

## طراحی و ساخت موتور مغناطیسی خورشیدی برای خودروها

محمدیوسف ولی<sup>۱</sup>، نیما امجدی<sup>۲\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۱	در این مقاله یک موتور جدید مغناطیسی خورشیدی برای خودروها ارائه شده است. هر یک از سیلندره‌های این موتور دارای دو آهنربای دائم است که نیروی مغناطیسی بین آنها باعث حرکت پیستون سیلندر می‌شود. یکی از دو آهنربای دائم هر سیلندر به عنوان پیستون آن سیلندر عمل می‌کند. آهنربای دائم دیگر در هر سیلندر به طور متناوب چرخیده به طوری که قطب‌های همنام و ناهمنام دو آهنربای دائم به صورت پریودیک مقابل هم قرار گیرند. نیروهای جاذبه و دافعه مغناطیسی که به این ترتیب در سیلندره‌های موتور به وجود می‌آیند با هم هماهنگ شده به نحوی که باعث حرکت میل‌لنگ شوند. آهنربای دائم قابل چرخش هر سیلندر به وسیله یک موتور DC به حرکت در می‌آید که از طریق پنل‌های خورشیدی موتور مغناطیسی خورشیدی تغذیه می‌شود. یکی از مزایای مهم موتور پیشنهادی حذف نیاز به موتورهای القایی گران‌قیمت و سنگین می‌باشد. علاوه بر این موتور پیشنهادی مجهز به باتری برای ذخیره و تغذیه انرژی بوده که زمان قابل استفاده موتور را افزایش می‌دهد. لازم به ذکر است که موتور مغناطیسی خورشیدی طراحی شده به عنوان اختراع با شماره ۸۵۱۳۸ در تاریخ ۱۳۹۳/۱۲/۰۶ در اداره ثبت اختراعات ایران به ثبت رسیده است.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۰۳	
<b>واژگان کلیدی:</b> موتور مغناطیسی خورشیدی، آهنربای دائم، نیروی مغناطیسی، انرژی خورشیدی.	

### ۱- مقدمه

سال‌هاست بشر درگیر مشکلات و مضرات سوخت‌های فسیلی و عوامل مخرب آن بر محیط زیست است و وابستگی هر چه بیشتر و صعودی صنعت به این منابع تجدیدنپذیر و پایان‌یافتنی ذهن پژوهشگران را بر این داشت تا به دنبال حذف این وابستگی و جایگزینی آن با انرژی‌های نو چون باد و خورشید باشند. به دنبال این ایده سال‌هاست طرح و ابداعات متفاوتی درباره‌ی ساخت ماشین‌های الکتریکی خورشیدی بیان می‌گردد و روز به روز طرح‌های نوین و جدیدتر جایگزین طرح‌های گذشته می‌شوند. اما این طرح‌ها اکثراً دارای مشکلات انکارناپذیری هستند. محرک بسیاری از ماشین‌های الکتریکی امروزی موتورهای الکتریکی القایی می‌باشند. موتورهای القایی با برق AC تغذیه می‌شوند و این به معنای بروز مشکلاتی برای تبدیل خروجی DC پنل‌های خورشیدی به برق AC برای تغذیه‌ی موتور است.

بزرگترین مشکل خودروهای برقی خورشیدی امروزی همان قسمت تبدیل برق DC به AC توسط اینورترهاست. این تجهیز ساختاری حساس، پیچیده، با قیمت تمام شده‌ی بالا و محدودیت توان عملکردی دارد. مشکلات بزرگ این تجهیز همواره باعث شده تا نتوان خودروهای برقی خورشیدی را وسیله‌ای دست‌یافتنی برای عموم دانست و همواره این خودروها در آزمایشگاه‌ها و صحنه‌های چندروزه مسابقات قابل رویت هستند. موتورهای القایی تک‌فاز و یا سه‌فاز خود دارای مشکلات بسیار زیادی هستند. ارزان بودن این موتور نسبت به موتورهای DC هم به طور موثری جبران هزینه بالای طرح‌های امروزی را نمی‌کند. در ماشین‌هایی که از محرک القایی سه‌فاز استفاده شده، وجود سه مسیر تبدیل تغذیه از DC به AC و افزایش چشم‌گیر تعداد و جرم باتری‌ها، مشکلات این ماشین‌ها را دو چندان نمود. وقتی از موتورهای الکتریکی به عنوان محرک

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: amjady@semnan.ac.ir

۱. کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

۲. استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

سلامت مردم می‌باشد. طرح ماشین مغناطیسی خورشیدی پیش رو دارای محرک مغناطیسی جدیدی است که دارای سه قسمت عمده و مهم می‌باشد. قسمت الکتریکی، مغناطیسی، مکانیکی سه جزء اصلی تشکیل دهنده این طرح می‌باشند. برای قسمت الکتریکی باید گفت دستاوردهای پیشین عمدتاً به دو دسته کلی تقسیم شدنی است. ماشین‌های الکتریکی خورشیدی با موتور القایی و ماشین‌های الکتریکی خورشیدی با موتور DC اساس تقسیم‌بندی خودروهای برقی است. در رابطه با ماشین‌های با موتور القایی باید گفت که در کشور ما و سایر کشورها اکثراً به صورت صرفاً الکتریکی طراحی می‌گردند و ضعف بزرگ آنها نیاز به وجود برق متناوب و تجهیزات حفاظت و کنترل پیچیده و مبدل‌های DC به AC است. در توضیح عبارت صرفاً الکتریکی باید گفت که اکثر ماشین‌های با موتور القایی بدون سلول خورشیدی طراحی می‌گردند در حالی که نیاز به انرژی زیادی دارند. به دلیل مصرف زیاد این ماشین‌ها، همواره طی مدت زمان نسبتاً کوتاهی نیاز به شارژ مجدد دارند. در رابطه با نوع دوم ماشین‌های الکتریکی که با موتور DC کار می‌کنند هم باید گفت شاید به ظاهر نیاز به تجهیزات خاصی نباشد، اما در واقع چون وظیفه این موتورها حرکت ماشین است بسیار سنگین بوده و با مصرف انرژی بالایی مواجه‌اند. به همین دلیل در اکثر این ماشین‌ها برای ذخیره بیشتر برق چاره‌ای جز استفاده از مبدل‌ها و مدارات حفاظت و کنترل پیچیده نیست. روشن است که مشکلاتی نظیر فضای محدود ماشین در هر دو نوع با انتخاب موتوری به آن بزرگی مشکل‌ساز خواهد بود. مشکلات بزرگتری چون هزینه‌های بسیار بالای مدارات حفاظت تعداد زیادی باتری و هزینه‌های سنگین خود باتری‌ها همگی دست به دست هم دادند تا این ماشین‌ها فقط صحنه چند روزه‌ی مسابقات و آزمایشگاه‌ها را تجربه کنند. قسمت مکانیکی و مغناطیسی موتور طراحی شده هم دارای ساختار جدیدی است که مشابه آن حتی در سایت‌های معتبر خارج از کشور هم پیدا نشد. البته انواع مختلفی از ماشین‌های مغناطیسی در داخل و خارج کشور ارائه گردیده‌اند، اما اکثر آنها در موارد زیر با طرح پیشنهادی تفاوت دارند:

۱- در اکثر این ماشین‌ها، استفاده از آهنرباهای دائم در ساختار همان موتورهای گذشته، یعنی بودن آهنربای دائم در یک بخش رتور و یا استاتور می‌باشد. اکثر

