی و همکاران خودروی اتوبوس هیبرید سری را طراحی و کاهش مصرف سوخت آن را در نرم‌افزار ADVISOR بررسی کرده است [۴]. از این دو مرجع نامبرده در طراحی خودروی تمام‌هیبرید سری بهره گرفته شد. منظری و همکاران چرخه رانندگی تهران را با استفاده از جمع‌آوری اطلاعات واقعی ارائه داده‌اند [۵]. از نتایج این مرجع برای شبیه‌سازی چرخه رانندگی تهران در این پژوهش استفاده شد. مشدی و همکاران محدوده مقدار مصرف سوخت چرخه شهر تهران را با توجه به عادت تعویض دنده رانندگان در گیربکس دستی به دست آورده‌اند [۶]. از نتایج این مرجع نیز برای صحت‌گذاری نتایج شبیه‌سازی چرخه تهران در خودروی بنزینی این مقاله استفاده شد. خودروهای تمام هیبرید^۱ با ساختارهای موازی، سری و سری-موازی مقدار مصرف سوخت را کم می‌کنند اما به منبع پر حجم و بزرگی از باتری نیاز دارند و این مشکلاتی را در جانمایی خودرو ایجاد می‌کند و همچنین باعث افزایش بار خودرو و کاهش انرژی در چرخ خودرو می‌شود. خودروهای هیبرید کامل ساختار خط انتقال قدرت متفاوتی با خودروهای معمول دارند و طراحی چنین خودروهایی بسیار سخت و ساخت آن‌ها هزینه‌بر است. در این میان خودروهای نیمه‌هیبرید موازی خودروهایی هستند که از همان ساختار انتقال قدرت خودرو معمول استفاده می‌کنند ولی با بکارگیری یک موتور الکتریکی کوچک قبل از موتور احتراقی، ساختار هیبرید در آن اجراء می‌شود [۷]. در این پژوهش خودروی سمند ال ایکس به صورت قوای محرکه با موتور احتراق داخلی XU7، تمام هیبرید سری و نیمه هیبرید موازی طراحی و با نرم افزار GT-DRIVE شبیه‌سازی و نتایج ارائه می‌شود. ابتدا چرخه‌های رانندگی و نحوه طراحی خودرو هیبرید الکتریکی در شبیه‌سازی و بعد نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌گردد.

۲- چرخه‌های حرکتی

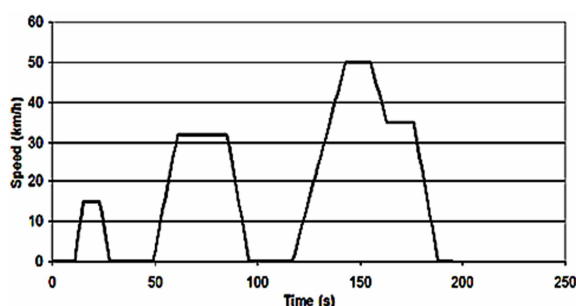
چرخه‌های حرکتی، منحنی‌های سرعت بر حسب زمانی هستند که برای نوع خاصی از وسیله نقلیه در یک محیط حرکتی با ویژگی‌های خاص برای نشان دادن الگوی رانندگی برای آن وسیله نقلیه و در آن شرایط مورد نظر بکار می‌روند. یک چرخه حرکتی بیانگر پدیده‌های

ترافیکی، فرهنگ رانندگی، قوای محرکه خودرو و شرایط ترافیکی یک شهر است [۸].

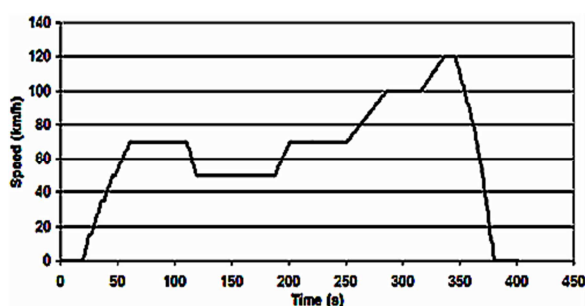
در این مقاله از چرخه شهری ECE و بزرگراهی EUDC از مراجع [۹] و [۱۰] و چرخه ترکیبی تهران از مرجع [۵] برای شبیه‌سازی استفاده شده است. جدول ۱ ویژگی‌های هریک از چرخه‌ها را ارائه می‌دهد و در شکل‌های ۱ تا ۳ منحنی‌های این چرخه‌های رانندگی به ترتیب دیده می‌شود.

جدول ۱- مشخصات چرخه حرکتی [۱۰، ۹] و [۵]

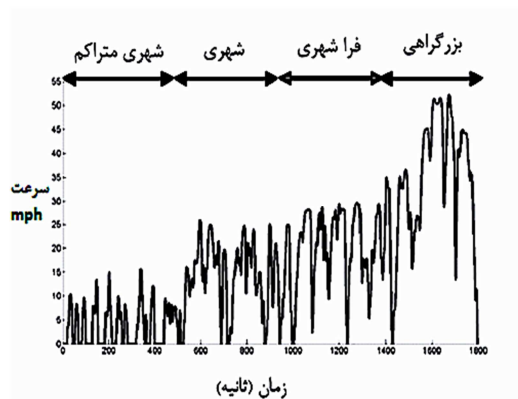
مشخصات	چرخه	چرخه	چرخه
	بزرگراهی	شهری	ترکیبی
	اروپایی	اروپایی	تهران
زمان (s)	۴۰۰	۱۹۵	۱۷۹۷
مسافت (km)	۶/۹۵۵	۰/۹۹۵	۱۳/۴۲
سرعت بیشینه (km/h)	۱۲۰	۵۰	۸۳/۹۴
سرعت متوسط (km/h)	۶۲/۶	۱۸/۴	۲۶/۸۸
شتاب بیشینه (m/s ²)	۰/۸۴	۱/۰۶	۱/۷
شتاب بیشینه منفی	-۱/۳۸	-۰/۸۳	-۲/۷۱
تعداد توقف	۲	۴	۱۸



شکل ۱- چرخه حرکت ECE15 [۹]



شکل ۲- چرخه حرکت EUDC [۹]



شکل ۳ - چرخه رانندگی تهران [۵]

^۱ Full Hybrid

۳- مدل سازی خودروی بنزینی

مدل سازی خودروی پایه بنزینی نیاز به داده های ساختاری خودرو از جمله جرم خودرو، مشخصات آیرودینامیک خودرو، هندسه خودرو، مشخصات تایر و موتور خودرو مورد نظر دارد. داده های ساختاری خودروی شبیه سازی شده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات ساختاری و سیستم محرکه خودرو سمند [۱۱]

