

افزایش بازدهی خودروهای الکتریکی از طریق بهبود مشخصه‌های آیرودینامیکی

سید محمد رضا طوسی^۱، پژمان بیات^۲، پیمان بیات^۳، علیرضا حاتمی^۴

تاریخ دریافت مقاله:

۹۴/۷/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله:

۹۵/۱/۱۷

چکیده:

امروزه نگرانی‌های زیست محیطی بزرگ‌ترین چالش در طراحی وسایل نقلیه به حساب می‌آیند و به نظر می‌رسد خودروهای الکتریکی پاسخ مناسبی برای حل این مشکلات است. از این رو، تاکنون اقدامات زیادی در زمینه‌های افزایش بازدهی، کاهش تلفات و بهبود عملکرد این خودروها انجام گرفته است. یکی از مهم‌ترین مواردی که در طراحی خودروها باید در نظر گرفت، بهبود مشخصه‌های آیرودینامیکی می‌باشد. در این مقاله، نتایج حاصل از تأثیرات بهبود مشخصه‌های آیرودینامیکی بر روی خودروی الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است و در این راستا، نصب اسپویلر متحرک عقب به همراه کنترل‌کننده پیشنهادی و همچنین پوشاندن چرخ‌های عقب خودرو پیشنهاد گردیده است. به منظور بررسی راه‌کارهای پیشنهادی، تأثیرات آنها بر روی نمونه‌ای از خودروی الکتریکی که توسط مولفین در دست ساخت و توسعه است، در محیط سیمولینک متلب مدل‌سازی شده است. به منظور استخراج ضرایب پسا و برآ، جریان حول خودروی الکتریکی ارائه شده در نرم افزار انسیس مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، حل عددی جریان حول خودرو از طریق دینامیک سیالات محاسباتی و همچنین مدل توربولانسی استاندارد $k-\epsilon$ انجام شده است. نتایج حاکی از آن است که نصب اسپویلر متحرک پیشنهادی و پوشاندن چرخ‌های عقب در خودروهای الکتریکی علاوه بر اینکه باعث افزایش پایداری خودرو می‌گردد، می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر روی سیستم ذخیره‌سازی انرژی، مسافت پیموده شده و بازدهی موتور الکتریکی داشته باشد.

کلمات کلیدی:

اسپویلر، خودروی الکتریکی، دینامیک سیالات محاسباتی، ضریب برآ، ضریب پسا

tousi@basu.ac.ir

pezhman.bayat92@basu.ac.ir

peyman.bayat92@basu.ac.ir

hatamisharif@basu.ac.ir

(۱) استادیار دپارتمان برق دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان (نویسنده مسئول)

(۲) کارشناس ارشد مهندسی برق قدرت، دانشگاه بوعلی سینا همدان

(۳) کارشناس ارشد مهندسی برق قدرت، دانشگاه بوعلی سینا همدان

(۴) استادیار دپارتمان برق دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

مقدمه

با توجه به کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، گرانی و از همه مهمتر آلاینده‌گی زیاد این نوع سوخت‌ها که منجر به شیوع مشکلات تنفسی، آلرژی، تنگی نفس و برخی سرطان‌ها گردیده است [۲۶]، خودروهای الکتریکی توجه بسیاری از خودروسازان در سراسر دنیا را به خود جلب کرده است و به سبب بازدهی بسیار بالا به یک راه حل مناسب به منظور برآورده کردن این نیازها تبدیل شده است. از این رو، خودروهای الکتریکی در دهه گذشته به طور گسترده مورد مطالعه بسیاری از محققین قرار گرفته است. بیشتر کارهای صورت گرفته بر مبنای بهبود عملکرد سیستم ذخیره سازی انرژی، کاهش تلفات و افزایش بازدهی این نوع خودروها می‌باشد. بدیهی است عوامل غیر مستقیمی نیز وجود دارند که بازدهی خودروهای الکتریکی را تحت تاثیر قرار دهند. یکی از مهم‌ترین این عوامل، طراحی آیرودینامیکی می‌باشد. اصلی‌ترین نیروهای آیرودینامیکی وارد شده به خودرو، نیروی مقاومت هوا (پسا) و نیروی بالابرنده (برآ) می‌باشد. بدیهی است کاهش نیروی پسا می‌تواند تاثیرات قابل توجهی در کاهش میزان مصرف انرژی و افزایش بازدهی خودرو داشته باشد و همچنین کاهش نیروی برآ می‌تواند منجر به افزایش پایداری خودرو در بسیاری از جوانب گردد.

با توجه به مطالعات انجام شده، اگر بخواهیم حداکثر سرعت خودروی فراری تستاروسا^۳ را بدون هیچ گونه تغییر در شرایط آیرودینامیکی، از ۲۸۸ کیلومتر بر ساعت به ۳۲۱ کیلومتر بر ساعت تغییر دهیم، نیاز است موتور آن را از ۳۹۰ اسب بخار به ۵۳۵ اسب بخار ارتقا دهیم، این امر نه تنها باعث اشغال حجم بیشتری از ماشین می‌شود، بلکه با افزایش وزنی که برای خودرو ایجاد می‌کند اثرات منفی ای را برای خودرو به‌جا می‌گذارد، این در حالی است که این تغییرات سرعت را می‌توان تنها با کاهش نیروی پسای وارد شده به خودرو از ۰/۲۶ به ۰/۲۹ انجام داد [۹]، به‌همین منظور، مشخصات آیرودینامیکی نقش بسیار مهمی را در خودرو ایفا می‌کند. در این راستا، تاکنون اقدامات متعددی در زمینه بهبود مشخصه‌های آیرودینامیکی در خودروهای سوختی انجام شده است که می‌توان به نصب انواع اسپویلر^۴ [۸،۱۵،۲۸،۳۴]، دیفیوزر^۵ [۱۷،۱۹]، اصلاح فرم جلو و عقب خودرو [۲۰] و اشاره کرد.

اسپویلرها با توجه به کاربرد مورد نظر طراحی می‌شوند و می‌توانند باعث کاهش نیروی پسا یا نیروی برا و یا حتی هر دوی آنها شوند. آقای دامجانوویچ و همکارانش^۶ در [۶] سعی در بهبود عملکرد خودروی سوختی از طریق تغییرات نیروی

- 1) Drag Force
- 2) Lift Force
- 3) Ferrari Testarossa
- 4) Spoiler
- 5) Diffuser
- 6) Damjanovi et al.

آیرودینامیکی نمودند و در این راستا، نصب اسپویلر عقب در خودرو را پیشنهاد کردند. نتایج نشان داد که نصب اسپویلر در عقب خودروی سوختی به میزان قابل توجهی طول و مساحت آشفستگی را در انتهای خودرو کاهش می‌دهد و باعث افزایش پایداری خودرو مخصوصاً در سرعت‌های بالا می‌شود. در مقاله [۲۸] آقای زیک و همکارانش^۱ نشان دادند که نصب اسپویلر عقب از طریق افزایش فشار در انتهای خودروی سوختی باعث افزایش پایداری و همچنین کاهش نیروی پسای وارده به خودرو می‌شود. به منظور افزایش بازدهی خودروهای سوختی در [۸]، اسپویلر عقب پیشنهاد شده است. با توجه به نتایج استخراج شده از این مقاله، نصب اسپویلر عقب در خودرو باعث کاهش نیروی برآ و پسای خودرو می‌شود و شرایط آیرودینامیکی مناسبی را برای خودرو به ارمغان می‌آورد. در مقاله [۳۴]، دو شبیه‌سازی مجزا از خودروهای سوختی صورت گرفت؛ یکی خودروی سوختی بدون اسپویلر و دیگری همراه با نصب اسپویلر و نتایج شبیه‌سازی نشان داد که نصب اسپویلر عقب در خودروهای سوختی نه تنها باعث بهبود مشخصه‌های آیرودینامیکی در خودرو می‌شود بلکه باعث کاهش مصرف سوخت نیز می‌شود. با توجه به محاسبات عددی در [۱۵]، نصب اسپویلر عقب در خودروهای حجم پایین مانند خودروهای شهری و مسابقاتی می‌تواند نیروی پسا و برآی وارد شده به خودرو را بیش از ۵ درصد کاهش دهد. تاکامری و همکارانش^۲ در [۳۶] نشان دادند که نصب اسپویلر در وسایل نقلیه با حجم بالا مانند اتوبوس‌ها نیز می‌تواند به میزان قابل توجهی نیروی پسا را کاهش دهد. این امر در [۲۵]، نیز بخوبی نمایان است که نصب اسپویلر عقب در اتوبوس‌های مرسوم می‌تواند نیروی پسا را تا ۱۶ درصد کاهش دهد. به منظور استخراج نتایج فوق، محققین از حل عددی جریان حول خودرو از طریق دینامیک سیالات محاسباتی^۳ و همچنین مدل توربولانسی^۴ استاندارد $k-\epsilon$ بهره می‌گیرند [۲۷، ۲۰، ۱۲، ۱۸].

با توجه به نتایج حاصل از مطالعات فوق، به نظر می‌رسد که بهبود مشخصه‌های آیرودینامیکی (کاهش نیروهای پسا و برآ)، می‌تواند نقش مهمی در افزایش بازدهی خودروهای الکتریکی ایفا کند. از این رو، لازم است تاثیرات این عوامل بر روی بازدهی سیستم ذخیره‌سازی انرژی، موتور الکتریکی، میزان مسافت پیموده شده و ... در خودروهای الکتریکی مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین، مقاله حاضر به بررسی تاثیرات بهبود مشخصه‌های آیرودینامیکی بر روی خودروهای الکتریکی می‌پردازد. در این راستا، با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف رانندگی (سرعت خودرو و پیچ جاده)، نوع جدیدی از اسپویلر پیشنهاد شده است که با توجه به دریافت سیگنال کنترلی، با تغییر زاویه قسمت متحرک نصب شده در عقب اسپویلر، بهترین حالت آیرودینامیکی را برای خودروی الکتریکی فراهم می‌کند. علاوه بر این، به منظور کاهش بیشتر نیروی پسای وارد شده به خودرو، پوشاندن چرخ‌های عقب پیشنهاد شده است. به منظور بررسی عملکرد روش‌های پیشنهاد شده،

1) Zake et al.

2) Takemori et al.

3) Computational Fluid Dynamics

4) Turbulence Model

نمونه‌ای از خودروی الکتریکی با مشخصات خودروی ساخته شده توسط مولفین مقاله، در چرخه رانندگی استاندارد^۱ با بهره‌گیری از محیط سیمولینک متلب^۲ مدل‌سازی شده است. به منظور استخراج ضرایب آیرودینامیکی (برآ و پسا) در دو حالت اعمال و عدم اعمال روش‌های پیشنهادی بر روی خودروی الکتریکی مورد نظر، جریان حول خودروی الکتریکی ارائه شده در نرم افزار انسیس^۳ مورد بررسی قرار گرفته شده است در این راستا، حل عددی جریان حول خودرو از طریق دینامیک سیالات محاسباتی و همچنین مدل توربلانسی استاندارد $k-\epsilon$ انجام شده است.

سایر بخش‌های این مقاله بدین صورت می‌باشد: ابتدا قسمت‌های مختلف خودرو شامل باتری، موتور الکتریکی، دینامیک خودرو، سیستم انتقال قدرت و سایر اجزا مدل‌سازی شده است. بعد از استخراج مشخصات آیرودینامیکی خودرو با اعمال تغییرات پیشنهادی از طریق روش‌های ارائه شده، ضرایب آیرودینامیکی استخراج گردیده است و در بخش بعدی، نتایج بدست آمده در محیط سیمولینک متلب مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت، نتیجه مقاله ارائه شده است.