مکانیکی یک ماشین استفاده می‌شود، فارغ از هر نوع موتور الکتریکی، مدارات حفاظت و کنترل باید در کنار موتور الکتریکی قرار بگیرد. افزایش اندازه و توان موتور الکتریکی منتج به افزایش اندازه و توان تجهیزات کمکی شده و افزایش تجهیزات به معنای افزایش تعداد باتری‌هاست. باتری‌های استفاده شده در این خودروها به طور معمول باتری لیتیوم یون می‌باشد. قیمت و حساسیت بالای این باتری بر هیچکس پوشیده نیست. قیمت این باتری در بعضی موارد آن چنان بالاست که گاهی ۵۰ درصد هزینه ساخت این ماشین‌ها به آن اختصاص داده می‌شود. باز هم قابل ذکر است که هر باتری مدار شارژ کنترلر و حفاظت اضافه شارژ و مدارات اتصال به پنل‌های خورشیدی مخصوص به خود را می‌خواهد. لذا افزایش تعداد باتری‌ها منجر به افزایش توان و اندازه این تجهیزات خواهد شد. این موارد منجر به افزایش وزن ماشین می‌گردد که می‌تواند حکم به عدم توجیه اقتصادی این ماشین‌ها بدهد. در برخی از نسل‌های جدید ماشین‌های الکتریکی، با افزایش تعداد باتری‌ها، موتورهای DC به عنوان محرک اصلی مکانیکی مورد استفاده قرار گرفته‌است. این موتورهای DC هم مشکلات قابل ملاحظه‌ای را دارا هستند. از جمله این مشکلات اندازه بسیار بزرگ این موتورها و افزایش چشمگیر وزن ماشین می‌باشد. چون این موتورها به عنوان محرک اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرند باید متناسب با توان و گشتاور بالای مورد نیاز آنها، تغذیه شوند. این امر باعث ورود مبدل‌های DC به DC توان بالا، ابرخازن‌ها و باتری‌های گران قیمت به این ماشین‌ها می‌گردد. علاوه بر آن قیمت بالای موتورهای DC توان بالا مشکلات اقتصادی این ماشین‌ها را دو چندان می‌کند. تمام این توصیفات منجر به افزایش چشم‌گیر تعداد پنل‌های خورشیدی می‌گردد. در آخرین نمونه از این خودروها تقریباً تمام سطح موجود خودرو به پنل‌های خورشیدی اختصاص داده شده‌است. تا جایی که از وجود آینه‌های کوچک کنار خودرو که به راننده کمک می‌کند نیز چشم‌پوشی شده است. این موضوع نیز به نوبه خود قیمت خودرو را افزایش می‌دهد. مشکل مشترک تمامی این ماشین‌ها قیمت فوق‌العاده بالا، محدودیت گشتاور و سرعت، محدودیت فضای مناسب امکانات و سرنشینی است. در مورد ماشین‌های بنزینی هم مشکلات زیادی مطرح شده‌است، که مهمترین آنها از بین رفتن منابع تجدیدناپذیر کشور و آسیب شدید به محیط زیست و

نیروهای جاذبه و دافعه میان آهنرباهای دائم دارد. با توجه به شکل (۱) در یک بلوک شبیه‌سازی شده (شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار<sup>۱</sup> Sketch Up) دو عدد آهنربای دائم که یکی در ابتدای سیلندر قرار داشته و دیگری با اتصال به میله‌ای، عملکردی به سان پیستون را داراست، قرار دارند. آهنربای دائم ابتدای سیلندر به محور موتور DC متصل است و توسط آن حول محور قائم می‌چرخد. این چرخش به نوعی است که در لحظه‌ای یک قطب آهنربا در برابر آهنربای دوم قرار می‌گیرد و در لحظه‌ای قطب دیگر قرار خواهد گرفت. بدین صورت عملکرد آهنربای دائم اول به این صورت است که حول محور قائم دوران داشته و قطب همنام یا ناهمنام آهنربای دائم دوم را در برابر آن قرار دهد. آهنربای دائم دوم که به سان پیستون عمل می‌کند، در لحظه‌ای که قطب هم‌نام را در برابر خود ببیند از آهنربای دائم اول دور می‌شود و در لحظه‌ای که قطب ناهمنام را در برابر خود ببیند به سمت آهنربای دائم اول می‌رود. این دور یا نزدیک شدن آغاز تبدیل حرکت خطی به دورانی است. با دور شدن این آهنربا در سیلندر اول به طور هم‌زمان در سیلندر دوم، پیستون یا آهنربای دوم در جهت عکس به سمت آهنربای اول می‌رود و این دقیقاً زمانی است که آهنربای اول سیلندر دوم در قطب ناهمنام با آهنربای دوم آن است و این دو یکدیگر را جذب می‌کنند. حال نوبت چرخش آهنربای اول سیلندر دوم است تا لحظه‌ای پرتاب پیستون دوم را آماده کند. سیکل عملکرد سیلندرها سوم و چهارم به ترتیب مشابه سیکل عملکرد سیلندرها اول و دوم می‌باشد. بدین ترتیب عملکرد دو سیلندر شماره ۱ و ۳ و هم‌زمان بوده و عملکرد دو سیلندر ۲ و ۴ نیز هم‌زمان می‌باشد. بدین صورت باید محورهای آهنربای اول دو سیلندر ۱ و ۳ و محورهای آهنربای اول دو سیلندر ۲ و ۴ با یک سرعت دوران کنند که این امر از طریق موتور DC که وظیفه چرخش این محورها را به عهده دارد فراهم می‌شود. فاصله‌ی میان هر دو سیلندر مجاور و حفاظت مغناطیسی هر سیلندر به نحوی است که سیلندرها مجاور تداخل مغناطیسی ناچیزی در عملکرد یکدیگر داشته باشند. اکثر پنل‌های خورشیدی موجود دارای خروجی DC هستند و این یک قابلیت مهم موتور مغناطیسی خورشیدی

اختراعات ثبت شده در سایت‌های داخلی و خارجی نیز به سمت بهینه‌سازی ساختارهای گذشته رفته‌اند. [۱، ۲ و ۳]

۲- تقریباً تمامی ماشین‌های مغناطیسی ارائه شده در سایت‌های معتبر ثبت اختراع، همچنان از ایده میدان‌های دوار استفاده می‌کنند و در موتورهای مغناطیسی آنها هیچگاه حرکت خطی تولید نمی‌گردد. [۴، ۵ و ۶]

۳- تقریباً در تمامی ساختارهای پیشنهاد شده برای ماشین‌های مغناطیسی، هرگز موضوعی تحت عنوان ماشین‌های خورشیدی مطرح نگردیده‌است و این موضوع در طرح پیش‌رو یک پارامتر بسیار مهم و همچنین یک مزیت مهم است.

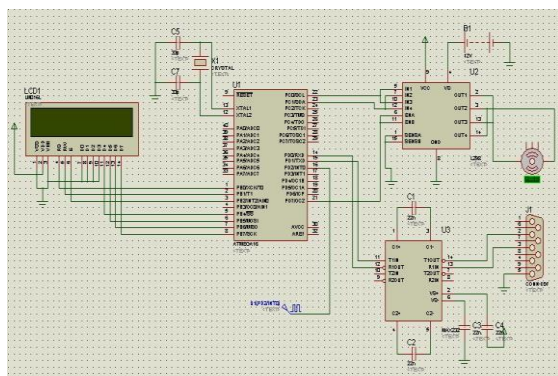
از طرفی ایده جدید ماشین مغناطیسی خورشیدی، دارای ابداع جالب استفاده از آهنرباهای دائم برای قسمت محرک این ماشین است، که به منزله‌ی موتور این ماشین می‌باشد. ارائه این ساختار و استفاده از نیروهای میان آهنرباهای دائم در هر بلوک سیلندر، منجر به تولید حرکت خطی گردیده که به کمک میل‌لنگ تولید گشتاور مورد نیاز برای حرکت چرخ‌های خودرو فراهم می‌گردد. موتور جریان مستقیم برای چرخش آهنرباهای دائم قابل‌گردش و پنل‌های خورشیدی اجزای نهایی این طرح می‌باشد. ساخت اجزای کلی طرح با استفاده از موادی مستحکم و سبک چون تفلون، پلی‌استر، سیلیس منجر به کاهش شدید وزن ماشین می‌گردد. این امر به معنای استفاده از دستگاه برای مدت زمان و تعداد سرنشین بیشتر است زیرا قسمتی از حجم جدید ایجاد شده را می‌توان به اضافه کردن باطری‌های بیشتری برای ذخیره انرژی اختصاص داد. رها شدن از آلودگی ماشین‌های بنزینی، استفاده از انرژی خورشید تحت ساختاری ساده، عملیاتی و قابل پیاده‌سازی در هر سطح دلخواه در کشور، امکان تجهیز ماشین‌های بنزینی فعلی به محرک مغناطیسی از جمله ویژگی‌های بارز این طرح می‌باشد.

## ۲- مدل پیشنهادی

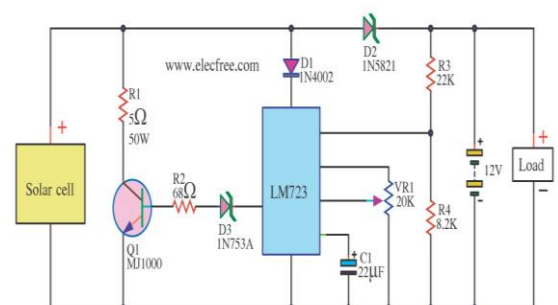
طرح ماشین مغناطیسی خورشیدی به طور کلی تکیه بر

جسم مورد نظر خود را تهیه کرده و پیاده‌سازی نمایید. این برنامه بر خلاف سایر برنامه‌های سه‌بعدی نیاز به منابع سیستم کمتری دارد و در رایانه‌های ساده‌تر هم قابل اجرا می‌باشد.