واحد	سمند LX	مدل خودرو
kg	۱۲۲۰	جرم خودرو بدون سرنشین و تجهیزات اضافی با مخزن سوخت پر
kg	۱۶۱۰	حداکثر جرم خودرو به همراه سرنشین و بار
kg	۸۱۰	حداکثر بار مجاز محور عقب
kg	۹۰۰	حداکثر بار مجاز محور جلو
آیرودینامیک خودرو		
m ²	۲/۰۰۹	سطح پیشانی خودرو
-	۰/۳	ضریب پسای خودرو
هندسه و اکسل		
m	۴/۵۰۲	طول خودرو
m	۱/۷۲۰	عرض خودرو
m	۱/۴۶۰	ارتفاع خودرو
m	۰/۵۷	ارتفاع مرکز ثقل
m	۲/۷۶۱	فاصله بین دو تایر
-	۱	تعداد اکسل عقبی
m	۱/۴۵۲	* فاصله افقی اکسل عقب تا مرکز جرم
تایر		
m	۰/۳۰۵	شعاع غلتشی تایر
-	۰/۰۱۲	ضریب مقاومت غلتشی تایر
موتور		

مصرف بنزین برای موتور XU7 مطابق استاندارد اروپا

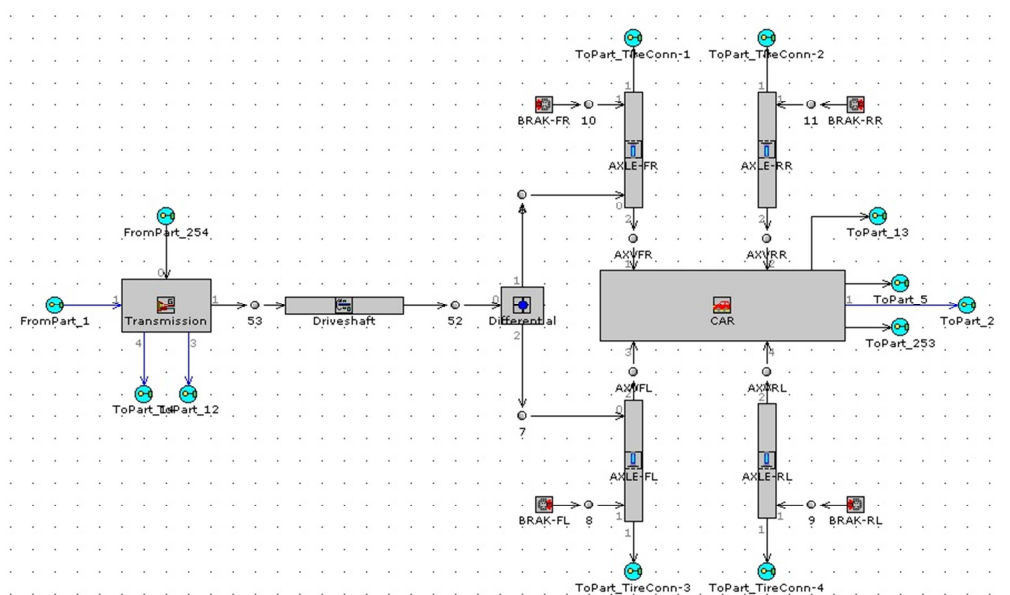
L/100 km	۹/۲	میانگین مصرف داخل شهر ECE
L/100 km	۷	میانگین مصرف بزرگراه EUDC

نسبت دنده های خودرو نیز در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- نسبت دنده های خودرو سمند LX [۱۲]

G ₁	۳/۴۵۴
G ₂	۱/۸۶۹
G ₃	۱/۲۹
G ₄	۰/۹۵۱
G ₅	۰/۷۴
G _f (نسبت دنده نهایی)	۴/۵۲۹

شکل های ۴ و ۵ ساختار کلی مدل خودروی بنزینی را در نرم افزار GT-DRIVE نشان می دهد. ایجاد ساختار مناسب خودرو و تعریف دقیق ویژگی ها و جداول اطلاعاتی خودرو از جمله جدول نسبت دنده و جدول چرخه رانندگی، در مدل سازی با این نرم افزار اهمیت زیادی دارد. جدول های اطلاعاتی که در کتابخانه نرم افزار تعریف می شوند از طریق بلوک های مدل شده از کتابخانه نرم افزار فراخوانی می شوند.



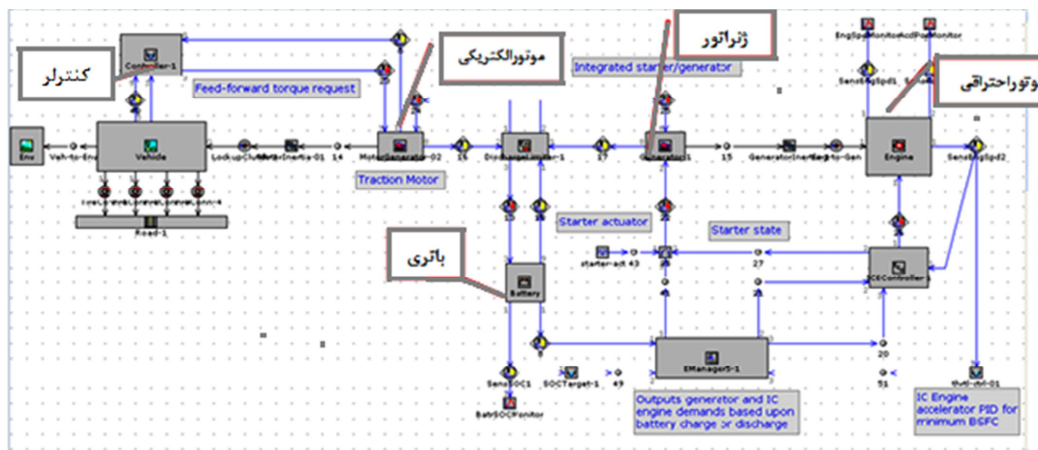
شکل ۵- باز شده بلوک Vehicle-C مدل خودروی بنزینی در شبیه سازی

۳- مدل سازی خودروی تمام هیبرید سری

مهمترین پارامترهایی که باید در قسمت مدل سازی تعیین شوند به شرح ذیل هستند:

- توان موتور الکتریکی
- توان موتور احتراقی

• توان ژنراتور
• توان و ظرفیت باتری ها
شکل ۶ مدل خودروی هیبرید سری را در نرم افزار GT-DRIVE نشان می دهد.