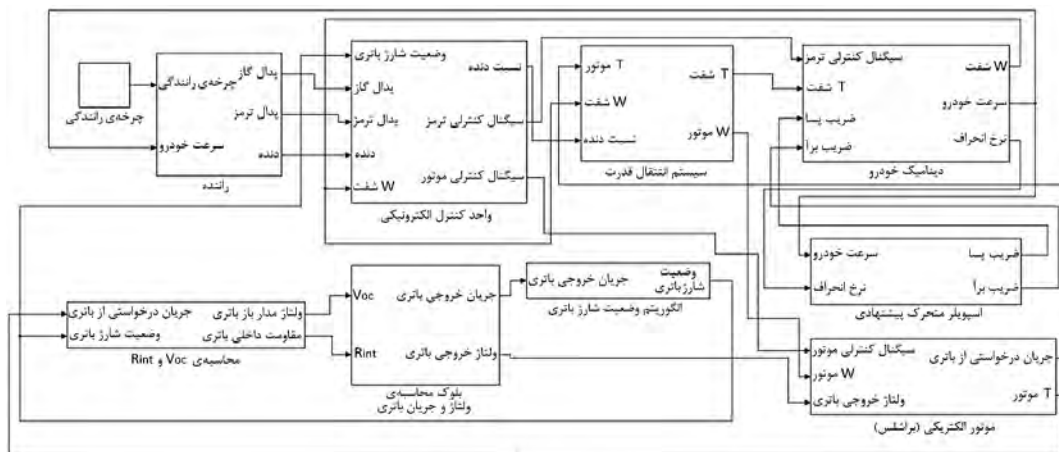
پیکربندی سیستم

به منظور ارزیابی تاثیرات بهبود مشخصه‌های آیرودینامیکی (اسپویلر متحرک ارائه شده به همراه سیستم کنترلی پیشنهادی و پوشاندن چرخ‌های عقب) بر روی خودروی الکتریکی، لازم است مدلی دقیقی از خودروی الکتریکی در چرخه حرکتی استاندارد ارائه شود. بدین منظور درک صحیحی از زیرساخت‌های موجود اعم از مدل‌سازی دینامیک خودرو شامل نیروهای وارد شده بر خودرو، مدل‌سازی سیستم انتقال قدرت (گیربکس دیفرانسیل و تایرها)، مدل‌سازی اجزای الکتریکی (موتور الکتریکی، باتری، و مبدل DC-DC افزاینده) و همچنین سیستم کنترلی ارائه شده در مقاله ضروری می‌باشد. در این راستا، اجزای مذکور همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، در محیط سیمولینک متلب مدل‌سازی شده است. در این مدل‌سازی، سرعت مورد نیاز (شتاب مورد تقاضا) که از موقعیت پدال تعیین می‌شود، با سرعت روتور مقایسه می‌شود و این امکان را فراهم می‌سازد که گشتاور مورد نیاز موتور برای رسیدن به نقطه کار مورد نظر محاسبه شود و انرژی الکتریکی مورد نیاز را از سیستم ذخیره انرژی فراخوانی کند و توان مکانیکی و سرعت مورد نیاز خودرو فراهم شود.

1) Driving Cycle

2) MATLAB/SIMULINK

3) ANSYS



شکل ۱) مدل خودروی الکتریکی در محیط سیمولینک

مدل دینامیکی خودرو

در این مقاله، پارامترهای خورویی که به منظور شبیه‌سازی انتخاب شده است مطابق با خودروی الکتریکی می‌باشد که توسط تیم مؤلفین ساخته شده و در حال توسعه است [۴] (شکل ۲). نیروی پیشران این خودرو توسط یک موتور الکتریکی جریان مستقیم بدون جاروبک^۱ به قدرت ۱۰ کیلووات تامین می‌شود. همچنین سیستم ذخیره سازی انرژی این خودرو شامل مجموعه‌ای از باتری‌های لیتیوم آیون^۲ و ماژول ابر خازن^۳ می‌باشد. پارامترهای دیگر خودرو در جدول (۱) نشان داده شده‌اند.



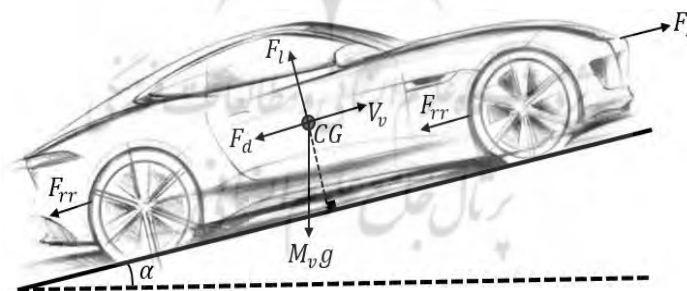
شکل ۲) خودروی الکتریکی ساخته شده مؤلفین مقاله

- 1) Brushless DC Motor
- 2) Li-ion Battery
- 3) Supercapacitor

جدول (۱) پارامترهای خودروی الکتریکی

۰/۰۱۱	ضریب مقاومت لغزشی (C_{rr})
$۲/۷ m^2$	مساحت سطح جلوی خودرو (A_f)
$۰/۳۲ m$	شعاع غلتشی تایر
$۵/۲۱$	نسبت نهایی دنده
$۱/۳۵ m$	فاصله محور جلو تا مرکز ثقل
$۱/۲۵ m$	فاصله محور عقب تا مرکز ثقل
٪۹۶	بازدهی سیستم انتقال قدرت
$۰/۳۱ m^2$	اینرسی موتور الکتریکی
$۱/۲ m^2$	اینرسی چرخ و محور
۱۵۰ Amps	حداکثر جریان خالی شدن ذخیره الکتریکی باتری
۲۰۰ Amps	حداکثر جریان خالی شدن ذخیره الکتریکی ابر خازن

این خودروی الکتریکی در حدود ۴۱۰۰ میلیمتر طول، ۱۷۰۰ میلیمتر عرض، ۱۴۰۰ میلیمتر ارتفاع و ۴۵۰ کیلوگرم وزن دارد و وزن آن تقریباً به صورت یکنواخت در همه ۴ چرخ توزیع شده است. اگر این گونه در نظر گرفته شود که بدنه خودرو توزیع جرم یکنواختی دارد، مرکز ثقل خودرو تقریباً در مرکز خودرو نزدیک به کف شاسی آن قرار می‌گیرد که ارتفاع مرکز ثقل از زمین ۴۵۰ میلیمتر است. شکل (۳) نیروهای وارد بر خودرو در حین حرکت و مرکز ثقل را نشان می‌دهد.



شکل (۳) مرکز ثقل و نیروهای وارده به خودرو در حین حرکت

در این مطالعه، جرم خودرو الکتریکی M_v در نظر گرفته شده است و اگر فرض گردد خودروی الکتریکی با سرعت V_v از روی جاده‌ای با شیب α بالا رود، نیروهای وارد بر خودرو در حین حرکت تحت قانون دوم نیوتن به صورت نیروی پسا (F_L) ، نیروی برآ (F_T) ، نیروی ناشی از جاذبه زمین (F_G) ، نیروی اینرسی (F_I) و نیروی مقاومت غلتشی (F_{rr}) در نظر گرفته شده است [۲۳].

$$F_I = M_v \dot{V}_v \quad (۱)$$

$$F_G = M_v \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (۲)$$

$$F_{rr} = M_v \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot \text{sign}(V_v) \cdot C_{trr} \quad (۳)$$

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot (V_v)^2 \quad (۴)$$

$$F_l = \frac{1}{2} \cdot c_l \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot (V_v)^2 \quad (۵)$$

$$C_{trr} = [100 + 3.6V_v] \cdot 10^{-4} \quad (۶)$$

که در روابط فوق، ρ_a چگالی هوا بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب (kg/m^3)، c_d ضریب پسا، c_l ضریب برآ، c_{trr} ضریب مقاومت غلتشی و A_f مساحت سطح جلوی خودرو بر حسب مترمربع (m^2) می‌باشد.

سرعت طولی و عرضی و نرخ انحراف^۱ نسبت به محور عمودی توسط معادلات زیر مدل می‌شوند [۱۱، ۲۹].

$$v_x = r v_y + \frac{1}{M_v} [(F_{xfl} + F_{xfr}) \cdot \cos(\delta_f) - (F_{yfl} + F_{yfr}) \cdot \sin(\delta_f) + F_{xrl} + F_{xrr}] \quad (۷)$$

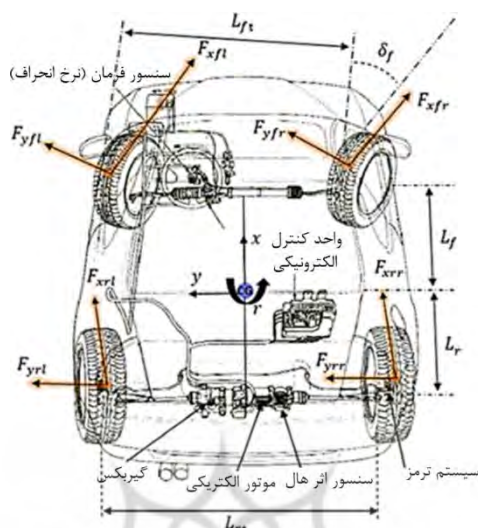
$$v_y = -r v_x + \frac{1}{M_v} [(F_{xfl} + F_{xfr}) \cdot \sin(\delta_f) + (F_{yfl} + F_{yfr}) \cdot \cos(\delta_f) + F_{yrl} + F_{yrr}] \quad (۸)$$

$$\begin{aligned} \dot{r} = \frac{1}{I_z} [& L_f (F_{xfl} + F_{xfr}) \cdot \sin(\delta_f) + L_f (F_{yfl} + F_{yfr}) \cdot \cos(\delta_f) \\ & - L_r (F_{yrl} + F_{yrr}) - \frac{T_f}{2} (F_{xfl} - F_{xfr}) \cdot \cos(\delta_f) \\ & + \frac{T_f}{2} (F_{yfl} + F_{yfr}) \cdot \sin(\delta_f) - \frac{T_r}{2} (F_{xrl} - F_{xrr})] \end{aligned} \quad (۹)$$

که F_{yrl} ، F_{xfl} ، F_{xfr} ، F_{xrr} ، F_{xrl} ، F_{yfl} ، F_{yfr} ، F_{yrr} نیروهای طولی و عرضی وارد شده به تایر خودرو و I_z ممان اینرسی خودرو حول محور عمودی می‌باشند.

شکل (۴) نشان دهنده نیروهای طولی و عرضی وارد به خودرو و همچنین فاصله مرکز ثقل نسب به محور جلو (L_f)، فاصله مرکز ثقل نسب به محور عقب (L_r)، طول محور جلو (L_{fl})، طول محور عقب (L_{rt}) و زاویه انحراف چرخ جلو (فرمان) (δ_f) می‌باشند.

1) Yaw Rate



شکل ۴) نیروهای طولی و عرضی وارد به خودرو

مدل باتری

در این مقاله، باتری به صورت مدل تونن در نظر گرفته شده است. این مدل شامل یک منبع ولتاژ مدار باز (V_{oc})، یک مقاومت داخلی ثابت (R_{int})، و ولتاژ ترمینال (V_t) است. مدل در نظر گرفته شده به نحوی است که مقاومت داخلی و ولتاژ مدار باز باتری بسته به وضعیت شارژ باتری^۱ و دمای ماژول رفتار متفاوتی را از خود نشان می‌دهد.