<sup>۱</sup> Google SketchUp Pro نرم افزار قدرتمند همراه با ابزارهای متنوع جهت ساخت، ویرایش و انتشار مدل‌های سه‌بعدی می‌باشد. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توانید طرح کلی یک خانه، کارخانه، کشتی، سفینه فضایی و هر تجهیز و



شکل ۲: مدار پیشنهادی کنترل دور موتور DC به کمک میکروکنترلر AVR به روش PWM (شبه سازی مدار در نرم افزار Proteus انجام شده است)



شکل ۳: مدار پیشنهادی شارژر باتری برای سیستم خورشیدی با حفاظت اضافه شارژ

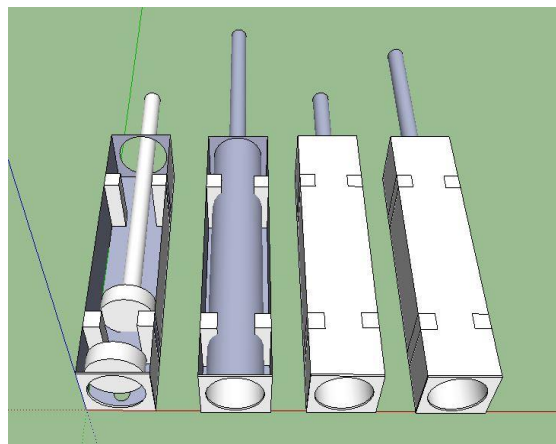
### ۳-۳- ملاحظات الکتریکی

قسمت‌های الکتریکی این ماشین به سه قسمت کلی تقسیم می‌شوند:

- ۱- مدارات کنترل دور موتور DC: به دلیل سادگی کنترل سرعت و دور ماشین DC مدارهای پیشنهادی برای کنترل سرعت آن عمدتاً به دو دسته تقسیم می‌گردند:
  - کنترل ولتاژ تحریک یا میدان یا استاتور موتور DC: در ساده‌ترین شکل این روش، کنترل سرعت با یک پتانسیومتر ممکن است.
  - کنترل به کمک روش مدولاسیون عرض پالس (PWM) که این امر هم به وسیله آی‌سی‌های درایور و هم میکروکنترلر ممکن است. به دلیل دقت بیشتر در کنترل دور موتور DC در این طرح از این روش استفاده شده است که مدار مربوطه در شکل (۲) نشان داده شده است.

۲- مدارات کنترلر و شارژر پنل خورشیدی: مدار شارژ و حفاظت باطری استفاده شده در شکل (۳) نشان داده شده است. طرز کار مدار شکل (۳) در مرجع [۷] تشریح

پیشنهادی است چون گرداننده آهنرباها، موتور DC است و لذا استفاده مستقیم از خروجی پنل‌های خورشیدی را بدون نیاز به استفاده از مبدل‌های AC به DC و یا DC به AC امکان‌پذیر می‌سازد.



شکل ۱: شبه سازی موتور مغناطیسی ابداعی

### ۳- ملاحظات کلی طرح

#### ۳-۱- ملاحظات مربوط به جنس مواد مورد استفاده

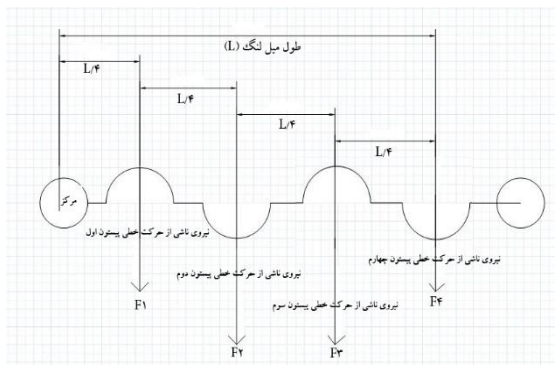
اجزای سیلندر از جنس موادی چون رزین پلی‌استر، تفلون یا سیلیس ساخته می‌شود. انتخاب نوع ماده قابل استفاده با در نظر گرفتن دو نکته است:

- این که شار مغناطیسی در هر سیلندر تاثیر منفی در کار سیلندر مجاور خود تا حد امکان نداشته باشد که البته این امر با حفظ فاصله و استفاده از قفس فاراده برای هر سیلندر شدنی است.
- باید در نظر داشت که پیستونی که آهنربای دائم دوم روی آن قرار دارد به کمک یاتاقان و شاتون به میل‌لنگ متصل می‌گردند و میل‌لنگ وسیله‌ای است که حرکت خطی آهنرباهای دائم را به حرکت دورانی تبدیل می‌کند. جنس سایر قطعات (به غیر از سیلندر) از موادی سبک و با استحکام می‌باشد. برای مثال جنس شاتون‌ها و میل‌لنگ و بلوک سیلندر در نمونه‌ک ساخته شده از تفلون می‌باشد.

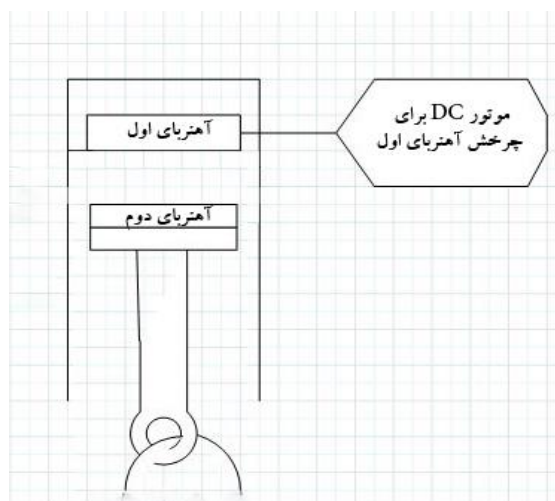
#### ۳-۲- ملاحظات انتخاب آهن ربای دائم

آهنرباهای دائم استفاده شده در نمونه‌ک ساخته شده، از جنس نئودیمیوم می‌باشند که دارای میدان مغناطیسی قوی، وزن سبک و هزینه مناسب می‌باشند. می‌توان برای داشتن نیروهای مغناطیسی بیشتر از آهنرباهای دائم قوی‌تر نظیر NdFeB استفاده نمود.

توسط پیستون‌ها و سپس شعاع لنگ اهمیت دارند. زاویه اعمال نیرو هم در حداکثر آن و به صورت عمود بر میل لنگ است. با توجه به شکل (۴) و شبیه‌سازی میل لنگ به شعاع R مدل ریاضی موتور بیان می‌گردد.



شکل ۴: شبیه‌سازی اعمال نیروهای پیستون بر میل لنگ با فرض سنکرون بودن ۱، ۲، ۳ و ۴



شکل ۵: شمای یک نمونه سیلندر برای بیان محدوده اثر آهنرباها و نحوه چرخش آهنربای اول

بر اساس آنچه که در شکل (۴) مشاهده می‌گردد، نیروی ناشی از آهنرباهای دائم موجود در بلوک‌های یک، دو، سه و چهار به ترتیب با  $F_1$ ،  $F_2$ ،  $F_3$  و  $F_4$  نمایش داده می‌شوند که مجموع نیروهای  $F_1$  و  $F_2$  با یکدیگر و مجموع نیروهای  $F_3$  و  $F_4$  با یکدیگر گشتاور روی میل لنگ را در هر سیکل می‌سازند بدین صورت که زمانی که نیروی  $F_1$  در مقدار بیشینه‌ی ناشی از حداقل فاصله میان قطب‌های ناممنا آهنرباهای دائم بلوک ۱ قرار دارد، نیروی  $F_2$  در مقدار کمینه‌ی ناشی از حداکثر فاصله میان قطب‌های همنام آهنرباهای دائم بلوک ۲ قرار خواهد گرفت. از مجموع لحظه‌ای این دو نیروی متناسب با جایگاه لحظه‌ای آهنربای

شده است. لازم به ذکر است در اندازه کوچک نمونک ساخته‌شده از کنترل‌کننده<sup>۱</sup> MPPT که تولید بیشینه توان در پنل‌های خورشیدی را میسر می‌سازد، استفاده نشده است اما برای ساخت نمونه‌های بزرگ‌تر جهت افزایش راندمان مجموعه می‌توان از کنترل‌کننده MPPT برای پنل‌های خورشیدی استفاده نمود.

#### ۴- مدل ریاضی برای نمونک ساخته شده

برای ساخت موتور و طراحی نمونک، به بیان مدل ریاضی مربوط به قسمت مکانیکی، مدل ریاضی مربوط به قسمت مغناطیسی و مدل ریاضی مربوط به قسمت الکتریکی پرداخته می‌شود. روال طراحی با انتخاب یک وزن فرضی برای موتور و تجهیزات وابسته آن در نظر آغاز شد [۸]. بر اساس این وزن پارامترهای الکتریکی، مکانیکی و مغناطیسی را بدست آورده و سپس اقدام به انتخاب تجهیزات واقعی نمودیم. تفاوت وزن تجهیزات و وزن کلی فرض شده، حد آزادی طراحی بوده و در واقعیت به بار قابل حمل توسط موتور تخصیص داده می‌شود. در ادامه محاسبات خواهید دید که با هر وزن فرضی، وزن تجهیزات از کمتر از وزن فرضی است و احتمال این که وزن تجهیزات از وزن فرضی بیشتر شود تقریباً صفر است. اگر هم چنین مشکلی پیش آید احتمالاً فرض اولیه اشتباه بوده و باید فرض اولیه اصلاح گردد. در نمونک ساخته شده جرم کلی موتور حدود ۴ کیلوگرم و به عبارتی وزن آن تقریباً ۴۰ نیوتن می‌باشد.