شکل ۶ - مدل خودروی هیبرید سری در GT-DRIVE

$$\delta = 1 + \delta_1 + \delta_2 i_g^2 i_0^2 \quad ; \quad \delta_1 = 0.04 \quad ,$$

(۳)

$$\delta_2 = 0.0025$$

پارامترهای i_g نسبت دنده و i_0 نسبت درایو نهایی^۱ هستند. مقدار i_0 از جدول ۳ برابر ۴/۵۳ می باشد.

برای به دست آوردن نسبت دنده از رابطه (۴) استفاده می شود که در آن شعاع تایر، $n_{m,max}$ سرعت بیشینه موتور و V_{max} سرعت بیشینه خودرو بر حسب m/s است [۱۳]. $n_{m,max}$ در طراحی ۲۴۰۰ rpm در نظر گرفته شد.

$$i_g = \frac{\pi n_{m,max} r}{30 V_{max}} \quad (۴)$$

با توضیحات فوق و استفاده از جدول ۱ مطابق رابطه (۵) مقدار نسبت دنده به دست می آید [۱۳].

$$i_g = \frac{\pi n_{m,max} r}{30 V_{max}} = \frac{\pi \times 2400 \times 0.305}{30 \times 52.77} = 1.45 \quad (۵)$$

با داشتن دو مقدار i_g و i_0 می توان از رابطه (۳) مقدار ضریب اینرسی چرخشی خودرو را مطابق رابطه (۶) به دست آورد [۱۳].

$$\delta = 1 + \delta_1 + \delta_2 i_g^2 i_0^2 = 1 + 0.04 + 0.0025 \times 1.45^2 \times 4.53^2 = 1.5 \quad (۶)$$

با داشتن مقدار ضریب اینرسی چرخشی مقدار توان موتور الکتریکی از رابطه (۱) و اطلاعات جدول ۲ مطابق رابطه (۷) محاسبه می شود [۱۳].

۳-۱- طراحی موتور الکتریکی

با استفاده از مشخصات بدنه خودرو در جدول ۲ و معادله (۱) می توان توان موتور الکتریکی را به دست آورد [۱۳].

$$P_t = \frac{\delta M}{2t_a} (V_f^2 + V_b^2) + \frac{2}{3} M g f_r + \frac{1}{5} \rho_a C_D A_f V_f^3 \quad (۱)$$

که در آن V_f سرعت نهایی خودرو یا آخرین سرعت شتابگیری است که برابر ۱۰۰ km/hr یا ۲۷/۸ m/s می باشد، A_f سطح پیشانی خودرو، C_D ضریب پسا، f_r ضریب مقاومت غلتشی تایر، g شتاب گرانش زمین و M جرم کلی خودرو بر حسب kg هستند که مقادیر این پارامترها در جدول ۲ داده شده اند. ρ_a چگالی هوا که در مرجع [۳] برابر ۱/۰۳۵ هست، t_a زمان شتابگیری خودرو از ۰ تا ۱۰۰ km/hr است که از مرجع [۳] این مقدار برابر ۱۱ ثانیه می باشد.

V_b سرعت خودرو بر حسب m/s است که این سرعت بستگی به سرعت پایه موتور الکتریکی دارد. موتور الکتریکی مشخصه ای بنام X دارد که نسبت بیشینه سرعت موتور الکتریکی بر حسب rpm به سرعت پایه آن است و معمولاً مقدار آن می تواند ۲، ۴ یا ۶ باشد.

خودروی هیبرید سری می تواند جعبه دنده ای با ۱، ۲ یا ۳ دنده داشته باشد. در این پژوهش خودرو با یک نسبت دنده و $X=4$ طراحی می شود. V_b را می توان از رابطه (۲) به دست آورد. در این رابطه سرعت بیشینه خودرو ۱۹۰ km/hr یا ۵۲/۷۷ m/s فرض می شود [۱۳].

$$V_b = \frac{V_{max}}{X} = \frac{190}{4} = 47.5 \left(\frac{km}{hr} \right) = 13.2 \left(\frac{m}{s} \right) \quad (۲)$$

در رابطه (۱)، پارامتر δ ضریب اینرسی چرخشی خودرو است و از رابطه (۳) به دست می آید [۱۳]. در این رابطه δ_1 و δ_2 مقادیر ثابت هستند.

¹Final drive ratio

SOC باتری بین ۰/۶ تا ۰/۷ است. تغییرات سطح انرژی در استراتژی کنترل روشن- خاموش^۲ بین ۰/۲ است [۱۳]. بنابراین طبق رابطه (۱۱) مقدار ظرفیت باتری ۲kwh به دست می آید.

$$E_{cap} = \frac{0.2}{0.7 - 0.6} = 2 \text{ kwh} \quad (11)$$

در کتابخانه نرم افزار تعریف شده است.

۴- مدل سازی خودروی نیمه هیبرید موازی

۴-۱- طراحی موتور الکتریکی و باتری

در این طرح از یک موتور الکتریکی کوچک با توان ۳۶kw استفاده شد. باتری نوع لیتیوم یونی استفاده شد که باید حداقل توانی برابر با توان موتور الکتریکی ایجاد کند.

$$P = V \times I \rightarrow 36000(W) = 360(V) \times I \rightarrow I = 100(A) \quad (12)$$

اگر سلول هایی که برای باتری انتخاب می شود هر یک دارای ۳/۷ V ظرفیت C=10 Ah باشد و جریان دائم آن ۳C و جریان لحظه ای آن ۵C باشد با توجه به اینکه مبنای محاسبات موتور است، آرایش و تعداد سلول باتری ها باید بتواند ۳۶۰ ولت را بدهد. لذا تعداد سلول هایی که باید سری شوند برابر است با [۱۴]:

$$360(V) = 3.7(V) \times \text{تعداد سلول} \rightarrow 97.3 \text{ cells} \quad (13)$$

چون در اثر شارژ و دشارژ اختلاف ولتاژ اندکی در باتری ها به وجود می آید و باتری های لیتیومی حساسیت بالایی دارند بنابراین تعداد باتری هایی که باید با هم سری شوند ۹۷ عدد در نظر گرفته می شود. از طرفی برای تأمین جریان اگر ۳ تا از این ردیف های نود و هفتایی موازی شود جریان مطلوب برای حالت دائم و لحظه ای فراهم می شود. با توجه به اینکه هر ردیف در دائم کار ۳C جریان می دهد و C=10A است پس جریان در دائم کار برابر ۳ ۱۰ ۳ یعنی ۹۰A و در هر لحظه این باتری ها جریان ۵C می دهد بنابراین جریان لحظه ای برابر ۱۵۰A=۳ ۱۰ ۵ است که این برای شرایط کاری مناسب است.

