

ایده جدید طراحی تایرهای الکتریکی شامل چیدمان ژنراتورهای خطی آهنربای دائمی

T The new idea of designing electric tires including the arrangement of permanent magnet linear generators

چکیده

نگرانی‌های فزاینده درباره اثرات زیست‌محیطی ناشی از احتراق گسترده سوخت توسط حمل‌ونقل جاده‌ای، نیاز به راه‌حل جایگزین برای تولید برق در وسایل نقلیه را برجسته کرده است. این مقاله یک روش جدید را برای تولید برق در وسایل نقلیه با استفاده از تغییرات موضعی در فشار و شکل یک تایر پنوماتیک در حین حرکت خودرو ارائه می‌دهد. این مقاله چیدمان مجموعه‌ای از ژنراتورهای خطی آهنربای دائمی داخل چرخ خودرو را به نمایش گذاشته است. در این مطالعه از یک مجموعه مولد خطی استفاده شده است که شامل قسمت‌های ترنسلیتر، استاتور، آهنربای دائمی و سیم‌پیچ می‌باشد. با توجه به تغییرات موضعی ایجاد شده در تایر و قانون القای فارادی، برق مورد نیاز برای خودروهای الکتریکی فراهم می‌شود. این روش محدودیت‌های مواد شیمیایی فعلی مانند باتری‌ها را نداشته ولی سایر مشکلات از نظر ایمنی، مشکلاتی که آن‌ها در هنگام پنچر شدن تایر و غیره ایجاد می‌شود را دارا می‌باشند.

کلمات کلیدی: تایر پنوماتیک، ژنراتور، آهنربای دائمی، استاتور، ترنسلیتر.

نوع مقاله: مروری

علی‌رضا بهزادی^۱

دانشجوی دکترا، کارشناس پژوهش و فناوری مرکز تحقیقات صنایع لاستیک ایران
ایمیل نویسنده‌گان و عهده‌دار مکاتبات:

alirezabehzadi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰-۱۱-۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰-۱۱-۳۰

مقدمه:

توده هوا پیشنهاد شد. تحقیقات در زمینه موضوعات ابتکاری در زمینه تولید برق مانند طراحی ژنراتور خطی آهنربای دائمی (PM-LG) برای برداشت انرژی (ذخیره شده) انجام شده است [۳]. طرح پیشنهادی در این مقاله یک روش جدید برای تولید برق در یک وسیله نقلیه با استفاده از انحراف‌های تاپر در هنگام حرکت خودرو ارائه می‌دهد. به طور خاص، این مفهوم جدید از تغییرات موضعی در فشار و شکل تاپر برای تولید برق استفاده می‌کند [۴].

ایده پیشنهادی از اصل الکترومغناطیس برای تولید برق در داخل تاپر خودرو از روش جدیدی استفاده می‌کند که در برق‌رسانی وسایل نقلیه مورد استفاده قرار نگرفته است [۵]. غلتش چرخ در جاده باعث تغییر موضعی در شکل متقارن تاپر می‌شود و آن را در ناحیه تماس با سطح جاده مسطح می‌کند؛ همان طور که در شکل ۱-الف نشان داده شده است. تغییرات انحرافات دینامیکی رادیال بین محور چرخ و محیط اطراف تاپر هنگام تماس با زمین صورت می‌پذیرد. این انحراف موضعی در تاپر را می‌توان با اتخاذ مجموعه‌ای از ۱۶ ژنراتور خطی که در شکل خودرو (شکل ۱-ب) گنجانده شده، مورد استفاده قرار داد.

جابه‌جایی‌های زاویه‌ای بین ژنراتورهای مجاور به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که غلتش تاپرها به‌صورت هموار در سطح جاده حفظ شود. یک ژنراتور واحد در یک‌زمان می‌تواند از حرکت نسبی خطی بین ترنسلیتر خود که به تاپر و استاتور، و در لبه ثابت شده است، استفاده کند. هر بار که این حرکت رخ می‌دهد توسط قانون القای فارادی یک جریان متناوب در سیم‌پیچ استاتور ایجاد می‌شود.