برای حرکت ماشین نیروی محرک آن باید بر نیروی مقاوم اصطکاک ناشی از این وزن غلبه نماید. با ارائه مدلی از چرخ و توجه به این که ضریب از وزن ماشین و اصطکاک سطح، سازنده نیروی اصطکاک بوده، می‌توان گشتاور راه‌اندازی مورد نیاز را محاسبه نمود. نیروی محرک با ضرب در شعاع گشتاور یا همان بازوی گشتاور، گشتاور محرک را می‌سازد. شعاع گشتاور فاصله تا گرانیگاه یا مرکز جرم ماشین است که در این نمونه به دلیل ابعاد کوچک ماشین کمتر از یک متر می‌باشد. ولی ما طراحی را برای مقدار یک متر انجام دادیم که به مراتب بزرگتر از مقدار مورد نیاز است. جزئیات محاسبات این طراحی در ادامه ارائه می‌شوند.

#### ۴-۱- معادلات حاکم بر قسمت مکانیکی

برای محاسبه گشتاور روی میل لنگ ابتدا نیروی اعمالی

<sup>1</sup> Maximum power point tracking

و محاسبه نیروی اصطکاک غلتشی بین چرخ و زمین بر اساس وزن فرضی ۴۰ نیوتن، با توجه به نیروهای وارده بر چرخ مانند آنچه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، برای این که چرخ بتواند از برجستگی فرضی  $D$  عبور کند، باید حول آن بگردد. برای این امر باید مجموع گشتاورهای ناشی از نیروی اصلی یعنی  $F_s$  و نیروی اصطکاک یعنی  $W$  صفر باشد. بر این اساس برای حرکت ماشین باید داشته باشیم:

$$F_s = F_f \quad (۳)$$

که در رابطه فوق  $F_f$  نیروی اصطکاک غلتشی بر حسب نیوتن می‌باشد.

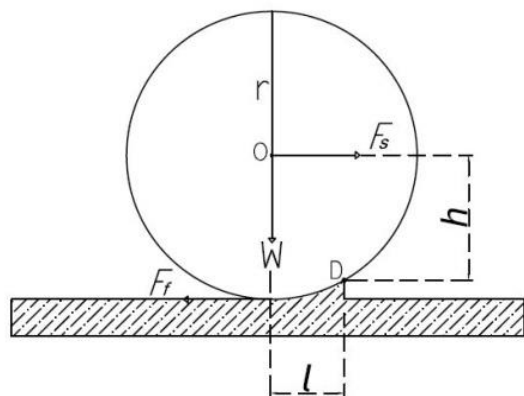
$$F_s \times h - W \times l = 0 \quad (۴)$$

که  $h$  طول موثر گشتاور محرک و  $l$  طول موثر گشتاور مقاوم بر حسب متر می‌باشد.

با توجه به این که شعاع چرخ  $r \cong h$  و با استفاده از روابط (۳) و (۴) می‌توان رابطه اصطکاک غلتشی بر حسب وزن نمونک ساخته شده را به دست آورد:

$$F_f = \frac{l}{r} \times W \quad (۵)$$

برای حرکت نمونک ساخته شده  $\tau_{Crankshaft\ total}$  که در رابطه (۲) محاسبه گردید باید بیشتر از گشتاور ناشی از  $F_f$  باشد. با در نظر گرفتن شعاع مناسب میل‌لنگ و محاسبات مربوط به قسمت مغناطیسی آهنرباها مقدار نیروی مغناطیسی مطلوب را محاسبه نمودیم تا گشتاور راه‌اندازی بدست آید. سپس با انتخاب مناسب شعاع چرخ نمونک به گشتاور راه‌اندازی مورد نیاز رسیدیم. جزئیات این محاسبات بر اساس روابط فوق در قسمت نتایج عددی ارائه شده‌اند.



شکل ۶: شمای چرخ نمونک ساخته شده و نمایش نیروهای وارده بر آن برای محاسبه شعاع صحیح چرخ

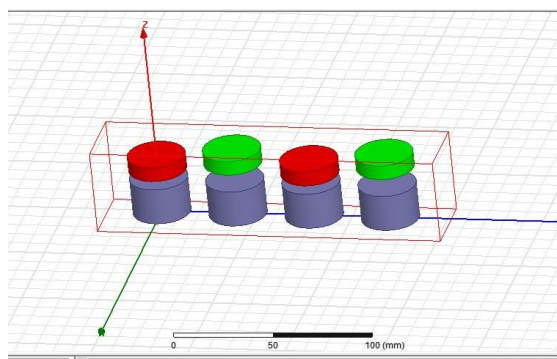
دائم پیستونی در هر دو سیلندر، نیروی  $F$  عملگر روی میل‌لنگ برابر با  $F = F_1 + F_2$  بوده که یک نیرو ناشی از دافعه و دیگری ناشی از جاذبه میان آهنرباهای دائم است. این فرایند تا کمینه شدن مقدار نیروی  $F_1$  ناشی از حداکثر فاصله میان آهنرباها و بیشینه شدن مقدار  $F_2$  ناشی از حداقل فاصله میان آهنرباها در نیم سیکل بعد ادامه خواهد یافت و در این لحظه آهنرباهای قابل‌گردش قطب‌هایی متفاوت با شرایط بیان شده را در برابر آهنربای دائم پیستونی خواهند ساخت. این فرایند در هر سیکل تکرار می‌شود. با توجه به اینکه شرایط آهنرباهای دائم چرخشی و پیستونی هر چهار بلوک در طراحی یکسان انتخاب شده، هم‌زمان در بلوک‌های ۳ و ۴ نیروی  $F$  که مجموع نیروهای  $F = F_3 + F_4$  می‌باشد، در شرایطی مشابه با عملکرد فوق‌الذکر، بر میل‌لنگ اعمال شده و موتور شروع به حرکت می‌نماید. با سنکرون بودن نیروهای  $F_1$  و  $F_3$  و همچنین نیروهای  $F_2$  و  $F_4$ ، زمانی که پیستون‌های موجود در بلوک‌های یک و سه در مسیر رفتِ ناشی از نیروهای دافعه میان آهنرباهای دائم قرار می‌گیرند، پیستون‌های موجود در بلوک‌های دو و چهار در مسیر برگشتِ ناشی از نیروهای جاذبه میان آهنرباهای دائم قرار گرفته و این امر منجر به اعمال نیرویی برابر با  $F_{Total} = 2 \times F = (F_1 + F_2) + (F_3 + F_4)$  به میل‌لنگ می‌شود. با طی شدن این نیم‌سیکل و بر اساس آنچه که در شکل (۵) نشان داده شده با چرخش آهنربای اول بلوک‌ها، عکس مفاهیم فوق به وقوع پیوسته و موتور یک سیکل کامل کاری را طی می‌کند. بنا بر شکل (۴) و فرمول‌های فیزیکی گشتاور خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \tau_2 = \\ &F \times \text{Crankshaft Radius}(R) \quad (۱) \\ \tau_{Crankshaft} &= \tau_1 + \tau_2 \\ &= 2F \times \text{Crankshaft Radius}(R) \\ &= 2 \times F \times R = \\ &[(F_1 + F_2) + (F_3 + F_4)] \times R \quad (۲) \end{aligned}$$

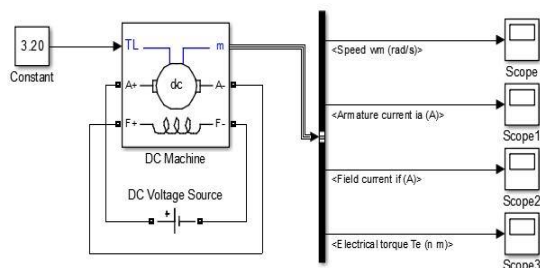
که در رابطه فوق  $\tau_{Crankshaft}$  گشتاور اعمال شده بر روی میل‌لنگ ناشی از نیروی مغناطیسی چهار بلوک می‌باشد و  $\tau_1$  گشتاور ناشی از آهنرباهای بلوک ۱ و ۲ و  $\tau_2$  گشتاور ناشی از آهنرباهای بلوک ۳ و ۴ می‌باشد. با ارائه مدل چرخ

همانطور که مشاهده می‌شود در روش آمپر برای بدست آوردن مقادیر  $m_1$  و  $m_2$  نیاز به استفاده از روش اجزای محدود می‌باشد که در نرم افزار MAXWELL پیاده‌سازی شده است.

