

# استفاده از الگوریتم زنبورهای عسل برای بهینه‌سازی سیستم‌های انتقال توان بدون تماس به روش القایی برای شارژ خودروهای الکتریکی

پدرام شهریاری‌نسب<sup>۱</sup> دانشجوی ارشد، معین پرستگاری<sup>۲</sup> دانشجوی دکترا، مهدی معلم<sup>۳</sup> استاد

۱- دانشکده برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان- اصفهان- ایران- P.shahriary@yahoo.com

۲- گروه مهندسی برق- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه اصفهان - اصفهان- ایران- parastegary\_m@yahoo.com

۳- دانشکده برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان- اصفهان- ایران- moallem@cc.iut.ac.ir

**چکیده:** امروزه، استفاده از سیستم‌های انتقال انرژی الکتریکی بدون تماس برای شارژ خودروهای الکتریکی موجبات افزایش کارایی این خودروها را فراهم آورده است. در این مقاله یک سیستم انتقال انرژی الکتریکی بدون تماس القایی با سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه مستطیل شکل طراحی شده است. مدلی تحلیلی برای سیستم انتقال انرژی القایی ارائه و از آن برای بهینه‌سازی عملکرد سیستم استفاده شده است. برای بهینه‌سازی پارامترهای سیستم، در این مقاله از الگوریتم زنبورهای عسل استفاده شده و مسئله بهینه‌سازی جدیدی با دو تابع هدف برای طراحی سیستم انتقال انرژی القایی تعریف شده، به نحوی که بالاترین بازده سیستم درحالی‌که کم‌ترین حجم مس برای اجرای عملی سیستم نیاز باشد به دست آید. همچنین لزوم جبران در سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه سیستم و بهترین نوع جبران با توجه به کاربرد شارژ بدون تماس خودروهای الکتریکی ارائه شده است. عملکرد سیستم طراحی شده در اثر جابه‌جا شدن مرکز سیم‌پیچ اولیه و ثانویه نسبت به یکدیگر نیز بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزارهای MATLAB و ANSOFT MAXWELL مویده صحت مدل تحلیلی به دست آمده و نتایج طراحی انجام شده می‌باشد. **واژه‌های کلیدی:** سیستم‌های انتقال انرژی بدون تماس القایی، خودرو الکتریکی، الگوریتم زنبورهای عسل

## Adopting Artificial Bee Colony Algorithm to Optimize Inductively Coupled Contactless Power Transmission Systems for EV Charging

P.Shahriari Nasab<sup>1</sup>, M.Parastegari<sup>2</sup>, M.Moallem<sup>3</sup>.

1, 3- Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, 2-University of Isfahan, Isfahan, Iran

**Abstract:** Today, using inductively coupled contactless power transmission systems (ICPT) to charge electric vehicles is a promising step in increasing efficiency of electric vehicles. In this paper, the design of an ICPT system based on a rectangular coil configuration for primary and secondary coil is presented. An analytical model of the contactless power transmission system is derived and is used to optimize the performance of the system. System parameters are optimized using artificial bee colony algorithm and a new two-objective optimization problem is obtained which optimizes the system parameters to reach maximum efficiency while the minimum volume of copper is needed to be used. Moreover, the necessity of compensation in both primary and secondary studied and the best compensation technique based on the application of ICPT system is applied. The designed system performance while the primary and secondary windings are misaligned is investigated. Simulations are done by MATLAB and ANSOFT MAXWELL and the results confirm the analytical model and designed result as expected.

**Keywords:** Inductively coupled contactless power transmission system (ICPT), Electric vehicles, Artificial Bee colony algorithm.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۴/۲۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۲/۷/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۸/۲۰

نام نویسنده‌ی مسئول: پدرام شهریاری‌نسب

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - اصفهان - بلوار دانشگاه صنعتی - دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

## ۱- مقدمه

در طراحی شکل سیم‌پیچ‌ها (هندسه سیستم)، ابعاد سیستم، فاصله بین سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه، فرکانس کاری سیستم و پارامترهای بسیار دیگری باید تعیین گردد.