مقدار جریان بستگی به حرکت نسبی بین دو قسمت استاتور و ترنسلیتر در مدار مغناطیسی کامل ژنراتور، سرعت وقوع این حرکت، تعداد دورها و ماهیت سیم‌پیچ دارد. آهنربا به‌عنوان بخشی از مدار مغناطیسی و همچنین ضریب میرایی

برقی شدن خودروها عمدتاً به ادغام منابع قدرت مانند باتری‌ها، ابرخازن‌ها و یا پیل‌های سوختی روی یک وسیله نقلیه بستگی دارد. این دستگاه‌های الکتروشیمیایی از طریق تبدیل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی با راندمان بسیار بالا، انرژی و توان خودرو را تأمین می‌کنند. برقی شدن وسایل نقلیه همچنین از انرژی شکسته شده و احیاکننده استفاده می‌کند، بدین صورت که انرژی جنبشی یک وسیله نقلیه گرفته می‌شود و یک موتور الکتریکی به‌عنوان یک مولد عمل می‌کند تا انرژی جنبشی را به انرژی الکتریکی تبدیل کند، همچنین انرژی جنبشی مورد نیاز می‌تواند از باتری‌های قرار گرفته در داخل موتور خودرو برای این کار استفاده نماید. مواد شیمیایی فعلی مانند باتری مورد استفاده برای تأمین الکتریکی خودرو محدودیت‌های خاصی را از جمله ظرفیت و توان کم تا متوسط، احتمال تخریب شدن و کم‌شدن ظرفیت و طول عمر محدود را دارا می‌باشند. وقتی باتری فراتر از محدوده دمایی کاربردی خودکار کند، این مشکلات تشدید می‌شوند. تولید برق با استفاده از اجزاء بیرونی یک وسیله نقلیه بدون تبدیل شیمیایی می‌تواند استقلال رانندگی برقی را به میزان قابل توجهی افزایش دهد و عمر و عملکرد دستگاه‌های تبدیل انرژی الکتروشیمیایی مانند باتری‌ها، خازن‌ها و سلول‌های سوختی را افزایش دهد [۱].

روش‌هایی برای جذب برخی از انرژی‌ها هنگام حرکت وسیله نقلیه در صنعت شناخته شده است. مخترعان روشی را برای تبدیل حرکت و ارتعاشات پارازیته در شرایط عادی رانندگی شهری به انرژی مفید الکتریکی پیشنهاد کردند. با این وجود، انرژی ذخیره شده هنوز برای گسترش برد خودروهای برقی به سطح قابل قبول کافی نیست [۲]. روش دیگری برای جذب انرژی هوای رام ناشی از حرکت وسیله نقلیه الکتریکی از طریق

تایر مربوط به ماهیت انحراف تایر در حین حرکت تایر است.

توصیف مفهوم پیشنهادی تایر الکتریکی

مفهوم پیشنهادی در این مقاله مربوط به عمل برداشت انرژی از وسیله نقلیه متحرک در جاده است؛ بنابراین مطالعه دینامیک خودرو در حالی که بر تجزیه و تحلیل انواع مختلف نیروها به ویژه نیروهایی که بر روی چرخها متمرکز می شوند، بسیار ضروری است. از آنجاکه ژنراتور خطی ارائه شده در این کار فقط در امتداد محور عمودی چرخ حرکت می کند، می توان دینامیک وسیله نقلیه را در یک صفحه دوبعدی تحلیل کرد. همچنین، تجزیه و تحلیل نیروهای وارد بر وسیله نقلیه را در حالی که در یک جاده افقی مسطح قرار دارد، در نظر گرفته می شود؛ زیرا عمل تولید فقط به برهم کنش نسبی بین چرخ و سطح جاده مربوط می شود، صرف نظر از اینکه جاده مسطح، ارتقا یافته یا تنزل یافته باشد.

فاکتورهای دینامیکی در نظر گرفته شده در وسایل نقلیه برای طراحی تایرهای الکتریکی

نیروهای اصلی وارد بر وسیله نقلیه در شکل ۱-ج نشان داده شده است. نیروی کشنده (F_t)، در ناحیه تماس بین تایر چرخهای محرک و سطح جاده، خودرو را به جلو سوق می دهد. در حالی که خودرو در حال حرکت است، مقاومتی وجود دارد که سعی می کند حرکت خود را متوقف کند. این مقاومت معمولاً شامل مقاومت غلتشی تایرها، کشش آیرودینامیکی و مقاومت در سربالایی می باشد. معادله دینامیکی حرکت وسیله

$$M_V \frac{dv}{dt} = (F_{tf} + F_{tr}) - (F_{rf} + F_{rr} + F_w + F_g) \quad (1)$$

نقلیه در امتداد جهت طولی با فرمول (۱) بیان می شود.