نرم افزار مورد استفاده در شبیه سازی نسخه ۱۴ نرم افزار MAXWELL می‌باشد. مطابق آنچه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، ساختار کلی بلوک مغناطیسی شبیه‌سازی گردیده است.



شکل ۷: شبیه‌سازی موتور مغناطیسی در نرم افزار Maxwell



$$TL=[0.080^4]9.8+k=3.20$$

شکل ۸: شبیه سازی موتور DC سری در Matlab

#### ۳-۴- معادلات حاکم بر قسمت الکتریکی

۱- انتخاب موتور DC: برای انتخاب صحیح موتور مورد استفاده در نمونک، ملاحظات و شبیه‌سازی مورد نیاز انجام شد. با توجه به این‌که بار روی شفت موتور DC در نمونک ساخته‌شده چهار آهنربای ۸۰ گرمی است نیرو و به تبع آن گشتاور عکس‌العمل در نمونک آنقدر کوچک است که از آن صرف‌نظر کردیم ولی در اندازه‌های بزرگ در صورت نیاز بر اساس روش گفته‌شده در قسمت قبل قابل محاسبه است و تحت عنوان ضریب طراحی به مقدار بار روی موتور اضافه می‌گردد. سپس نوبت به انتخاب موتور می‌رسد. این مرحله به لحاظ انتخاب موتور با وزن کمتر دارای اهمیت است. با توجه به نیاز به محاسبه جریان آرمیچر موتور DC سری برای محاسبه

#### ۲-۴- معادلات حاکم بر قسمت مغناطیسی

در این کار تحقیقاتی از مدل آمپر که یک مدل شناخته‌شده و کارآمد برای محاسبه نیروی بین دو آهنربای دائم است، استفاده شده‌است. نرم افزار MAXWELL نیز این مدل را با استفاده از روش اجزای محدود پیاده‌سازی می‌نماید که یک دلیل دیگر انتخاب مدل آمپر برای محاسبه نیروهای مغناطیسی در این کار تحقیقاتی است.

در مدل آمپر برای بیان نیروی مغناطیسی یک آهنربای دائم، این آهنربا را به صورت حلقه‌های کوچک جریانی که درون حجم آن است در نظر می‌گیریم. نیروی مغناطیسی آهنربای دائم با جریان هر حلقه کوچک (آمپر)، بر سطح هر حلقه کوچک (متر مربع)، به چگالی تعداد حلقه‌های جریان در ماده (تعداد بر متر مکعب) متناسب است. بنابراین بعد نیروی مغناطیسی آهنربای دائم برابر است با آمپر در مترمربع بر مترمکعب  $(\frac{A \times m^2}{m^3})$  که برابر با آمپر بر متر

$(\frac{A}{m})$  می‌باشد. به همین دلیل است که آمپر بر متر واحد نیروی مغناطیسی است. مدل آمپر نیروی ناشی از یک آهنربای دائم را متشکل از مولفه‌های نیروهای هر جزء سازنده آن ماده آهنربایی می‌داند. بنابراین اثر مغناطیسی یک آهنربای دائم واقعی در یک فاصله بزرگ نسبت به ابعاد آهنربا را می‌توان با جمع کردن اثرات مغناطیسی المان‌های سازنده آن محاسبه کرد. در این روش نیروی دوقطبی مغناطیسی  $m_1$  روی دوقطبی مغناطیسی  $m_2$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۹]:

$$F(r, m_1, m_2) = \frac{3\pi_0}{4\pi r^5} ((r \cdot m_1)m_2 + (r \cdot m_2)m_1 + (m_1 \cdot m_2)r - \frac{5(m_1 r)(m_2 r)r}{\|r\|^2}) \quad (6)$$

که در فرمول فوق  $r$  فاصله برداری از دوقطبی مغناطیسی  $m_1$  به دوقطبی مغناطیسی  $m_2$  می‌باشد.

مقدار عددی نیروی میان آهنرباهای دائم مورد استفاده در نمونک، با توجه به این‌که میدان‌های مغناطیسی دو آهنربای دائم در جهت محور Z می‌باشند، و با فرض فاصله‌ی هوایی Z میان آنها، برابر است با:

$$F(z, m_1, m_2) = -\frac{3\mu_0 m_1 m_2}{2\pi z^4} \quad (7)$$

دمای سلول خورشیدی:

$$T_C = T_A + \left[ \frac{NOCT - 20}{0.8} \right] \times G = 50 + 0.8 \times \frac{43 - 20}{0.8} = 73^\circ\text{C} \quad (10)$$

ولتاژ مدار باز:

$$V_{OC}(T_C) = V_{OC}(25^\circ\text{C}) - \frac{dV_{OC}}{dT} \times N \times (T_C - 25)$$

$$V_{OC}(73^\circ\text{C}) = 4. - 0.0023 \times 6 \times (73 - 25)$$

$$= 42.33\text{V} \quad (11)$$

توان ماکزیمم تحت شرایط کاری: اگر فرض شود که Fill Factor (FF) مستقل از تابش خورشید و دما باشد [۱۰]:

$$F = \frac{P_{max}}{I_{SC} \times V_{OC}} = \frac{12}{4.5 \times 42.33} = 0.062 \quad (12)$$

$$P_{max}(G, T_C) = I_{SC}(G) \times V_{OC}(T_C) \times FF = 3.6 \times 42.33 \times 0.062 = 9.44\text{ W} \quad (13)$$

جریان کاری سلول خورشیدی:

$$I_P = \frac{I_R \left( \frac{Ah}{day} \right)}{K2 \times K3 \times K4 \times \left( \frac{h}{day} \right)}$$

$$= \frac{13.10}{0.89 \times 0.93 \times 0.95 \times 5} = 3.00\text{ A} \quad (14)$$

ولتاژ شارژ باتری‌های ذخیره (نیکل - کادمیوم):

$$V_{ch} = \frac{V_S}{V_n} \times V_f = \frac{24}{1.2} \times 1.45 = 29\text{ V} \quad (15)$$

ولتاژ کاری ماژول خورشیدی: ولتاژ کاری ماژول خورشیدی برابر مجموع ولتاژ شارژ باتری‌ها، افت ولتاژ دو سر دیود بلوک‌کننده، افت ولتاژ سیم‌های رابط و افت ولتاژ ناشی از افزایش دما می‌باشد. بنابراین ولتاژ کاری ماژول خورشیدی برابر است با:

$$V_P = 29 + 0.1 + 0.05 + 0.2 = 29.35\text{ V} \quad (16)$$

سه مولفه افت ولتاژ دو سر دیود بلوک‌کننده (۰,۱ ولت)، افت ولتاژ سیم‌های رابط (۰,۰۵ ولت) و افت ولتاژ ناشی از افزایش دما (۰,۲ ولت) برای نمونه ساخته شده با اندازه گیری به دست آمده‌اند.

توان کاری ماژول خورشیدی:

راندمان موتور مغناطیسی طراحی شده، شبیه سازی این موتور DC در نرم افزار Matlab انجام شد، که در شکل (۸) قابل مشاهده می‌باشد. پس از انتخاب موتور، متناسب با ولتاژ تغذیه آن، انتخاب سلول خورشیدی و باطری صورت پذیرفت. مجدداً لازم به ذکر است باطری‌های مورد استفاده در این طرح بسیار کمتر و به تبع آن اشغال حجم و وزن کمتری از ماشین نسبت به ماشین‌های الکتریکی امروزی است. براساس باطری شارژ کنترلر متناسب و برق مورد نیاز سایر ملزومات ماشین و دستگاه کنترل دور موتور DC هم تامین می‌گردد.

۲- انتخاب باطری و پنل خورشیدی: برای طراحی کامل خودرو باید محاسبات مربوط به باطری و پنل‌های خورشیدی انجام گردد، تا نهایتاً وزن تجهیزات محاسبه شده و مفروضات محاسبات مکانیکی و مغناطیسی صحت‌سنجی گردند. اطلاعات مربوط به پنل خورشیدی و باطری که در این کار تحقیقاتی از آنها استفاده شده (که در صنعت متداول می‌باشند) به شرح ارائه شده در جدول ۱ هستند. برای جزئیات پارامترهای قیدشده در این جدول می‌توان به مرجع [۱۰] مراجعه نمود.