همان‌طور که در [۳۱] نشان داده شده است، وضعیت شارژ را می‌توان توسط دو روش کلی تعیین نمود: برخط^۲ و غیر برخط^۳. در روش‌های غیر برخط، لازم است باتری از روش مشخصی شارژ و دشارژ شود تا امکان استخراج مشخصه‌ها از داده‌ها فراهم شود. در اغلب موارد، روش‌های غیر برخط برآوردی دقیق از وضعیت شارژ باتری ارائه می‌دهند. با این حال، این روش‌ها وقت‌گیر و پرهزینه هستند و در عملکرد باتری اصلی می‌توانند وقفه به وجود آورند. این عوامل مهم‌ترین دلایلی هستند که محققان از روش‌های برخط برای تعیین وضعیت شارژ به جای روش‌های غیر برخط استفاده می‌کنند [۱۳، ۳۵]. رایج‌ترین روش محاسبه وضعیت شارژ، روش شمارش بار^۴ می‌باشد که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. معادله (۱۰) و (۱۱) روابط مربوط را در فرایند شارژ و دشارژ نشان می‌دهند.

- 1) State of Charge
- 2) Online
- 3) Offline
- 4) Coulomb Counting

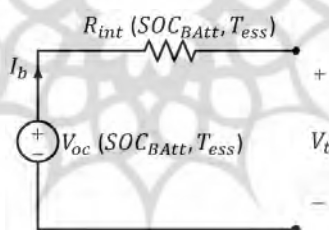
$$SOC = SOC_0 + \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^t |I| dt \quad \text{Charge} \quad (10)$$

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{C_n} \int_0^t |I| dt \quad \text{Discharge} \quad (11)$$

در روابط مذکور، C_n ظرفیت نامی باتری، I جریان باتری، SOC_0 مقدار اولیه شارژ می‌باشد. با این حال، این روش نیازمند اندازه‌گیری دقیق جریان I و اطلاع از SOC_0 است.

بعد از به دست آمدن میزان شارژ باتری و اعمال تاثیر آن بر مقاومت داخلی و ولتاژ مدار باز، در هر مرحله جریان خروجی باتری با در نظر گرفتن توان درخواستی از باتری از رابطه (۱۲) (با توجه به شکل ۵) محاسبه می‌شود.

$$I_b = \frac{V_{oc} \pm \sqrt{V_{oc}^2 - 4P_r R_{int}}}{2R_{int}} \quad (12)$$



شکل ۵) مدل دینامیکی باتری

تغییر سریع سرعت و شتاب در خودروهای الکتریکی باعث وارد شدن تنش‌های شدیدی مانند پرش‌های سریع جریانی به باتری می‌شود که این امر موجب افزایش دمای تک‌تک سلول‌ها می‌شود. بزرگ‌ترین مشکل افزایش بیش از حد دما در باتری‌ها، کاهش راندمان است. به همین دلیل برای جلوگیری از بروز این مشکل، قرار دادن سیستم خنک‌کننده در مجموعه باتری‌ها ضروری است. در این راستا، در این مقاله همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، برای بالا بردن دقت در مدلسازی و تاثیرات اسپویلر ارائه شده بر دمای باتری، باتری همراه با سیستم خنک‌کننده با در نظر گرفتن دمای محیط، گرمای دفع شده از باتری و نرخ جریان هوا به صورت معادلات زیر مدل شده است [۳۷].

$$H_d = \frac{T_{ess} - T_{air}}{R_{eff}} \quad (13)$$

$$R_{eff} = \frac{1}{h\gamma} + \frac{t}{k\gamma} \quad (14)$$

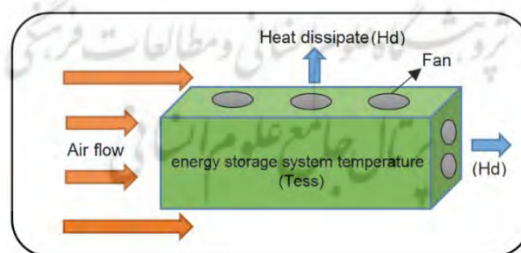
$$h = \begin{cases} a \left(\frac{m / \rho A}{5} \right)^b & T_{ess} > T_{ess-set} \\ 4 & T_{ess} < T_{ess-set} \end{cases} \quad (15)$$

$$T_S = T_{amb} + \frac{0.5H_d}{r_{air}C_{p,air}} [^{\circ}C] \quad (16)$$

$$P_{l,ess} = \eta R_{int} I^2 [W] \quad (17)$$

$$T_{ess} = \int_0^t \frac{H_d - P_{l,ess}}{m_{Batt} C_{p,Batt}} dt [^{\circ}C] \quad (18)$$

در این روابط، H_d گرمای دفع شده از باتری، T_S دمای اطراف باتری، T_{ess} دمای باتری، R_{eff} مقاومت دمایی مؤثر، T_{amb} دمای محیط، r_{air} نرخ جریان هوا، $C_{p,air}$ ظرفیت گرمایی هوا، m_{Batt} وزن باتری، $C_{p,Batt}$ ظرفیت گرمایی باتری، h ضریب انتقال حرارت، K ضریب هدایت حرارت، a, b ثابت‌های هندسی که با توجه به شکل باتری تعیین می‌شود، $P_{l,ess}$ توان تلفاتی باتری، A سطح باتری، ρ چگالی هوا و γ, t ضرایب ثابتی که بسته به نوع باتری تعیین می‌شوند.



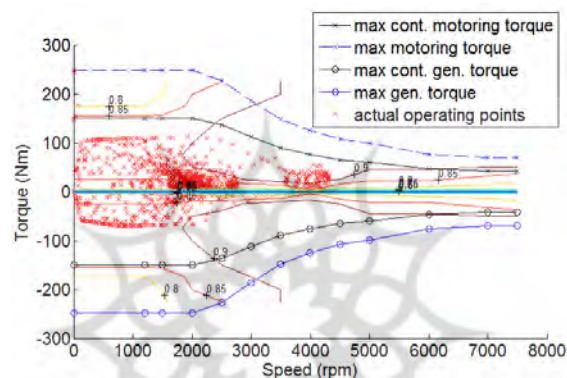
شکل ۶) مدل دمایی مازول باتری

مدل موتور الکتریکی

به منظور مدل‌سازی موتور الکتریکی، مشخصه‌ها بر اساس اطلاعات بدست آمده از مدل ارائه شده به صورت شکل (۷) به دست آمده است. به علت محدودیت توان باتری و گشتاور موتور، گشتاور نهایی موتور به صورت معادله (۱۹) در نظر گرفته شده است [۳۰]، همچنین بازدهی موتور تابعی از گشتاور موتور و سرعت آن می‌باشد $(\eta_m = f(T_m, w_m))$.

$$T_m = \begin{cases} \min(T_{m,r}, T_{m,d}(\omega_m), T_{batt,d}(SOC, \omega_m)) & \text{if } T_{m,r} > 0 \\ \max(T_{m,r}, T_{m,c}(\omega_m), T_{batt,c}(SOC, \omega_m)) & \text{if } T_{m,r} < 0 \end{cases} \quad (19)$$

که در این رابطه، $T_{m,r}$ گشتاور درخواستی موتور، $T_{m,d}$ و $T_{m,c}$ به ترتیب عبارتند از حداکثر گشتاور موتور در حالت‌های دشارژ و شارژ، $T_{batt,c}$ و $T_{batt,d}$ عبارتند از محدودیت‌های گشتاور به سبب محدودیت جریان باتری در حالت‌های دشارژ و شارژ (تمامی گشتاورها بر حسب نیوتن متر می‌باشند).



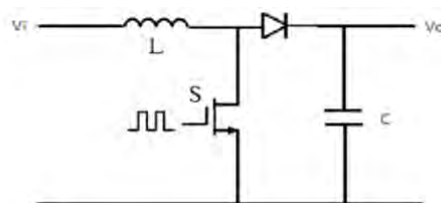
شکل ۷) دیاگرام راندمان موتور الکتریکی

مدل مبدل DC-DC

در خودروی الکتریکی مدل شده از مبدل افزایشی DC-DC بهره گرفته شده است. هدف استفاده از این مبدل، تبدیل ولتاژ باتری به سطح مورد نظر به منظور تغذیه موتور الکتریکی بدون جاروبک استفاده شده در خودروی الکتریکی مورد نظر می‌باشد. در این مبدل، همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده است، برای از بین بردن ریپل موجود در ولتاژ خروجی از یک خازن استفاده گردیده و همچنین با استفاده از یک دیود، جریان خروجی یکسو شده است. سلف موجود در قسمت ورودی مدار، انرژی مورد نیاز خود را در هنگام بسته بودن کلید از ولتاژ ورودی دریافت و در هنگام باز شدن کلید، این انرژی را آزاد می‌سازد. در نتیجه، در حالت پایدار، ولتاژ خروجی مقداری ثابت و بزرگ‌تر از ورودی خواهد بود. رابطه ولتاژ ورودی و خروجی از طریق معادله‌ی (۲۰) به دست می‌آید [۲۴].

$$V_o = \frac{1}{1-D} V_i \quad (20)$$

که در آن، D نسبت وظیفه کلیدزنی مبدل می‌باشد.



شکل ۸) مدل افزایشنده DC-DC

سیستم انتقال قدرت

در این مطالعه، به منظور مدل کردن اجزای سیستم انتقال قدرت (مجموعه قطعات یا سازوکارهایی که دور و گشتاور موتور را به چرخ‌های خودرو انتقال می‌دهند) از مدل استاتیکی استفاده شده است و دلیل این امر، سریع بودن سیستم انتقال قدرت می‌باشد. سیستم انتقال قدرت شامل گیربکس، دیفرانسیل، چرخ‌ها و شفت‌های اتصالی در نظر گرفته شده است. همچنین برای توالی تغییر دنده‌ها از مدل دینامیکی گسسته غیرخطی متغیر با زمان بهره گرفته شده است [۱۴، ۳۳].

$$T_{tr} = \eta_{tr}(g_n) \cdot R_{tr}(g_n) \cdot (T_t - T_{tr,loss}(\omega_t, g_n)) \quad (21)$$

$$T_{df} = \eta_{df} \cdot R_{df} \cdot (T_{tr} + R_c \cdot \eta_c \cdot T_m - T_{df,loss}(\omega_t)) \quad (22)$$

$$T_p = \frac{T_t}{T_r(w_{rc})} = \left(\frac{\omega_e}{K_t(w_{rc})} \right)^2, \quad \omega_{rc} = \frac{\omega_t}{\omega_e} \quad (23)$$

$$g_n(k+1) = \begin{cases} 1, & g_n(k) + S(k) < 1 \\ g_n(k), & 1 < g_n(k) + S(k) < 4 \\ 4, & g_n(k) + S(k) > 4 \end{cases} \quad (24)$$

که در این معادلات، T_{tr} گشتاور خروجی سیستم انتقال قدرت، T_{df} گشتاور خروجی دیفرانسیل، T_p گشتاور پمپ هیدرولیکی، T_t گشتاور توربین، T_r نسبت گشتاور خروجی مبدل، $T_{tr,loss}$ گشتاور تلف شده ناشی از اصطکاک در سیستم انتقال قدرت، $T_{df,loss}$ گشتاور تلف شده ناشی از اصطکاک در دیفرانسیل، R_{tr} نسبت دنده‌ها در سیستم انتقال قدرت، R_{df} نسبت دنده‌ها در دیفرانسیل، η_{tr} بازدهی سیستم انتقال قدرت، η_{df} بازدهی دیفرانسیل، w_{rc} نسبت سرعت مبدل گشتاور، K_t ضریب ظرفیت مبدل گشتاور، $g_n(k)$ شماره دنده، $S(k)$ دستور تعویض دنده است (همه گشتاورها بر حسب نیوتن می‌باشد).

معادلات حاکم بر جریان اطراف خودرو و مدل‌سازی آشفتگی

برای حل جریان سیال حول خودروی الکتریکی مورد نظر، مساله جریان به صورت مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل

غیرخطی به همراه مشتقات جزئی و با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب تعریف گردیده است و برای نوشتن این معادلات به صورت کد (CFD^۱) از محیط نرم‌افزار متلب بهره گرفته شده است. معادلات ناویر استوکس (مومنتوم)^۲ سه بعدی و وابسته به زمان برای جریان تراکم ناپذیر به صورت زیر می‌باشد که شامل گرادیان فشار، اثرات ویسکوزیته^۳ و نیروهای وارد به بدنه می‌باشد [۱۶].