جایی که dV/dt شتاب خطی وسیله نقلیه در جهت طولی است، M_V جرم خودرو است، F_{rf} و F_{rr} نیروهای کشنده

تایرهای جلو و عقب، F_{rf} و F_{rr} مقاومت های غلتشی تایرهای جلو و عقب هستند که با گشتاورهای مقاومت غلتشی T_{rf} و T_{rr} همچنین کشش آیرودینامیک F_w و F_g نشان داده می شود [۶].

مقاومت غلتشی تایر بر روی سطوح سخت عمدتاً به دلیل هیستریسیس در مواد تایر ناشی از انحراف کارکاس در هنگام غلتش ایجاد می شود. هیستریسیس باعث توزیع نامتقارن نیروهای واکنش داده با زمین می شود. همان طور که در شکل ۱-د نشان داده شده است، فشار در نیمه جلویی ناحیه تماس بزرگتر از فشار در ناحیه عقب است. این پدیده منجر به حرکت نیروی واکنش زمین به جلو می شود. این نیروی واکنش داده با زمین با حرکت رو به جلو، با بار عادی روی مرکز چرخ، لحظه ای ایجاد می کند که با چرخش چرخ مخالفت می کند. برای درک بهتر اینکه چه چیزی بر مقاومت غلتشی تأثیر می گذارد، همان تایر اما با فشار تورم کم مورد بررسی قرار گرفته است. گشتاور تولید شده توسط تغییر جهت نیروی واکنش حاصل شده با زمین، گشتاور مقاومت غلتشی نامیده می شود [۱]. همان طور که در شکل ۱-د نشان داده شده است، به طور مستقیم با طول جابجایی (a) مرتبط است و می تواند به صورت فرمول (۲) بیان شود.

$$T_r = F_g a \quad (2)$$

نیروی مخالف (F_r) با نیروی کششی (F_t) در محور چرخ که توسط سیستم محرک اعمال می شود، دیده می شود؛ بنابراین سیستم محرک باید بر این نیروی مقاومتی که می تواند به صورت فرمول (۳) بیان شود، غلبه کند.

$$F_r = \frac{T_r}{ra} = \frac{F_g a}{ra} \quad (3)$$

جایی که rd شعاع مؤثر تایر است. به این ترتیب، گشتاور مقاومت غلتشی را می توان به طور معادل با نیروی افقی که

هسته ترنسلیتر قرار داده شود، همان طور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است) شار اصلی در ژنراتور این طرح توسط آهنربای دائمی ایجاد می شود. مقدار شار تحت تأثیر برخی عوامل، یعنی ابعاد و خواص مواد اجزای مغناطیسی ژنراتور قرار می گیرد. طراحی مغناطیسی باید اطمینان حاصل کند که چگالی شار در هسته های فولادی ژنراتور زیر $1/7 - 1/6$ تسلا است. اگر چگالی شار از این حد بیشتر شود، نفوذپذیری آن به میزان قابل توجهی کاهش می یابد و نیروی محرکه مغناطیسی (MMF) در جریان حرکت از طریق فولاد هدر می رود. انتخاب آهنربای دائمی یکی دیگر از جنبه های مهم است که باید در طراحی ژنراتور مورد توجه قرار گیرد. بسته به الزامات کاربرد، مهم ترین پارامترهایی که باید برای آهنربا دائمی رعایت شوند چگالی شار باقی مانده (Br) و نیروی اجباری (Hc) هستند.

سپس مدار مغناطیسی معادل (EMC) برای یافتن نقطه عمل در منحنی هیستریسیس همان آهنربا در داخل مدار مغناطیسی استفاده می شود. همان طور که در مدار مغناطیسی معادل است سه جریان اصلی وجود دارد. شار مغناطیسی، شار شکاف هوایی و شار ناشی. همچنین سه مقاومت مغناطیسی وجود دارد؛ مقاومت مغناطیسی آهنربا، مقاومت شکاف هوایی و مقاومت مغناطیسی ناشی. مقاومت مغناطیسی اصلی نسبتاً بسیار کم است و می توان از آن صرف نظر کرد. عدم تمایل به نشد را می توان در مرحله اولیه طراحی نادیده گرفت. مقاومت مغناطیسی آهنربای دائمی توسط فرمول (۴) محاسبه می شود.

$$R_{M0} = \frac{LM}{\mu_{rec} \mu_0 AM} \quad (4)$$

جایی که LM طول مغناطیسی در جهت مغناطیس شدن است، AM ناحیه قطب آهنربا، μ_{rec} نفوذپذیری نسبی و μ_0 نفوذپذیری فضای آزاد است. مقاومت مغناطیسی شکاف هوا را می توان با توجه به ابعاد و نفوذپذیری هوا محاسبه کرد. عمل آهنربا در تقاطع منحنی هیستریسیس همان آهنربا با

درجهت مخالف حرکت چرخ بر مرکز چرخ وارد می کند جایگزین کرد [۱].