ظرفیت یک سیستم فتوولتائیک بستگی به میزان مصرف بار آن دارد. لیست مصرف‌کننده‌های سیستم فتوولتائیک (با پنل ۲۴ ولت و توان ۱۲ وات) برای نمونه ساخته شده مطابق جدول ۲ می‌باشد. همان‌طور که در ستون آخر جدول ۲ مشاهده می‌گردد تعداد ساعات کارکرد ماشین مغناطیسی خورشیدی طراحی شده در یک روز ۸ ساعت در نظر گرفته شده که کاملاً دست بالا می‌باشد (معمولاً از خودروها کمتر از ۸ ساعت در روز استفاده می‌شود). به عبارت دیگر محاسبات برای یک حالت کاملاً سخت‌گیرانه انجام می‌شود.

بنابراین مجموع جریان مصرفی سیستم فتوولتائیک در یک شبانه‌روز برابر است با:

$$I_R = K1 \times \sum I_L(A) \times T \left( \frac{h}{day} \right) = 1.05 \times (1.36 \times 8 + 0.2 \times 8) = 13.10 \left( \frac{Ah}{day} \right) \quad (8)$$

برای پارامترهای سیستم فتوولتائیک داریم:

جریان اتصال کوتاه:

$$I_{SC}(G) = I_{SC} \times G = 4.5 \times 0.8 = 3.6\text{ A} \quad (9)$$



به رسم نمودار نیرو بر حسب فاصله‌هوایی نمودیم که در شکل (۹) قابل مشاهده می‌باشد. در این شکل محور عمودی نشان‌دهنده اندازه نیروی مغناطیسی ناشی از یک بلوک بوده و محور افقی فاصله هوایی میان دو آهنربای دائم را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که نمودار نیرو نموداری پیرویدیک است که ما فقط به رسم آن در یک سیکل کاری اکتفا کردیم. همچنین نمودار نیرو از کمترین مقدار فاصله هوایی یعنی ۳ میلی‌متر تا بیشترین مقدار فاصله هوایی یعنی حدود ۳۰ میلی‌متر رسم شده است

۲- مقادیر شدت میدان (H) و چگالی میدان (B) مغناطیسی: در شکل (۱۰) مقادیر شدت میدان مغناطیسی و در شکل (۱۱) بردارهای چگالی میدان مغناطیسی نمایش داده شده‌اند. مقادیر عددی رنگ‌های نمایش داده‌شده در هر شکل در جدول کناری آن مشخص شده‌اند. شکل (۱۰) نشان می‌دهد که شدت میدان مغناطیسی در بلوک‌های ۱ و ۳ (از سمت چپ) که آهنرباهای دائم به هم نزدیک می‌شوند بیش از شدت میدان مغناطیسی در بلوک‌های ۲ و ۴ که آهنرباهای دائم از هم دور می‌شوند می‌باشد. در شکل (۱۱) بردارهای سبز رنگ نشان‌دهنده خطوط شار مغناطیسی بوده و تراکم این بردارها در هر نقطه از شکل نمایشگر میزان چگالی شار در آن نقطه می‌باشد.

در شکل (۱۲) توزیع تغییر دمای موتور نسبت به دمای محیط نشان داده شده‌است. به طوری که مشاهده می‌گردد تغییر دما نسبت به دمای محیط در نقاط مختلف موتور در حدود صفر می‌باشد که با رنگ سبز در شکل مشخص شده‌اند. با اندازه‌گیری‌های انجام شده مشخص گردید که نهایت افزایش دمای موتور نسبت به دمای محیط در حدود ۳ درجه سلسیوس است. این تغییر دما بسیار اندک بوده و یکی از مزایای مهم موتور طراحی شده نسبت به موتورهای بنزینی و دیزلی موجود یعنی آلودگی حرارتی ناچیز آن را نشان می‌دهد. به علاوه بسیاری از لوازم خنک‌سازی در ماشین‌های فعلی قابل حذف برای موتور طراحی شده می‌باشند.

پیدا می‌کنیم. آهنرباهای نئودیمیوم فعلی درجه‌بندی‌ای در بازه N35 الی N52 دارند. درجه‌بندی بیشتر آهنرباهای موجود در کشور ما به دلیل ایجاد تعدادی بهینه بین قدرت آهنربای دائم و قیمت آن، N42 و پایین‌تر است.

$$W_p = V_p \times I_p = 29.35 \times 3.00 = 88.28 \text{ W} \quad (17)$$

تعداد آرایه‌های خورشیدی که بایستی با یکدیگر موازی شوند تا توان مورد نیاز را تامین نمایند برابر است با:

$$C = \frac{W_p}{P_{max}(G.T_c)} = \frac{88.28}{9.44} = 9.35 \quad (18)$$

لذا با لحاظ نمودن یک حاشیه امنیت تعداد آرایه‌های خورشیدی ۱۰ عدد در نظر گرفته شد.

ظرفیت شارژکنترلر ماژول خورشیدی: مطابق استاندارد ظرفیت جریانی شارژکنترلر بایستی ۱٫۳ برابر جریان اتصال کوتاه مجموع آرایه‌های موازی انتخاب شود [۱۰].

$$I_{CC} = 1.3 \times I_{SC} \times N = 1.3 \times 3.6 \times 10 = 46.8 \text{ A} \quad (19)$$

ظرفیت باطری ذخیره:

$$C(Ah) = \frac{I_R \left( \frac{Ah}{day} \right) \times D(day)}{K5 \times K6} = \frac{13.10 \times 1}{0.98 \times 0.98} = 13.64 \text{ Ah} \quad (20)$$

بنابراین دو باطری ۲۴V با ظرفیت ۷.۲Ah را به صورت موازی با یکدیگر انتخاب می‌کنیم (۷.۲×۲=۱۴.۴ > ۱۳.۶۴). مشاهده می‌گردد که در انتخاب روزهای غیرآفتابی مجدداً بدترین حالت در نظر گرفته‌شده یعنی فرض‌شده در تمام روز غیرآفتابی هیچ تابش خورشید در کار نباشد. حتی برای این بدترین حالت نیز باطری‌های استفاده شده می‌توانند یک روز مصرف ماشین را تامین نمایند.

## ۵- نتایج عددی

۱- بدست آوردن مقدار نیرو: با در نظر گرفتن آهنربایی از جنس NdFeB و پس از انجام شبیه‌سازی موتور مغناطیسی در نرم‌افزار MAXWELL، نیرو در راستای محور Z در حدود ۲۰۵ نیوتون می‌باشد. با توجه به عدم نیاز به نیروی مغناطیسی بالای ناشی از آهنربای NdFeB با تغییر جنس آهنربای دائم به نئودینیوم با درجه‌بندی<sup>۱</sup> ۴۲ و آنچه که در نمونه ساخته‌شده استفاده گردیده است، با پیگیری مسیر شبیه‌سازی اقدام

<sup>۱</sup> آهنرباهای دائم نئودینیوم بوسیله مواد مغناطیسی به کار رفته در ساخت‌شان درجه‌بندی می‌شوند. به طور کلی درجه بالاتر از مواد سازنده به معنای آهنربای قدرتمندتر است. برای صحت‌سنجی عدد درجه‌بندی، نیروی کشش یک آهنربای دائم را که به طور مستقیم وابسته به عدد N یا همان Grade است،

جدول ۱: اطلاعات مربوط به پنل خورشیدی و باتری

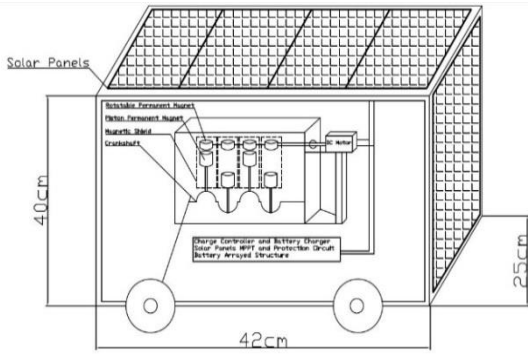
$V_S = 24V$	ولتاژ مازول خورشیدی
$D = 1$	تعداد روزهای پشتیبانی باتریها برای روزهای غیر آفتابی
$I_{SC} = 4.5A$	جریان اتصال کوتاه هر یک از سلولها تحت شرایط استاندارد
$\frac{dV_{OC}}{dT} = 2.3mV / ^\circ C$	ضریب دمایی ولتاژ هر سلول
$V_{OC} = 43V$	حداکثر ولتاژ مدار باز در دمای $25^{\circ}C$
$P_{max} = 12W$	حداکثر توان پنل (MPP)
$G = 0.8kW / m^2$	میزان متوسط روزانه توان تابشی خورشید
$N = 6$	تعداد سلولهای سری شده در یک پنل خورشیدی با توان نامی 12W
$NOCT = 43^{\circ}C$	دمای کاری نرمال سل (تحت تابش $0.8 KW/m^2$ ، طیف توزیع AM1.5، دمای محیط $20^{\circ}C$ و سرعت باد کمتر از 1m/s)
$T_A = 50^{\circ}C$	حداکثر دمای محیط در سایه
$K1 = 1.05$	ضریب ایمنی (رزرو) بار
$K2 = 0.89$	ضریب تعدیل شی از تغییرات دما
$K3 = 0.93$	ضریب تعدیل ناشی از آلودگی سطح سلولها
$K4 = 0.95$	ضریب تعدیل ناشی از راندمان شارژ / دشارژ سلولها
$K5 = 0.98$	ضریب ایمنی برای تخلیه خودی باتریهای ذخیره
$K6 = 0.98$	ضریب حداکثر مجاز تخلیه شدید (DOD) باتریهای ذخیره
$T_S = 5$	متوسط زمان تولید توان نامی سلول در روز
$V_n = 1.2V / cell$	ولتاژ نامی باتریهای ذخیره
$V_n = 1.45V / cell$	ولتاژ شارژ شناور باتریهای ذخیره