۶- استراتژی کنترل

استراتژی کنترل همان قانون کنترل است که در کنترلر خودرو تعریف می شود و عملکرد هر یک از اجزا را دستور می دهد.

در این مقاله استراتژی کنترل برای نگهداری سطح شارژ باتری ترموستات روشن- خاموش است. ژنراتور به عنوان استارت/ ژنراتور یکپارچه عمل می کند، ژنراتور و موتور احتراق داخلی زمانی که سطح شارژ باتری بین ۰/۷ < SOC < ۰/۶ باشد یعنی در زمان تخلیه باتری خاموش است. وقتی سطح شارژ باتری به کمتر از ۰/۶ کاهش یافت ژنراتور مانند یک استارت موتور احتراق داخلی را روشن می کند و بعد از آن به عنوان یک ژنراتور عمل می کند. زمانی که موتور احتراق داخلی روشن است نمودار ترموستات عدد یک و زمانی که موتور احتراق خاموش است، ترموستات عدد صفر را نشان می دهد.

$$P_t = \frac{\delta M}{2t_a} (V_f^2 + V_b^2) + \frac{2}{3} M g f_r + \frac{1}{5} \rho_a C_D A_f V_f^3 \quad (7)$$

$$= \frac{1.5 \times 1610}{2 \times 11} (27.8^2 + 13.2^2) + \frac{2}{3} \times 1610 \times 9.81 \times 0.012 + \frac{1}{5} \times 1.035 \times 0.3 \times 2.009 \times 27.8^3 = 82.5 \text{ kw}$$

۳-۲- طراحی موتور احتراقی و ژنراتور

با توجه به این که در این طرح ساختار خودرو هیبرید سری است بنابراین باید توان موتور احتراقی و ژنراتور در یک حد باشند. توان موتور احتراقی و ژنراتور باید به خودرو این توان را دهد که در بزرگراه روی یک جاده صاف طبق مقررات با سرعت ۱۳۰ km/hr یا ۳۶/۱ m/s حرکت کند.

در خودروهای با ساختار هیبرید سری از موتور احتراقی و ژنراتور برای تأمین توان حالت پایدار به منظور جلوگیری از تخلیه کامل باتری ها استفاده می شود. برای تأمین توان های گذرا مثل شتاب گیری از باتری ها استفاده می شود. رابطه (۸) توان متوسطی که توسط موتور احتراقی یا ژنراتور تأمین می شود، را بیان می کند [۱۳]:

$$P_{e/g} = \frac{V}{1000 \eta_{te} \eta_m} \left(M \cdot g \cdot f_r + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 \right) \quad (8)$$

که در آن V سرعت خودرو بر حسب m/s، $\eta_{te} = ۰/۹$ راندمان خط انتقال قدرت، $\eta_m = ۰/۸$ راندمان موتور الکتریکی، M جرم خودرو بر حسب kg، f_r ضریب مقاومت غلتشی تایر، $\rho_a = ۱/۰۳۵$ چگالی هوا بر حسب kg/m^3 ، C_D ضریب پسای آیرودینامیکی و A_f سطح بادخور خودرو بر حسب m^2 است. توان ژنراتور مطابق آنچه که در رابطه (۹) ارائه شده برابر با ۳۰kW می شود [۱۳].

$$P_{e/g} = \frac{36.1}{1000 \times 0.9 \times 0.8} \left(1610 \times 9.8 \times 0.012 + \frac{1}{2} \times 1.035 \times 0.3 \times 2.009 \times 36.1^2 \right) = 30 (kw) \quad (9)$$

در حقیقت خودرو به توانی بیشتر از ۳۰kw نیاز دارد زیرا بارهای اضافی مانند توان برای تهویه، سیستم صوتی تصویری و روشنایی نیز نیاز دارد. بنابراین توان خودرو بدون نیاز به استفاده از باتری حدود ۴۰kw برآورد می شود.

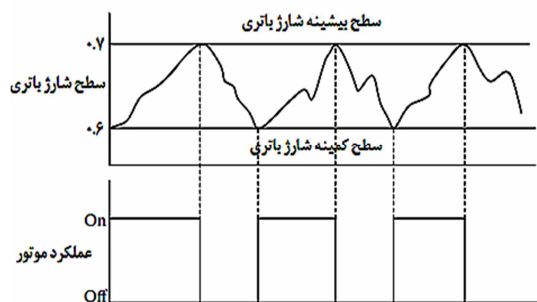
۳-۳- ظرفیت انرژی باتری

در برخی از چرخه های رانندگی، الگوی شتابگیری و کاهش شتاب مکرر منجر به SOC^۱ پایین و ضعیف در باتری می شود. ظرفیت باتری برای جلوگیری از این امر باید تعیین نمود. این ظرفیت به استراتژی کنترل در خودروی هیبرید بستگی دارد. استراتژی کنترل انتخاب شده استراتژی ترموستات on-off است که در ادامه استراتژی کنترل خودرو توضیح داده خواهد شد. رابطه (۱۰) ظرفیت باتری را نشان می دهد.

$$E_{cap} = \frac{\Delta E_{max}}{SOC_{top} - SOC_{bott}} \quad (10)$$

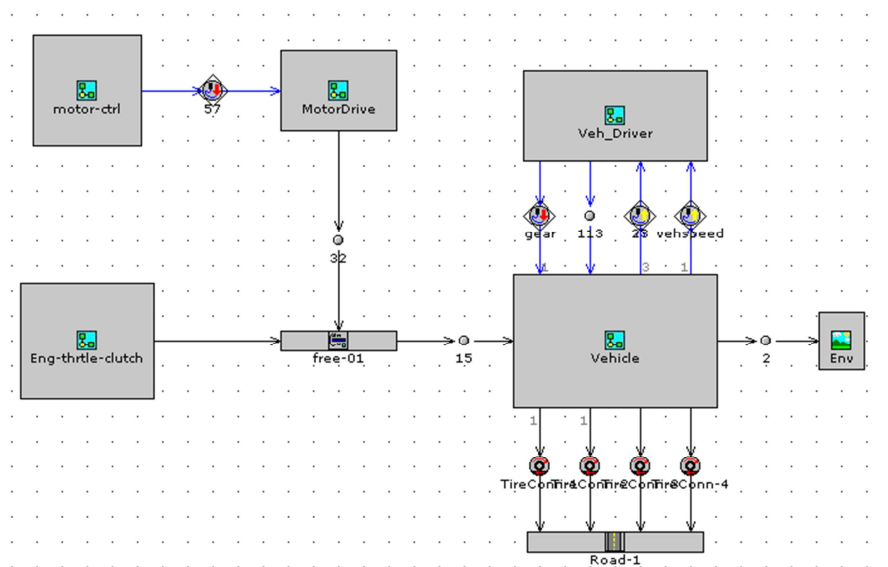
² On-Off

¹ State Of Charge



شکل ۸ - استراتژی کنترلی ترموستات [۱۴]