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + F; i, j = 1, 2, 3 \quad (25)$$

و معادله پیوستگی^۴ به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad i = 1, 2, 3; \quad (26)$$

به منظور محاسبه اثرات آشفته‌گی بر روی میدان جریان، از تکنیک میانگین‌گیری رینولدز^۵ معادلات ناویر استوکس بهره گرفته شده و همچنین برای مدل‌سازی آشفته‌گی از مدل استاندارد $k-\varepsilon$ استفاده شده است. مدل استاندارد $k-\varepsilon$ در برابر جریان‌های پیچیده، پیش‌بینی خوبی ارائه می‌دهد [۳۲] و به منظور نمایش و تحلیل خواص حرکات آشفته‌گی سیال از دو معادله k و ε بهره می‌گیرد که k نمایانگر انرژی جنبشی آشفته‌گی و ε نمایانگر نرخ اتلاف گردابه‌های آشفته‌گی می‌باشد و به محاسبه مقیاس سرعت و طول گردابه‌ها می‌پردازد.

$$g = k \frac{1}{2} \quad \text{مقیاس سرعت} \quad (27)$$

$$l = \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{مقیاس طول} \quad (28)$$

ویسکوزیته آشفته‌گی مطابق فرمول (۲۹) زیر در نظر گرفته شده است.

$$\mu_t = C_\mu l \cdot g = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (29)$$

- 1) Computational Fluid Dynamics
- 2) Niver-Stocks Equations
- 3) Effects of Viscosity
- 4) Continuity Equation
- 5) Reynolds

انرژی جنبشی آشفتگی (k) از طریق فرمول زیر به دست می‌آید:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]; i, j = 1, 2, 3 \quad (30)$$

نرخ اتلاف (ε) به شرح زیر است:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]; i, j = 1, 2, 3 \quad (31)$$

که داریم:

$$\tau_{ij} = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} = \text{تانسور تنش‌های رینولدز} \quad (32)$$

$$\delta_{ij} = (1 \text{ when } i = j) = \text{دلتای کرونکر} \quad (33)$$

$$S_{ij} = \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (34)$$

با افزایش نرخ میانگین تغییر شکل‌ها، آشفتگی افزایش می‌یابد. فرضیه بوزینسک^۳ بیان می‌کند که می‌توان تنش‌های رینولدز را به نرخ میانگین تغییر شکل‌ها ارتباط داد [۱]. لذا با در نظر گرفتن فرضیه بوزینسک در معادله مومنتوم داریم:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} = - \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right]; i, j = 1, 2, 3 \quad (35)$$

ثابت‌های مدل، بر اساس [۵] به شرح زیر نظر گرفته شده است که براساس آزمایش‌های تجربی به دست آمده است.

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, \sigma_\varepsilon = 1.3, \sigma_k = 1, C_\mu = 0.09 \quad (36)$$

1) Reynolds Stress Tensor

2) Kronecker Delta

3) Boussinesq Hypothesis

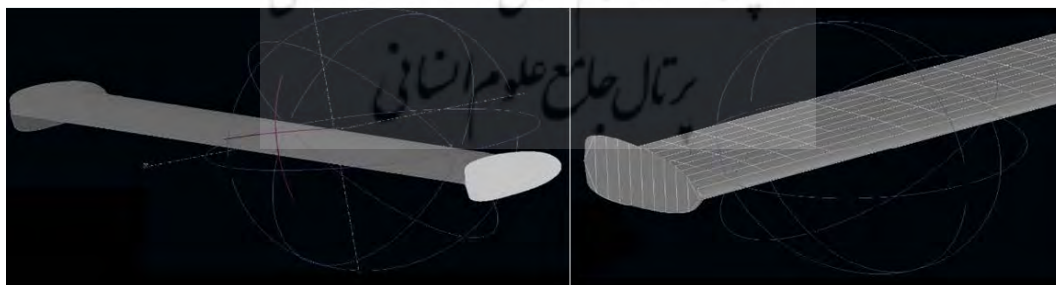
در روابط فوق، ρ چگالی هوا (m/s^2)، p فشار (pa)، μ لزجت ملکولی، μ_t لزجت گردابه‌ای، σ_k و σ_ϵ اعداد پراتل آشفتگی^۱، $x_{i,j}$ مختصات، $u_{i,j}$ جزء سرعت در راستای $x_{i,j}$ ، F نیروی وارد به بدنه در واحد جرم (N) می‌باشد.

تجزیه و تحلیل مشخصات آیرودینامیکی

تحقیقات حاکی از آن است که یک خودرو با موتور احتراقی داخلی در حال حرکت با سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت ۶۵ درصد از انرژی خود را صرف مقابله با نیروهای آیرودینامیکی وارد شده به خودرو می‌کند [۷،۲۱]. به همین دلیل تجزیه و تحلیل مشخصات آیرودینامیکی یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در طراحی خودرو به شمار می‌آید. نیروی برآ و پسا اصلی‌ترین نیروهای آیرودینامیکی وارده به خودرو محسوب می‌شوند.

نیروی پسا یا همان نیروی مقاومت باد در اثر برخورد ذرات هوا با خودرو به وجود می‌آید. به همین دلیل، تا آنجایی که ممکن است خودرو را طوری طراحی می‌کنند که برخورد ذرات هوا به قسمت‌های مختلف خودرو به حداقل مقدار خود برسد. نیروی برآ به علت اختلاف فشار ذرات عبوری هوا در زیر و روی ماشین به وجود می‌آید و در برخی اوقات افزایش این نیرو باعث بروز برخی از مشکلات از جمله لغزش چرخ‌ها و کاهش پایداری خودرو می‌شود. به همین دلیل، لازم است این نیرو در شرایط مختلف رانندگی کنترل شود.

به منظور بررسی تاثیرات نصب اسپویلر بر مشخصه‌های آیرودینامیکی خودروی الکتریکی از جمله ضریب پسا و برآ، همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده است، نمونه‌ای از اسپویلر غیر قابل کنترل با زاویه لبه فرار صفر^۲ توسط نرم افزار $XFLR5$ طراحی شده است. این اسپویلر دارای ۱۴۰ سانتی‌متر طول و ۳۶ سانتی‌متر عرض می‌باشد.



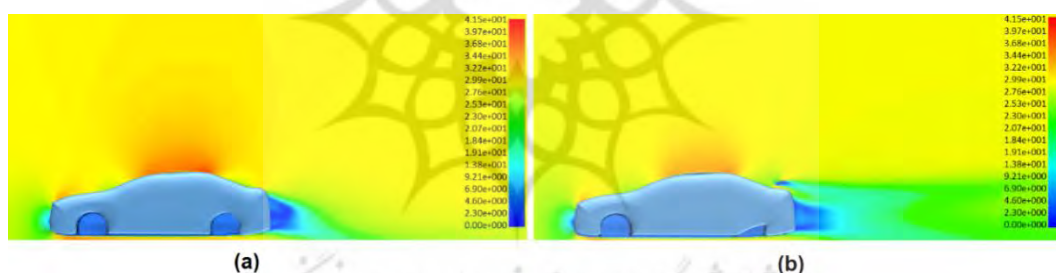
شکل ۹) اسپویلر غیر قابل کنترل با زاویه لبه فرار ثابت صفر درجه

1) Turbulent Prandtl Numbers
2) Angle of Trailing Edge

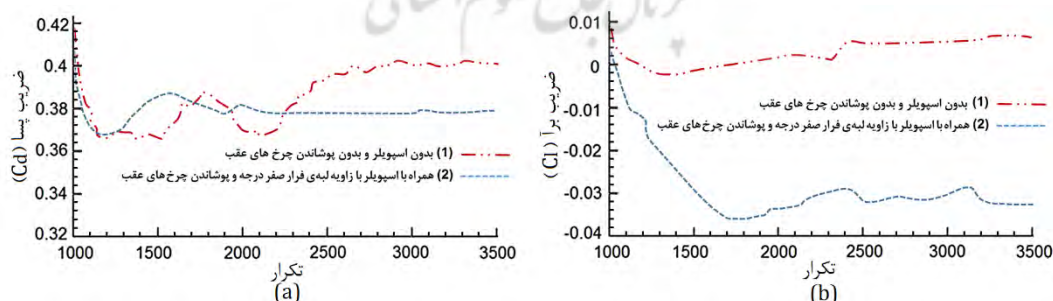
به منظور استخراج کانورترهای فشار و بررسی تاثیرات نصب اسپویلر و پوشاندن چرخ‌های عقب، در حالت ماندگار از معادلات سه بعدی ناویر استوکس در محیط نرم افزار انسیس فلونت بهر گرفته شده است. همچنین مدل‌سازی اغتشاش با استفاده از توابع دیوار عدم تعادل^۱ در مدل تلاطم $k-\epsilon$ انجام گرفته شده است.

ضرائب برآ و پسا برای خودروی الکتریکی مورد نظر در حالات نصب اسپویلر و پوشاندن چرخ‌های عقب و بدون در نظر گرفتن آنها، در شرایط مرزی و همچنین شبکه‌بندی مشابه در نظر گرفته شده است. شبکه‌بندی خودرو توسط نرم افزار گمبیت صورت گرفته و سرعت جریان آزاد ۲۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. فشارهای ایجاد شده در اطراف خودروی مورد نظر در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

همان‌طور که از شکل پیداست، بعد از نصب اسپویلر و پوشاندن چرخ‌های عقب، فشارهای وارد شده بر قسمت انتهایی و بالایی خودرو تغییر کرده است. این امر باعث تغییر در نیروهای پسا و برآی وارد شده به خودرو می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۱) پیداست، نیروی برآ و پسای خودروی مورد نظر بعد از انجام شبیه‌سازی در ۳۵۰۰ تکرار، به ترتیب از اعداد ۰/۰۰۸ و ۰/۴۰۴ به اعداد ۰/۰۳۶- و ۰/۳۷۸ همگرا شده است.



شکل ۱۰ فشارهای ایجاد شده در اطراف خودروی الکتریکی مورد نظر، (a) خودروی الکتریکی بدون پوشاندن چرخ‌های عقب و بدون اسپویلر، (b) خودروی الکتریکی با پوشاندن چرخ‌های عقب و به همراه اسپویلر غیر متحرک



شکل ۱۱ (a) ضریب پسای خودروی الکتریکی، (b) ضریب برآی خودروی الکتریکی

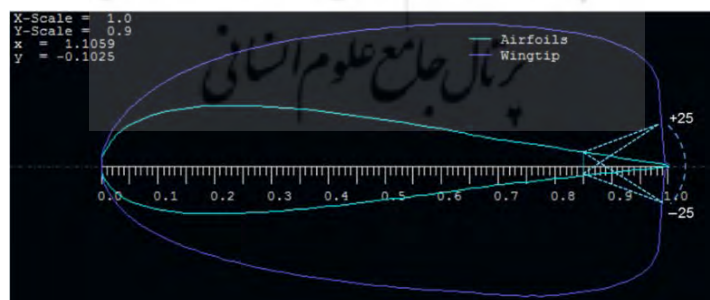
1) Non-Equilibrium Wall Functions

اسپویلر متحرک پیشنهادی

با توجه به اینکه با تغییر زاویه لبه فرار اسپویلر ممکن است ضرایب استخراج شده از شبیه‌سازی شکل (۱۱) تغییر نماید، به همین منظور، با توجه به ایرفویل^۱ اسپویلر پیشنهادی، زوایای لبه فرار برای اسپویلر مورد نظر از ۲۵- تا ۲۵+ درجه در نظر گرفته شده است (شکل ۱۲). همان‌طور که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، بعد از اعمال تغییرات زاویه لبه فرار در اسپویلر، ضرائب برآ و پسا به اعداد مختلفی همگرا شده و ممکن است برای یک زاویه خاص مانند ۲۵- درجه تاثیرات منفی در ضریب پسا ایجاد شود ولی تاثیرات مثبت چشم‌گیری بر ضریب برآ داشته باشیم. به همین منظور، لازم است زاویه لبه فرار اسپویلر برای پیدا کردن نقطه بهینه ضرایب برآ و پسا در شرایط مختلف حرکتی خودرو کنترل شود تا بهترین شرایط آیرودینامیکی برای خودرو فراهم شود. به عنوان مثال، در شرایطی که با پیچ جاده روبه‌رو می‌شویم، به منظور حفظ پایداری خودرو و کاهش لغزش چرخ‌ها، ضریب برآ بر ضریب پسا ارجحیت دارد و عکس آن ممکن است در شرایط حرکت مستقیم خودرو با سرعت زیاد صدق کند.