سیستم‌های انتقال توان القایی با استفاده از سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه دایره شکل در [۱۲] آورده شده است. در این مرجع بهینه‌سازی پارامترهای سیستم برای افزایش اندوکتانس متقابل دو سیم‌پیچ و درحالی‌که طول سیم‌ها ثابت فرض شده است مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۳] از هسته فریت برای جهت‌دهی شار پیوندی سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه استفاده شده است. در [۱۴] نویسندگان از سیم‌پیچ‌های مارپیچ برای انتقال استفاده کرده‌اند. استفاده از جبران‌کننده‌های خازنی برای بالا بردن بازده سیستم و حداقل‌سازی مقادیر نامی سیستم نیز در این مرجع بررسی شده است. استفاده از سیم‌پیچ‌ها با ساختارهای دو وجهی<sup>۲</sup> و سه وجهی<sup>۴</sup> در [۱۵] و [۱۶] مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۷] مدل‌سازی سیستم‌های انتقال انرژی بدون تماس سه فاز مورد بررسی قرار گرفته و مدار معادل سه فاز سیستم و اندوکتانس‌های متقابل به دست آمده است.

در مقایسه با تمام ساختارهای هندسی متفاوتی که تاکنون برای سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه در سیستم‌های انتقال انرژی القایی مورد بررسی قرار گرفته است سیم‌پیچ‌های مستطیل شکل سطح بالاتری را می‌توانند پوشش دهد. این امر برای کاربرد شارژ خودرو الکتریکی که امکان جابه‌جا شدن مرکز سیم‌پیچ‌ها وجود دارد بسیار اهمیت دارد. با پوشش بیشتر سطح، هم‌چنین امکان انتقال توان بیشتر در مدت زمان کمتر فراهم می‌شود. به همین دلیل برای طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی در این مقاله با توجه به کاربرد، سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه به صورت مستطیل شکل در نظر گرفته شده‌اند.

در این مقاله طراحی و بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های انتقال انرژی بدون تماس القایی مورد بررسی قرار گرفته است. مسئله طراحی و بهینه‌سازی به نحوی تعریف شده است که به طور هم‌زمان حداکثر راندمان و حداقل هزینه به دست آید. برای رسیدن به سیستم بهینه، مسئله طراحی ترانسفورماتور (تعیین ولتاژ، فرکانس، تعداد دور سیم پیچ‌ها و دیگر پارامترها) به یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه تبدیل می‌گردد. در این مقاله از الگوریتم زنبور عسل برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است.

در ادامه مطالب به صورت زیر ارائه می‌گردند. در بخش دوم این مقاله مقدمه‌ای بر خودروهای الکتریکی و سیستم‌های شارژ آن‌ها ارائه شده است. شارژ بدون تماس خودروهای الکتریکی و پارامترهای سیستم در این بخش معرفی شده‌اند. در قسمت سوم مسئله اصلی بهینه‌سازی و طراحی، فرمول‌بندی شده است. در بخش چهارم لزوم استفاده از سیستم‌های جبران در سیستم‌های انتقال مطرح و بهترین سیستم جبران خازنی برای شارژ خودروهای الکتریکی معرفی شده‌اند. مقدمه‌ای بر الگوریتم زنبورهای عسل در بخش پنجم این مقاله آورده شده است و نهایتاً نتایج شبیه‌سازی در بخش ششم ارائه شده است.

وابستگی خودروهای متداول کنونی مبتنی بر موتورهای احتراق داخلی به نفت، موجب مشکلات زیست محیطی بسیاری از جمله گرم شدن محیط زمین و آلودگی شهرهای بزرگ شده است [۱]. بر خلاف خودروهای مبتنی بر موتورهای احتراقی، خودروهای الکتریکی از سوخت پاک به عنوان منبع انرژی استفاده می‌کنند به همین علت امروزه استفاده از خودروهای الکتریکی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است.

یکی از مشکلات اصلی خودروهای الکتریکی زمان شارژ بسیار طولانی و مسافت قابل حرکت کم در حالت شارژ کامل است. راحت‌ترین روش حل این مشکل بالا بردن توان انتقالی شارژرها و ظرفیت ذخیره کننده‌های انرژی می‌باشد. افزایش توان شارژرها در سیستم‌های شارژ متداول کنونی (انتقال از طریق کابل) موجب افزایش احتمال شوک‌های الکتریکی، افزایش هزینه اجرا سیستم و افزایش هزینه و وزن ذخیره کننده‌های انرژی مورد نیاز می‌شود [۲].