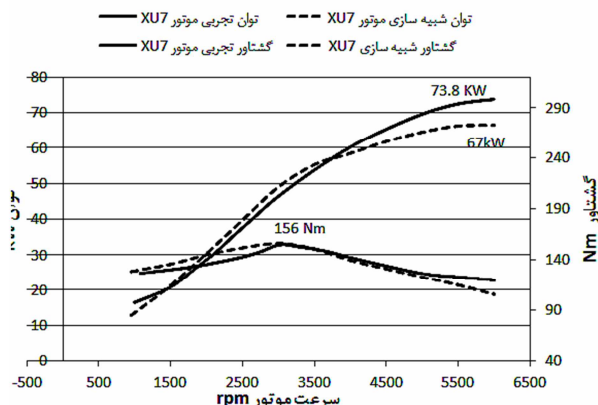
شکل ۹ ساختار خودروی نیمه هیبرید موازی را در شبیه سازی نشان می دهد.



شکل ۹- مدل خودروی نیمه موازی در شبیه سازی

۷- صحنه گذاری نتایج

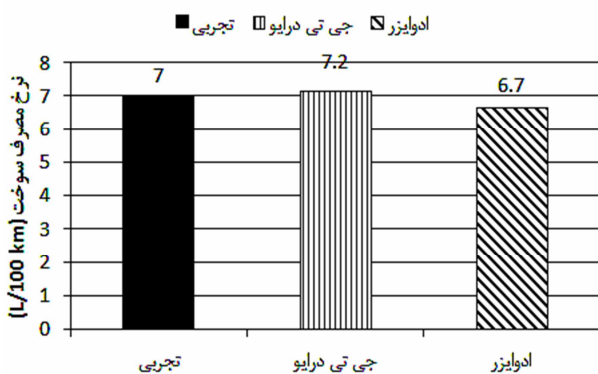
شکل ۱۰ نمودار گشتاور و توان را در حالت تمام بار نشان می دهد در مرجع [۱۶] مقادیر تجربی گشتاور ترمزی بیشینه برابر با ۱۵۳ Nm در دور ۳۰۰۰ rpm و بیشینه توان برابر با ۷۴ kW در دور ۶۰۰۰ rpm داده شده است. همان طور که در شکل ۱۰ دیده می شود مقادیر به دست آمده از شبیه سازی بسیار نزدیک به نتایج تجربی است. شبیه سازی مقاله حاضر مقدار بیشینه توان را ۶۷ kW و مقدار بیشینه گشتاور را ۱۵۶ Nm نتیجه داده است که اختلاف کمی با مقادیر تجربی دارد.



شکل ۱۰- مقایسه نمودار نتایج گشتاور و توان شبیه سازی شده موتور در حالت تمام بار با مقادیر تجربی از مرجع [۱۶]

در شکل ۱۰ دیده می شود که توان بیشینه در دور نامی و گشتاور بیشینه در دور متوسط رخ می دهد. تا قبل از دور ۳۰۰۰ rpm گشتاور و توان هر

این چرخه اختلاف دقت نرمافزار GT-DRIVE و ADVISOR فقط ۰/۵ است. پس می‌توان گفت دقت نرمافزار GT-DRIVE و ADVISOR در این چرخه تقریباً برابر است. در فرایند شبیه‌سازی در این مقاله انتظار می‌رود که مصرف سوخت خروجی بیشتر از تجربی باشد زیرا جهت اطمینان از شبیه‌سازی همیشه یک مقدار بار بیشتر از واقعیت در نظر گرفته می‌شود. این مطلب در مرجع [۱۶] نیز به خوبی قابل مشاهده است. این مرجع مصرف سوخت چرخه شبیه‌سازی شده NEDC را با مقدار تجربی آن چرخه مقایسه کرده و مقدار مصرف سوخت شبیه‌سازی شده به دلیل ذکر شده بیشتر از مقدار تجربی است.



شکل ۱۲- مقایسه مصرف سوخت در چرخه EUDC در نرمافزار GT-DRIVE با نتایج ADVISOR و تجربی [۳]

با مقایسه نتایجی که GT-DRIVE در چرخه‌های ECE و EUDC نسبت به نتایج نرمافزار ADVISOR و نتایج تجربی می‌دهد، مشخص است که مدل ایجاد شده در نرمافزار GT-DRIVE کالیبره است و دقت نتایج کمی بهتر از ADVISOR است. حالا می‌توان چرخه رانندگی تهران را شبیه‌سازی کرد و مقدار مصرف سوخت را به دست آورد. در شبیه‌سازی مصرف سوخت چرخه تهران ۱۱ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر است. از مرجع [۱۶] مقدار مصرف سوخت خودرو در چرخه تهران بین ۱۰ تا ۱۱/۵ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر است. این محدوده به دلیل عادت تعویض دنده در جعبه دنده دستی در رانندگان مختلف است. جدول ۴ مصرف سوخت خودروی پایه را در حالت شبیه‌سازی و تجربی مقایسه می‌کند.

جدول ۴- مقدار مصرف سوخت خودروی پایه در چرخه حرکت تهران

نوع خودرو	لیتر در صد کیلومتر
پایه شبیه‌سازی	۱۱
پایه تجربی	۱۱/۵ - ۱۰

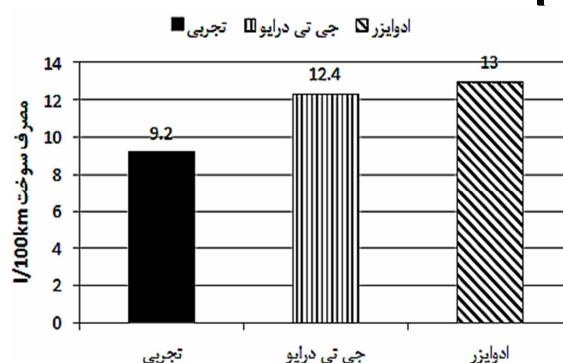
۸- شبیه‌سازی خودروی تمام‌هیبرید سری

شکل ۱۳ عملکرد خودروی تمام‌هیبرید سری را در چرخه شهری ECE نشان می‌دهد. در طی این چرخه رانندگی ۱۹۵ ثانیه‌ای همان‌طور که دیده می‌شود سطح شارژ باتری به کمتر از ۰/۶ نمی‌رسد به همین دلیل موتور احتراق داخلی خاموش است. هر جا که سرعت رو به کاهش است به توان کمتری از باتری احتیاج است بنابراین توان مصرفی باتری نیز افت ناگهانی دارد.