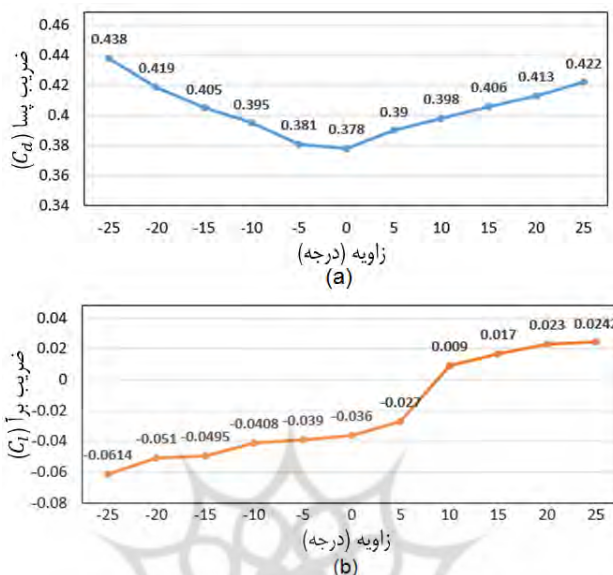
کنترل‌کننده‌ی اسپویلر متحرک

همان‌طور که در قسمت قبل بیان گردید، زوایای مختلف لبه فرار برای اسپویلر، نیروهای آیرودینامیکی متفاوتی را برای سیستم فراهم نمود. به همین منظور، سیستم کنترلی نیاز است تا اسپویلر بتواند به کمک آن، با توجه به شرایط مختلف رانندگی، بهترین حالت آیرودینامیکی را برای خودرو به ارمغان آورد. سیستم کنترلی پیشنهادی برای اسپویلر متحرک به صورت الگوریتم در شکل (۱۴) نشان داده شده است. نرخ انحراف از مسیر مستقیم (با توجه به معادله‌ی ۹) که از حسگر فرمان گرفته می‌شود و نرخ سرعت خودرو که از حسگر سرعت دریافت می‌گردد، به عنوان ورودی‌های الگوریتم در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۲) ایرفویل اسپویلر پیشنهادی و محدوده تغییرات زاویه لبه فرار

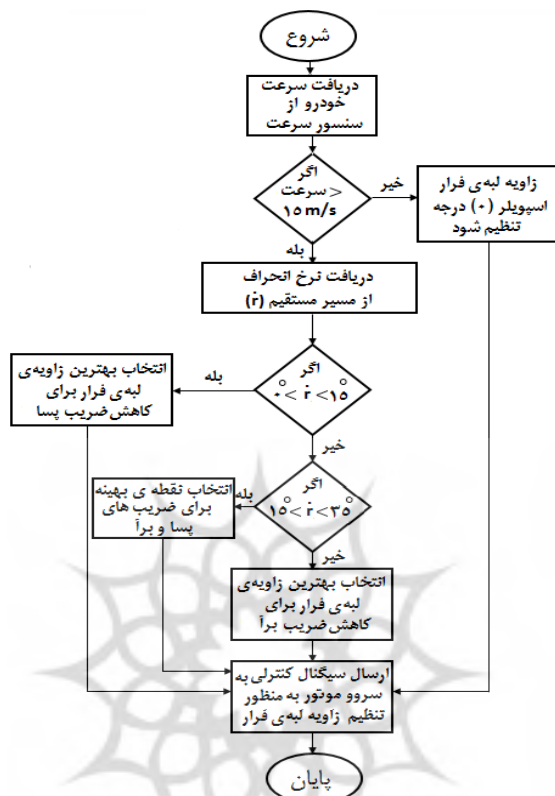
1) Airfoil



شکل ۱۳) ضرایب آیرودینامیکی استخراج شده برای خودروی الکتریکی ناشی از زاویه‌های مختلف لبه فرار اسپویلر (a) ضریب پسا، (b) ضریب مکش

سیستم کنترلی پیشنهادی بعد از دریافت دو سیگنال ورودی، در سه حالت مختلف برای زاویه لبه فرار اسپویلر تصمیم‌گیری می‌نماید. لازم به ذکر است به منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی الکتریکی و همچنین تاثیر ناچیز اسپویلر در سرعت‌های پایین، کنترل‌کننده تنها در سرعت‌های بالای ۱۵ متر بر ثانیه عمل می‌کند.

حالت اول زمانی رخ می‌دهد که خودرو با سرعت بالای $15m/s$ در حال حرکت باشد و همچنین نرخ انحراف خودرو از مسیر مستقیم کمتر از ۱۵ درجه باشد. در این حالت، به دلیل اینکه این انحراف تغییرات محسوسی را در پایداری خودرو ایجاد نمی‌کند، به منظور کاهش فشارهای آیرودینامیکی ناشی از برخورد ذرات هوا به عقب خودرو، نیروی پسا نسبت به نیروی برآ در اولویت قرار گرفته شده است. به همین منظور، برای ایجاد کم‌ترین نیروی پسا در خودرو، طبق نمودار اول از شکل (۱۳)، زاویه لبه فرار اسپویلر صفر در نظر گرفته می‌شود. حالت دوم زمانی رخ می‌دهد که خودرو با سرعتی بالای $15m/s$ و نرخ انحرافی بین ۱۵ تا ۳۵ درجه در حال تردد باشد. در این حالت، به منظور در نظر گرفتن هم‌زمان پایداری و نیروی پسا، زاویه ۱۰- تا ۱۵- برای زاویه لبه فرار اسپویلر در نظر گرفته شده است و حالت سوم زمانی رخ می‌دهد که خودرو با سرعت بالای $15m/s$ و نرخ انحراف بالای ۳۵ درجه مواجه است. در این حالت حفظ پایداری خودرو نسبت به نیروی پسا از اهمیت بالایی برخوردار است. به همین دلیل، بدون در نظر گرفتن نیروی پسا، طبق نمودار دوم در شکل (۱۳)، بهترین حالت برای نیروی برآی وارد شده به خودرو که در زاویه لبه فرار ۲۵- رخ می‌دهد، در نظر گرفته شده است.



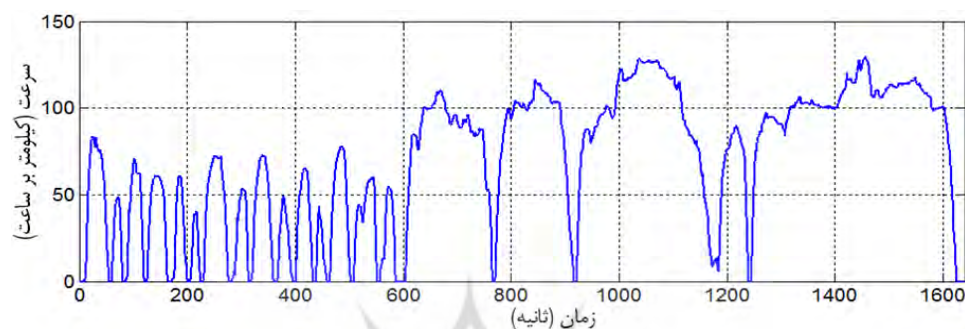
شکل ۱۴) الگوریتم کنترلی تنظیم زاویه لبه فرار اسپویلر به منظور مدیریت ضرائب پسا و برآ

نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، نتایج بدست آمده از پژوهش در زمینه بررسی تأثیرات نیروهای آیرودینامیکی بر خودروهای الکتریکی در محیط نرم افزار سیمولینک متلب بیان شده است. در این شبیه‌سازی، تأثیرات تغییر مسیر حرکت خودرو نیز در نظر گرفته شده و این تأثیرات طبق شکل (۴) با اعمال تغییرات بر روی نیروها اعمال گردیده است، لذا کنترل کننده قسمت متحرک اسپویلر به طور مستقیم در شبیه‌سازی لحاظ شده است و خود وابسته به تغییر مسیر حرکت خودرو و سرعت خودرو می‌باشد. در این راستا، به منظور یکپارچه کردن نتایج بدست آمده و فراهم نمودن زمینه‌ای برای مقایسه روش ارائه شده در راستای بهبود نیروهای آیرودینامیکی خودروی الکتریکی شامل نصب اسپویلر متحرک پیشنهادی به همراه پوشاندن چرخ‌های عقب خودرو در مقایسه با خودروی الکتریکی بدون در نظر گرفتن بهبودهای ذکر شده، شبیه‌سازی‌ها در چرخه رانندگی استاندارد انجام شده است. در این راستا، چرخه رانندگی استاندارد باید به نحوی انتخاب گردد که شرایط مختلف رانندگی از جمله تغییرات سریع در شتاب و رانندگی با سرعت بالا را در برگیرد. بدین منظور، چرخه استاندارد (ARB02)^۱ انتخاب شده

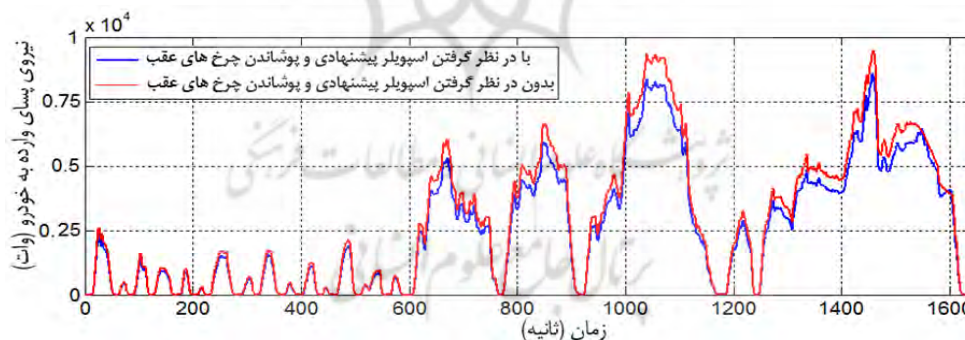
1) Air Resources Board Drive Cycle No.2

است [۳]. همان‌طور که در شکل (۱۵) مشخص است، این چرخه از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول به منظور شبیه‌سازی خودرو در شرایطی است که تغییرات شتاب زیاد است مانند رانندگی در شهر و بخش دوم، رانندگی در شرایطی است که سرعت خودرو بالاتر بوده و خودرو با سرعت میانگین ۷۰ کیلومتر بر ساعت در حال حرکت است.



شکل ۱۵) چرخه رانندگی استاندارد ARB02

نیروی پسای ایجاد شده توسط خودرو با توجه به فرمول (۴)، با و بدون در نظر گرفتن روش‌های پیشنهادی در شکل (۱۶) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل پیداست، در هنگام نصب اسپویلر پیشنهادی و پوشاندن چرخ‌های عقب، نیروی پسا کاهش پیدا کرده است. این تغییرات نه تنها باعث کاهش مصرف انرژی می‌شود بلکه حاوی مزایایی است که به شرح آن خواهیم پرداخت.