عوامل متعددی بر مقاومت غلتشی تایرهای پنوماتیک تأثیر می گذارد. آن ها شامل ساختار تایر (ساختمان و مواد) و شرایط عملکردی آن ها (شرایط سطح، فشار تورم، سرعت، دما و غیره) هستند. برای معتبر بودن مفهوم جدیدی که در این مقاله پیشنهاد شده است، باید تأیید کرد که افزودن این ژنراتورها در داخل تایر، (توزیع آن ها و هر نیرویی که تولید می کنند)، مقاومت غلتشی را افزایش نمی دهد. همچنین، منبع انرژی که توسط این مفهوم جدید جذب می شود باید روشن شود. هر ژنراتور در طول هر چرخش چرخ سعی می کند سطح مسطح تایر را به حداقل برساند، یا به عبارت دیگر سعی می کند تا جایی که ممکن است تایر را دایره ای شکل نگه دارد. درحالی که از طرف دیگر، وزن خودرو با این عمل مخالف است. وزن وسیله نقلیه که با F_g نشان داده می شود، سعی می کند دو قطب هم تایی استاتور و ترنسلیتر را کنار بزند. مفهوم پیشنهادی در اینجا طراحی شده است تا این اقدام تعاملی بین دو نیروی متضاد را به تصویر بکشد. همچنین، از تجزیه و تحلیل گسترده در بخش قبل، کاهش سطح صاف تایر، مقاومت غلتشی را کاهش می دهد؛ بنابراین، ادغام این ژنراتورها در داخل چرخ نباید مقاومت غلتشی را افزایش دهد. مولد خطی متشکل از استاتور و ترنسلیتر دارای دو آهنربای دائمی (PM) است که در دو انتهای یک مدار مغناطیسی U شکل قرار دارد و قسمت ترنسلیتر را تشکیل می دهد. استاتور که به صورت جداگانه دچار آسیب شود، بین دو انتهای ترنسلیتر U شکل قرار دارد، همان طور که در شکل ۱-۱، ه، ی مشاهده می شود ترنسلیتر بسته به وضعیت انحراف، بین موقعیت استاتور و موقعیت های تراز شده و غیر تراز حرکت می کند.

در رویکرد طراحی دیگر، ممکن است یک آهنربا در وسط

1. Permanent Magnet

2. Magneto Motive Force

3. Equivalent Magnetic Circuit

هر ژنراتور استفاده می‌شود. نتایج در محدوده ۵۰ تا ۱۰۰ دور قابل قبول است. تمایل به تولید میدان الکتریکی و مغناطیسی^۴ بالاتر، نیاز به انتخاب تعداد بیشتری از دورها دارد. باین حال، برای سرعت بیشتر عملیات، میدان الکتریکی و مغناطیسی بالاتر می‌تواند توسط سیم‌پیچ با تعداد زیاد چرخش ایجاد شود؛ بنابراین یک عدد قابل قبول می‌تواند ۸۰ دور باشد که برای محدوده سرعت در این کاربرد مناسب است [۱].

نیروی الکتریکی و جریان تولید شده برای یک ژنراتور با ۸۰ دور پیچ و آهنرباهای آلنیکو به دست آمد. شبیه‌سازی آنالیز عناصر محدود با سرعت متغیر خودرو و زیر بار ۱۰ اهم انجام شد. اولین راه برای جذب انرژی گرمایی، استفاده از نوارهای سیاه‌رنگ روی لاستیک برای دریافت گرمای حاصل از تابش نور خورشید است. در طول روز خودروها برای مدتی در نور آفتاب قرار می‌گیرند که می‌توان با استفاده از این روش، از لاستیک‌ها به منظور تولید انرژی الکتریکی استفاده کرد.

بهترین روش برای تبدیل انرژی گرمایی به انرژی الکتریکی توسط لاستیک‌ها، استفاده از گرمای حاصل از اصطکاک لاستیک و تماس سطحی می‌باشد. باتوجه به اینکه خودروها روزانه مسافت زیادی راه می‌پیمایند، از این رو می‌توان با این روش انرژی الکتریکی زیادی تولید کرد.