دو زیاد می‌شوند. اما بعد از دور موتور ۳۰۰۰ rpm به دلیل افت، راندمان حجمی هوای ورودی به موتور کم شده و باعث کم شدن نیروی حاصل از احتراق می‌شود در نتیجه گشتاور افت می‌کند ولی توان همچنان زیاد می‌شود. توان رابط‌های از گشتاور و دور موتور است، گشتاور در حال افت است اما دور موتور در حال زیاد شدن است که این منجر به رشد توان بعد از دور ۳۰۰۰ rpm می‌شود.

اختلاف بین توان تجربی و توان شبیه‌سازی شده در دور موتور ۶۰۰۰ rpm مشهود است. در شبیه‌سازی جهت اطمینان، بار بیشتری به موتور وارد می‌شود لذا مقدار توان شبیه‌سازی شده در دورهای بالای موتور که افت راندمان حجمی بیشتری وجود دارد، کمتر از مقدار توان تجربی است.

چرخه ECE چرخه شهری است و از جدول ۱ مقدار مصرف سوخت تجربی خودرو در چرخه شهری حدود ۹/۲ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر است. به منظور ارزیابی دقت نرمافزار و صحت‌گذاری علمی، نتایج به دست آمده از مدل مورد بررسی در نرمافزار GT-DRIVE با نتایج مرجع [۳] و [۸] مقایسه شد. مرجع [۳] خودروی پایه سمند و هیبرید سری سمند را در نرمافزار ادوایزر مدل‌سازی کرده و مقدار بهبود مصرف سوخت نسبت به نمونه با موتور احتراق داخلی آن را مقایسه کرده است. در این مرجع مقدار مصرف سوخت خودروی پایه بعد از شبیه‌سازی در چرخه ECE برابر ۱۳/۵ L/100km بیان شده است. در حالیکه در شبیه‌سازی با GT-DRIVE مقدار مصرف سوخت برابر ۱۲/۴ L/100km شد. در شکل ۱۱ مقدار مصرف سوخت خودروی پایه با موتور احتراق داخلی در چرخه حرکت ECE در نرمافزار GT-DRIVE و ADVISOR با مقدار تجربی مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتیجه به دست آمده از نرمافزار GT-DRIVE کمی به مقدار تجربی نزدیک‌تر است. البته اختلاف ADVISOR و GT-DRIVE ناچیز است و این اختلاف می‌تواند به دلیل تغییرات جزئی در داده‌های ورودی باشد. دلیل این اختلاف کم می‌تواند ممان اینرسی موتور که در مراجع مختلف از ۰/۱۸ تا ۰/۲ استفاده می‌شود و یا نقاط ورودی در نقشه مصرف سوخت موتور باشد.



شکل ۱۱- نمودار مقایسه مصرف سوخت در چرخه ECE خودروی مدل شده در GT-DRIVE با نتایج ADVISOR و تجربی [۳]

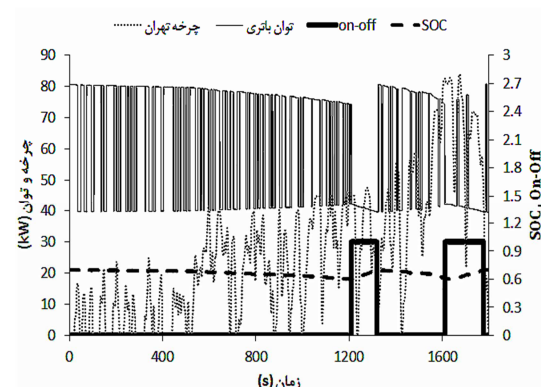
در مرجع [۳] مقدار مصرف سوخت سمند در چرخه EUDC پس از شبیه‌سازی در نرمافزار ADVISOR برابر ۶/۷ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر بیان شده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود نتیجه به دست آمده از نرمافزار GT-DRIVE به مقدار تجربی نزدیک‌تر است. البته در

در جدول ۶ مصرف سوخت خودروی تمام‌هیبرید سری و بنزینی در چرخه EUDC مقایسه شده است. در این چرخه مصرف سوخت خودروی بنزینی $7/2$ L/100Km و برای تمام‌هیبرید سری $5/6$ L/100Km است. درصد کاهش مصرف سوخت برای این چرخه بزرگراهی $22/2\%$ است.

جدول ۶ - مصرف سوخت خودروی تمام‌هیبرید سری و بنزینی در

چرخه EUDC	
لتر در صد کیلومتر	نوع خودرو
$7/2$	پایه با موتور احتراق داخلی
$5/6$	تمام‌هیبرید سری
$22/2$	درصد کاهش مصرف سوخت

شکل ۱۵ عملکرد خودروی تمام‌هیبرید سری را در چرخه تهران نشان می‌دهد. در طی این چرخه دو بار موتور احتراقی روشن می‌شود که در بخش برون‌شهری و بزرگراهی است.



شکل ۱۵- عملکرد خودروی تمام‌هیبرید سری در چرخه ترکیبی تهران

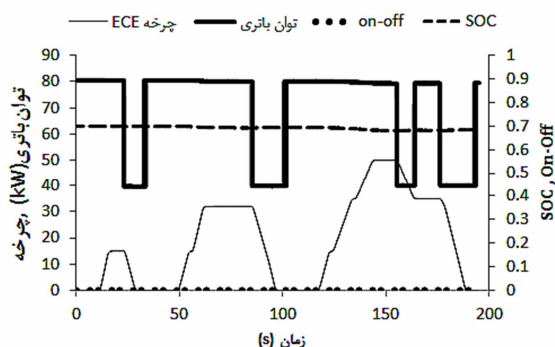
در جدول ۷ مصرف سوخت خودروی تمام‌هیبرید سری و بنزینی در چرخه تهران مقایسه شده است. در این چرخه مصرف سوخت خودروی بنزینی 11 L/100Km و برای تمام‌هیبرید سری $5/6$ L/100Km است. درصد کاهش مصرف سوخت برای این چرخه شهری 49% است.