شکل ۱۶) نیروی پسا در سرعت‌های مختلف خودرو

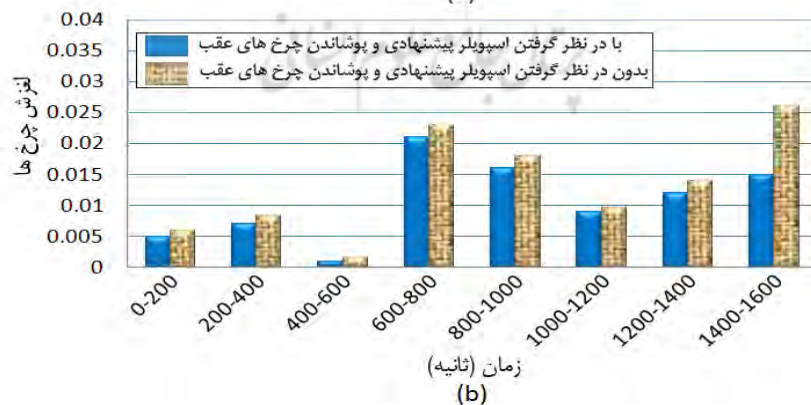
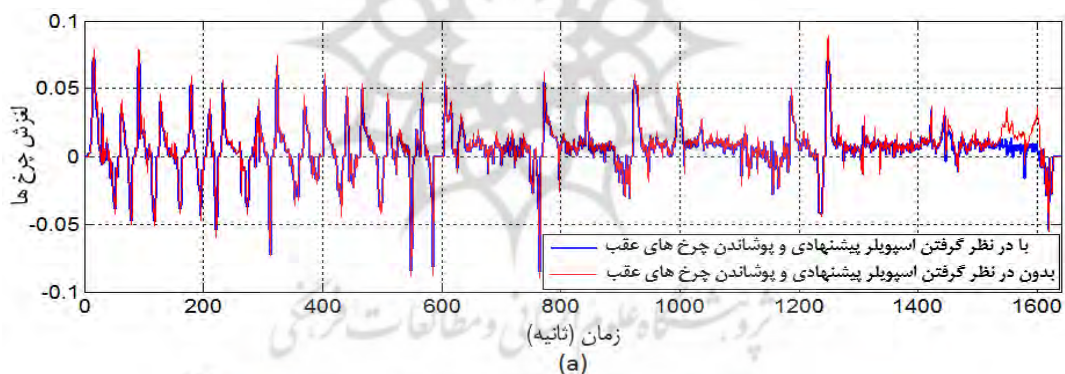
همان‌طور که پیشتر بیان گردید، نصب اسپویلر پیشنهادی در بسیاری از شرایط منجر به کاهش ضریب برآ در خودرو گردید که خود منجر به افزایش پایداری در خودرو می‌گردد. لذا برای بررسی بیشتر تاثیرات نصب اسپویلر پیشنهادی بر پایداری خودرو لازم است تاثیرات آن بر مقاومت غلتشی و زاویه لغزش مطالعه شود. زاویه لغزش چرخ‌های جلو و عقب در هنگام شتاب‌گیری و ترمز خودرو از طریق معادلات زیر به دست می‌آید [۲۲].

$$\sigma_f = \begin{cases} \frac{w_f R_f - V_v}{w_f R_f} & \text{if } w_f R_f > V_v, \text{ for acceleration} \\ \frac{w_f R_f - V_v}{V_v} & \text{if } w_f R_f < V_v, \text{ for braking} \end{cases} \quad (37)$$

$$\sigma_r = \begin{cases} \frac{w_r R_r - V_v}{w_r R_r} & \text{if } w_r R_r > V_v, \text{ for acceleration} \\ \frac{w_r R_r - V_v}{V_v} & \text{if } w_r R_r < V_v, \text{ for braking} \end{cases} \quad (38)$$

که σ_f لغزش چرخ‌های جلو، σ_r لغزش چرخ‌های عقب، R_r شعاع چرخ‌های عقب، R_f شعاع چرخ‌های جلو، w_r سرعت زاویه‌ای چرخ‌های عقب، w_f سرعت زاویه‌ای چرخ‌های جلو، V_v سرعت خودرو می‌باشد.

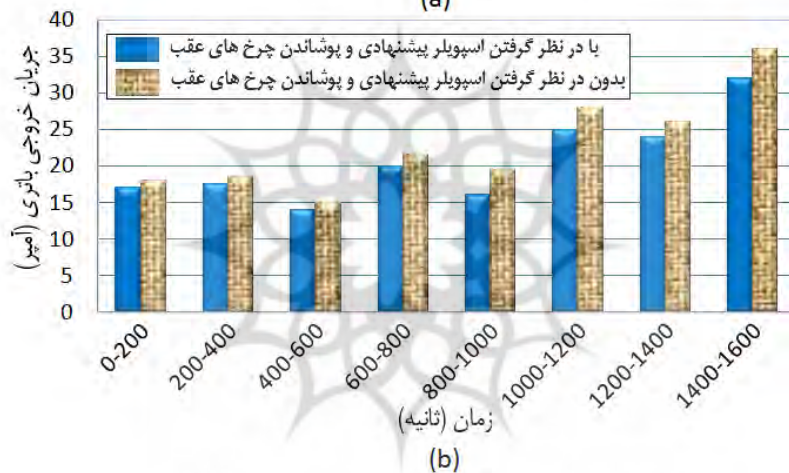
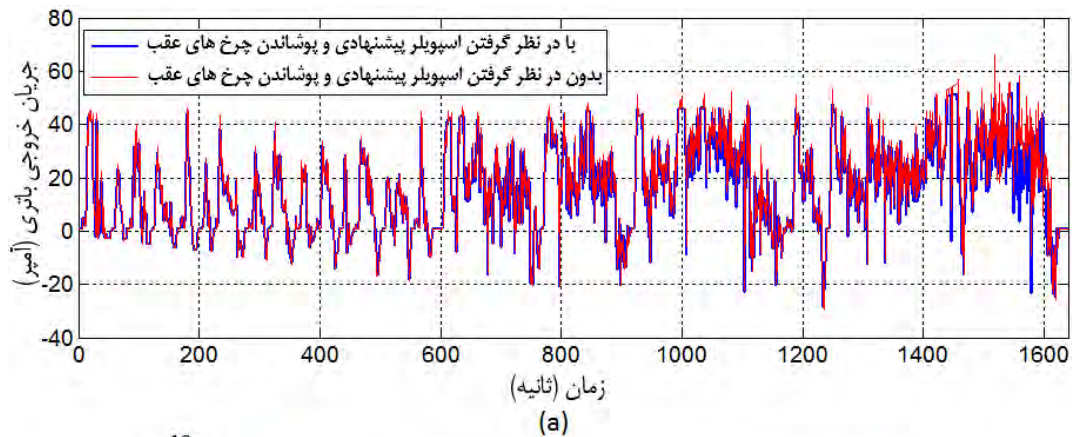
با توجه به نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی در شکل (۱۷)، نصب اسپویلر پیشنهادی باعث کاهش لغزش چرخ‌ها می‌شود. علاوه بر این، مقاومت غلتشی نیز تحت تاثیر قرار گرفته شده است و کاهش می‌یابد که خود منجر به کاهش انرژی مورد نیاز در تولید نیروی پیشران خودرو می‌شود.



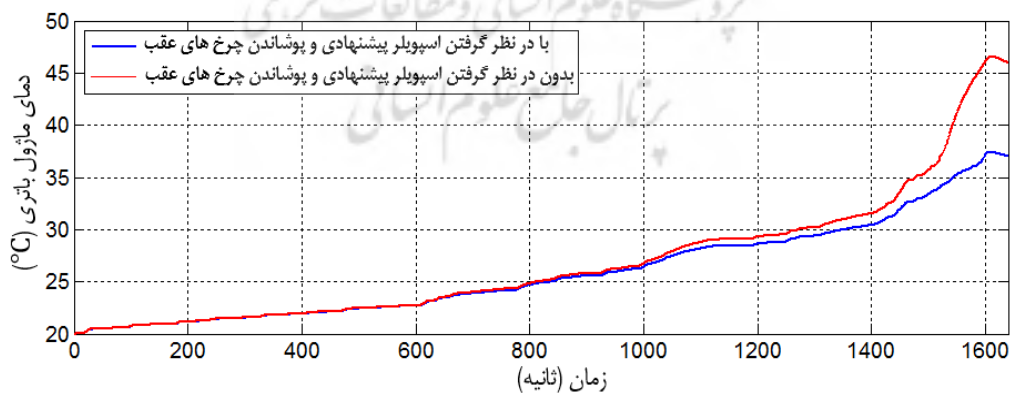
شکل ۱۷) لغزش ایجاد شده در چرخ‌ها، (a) لحظه‌ای؛ (b) متوسط‌گیری در بازه‌های ۲۰۰ ثانیه

یکی دیگر از مواردی که می‌توان از تاثیرات بهبود مشخصه‌های آیرودینامیکی در خودروهای الکتریکی نام برد، تاثیرات غیر مستقیم آن بر واحد ذخیره‌سازی انرژی می‌باشد. نرخ سلامتی باتری^۱ یکی از مهم‌ترین موارد مورد بحث در باتری‌هاست. در موضوع نرخ سلامتی باتری عواملی که باعث خرابی زودرس باتری می‌شود مورد بحث و تحلیل قرار می‌گیرد. که می‌توان به افزایش ناگهانی جریان درخواستی از باتری، افزایش غیر معمول دمای باتری و ... اشاره کرد که این موارد می‌تواند به خودی خود باعث بروز تلفات در سیستم ذخیره‌سازی انرژی شود [۳۱]. این افزایش تلفات باعث می‌شود توان خروجی از باتری کمتر از توان درخواستی مورد نظر باشد. به همین منظور، برای رسیدن به توان مورد نیاز باید جریان بیشتری از باتری کشیده شود. واضح است که با بهبود مشخصه‌های آیرودینامیکی، برخی از این مشکلات حل می‌شود. به همین منظور، استفاده از روش‌های پیشنهادی به‌عنوان بهترین و در دسترس‌ترین گزینه‌ها می‌باشد که تاثیرات آنها بر جریان خروجی باتری و دمای باتری در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) نشان داده شده است. هنگامی که بهبود مشخصه‌های آیرودینامیکی از طریق روش‌های پیشنهادی در خودروی الکتریکی اعمال نگردیده است، پیک جریان ۶۸ آمپر می‌باشد و جریان کاری باتری بشدت تغییر می‌کند که باعث پدید آمدن تعداد بیشتری ضربه‌های جریانی بالاتر از ۴۵ آمپر شده است. همان‌طور که در شکل (۱۸) بخوبی نمایان است، با بهبود مشخصه‌های آیرودینامیکی، پیک جریان باتری به ۵۵ آمپر کاهش یافته است و تعداد ضربه‌های جریانی کاهش پیدا کرده است. افزایش ضربه‌های جریانی و بالا رفتن پیک جریان در باتری فقط به کاهش عمر باتری محدود نمی‌شود بلکه این امر باعث افزایش تلفات در باتری نیز می‌شود. ضربه‌های جریانی در باتری، گرایش به تولید حرارت زیادی درون باتری دارند که منجر به افزایش مقاومت داخلی باتری می‌شوند و در نتیجه، پائین آمدن راندمان و خرابی پیش از موعد را برای باتری به دنبال خواهند داشت. همان‌طور که در شکل (۱۹) نشان داده شده است، در حالتی که روش‌های پیشنهادی اعمال نگردیده است، دمای مازول باتری در مقایسه با اعمال روش‌های پیشنهادی، ۱۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر است.