مولد خطی در نظر گرفته شده با استاتور، ترنسلیتر، آهن‌ربای دائمی و سیم‌پیچ برای تاپر دارای مزایا و معایبی هستند. تاپرهای شامل این مولد هنگام پنچر شدن با مشکلاتی روبه‌رو می‌شوند که باید با استفاده از سیستم خودتعمیرکننده تاپر و تطبیق این دو طرح با یکدیگر این مشکل را برطرف کنیم همچنین مشکلات ایمنی و گران‌قیمت بودن آن‌ها از جمله مشکلاتی هستند که باید در مطالعات بعدی به آن‌ها پرداخت. از مزایای این روش می‌توان به کاهش انرژی هدررفت ایجاد شده توسط تاپر و استفاده بهینه از آن، کاهش وزن اتومبیل و طول عمر طولانی‌تر این تولیدکننده برق نسبت به باتری و

خطی که نشان‌دهنده ماندگاری مدار مغناطیسی خارجی است، یافت می‌شود [۱].

باتوجه به این واقعیت که تمام شار ماشین اصلی متحرک در یک صفحه قرار دارد، آنالیز عناصر محدود^۱ دوبعدی برای شبیه‌سازی عملکرد ژنراتور در این مرحله کافی است. مدل دوبعدی تک ژنراتور با استفاده از نرم‌افزار مگنت^۲ از شرکت اینفولیتیکا^۳ ساخته شده است. با شروع از پارامترهای طراحی تحلیلی اولیه به دست آمده توسط مدار مغناطیسی معادل، درحالی که با در نظر گرفتن همه الزامات و محدودیت‌ها مانند فضای موجود، سادگی هزینه و سهولت نصب، چندین مدل آنالیز عناصر محدود با تمام گزینه‌های ممکن برای تأیید نظری ساخته و شبیه‌سازی شده مورد مطالعه قرار گرفته است [۱].

اولین قدم، آزمایش مواد مختلف برای آهنربا مورد استفاده است. انواع مختلفی از آهنربا با درجه‌بندی خاص در آنالیز عناصر محدود ساخته شده است. آهنرباهای مورد استفاده در این مورد آلنیکو ۵-۷ هستند. چگالی شار نسبتاً بالایی که در هسته ترنسلیتر در نزدیکی آهنربا مشاهده می‌شود، نشان می‌دهد که تغییرات و بهبودهای بیشتری را می‌توان برای این مناطق انجام داد. شبیه‌سازی برای سرعت وسیله نقلیه ۶۰ کیلومتر در ساعت انجام می‌شود. البته این سرعت با استفاده از داده‌های قطر چرخ، جابه‌جایی زاویه‌ای بین دو ژنراتور مجاور واقع در داخل تاپر، به سرعت خطی تبدیل می‌شود. چهار نوع مختلف آهنربا در مدل‌های آنالیز عناصر محدود ساخته شده است، به عنوان مثال؛ نئودیمیم آهن بور، ساماریوم کبالت، آلنیکو و سرامیک، تفاوت قابل توجهی در نیروی دندان‌دار شدن، نیروهای دندانی زیاد در آهنرباهای نئودیمیم آهن بور و ساماریوم کبالت در مقایسه با دوتای دیگر مشاهده می‌شود که این را می‌توان به مقادیر بالای نیروهای اجباری نسبت داد.

از روش انرژی مشترک برای انتخاب تعداد مطلوب دور در

1. Finite Element Analysis

2. MagNet

3. Infolytica

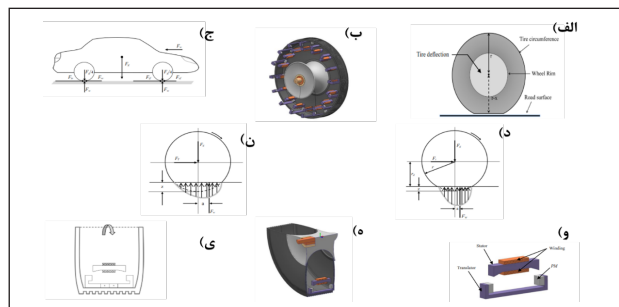
4. Electric and Magnetic Fields

غیره اشاره داشت.