جدول ۲: لیست مصارف الکتریکی سیستم فتوولتائیک

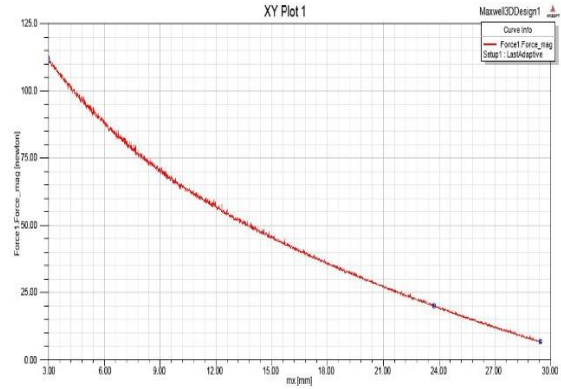
Item	Power (Watt)	Rated Voltage (VDC)	Current requirement (A)	Duration per day (h/day)
DC motor	32.64	24	1.36	8
internal circuitry	4.8	24	0.2	8

جدول ۳: مشخصات قطعات استفاده شده در نمونه

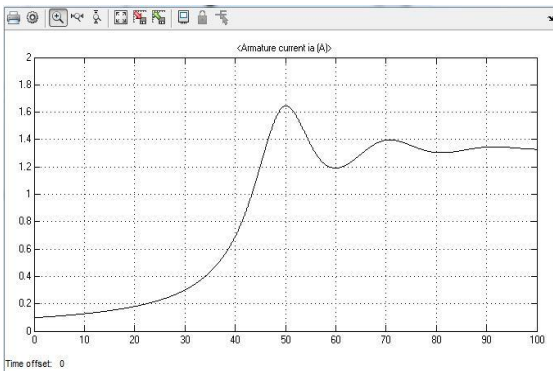
قطعه مورد استفاده در نمونه	مشخصات قطعه مورد استفاده	ابعاد قطعه (سانتی متر)	جرم قطعه مورد استفاده (گرم)	تعداد مورد استفاده	جرم کل (گرم)
پنل خورشیدی	۱۲ ولت ۳,۵ آمپر	۴۰*۲۵	۱۱۰۰	۲	۲۲۰۰
باتری قابل شارژ	VoltaMax	۸*۱۲	۳۰۰	۲	۶۰۰
آهنربای دائم	نئودیمیوم N42	۲*۲,۵	۸۰	۸	۶۴۰
موتور DC	GONGLI-300CA-HHG18CXK	۲*۲,۵	۵۰	۱	۵۰
میل لنگ، پیستون و بلوک سیلندر	تفلون	-	۴۰۰	۱	۴۰۰
بدنه و اقلام	تفلون	-	۸۰	۱	۸۰
مدار حفاظت باتری	-	۳*۵	۲۰,۵	۱	۲۰,۵
مدار کنترل سرعت	-	-	۱۰,۲	۱	۱۰,۲



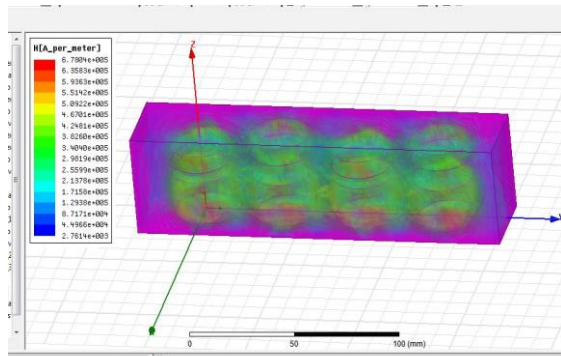
شکل ۱۳: طراحی پایانی ماشین نمونک، طول نهایی ۴۲، عرض نهایی ۴۰ و ضخامت ۲۵ سانتی متر



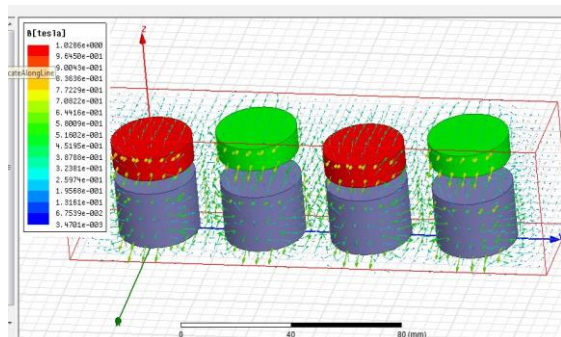
شکل ۹: رسم نمودار نیرو برای آهنربای دائم از جنس نئودیمیوم بر حسب فاصله هوایی از نتایج آنالیز پارامتریک نرم‌افزار



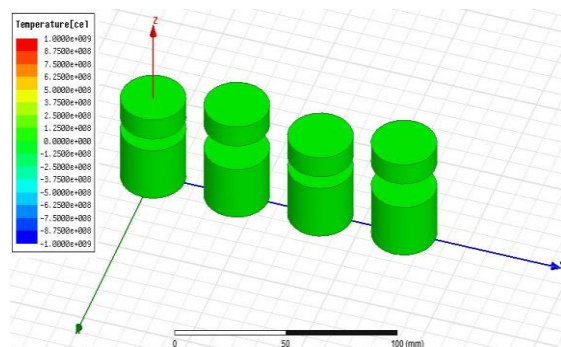
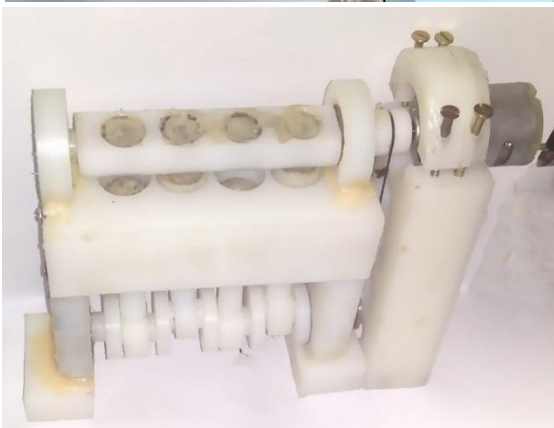
شکل ۱۴: مشخصه جریان آرمیچر موتور DC سری نمونک در Matlab



شکل ۱۰: نتایج مقادیر شدت میدان مغناطیسی به دست آمده از نتیجه آنالیز کلی در Maxwell



شکل ۱۱: نتایج برداری چگالی میدان مغناطیسی به دست آمده از نتیجه آنالیز کلی در Maxwell



شکل ۱۲: نتایج تغییر دمای موتور مغناطیسی نسبت به دمای محیط به دست آمده از آنالیز کلی در Maxwell

شکل ۱۵- ساختار نهایی موتور مغناطیسی نمونک ساخته‌شده

برابر با ۴۰ نیوتن می‌باشد ( $W = 40 \cdot N$ ) و در نظر گرفتن مقدار ۵۰ میلی‌متر برای شعاع چرخ  $r$  و مقدار ۵ میلی‌متر برای  $l$  که در شکل شماره (۶) نشان داده شدند، از رابطه (۵) خواهیم داشت:

$$F_r = \frac{l}{r} \times N = \frac{0.005}{0.05} \times 40 = 0.1 \times 40 = 4 \text{ N} \quad (23)$$

$$\eta = \frac{P_{\text{elec out}}}{P_{\text{elec in}}} = \frac{V_{\text{out}} \times I_{\text{out}}}{V_{\text{in}} \times I_{\text{in}}} = \frac{22.61 \times 1.16}{24.00 \times 1.36} = 80.3\% \quad (24)$$

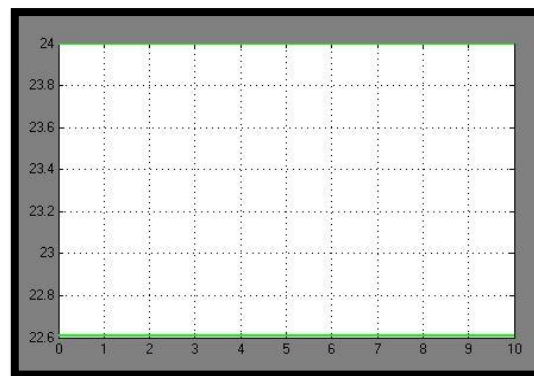
مشاهده می‌گردد که مقدار ۴ نیوتن نیروی اصطکاک ناشی از وزن فرضی در برابر  $2 \times 117 = 234$  نیوتن نیروی ناشی از آهنرباهای دائم بسیار ناچیز می‌باشد. شمای کلی نمونک ساخته‌شده در شکل (۱۳) نشان داده شده‌است. ابعاد و وزن واقعی تجهیزات آن نیز در جدول ۳ ارائه گردیده‌اند.