1) State of Health



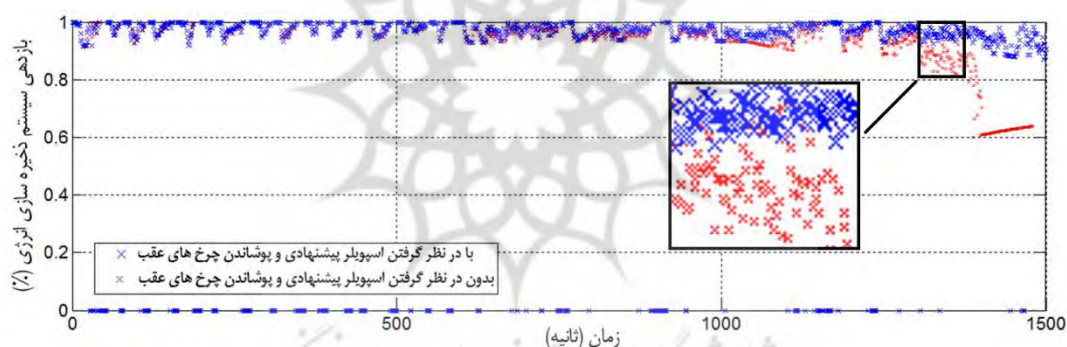
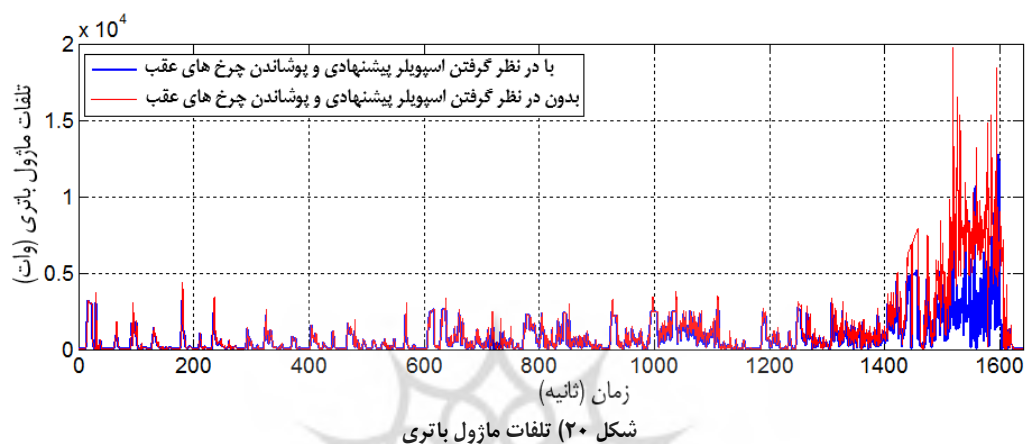
شکل ۱۸) جریان خروجی مازول باتری، (a) لحظه‌ای؛ (b) متوسط‌گیری در بازه‌های ۲۰۰ ثانیه



شکل ۱۹) دمای مازول باتری

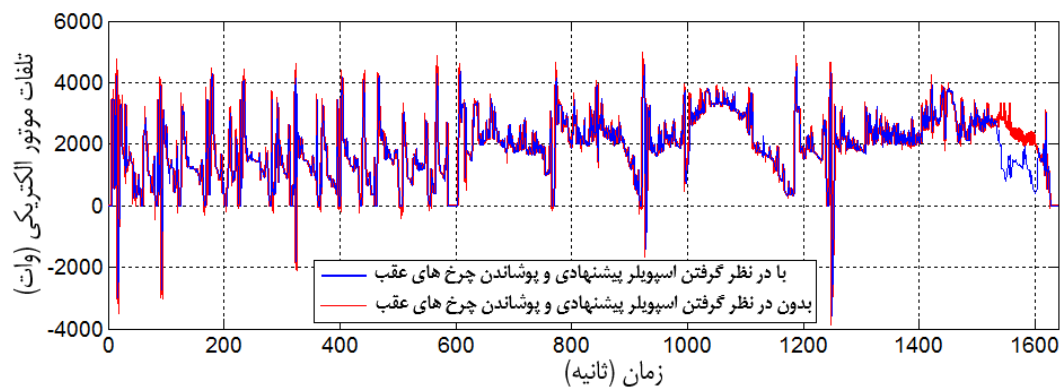
بدیهی است که افزایش دمای باتری و افزایش ضربه‌های جریانی منجر به افزایش تلفات در مازول باتری می‌شود. برای اثبات این موضوع شبیه‌سازی مجزایی در این زمینه انجام شده است (شکل ۲۰).

همان‌طور که در شکل (۲۱) نشان داده شده است، افزایش تلفات در باتری، بازدهی سیستم ذخیره‌سازی انرژی را تحت تاثیر قرار داده است و منجر به کاهش آن می‌شود.



تغییرات جریان خروجی سیستم ذخیره‌سازی انرژی فقط به کاهش بازدهی سیستم ذخیره انرژی محدود نمی‌شود بلکه باعث بروز مشکلات جدی‌تر برای کل مجموعه می‌شود و ممکن است در بعضی شرایط بازدهی موتور الکتریکی را تحت تاثیر قرار دهد.

همان‌طور که در شکل (۲۲) نشان داده شده است، این تغییرات جریان باعث ایجاد تلفات بیشتری در موتور الکتریکی گردیده است که باعث می‌شود دمای موتور نیز افزایش پیدا کند.



شکل ۲۲) تلفات موتور الکتریکی

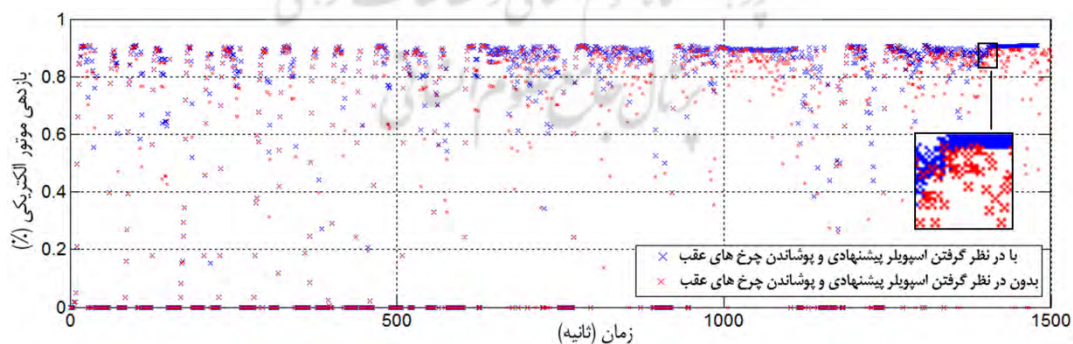
با توجه به فرمول‌های (۳۹-۴۱)، بازدهی موتور الکتریکی بدون جاروبک (براشلس) تحت تاثیر توان مکانیکی و توان ورودی است.

$$P_L = T_L W_m \quad (۳۹)$$

$$P_{in} = V_s I_s \quad (۴۰)$$

$$eff (\%) = \frac{P_L}{P_{in}} \times 100 \quad (۴۱)$$

همان‌طور که در شکل (۲۳) نشان داده شده است، بازدهی موتور الکتریکی نیز تحت تاثیر نیروهای آیرودینامیکی قرار گرفته است که این امر می‌تواند به دلیل تغییرات جریان خروجی باتری باشد.

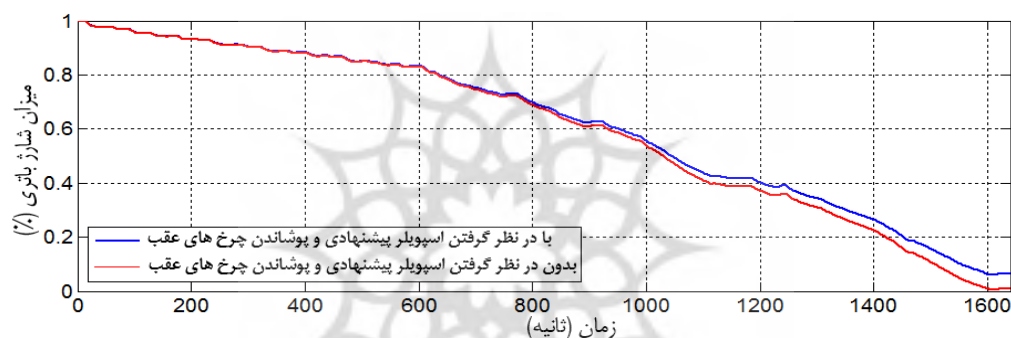


شکل ۲۳) بازدهی موتور الکتریکی

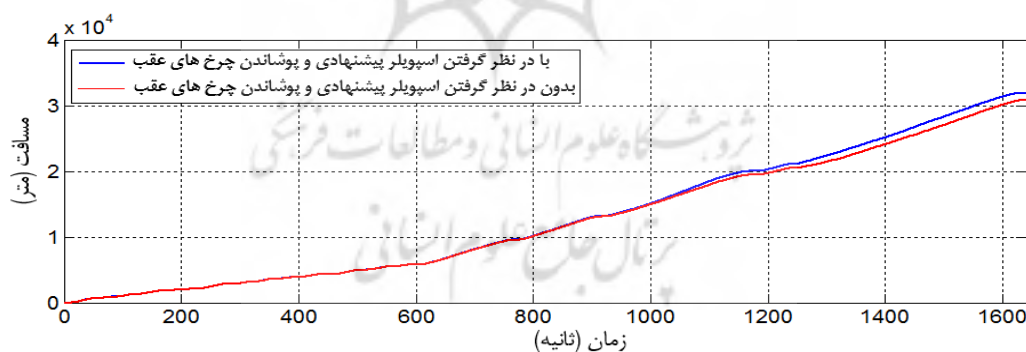
باتری در بیشتر خودروهای الکتریکی به عنوان منبع اصلی در نظر گرفته می‌شود. به همین منظور، وضعیت شارژ باتری با توجه به فرمول‌های (۱۰) و (۱۱) از اهمیت بالایی برخوردار است. در شکل (۲۴) وضعیت شارژ باتری در دو حالت مختلف

از مشخصه‌های آیرودینامیکی در زمانی مشابه نشان داده شده است.

همان‌طور که از شکل پیداست، میزان شارژ باتری در پایان چرخه در نظر گرفته شده در خودروی الکتریکی با اضافه کردن روش‌های پیشنهادی در حدود ۱۰ درصد می‌باشد و به این منظور است که باتری هنوز توانایی تولید توان را دارد و این در حالی است که در حالت عدم اعمال روش‌های پیشنهادی شارژ باتری در ۱۶۰۰ ثانیه به پایان رسیده است و دیگر توانایی تامین توان خودرو را ندارد. با توجه به وضعیت شارژ باتری در دو حالت، بدیهی است که خودروی الکتریکی با اعمال روش‌های پیشنهادی در شرایط مشابه و در زمانی مشابه مسافت بیشتری را می‌پیماید که شکل (۲۵) بیانگر این موضوع می‌باشد.