جدول ۷- مصرف سوخت خودروی تمام‌هیبرید سری و بنزینی در

چرخه تهران	
لتر در صد کیلومتر	نوع خودرو
11	پایه با موتور احتراق داخلی
$5/6$	تمام‌هیبرید سری
49	درصد کاهش مصرف سوخت

۹- شبیه‌سازی خودروی نیمه‌هیبرید موازی

شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ عملکرد خودروی نیمه‌هیبرید موازی را به ترتیب در چرخه ECE و EUDC و تهران نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود توان باتری و موتور الکتریکی با هم برابرند. در این شکل مشخص است که عمده نقش باتری در شتاب‌گیری چرخه است. به عبارتی هر جا که در چرخه افزایش سرعت وجود دارد توان باتری به



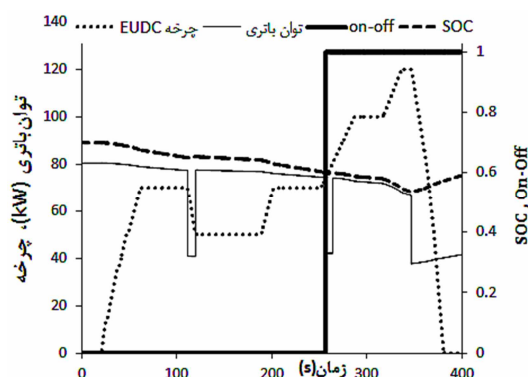
شکل ۱۳- عملکرد خودروی تمام‌هیبرید سری در چرخه شهری ECE

در جدول ۵ مصرف سوخت خودروی تمام‌هیبرید سری و بنزینی در چرخه ECE مقایسه شده است. در این چرخه مصرف سوخت خودروی بنزینی $12/4$ L/100Km و برای تمام‌هیبرید سری 0 L/100Km است. درصد کاهش مصرف سوخت برای این چرخه شهری 100% است. کل این چرخه با توان باتری طی می‌شود.

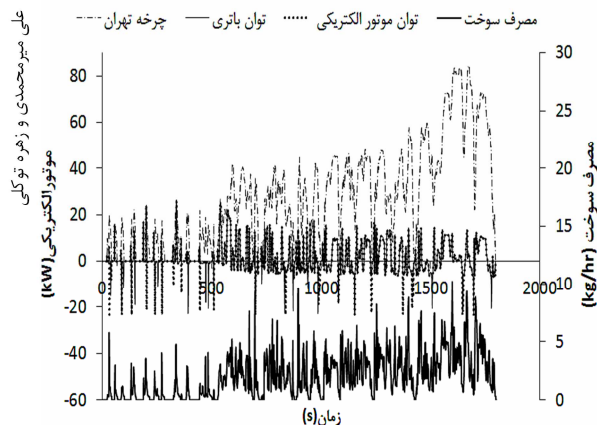
جدول ۵- مصرف سوخت خودروی تمام‌هیبرید سری و بنزینی در چرخه

ECE	
لتر در صد کیلومتر	نوع خودرو
$12/4$	پایه با موتور احتراق داخلی
0	تمام‌هیبرید سری
100	درصد کاهش مصرف سوخت

شکل ۱۴ عملکرد خودروی تمام‌هیبرید سری را در چرخه بزرگراهی EUDC نشان می‌دهد. در این چرخه یک بار سطح شارژ باتری به کمتر از $0/6$ کاهش می‌یابد به همین دلیل موتور احتراق داخلی روشن می‌شود. در طی این چرخه تا قبل از روشن شدن موتور احتراق داخلی سطح توان مصرفی باتری به محض کاهش سرعت در چرخه افت داشته است اما درست لحظه‌ای که موتور احتراقی روشن می‌شود، با وجود افزایش سرعت در چرخه، سطح توان مصرفی باتری افت می‌کند، زیرا در این لحظه از نیروی موتور احتراقی استفاده می‌شود.



شکل ۱۴- عملکرد خودروی تمام‌هیبرید سری در چرخه بزرگراهی EUDC



شکل ۱۸- عملکرد خودروی نیمه‌هیبرید موازی در چرخه تهران

در جدول ۱۰ مصرف سوخت خودروی نیمه‌هیبرید موازی و بنزینی در چرخه تهران مقایسه شده است. در این چرخه مصرف سوخت خودروی بنزینی ۱۱ L/100Km و برای نیمه‌هیبرید موازی ۸/۸ L/100Km است. درصد کاهش مصرف سوخت برای این چرخه ترکیبی ۲۰٪ است.

جدول ۱۰- مصرف سوخت خودروی نیمه‌هیبرید موازی و بنزینی در چرخه تهران

نوع خودرو	لیتر در صد کیلومتر
پایه بنزینی	۱۱
نیمه‌هیبرید موازی	۸/۸
درصد کاهش مصرف سوخت	۲۰

۱۰- نتیجه گیری

خودروی سواری سمند بنزینی و تمام‌هیبرید سری و نیمه‌هیبرید موازی در این مقاله با نرم‌افزار GT-DRIVE مدل‌سازی و در چرخه‌های رانندگی ECE و EUDC شبیه‌سازی شد و نتایج زیر به دست آمد.

۱- در مدل خودروی بنزینی نتایج عملکردی گشتاور و توان موتور نزدیک به نتایج تجربی موتور است.

۲- در مقایسه با نتایج تجربی موتور جواب‌های حاصل از حل این نرم‌افزار کمی دقیق‌تر از حل عددی با نرم‌افزار ADVISOR است.

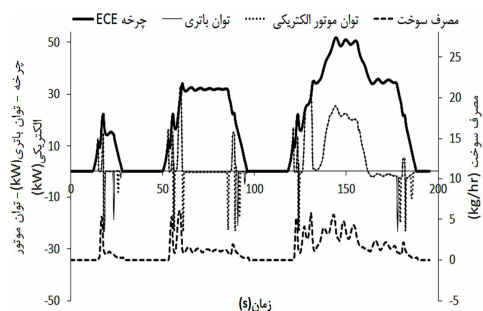
۳- در چرخه شهری ECE مقدار مصرف سوخت خودرو پایه ۱۲/۴ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر بوده و در خودروی تمام‌هیبرید سری ۰ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر و در نیمه‌هیبرید موازی ۸/۵ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر است.

۴- در چرخه ECE کاهش مقدار مصرف سوخت در خودروی تمام‌هیبرید سری نسبت به خودرو بنزینی به مقدار ۱۰۰٪ و در خودروی نیمه‌هیبرید موازی به مقدار ۳۱/۴٪ است.

۵- در چرخه بزرگراهی EUDC مقدار مصرف سوخت خودرو پایه ۷/۲ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر بوده و در خودروی تمام‌هیبرید سری ۵/۶ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر و در نیمه‌هیبرید موازی ۶/۳ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر است.

۶- در چرخه EUDC کاهش مقدار مصرف سوخت در خودروی تمام‌هیبرید سری نسبت به خودرو بنزینی به مقدار ۲۲/۲٪ و در خودروی نیمه‌هیبرید موازی به مقدار ۱۲/۵٪ است.