نتیجه‌گیری

این مقاله یک روش جدید برای تولید برق در داخل یک تیر خودرو ارائه می‌دهد که در برق‌رسانی وسایل نقلیه مورد استفاده قرار نگرفته است. مفهوم لاستیک الکتریکی پیشنهادی و طراحی ژنراتور به اندازه کافی تجزیه و تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که مفهوم پیشنهادی معتبر است، زیرا قدرت قابل توجهی را که می‌تواند استقلال رانندگی برقی افزایش دهد، نشان می‌دهد. نتایج نشان داده شده برای تأمین برق یک خودرو الکتریکی ۱۶ ژنراتور خطی با استفاده از آهن‌ربا آلنیکو ۷-۵ با ۸۰ دور پیچ، اعداد بهینه شده برای تأمین انرژی الکتریکی خودرو هستند. در آینده باید نکات ایمنی برای این مولد و همچنین مشکلات پنچری و تعویض این مجموعه مولد خطی در نظر گرفته شود.

سپاسگزاری IRM



شکل ۱. الف) شماتیک انحرافات تیر و تغییر شکل هنگام تماس با جاده. ب) مقطع سیستم پیشنهادی تیر الکتریکی یکپارچه که از ۱۶ ژنراتور خطی تشکیل شده. ج) نیروی اصلی وارده بر وسایل نقلیه در صفحه دوبعدی. د، ن) منابع مقاومت غلتشی در فشار تورم بالا و فشار تورم پایین. و) نمایش سه‌بعدی ژنراتور خطی. ه) ژنراتور خطی یکپارچه شده با چرخ خودرو. ی) ژنراتور خطی با یک آهن‌ربا واقع در وسط هسته ترنسلیتر.

مراجع

- [1] R. B. Goldner and P. Zerigian. "Electromagnetic linear generator and shock absorber." U.S. Patent 6 952 060 B2, Oct. 4, 2005.
- [2] D. C. Botto. "Ram air driven turbine generator battery charging system using control of turbine generator torque to extend the range of an electric vehicle." US Patent 8 098 040 B1, Jan. 17, 2012.
- [3] Z. Yang and A. Khaligh, "A flat linear generator with axial magnetized permanent magnets with reduced accelerative force for backpack energy Harvesting," in Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2012, pp. 2534-2541
- [4] M. Ehsani, Y. Gao, and A. Emadi, Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, Second Edition, CRC Press, USA, 2010.
- [5] J.Y. Wong, Theory of Ground Vehicles, John Wiley & Sons, New York, 1978.
- [6] J. R. Hendershot and T. J. E. Miller, Design of Brushless Permanent- Magnet Motors, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford, 1994.
- [7] V. Cecconi and M. Trapanese, "An optimum design of the magnetic circuit of a PM linear electrical generator for the exploitation of sea waves," in proceedings of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006.
- [8] Wong, Jo Yung. Theory of ground vehicles. John Wiley & Sons, 2008.

- [9] Leijon, Jennifer, et al. "Study of an altered magnetic circuit of a permanent magnet linear generator for wave power." *Energies* 11.1 (2018): 84.
- [10] Song, Y., Shu, H., Chen, X., & Luo, S. (2019). Direct-yaw-moment control of four-wheel-drive electrical vehicle based on lateral tyre-road forces and sideslip angle observer. *IET Intelligent Transport Systems*, 13(2), 303-312.
- [11] Xu, G., Xu, K., & Li, W. (2013). Novel estimation of tyre-road friction coefficient and slip ratio using electrical parameters of traction motor for electric vehicles. *International Journal of Vehicle Autonomous Systems*, 11(2-3), 261-278.
- [12] Ma, C., Xu, M., & Wang, H. (2011). Dynamic emulation of road/tyre longitudinal interaction for developing electric vehicle control systems. *Vehicle System Dynamics*, 49(3), 433-447.
- [13] Dai, Y., Luo, Y., Chu, W., & Li, K. (2014). Optimum tyre force distribution for four-wheel-independent drive electric vehicle with active front steering. *International Journal of Vehicle Design*, 65(4), 336-359.
- [14] Soundararajan, R., & Pradeep, C. (2021). Regeneration of Waste Energy from Tire Strain and Rapid Charging Through Super-Capacitor for Electric Vehicles (No. 2021-28-0278). SAE Technical Paper.
- [15] Yaqub, R., & Heidary, K. (2018). Mathematical modelling of energy harvesting in piezo embedded electric vehicle tyres together with self-health assessment of suspension system. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*, 10(2), 161-176.

IRM