شکل ۲۴) وضعیت شارژ باتری

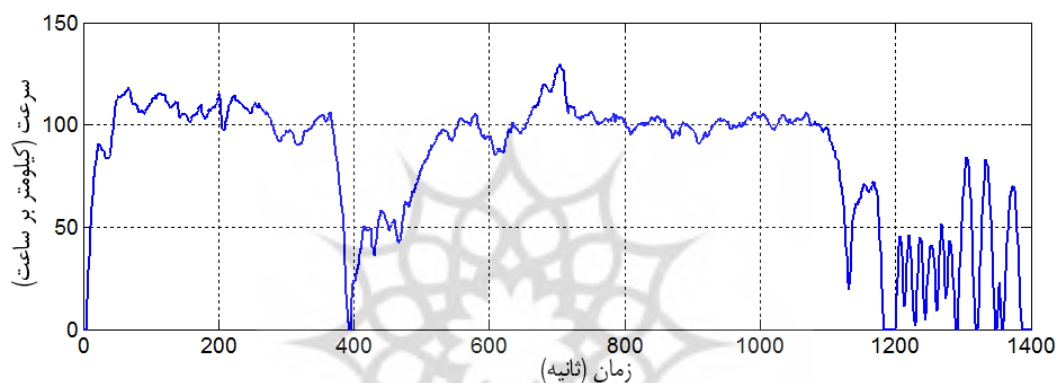


شکل ۲۵) مسافت پیموده شده خودرو در چرخه استاندارد ARB02

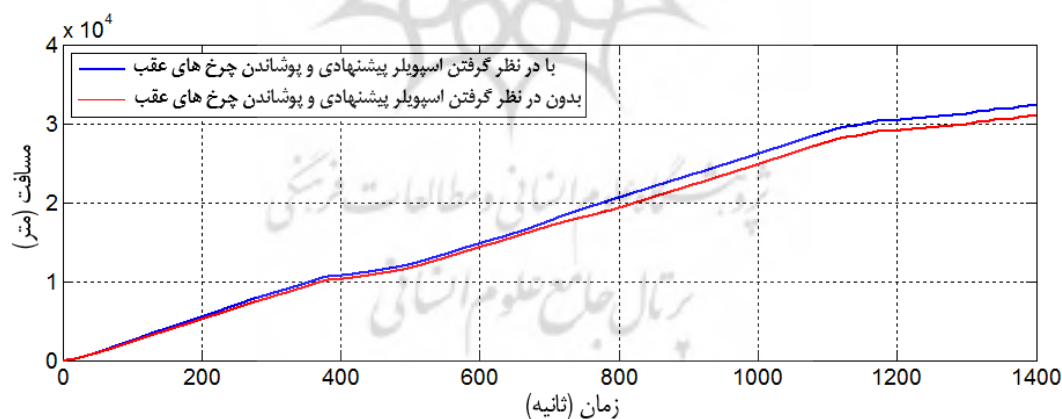
به‌منظور مشخص نمودن این موضوع نیاز است مسافت پیموده شده در چرخه رانندگی استاندارد دیگری نیز که دارای تغییرات شتاب بیشتر و همچنین میانگین سرعت بالاتر می‌باشد، بررسی گردد. چرخه استاندارد (REP05)^۱ به منظور مدلسازی رانندگی تهاجمی با تغییرات شتاب بالا و سرعت زیاد در بزرگراه در نظر گرفته شده است [۳].

1) Representative Drive Cycle No.5

همان‌طور که در شکل (۲۶) نشان داده شده است، این چرخه از سه بخش تشکیل گردیده است. اولین و دومین بخش رانندگی در بزرگراه را مدلسازی می‌نماید که با یک ایست کامل از هم جدا می‌گردند و سومین بخش، رانندگی در مکان‌هایی می‌باشد که ایست خودرو بیشتر اتفاق افتاده است. سرعت متوسط این چرخه در حدود ۸۳ کیلومتر بر ساعت می‌باشد و حداکثر سرعت ۱۳۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۲۷) نشان داده شده است، تغییرات مسافت پیموده شده در خودرویی مشابه با میزان شارژ باتری برابر، که یکی از آنها مجهز به اسپویلر پیشنهادی و پوشاندن چرخ‌های عقب می‌باشد تحت عنوان این چرخه، واضح‌تر مشخص گردیده است.



شکل (۲۶) چرخه رانندگی استاندارد REP05



شکل (۲۷) مسافت پیموده شده توسط خودرو در چرخه استاندارد REP05

نتیجه گیری

بسیاری از سازندگان خودروهای الکتریکی بیشترین تلاش و توجه خود را بر بهبود عملکرد سیستم‌های الکتریکی موجود بخصوص باتری‌ها و موتورهای الکتریکی قرار داده‌اند و در این راستا، هزینه‌های زیادی را نیز صرف می‌کنند، حال آنکه تاثیر مشخصات آیرودینامیکی نیز در عملکرد خودروهای الکتریکی قابل توجه و بررسی بوده و می‌توان از طریق بهبود

این موارد به اقتصادی شدن این خودروها کمک کرد. از این رو، در این مقاله تأثیرات بهبود مشخصه‌های آیرودینامیکی و کاهش نیروهای برآ و پسا بر روی خودروی الکتریکی بررسی گردید. در این راستا، اسپویلر متحرک پیشنهادی به همراه الگوریتم کنترلی ارائه شد. بعلاوه، به منظور کاهش بیشتر ضریب پسا، پوشاندن چرخ‌های عقب پیشنهاد شد. تمام قسمت‌های خودروی الکتریکی در محیط نرم افزار سیمولینک متلب با و بدون در نظر گرفتن تغییرات پیشنهادی مدل‌سازی شد و به منظور استخراج ضریب برآ و پسای خودروی الکتریکی مورد نظر، از کد CFD در نرم‌افزار متلب بهره گرفته شد و به منظور بررسی کانورترهای فشار حول خودرو از نرم‌افزار انسیس فلونت استفاده گردید. نتایج نشان داد که بهبود مشخصه‌های آیرودینامیکی در خودروهای الکتریکی نه تنها باعث کاهش میزان مصرف انرژی می‌شود بلکه از طریق کاهش پرفشارهای جریانی، باعث کاهش دما و افزایش بازدهی مازول باتری می‌گردد که خود باعث افزایش طول عمر سیستم ذخیره‌سازی انرژی می‌شود. بعلاوه، از طریق تأثیرات غیر مستقیم باعث کاهش تلفات و افزایش بازدهی موتور الکتریکی می‌گردد. تمام تغییرات ذکر شده منجر به افزایش مسافت طی شده توسط خودروی الکتریکی گردید.

منابع

- [1] Dewan A. 2011. "Tackling Turbulent Flows in Engineering", 1rd Ed., Springer, Berlin.
- [2] Gilhaus A. and Hoffmann R. 1998. "Directional Stability, Aerodynamics of Road Vehicles", in: W.H. Hucho (Ed.), SAE International, Warren dale, PA.
- [3] Michelle B. I. 2010. "The Effects of Driving Style and Vehicle Performance on the Real-World Fuel Consumption of U.S. Light-Duty Vehicles", Master's Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- [4] Bu-Ali Sine University (BASU) Solar Car. [Online]. Available: <http://basusolarcar.esy.es> .
- [5] Choudhury D. 2010. "Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling", Technical Memorandum TM 107, Fluent Inc., Lebanon.
- [6] Damjanovi D., Kozak D., Ivandi . and Kokanovi M. 2010. "Car design as a new conceptual solution and CFD analysis in purpose of improving aerodynamics", Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Croatia.
- [7] Diamond S. 2004. "Heavy Vehicle Systems optimization", Annual Progress Report for Heavy Vehicle Systems Optimization, Washington, D.C, U.S.A.

- [8] Menon D. P., Kamat S., Yangnavalkya G., Mukkamala S. and Kulkarni P. S. 2014. "To improve the aerodynamic performance of a model hatchback car with the addition arear roof spoiler", 16th Annual CFD Symposium, Bangalore.
- [9] Drag & lift [Online]. Available: http://www.autozine.org/technical_school/aero/tech_aero.htm.
- [10] Bailey F. R. and Simon H. D. 1992. "Future Directions in Computing and CFD", AIAA Paper 92-2734.
- [11] Dugoff H., Fancher P. and Segel L. 1970. "An analysis of tire traction properties and their influence on vehicle dynamic performance", SAE Technical Paper 700377.
- [12] Taeyoung H., Sumantran V., Harris C., Kuzmanov T., Huebler M. and Zak T. 1996. "Flow-field simulations of three simplified vehicle shapes and comparisons with experimental measurements", SAE Transactions, Vol. 106, PP. 820-835.
- [13] He H., Xiong R. and Guo H. 2012. "Online estimation of model parameters and state-of-charge of LiFePO4 batteries in electric vehicles", Journal of Applied Energy, Vol. 89, PP. 416-420.
- [14] Husain I. 2003. "Electric and Hybrid Vehicles, Design Fundamental", CRC Press LLC, Florida.
- [15] Kim I., Chen H. and Shulze R. C. 2006. "A Rear Spoiler of a New Type that Reduces the Aerodynamic Forces on a Mini-Van", SAE Technical Paper 2006-01-1631.
- [16] Ferziger J. and Peric M. 2001. "Computational Methods for Fluid Dynamics", 3rd Ed., Springer.
- [17] Marklund J. 2013. "Under-body and Diffuser Flows of Passenger Vehicles", Department of Applied Mechanics CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Gothenburg, Sweden.
- [18] Callister J. R. and George A. R. 1998. "Wind Noise, Aerodynamics of Road Vehicles", in: W.H. Hucho (Ed.), SAE International, Warrendale, PA.
- [19] Peddie K. M. and Gonzalez L. F. 2009. "CFD Study on the Diffuser of a Formula 3 Racecar", University of Sydney Undergraduate Research Journal, Vol. 1, Issue. 1, PP. 18-35,
- [20] Guo L. X., Zhang Y. M. and Shen W. J. 2011. "Simulation Analysis of Aerodynamics Characteristics of Different Two-Dimensional Automobile Shapes", Journal of computers, Vol. 6, Issue. 5, PP. 999-1005.
- [21] Leduc G. 2009. "Longer and heavier vehicles, an overview of technical aspects", JRC Scientific and Technical Reports, European Communities.
- [22] Amodeo M., Ferrara A., Terzaghi R. and Vecchio C. 2010. "Wheel slip control via second-order sliding-mode generation", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 11, Issue. 1, PP. 122-131.

- [23] Ehsani M., Gao Y. and Emadi A. 2009. "Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design", Second Edition, CRC Press.
- [24] Moradi M. H., Tousi M. R., Nemati M., Sadat Basir N. and Shalavi N. 2013. "A Robust Hybrid Method for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems", *Journal of Solar Energy*, Vol. 94, PP 266-276.
- [25] Kim M. 2003. "Numerical Study on the Wake Flow and Rear-Spoiler Effect of a Commercial Bus Body", *SAE Technical Paper* 2003-01-1253.
- [26] Künzli N., Kaiser R., Medina S. and et al. 2000. "Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment", *The Lancet*, Vol. 356, Issue 9232, PP. 795-801.
- [27] Baysal O. and Bayraktar I. 2000. "Computational Simulation for External Aerodynamics of Heavy Trucks", *SAE* 2000-01-3501.
- [28] Zake R. C. 2008. "Aerodynamics of aftermarket rear spoiler", University Malaysia, Pahang.
- [29] Rajamani R. 2006. "Vehicle dynamics and control", New York, NY: Springer.
- [30] Baldursson S. 2005. "BLDC Motor Modelling and Control-A Matlab/Simulink Implementation", Goteborg, Sverige.
- [31] Rezvanizani S. M., Liu Z., Chen Y. and Lee J. 2014. "Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility", *Journal of Power Sources*, Vol. 256, PP. 110-124.
- [32] Rezvanizani S. M., Liu Z., Chen Y. and Lee J. 2014. "Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility", *Journal of Power Sources*, Vol. 256, PP. 110-124.
- [33] Zackrisson T. 2003. "Modeling and simulation of a driveline with an automatic gearbox", Master's thesis, Royal Institute of Technology, KTH.
- [34] Hu X. and Wong T. 2001. "A Numerical Study On Rear-spoiler Of Passenger Vehicle", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 5, PP. 636-641.
- [35] Chiang Y. H., Sean W. Y. and Ke J. C. 2011. "Online estimation of internal resistance and open-circuit voltage of lithium-ion batteries in electric vehicles", *Journal of Power Sources*, Vol. 196, Issue 8, PP. 3921-3932.
- [36] Takemori Y., Kato S., Masumitsu Y. and Mizutani T. 1992. "Drag Reduction of Bluff-Based by Wake Control Vanes (Effective Utilization of Under Floor Flow)", *FISITA World Automotive Congress*, F2000G357.
- [37] Rao Z. and Wang S. 2011. "A review of power battery thermal energy management", *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, PP. 4554- 4571.