با مشاهده ارقام مصرفی در ساخت نمونک و جمع‌بندی جرم آنها، مجموع جرم نمونک برابر با ۴۰۰۰,۷ گرم می‌شود. پس از مقایسه وزن بدست‌آمده و وزن فرضی می‌توان دریافت که ساخت این طرح دارای توجیه اقتصادی بوده و توانایی حمل بار یا سرنشین را داراست. قابل ذکر است که گشتاور راه اندازی مورد نیاز موتور برای غلبه بر نیروهای اصطکاک مقداری به مراتب کمتر از گشتاور تولیدی است و این نشان‌دهنده‌ی عملکرد کاملاً قابل قبول موتور طراحی شده می‌باشد.

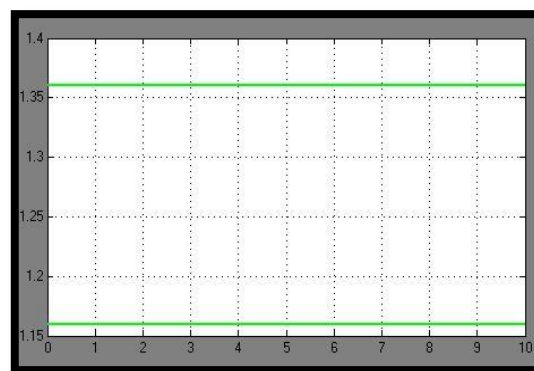
**۳- نتایج شبیه‌سازی موتور DC سری در Matlab:** شبیه‌سازی موتور DC با ولتاژ ۲۴ ولت انجام شده است که نمودار جریان آرمیچر آن بر حسب زمان در شکل (۱۴) نشان داده شده‌است.

#### ۶- آزمایشات عملی و محاسبه راندمان موتور

ساختار نهایی ساخته‌شده موتور مغناطیسی ابداعی در شکل (۱۵) قابل مشاهده می‌باشد. برای محاسبه راندمان دستگاه با اعمال جریان و ولتاژ DC خروجی از پنل خورشیدی استفاده‌شده به موتور DC محرک آهنرباهای قابل چرخش اقدام به راه‌اندازی موتور نمودیم. به کمک یک کرنش‌سنج و قرار دادن آن بر روی شفت موتور مغناطیسی، میزان گشتاور مکانیکی شفت برابر با ۲۴ نیوتن متر شد. برای اندازه‌گیری راندمان موتور مغناطیسی نیاز به محاسبه



شکل ۱۶: نتایج ولتاژ ورودی به محرک موتور مغناطیسی و خروجی از بار روی شفت آن



شکل ۱۷: نتایج جریان ورودی به محرک موتور مغناطیسی و خروجی از بار روی شفت آن

در ادامه نتایج عددی به دست آمده از محاسبات گشتاور محرک و گشتاور مقاوم بر مبنای مدل‌های ریاضی معرفی شده در بخش قبل ارائه می‌شوند.

پس از در نظر گرفتن آهنرباهای دائم از جنس نئودیمیوم به قطر ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰ میلی‌متر و فاصله میان این دو آهنربا به مقدار ۲۸ میلی‌متر، نیروی بین دو آهنربای دائم  $117 = 112 + 5$  نیوتن بدست آمد. مقادیر ۱۱۲ نیوتن و ۵ نیوتن برای نیروی بین دو آهنربای دائم مربوط به کمترین و بیشترین مقدار فاصله هوایی (یعنی ۳ میلی‌متر و ۳۰ میلی‌متر) در شکل (۹) می‌باشد. با توجه به مدل‌سازی‌های بیان شده برای قسمت مکانیکی خواهیم داشت:

$$\tau_{\text{Crankshaft}} = 2 \times F \times R = 2 \times 117 \times R \quad (21)$$

$$\tau_{\text{Crankshaft}} = 2 \times 117 \times 0.05 = 11.7 \text{ NM} \quad (22)$$

حال به بیان مدل چرخ و انتخاب شعاع مناسب برای چرخ نمونک باز می‌پردازیم. با توجه به این که وزن فرضی نمونک

و نیازمند به حفاظت چون اینورتر و مدار کنترل و حفاظت موتور القایی و سایر دغدغه های ناشی از التزام به استفاده از برق AC.

۴- کاهش حجم اشغال شده توسط ملزومات و قطعات موتور و اختصاص آن به مواردی مهم تر چون باطری که به معنای افزایش مدت زمان استفاده از خودرو می باشد.

۵- کاهش مصرف انرژی به دلیل حذف بسیاری از قسمت های الکتریکی که منجر به افزایش مدت زمان استفاده از خودرو خواهد شد.

۶- از بین رفتن آلودگی های ناشی از ماشین های بنزینی و دیزلی برای محیط زیست و انسان ها.

۷- صرفه ای اقتصادی مطلوب نسبت به مدل های کنونی و قابلیت استفاده همگانی از این ماشین و تولید و مونتاژ انبوه آن در داخل کشور.

۸- دسترسی آسان به موارد مورد نیاز ساخت این طرح در داخل کشور.

۹- ارائه راهکاری جدید برای به خدمت گرفتن نیروهای آهنربای دائم.

۱۰- قابلیت تعمیر و نگهداری بسیار ساده تر و ارزان تر از ماشین های امروزی.

۱۱- ارائه راندمانی بالاتر از خودروهای بنزینی و دیزلی.

توان خروجی موتور مغناطیسی است که این امر با قرار دادن یک ژنراتور DC دیگر روی شفت موتور مغناطیسی و بدست آوردن توان الکتریکی خروجی آن انجام گردید. نتایج بدست آمده در شکل های (۱۶) و (۱۷) ارائه شده اند. راندمان موتور مغناطیسی برابر با نسبت توان الکتریکی خروجی به ورودی می باشد:

راندمان بالای این موتور یکی دیگر از مزایای مهم آن نسبت به موتورهای بنزینی و دیزلی می باشد که راندمانی در حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد دارند.

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله ایده ماشین مغناطیسی خورشیدی به عنوان یک اختراع جدید معرفی گردیده و سپس مدل های ریاضی و محاسبات فنی بخش های مختلف آن ارائه شدند. طرح ماشین مغناطیسی خورشیدی ارائه شده دارای مزایای بسیاری است که از جمله آن می توان موارد زیر را برشمرد:

۱- کاهش چشم گیر وزن ملزومات ساخت موتور و در نتیجه کاهش شدید نیروی مورد نیاز برای حرکت اولیه و ادامه حرکت.

۲- ساختار ساده، ارزان و قابل ارتقا به سطوح بالاتر توان با افزایش تعداد بلوک های سیلندر.

۳- عدم نیاز به استفاده از ملزومات گران قیمت و حساس

## ۸- مراجع

- [1] Permanent Magnet Electric Rotating Machine and Electromotive Vehicle Using Permanent Magnet Electric Rotating Machine, US 2006/0284508 A1 Patent Application.
- [2] Permanent-magnet Type Electric Rotating Machine, US 8569921 B2 Granted Patent
- [3] Permanent Magnet Type Electric Rotating Machine and Manufacturing Method Thereof, US 2014/0084731 A1 Patent Application.
- [4] Dynamo magnetic Machine WO 1988/005976 A1 Patent Application.
- [5] Multi-layer Magnet Arrangement in A Permanent Magnet Machine For A Motorized Vehicle, US 7847461 B2 Granted Patent.
- [6] Permanent Magnet Electric Machine, WO 2013/158059 A1 Patent Application
- [7] Solar battery charger with overcharge protection, Battery & Charge Controller and Solar circuit section in [www.eleccircuit.com](http://www.eleccircuit.com).
- [8] Electric Vehicle Conversion Design, Brigham Joffs. Document from [www.scribd.com](http://www.scribd.com) by 189715630 document number.
- [9] Schill, R. A. (2003). "General relation for the vector magnetic field of a circular current loop: A closer look". IEEE Transactions on Magnetics 39 (2):961-967. Bibcode: 2003ITM 39961S. doi:10.1109/TMAG.2003.808597.
- [10] IEC 60904:1-10, IEC 61730, IEC 61215, IEC 61853 standards.