موتور احتراقی کمک کرده تا سوخت کمتری در شتاب‌گیری مصرف شود. در این نمودارها هر جا که توان موتور الکتریکی منفی است نقش ژنراتور را دارد و باتری را شارژ می‌کند.

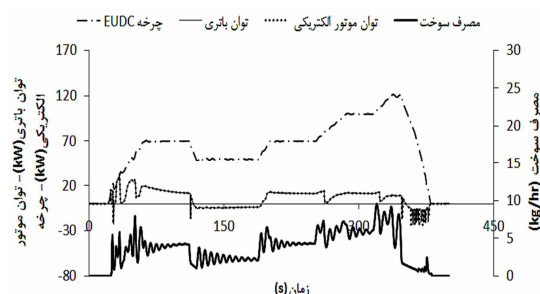


شکل ۱۶- عملکرد خودروی نیمه‌هیبرید موازی در چرخه ECE

مصرف سوخت خودروی نیمه‌هیبرید موازی و بنزینی در چرخه ECE در جدول ۸ مقایسه شده است. در این چرخه مصرف سوخت خودروی بنزینی ۱۲/۴ L/100Km و برای نیمه‌هیبرید موازی ۸/۵ L/100Km است. درصد کاهش مصرف سوخت برای این چرخه شهری ۳۱/۴٪ است.

جدول ۸- مصرف سوخت خودروی نیمه‌هیبرید موازی و بنزینی در چرخه ECE

نوع خودرو	لیتر در صد کیلومتر
پایه بنزینی	۱۲/۴
نیمه‌هیبرید موازی	۸/۵
درصد کاهش مصرف سوخت	۳۱/۴



شکل ۱۷- عملکرد خودروی نیمه‌هیبرید موازی در چرخه EUDC

در جدول ۹ مصرف سوخت خودروی نیمه‌هیبرید موازی و بنزینی در چرخه EUDC مقایسه شده است. در این چرخه مصرف سوخت خودروی بنزینی ۷/۲ L/100Km و برای نیمه‌هیبرید موازی ۶/۳ L/100Km است. درصد کاهش مصرف سوخت برای این چرخه بزرگراهی ۱۲/۵٪ است.

جدول ۹- مصرف سوخت خودروی نیمه‌هیبرید موازی و بنزینی در چرخه EUDC

نوع خودرو	لیتر در صد کیلومتر
پایه بنزینی	۷/۲
نیمه‌هیبرید موازی	۶/۳
درصد کاهش مصرف سوخت	۱۲/۵

- ۷- در چرخه ترکیبی تهران مقدار مصرف سوخت خودرو پایه ۱۱ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر بوده و در خودروی تمام‌هیبرید سری ۵/۶ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر و در نیمه‌هیبرید موازی ۸/۸ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر است.
- ۸- در چرخه تهران کاهش مقدار مصرف سوخت در خودروی تمام‌هیبرید سری نسبت به خودرو بنزینی به مقدار ۴۹٪ و در خودروی نیمه‌هیبرید موازی به مقدار ۲۰٪ است. اگرچه طراحی خودروی نیمه‌هیبرید موازی ساده‌تر از تمام‌هیبرید سری است و خط انتقال قدرت خودروی بنزینی سمند ال-ایکس بدون تغییرات زیاد می‌تواند به خودروی نیمه‌هیبرید موازی تبدیل شود.

۱۱- مراجع

- [1] Farhadi A., Naderi P., Sardarzade S., Simulating and Modeling of Pride Hybrid car batteri- fuel cell, in The 3th Conference on fuel cell, Tehran, Iran, 2010. (In Persian)
- [2] Hajinajafi R., Mirsalim M., Modeling and Simulation of a Series Hybrid Samand Using ADVISOR, in The 3th Conference on Internal combustion engine, Tehran, Iran, 2004. (In Persian)
- [3] Hadadi S., Esfahanian V., Amiri Bavandpoor M., Nehzati H., Sangtarash F., The study of improving fuel consumption in a hybrid urban buses by using AVL / CRUISE, in The 1th International Conference on Automotive electronics industry, Tehran, Iran, 2008. (In Persian)
- [4] Mirmohammadi A., Rashtbarzade A., Bus vehicle hybridisation and its impacts on driving cycle fuel consumption, International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, Vol. 6, No. 1, pp. 14-30, 2014.
- [5] Montazeri-Gh M., Naghizadeh M., Development of the Tehran car driving cycle, International Journal of Environment and Pollution, Vol. 30, No. 1, pp. 106-118, 2007.
- [6] Mashadi B., Amiri-rad Y., Afkar A., Mahmoodi-kaleybar M., Simulation of automobile fuel consumption and emissions for various driver's manual shifting habits, Journal of Central South University, Vol. 21, No. 3, pp. 1066-1058, 2014.
- [7] Tavakoli Z., Hybrid car performance determination using simulation with GT-drive software and comparison with gasoline vehicle, M.Sc Thesis, University of Shahid Rajaee Teaching Training, Tehran, 2015. (In Persian)
- [8] Iran National oil company, Report of the project management cycle studies of Tehran, Tehran, pp. 2-32, 2004.
- [9] Barlow TJ., Latham S., McCrae IS., Boulter PG., A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions, Versio3, pp. 5-32, IHS, 2009.
- [10] Dieselnet. 2013. Emission Test Cycles. Dieselnet, Accessed 7 may 2015; https://www.dieselnet.com/standards/cycles/ece_eudc.php.
- [11] Irankhodro Company, Samand LX Vehicle Manual, Irankhodro, Tehran, pp. 157-162, 2010. (In Persian)
- [12] Shojaeefard M., Khatami M., Sadooghi-Asl A., Mohammadian M., Design of controler for hybrid Samand car and simulation its performance, in The 5th Conference on Internal combustion engine, Tehran, Iran, 2007. (In Persian)
- [13] M. Ehsani, Y. Gao, A. Emadi, Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles, Second Edition, pp. 253-372, New York: CRC, 2004.
- [14] Bestgo power. 2012. Long Lifespan and Ultra Safe Rechargeable Cell. Accessed 1 May 2015; <http://www.bestgopower.com/products/battery-overview/lifepo4-pouch-cell-list.html>
- [15] Tuning talk, Accessed 3 May 2014; <http://www.tuningtalk.com/forum/viewtopic.php?f=28&t=18568&start=20>. (In Persian)
- [16] Montazeri M., Poorbafrani Z., Simulation automated manual transmission with double prong connector and its effect on the performance of the hybrid electric vehicle based on the national car, Journal of Engine reserch, Vol. 6, No21, pp. 3-12, 2011. (In Persian)
- [17] Montazeri M., Naderpoor A., Simulated fuel consumption and emissions of hybrid Samand with national engine and