استفاده از سیستم‌های انتقال انرژی الکتریکی بدون تماس برای شارژ خودروهای الکتریکی، به عنوان راه‌حلی مناسب برای کاهش زمان شارژ خودروهای الکتریکی و افزایش ایمنی و راحتی در هنگام شارژ عنوان می‌شود [۳، ۴]. استفاده از این سیستم‌ها هم‌چنین امکان افزایش انرژی الکتریکی انتقال یافته در مدت زمان کوتاه‌تری را فراهم می‌آورد. علاوه بر این، انتقال انرژی الکتریکی بدون تماس، به ارتقای سیستم الکتریکی نیاز ندارد، انتقال در ایمنی الکتریکی کامل انجام می‌شود و نیاز به تعمیرات و نگهداری ندارد [۵].

روش‌های بسیاری برای انتقال انرژی الکتریکی بدون تماس با استفاده از واسطه‌های انرژی مختلف از جمله میدان مغناطیسی [۵]، میدان‌های الکتریکی [۶، ۷]، امواج ماکروویو [۸]، امواج مافوق صوت [۹، ۱۰] و ... ارائه شده است. هر روش با توجه به واسطه انتقال مشخصه عملکردی خاصی دارد و در کاربردی خاص نسبت به سایر روش‌ها ارجحیت پیدا می‌کند. در کاربردهای شارژ بدون تماس خودروهای الکتریکی، انرژی الکتریکی باید در فواصل کوتاه (تا ۲ متر [۴]) منتقل شود. استفاده از القای مغناطیسی راهی مناسب برای انتقال انرژی الکتریکی در فواصل متوسط می‌باشد [۴].

در این سیستم‌ها (سیستم‌های انتقال انرژی الکتریکی القایی<sup>۱</sup> که ترانسفورماتور بدون هسته<sup>۲</sup> نیز نامیده می‌شوند)، شار مغناطیسی در سیم‌پیچ اولیه تولید و با سیم‌پیچ ثانویه کوپل می‌شود. بدین وسیله ولتاژ در سمت ثانویه سیستم القا شده و انرژی الکتریکی بدون هیچ واسطی انتقال داده می‌شود. در چنین سیستم‌هایی شار نشتی در فضا به دلیل تزویج ضعیف سیم‌پیچ اولیه و ثانویه بسیار زیاد می‌باشد بنابراین برای رسیدن به سیستم انتقال القایی با عملکرد بهینه باید پارامترهای سیستم به صورت دقیق طراحی شوند [۱۱].

## ۲- مقدمه‌ای بر خودروهای الکتریکی

### ۱-۲- خودرو الکتریکی

بیش از صد سال است که خودروها، از موتورهای احتراقی به عنوان تامین کننده انرژی خود استفاده می‌کنند. وابستگی به نفت، آلودگی هوا و نویزهای صوتی از مشکلات اساسی موتورهای احتراقی به شمار می‌رود. به همین دلیل خودروهای الکتریکی که از سوخت پاک استفاده می‌کنند مورد توجه قرار گرفته‌اند. یک خودرو الکتریکی به طور کلی شامل یک موتور الکتریکی، یک ژنراتور الکتریکی، واحد مکانیکی، سیستم کنترل توان و باتری برای ذخیره انرژی الکتریکی است. با توجه به نحوه قرار گرفتن این قسمت‌ها و نحوه فعالیت هر یک و ارتباط با یکدیگر انواع متفاوتی از خودروهای الکتریکی قابل طراحی می‌باشد. به طور کلی خودروهای الکتریکی به چهار دسته: (۱) خودروهای هیبریدی، (۲) خودرو الکتریکی با رنج افزایش یافته، (۳) خودروهای الکتریکی هیبریدی و متصل به شبکه و (۴) خودروهای الکتریکی مبتنی بر باتری (شکل (۱)) تقسیم می‌شوند.

مشکل اصلی خودروهای الکتریکی مدت زمان شارژ بالا و زمان رانندگی کم می‌باشد. در حال حاضر، سه استاندارد برای شارژ خودروهای الکتریکی توسط موسسه‌های مختلف از جمله موسسه مهندسی اتومبیل (SAE) ارائه شده است.

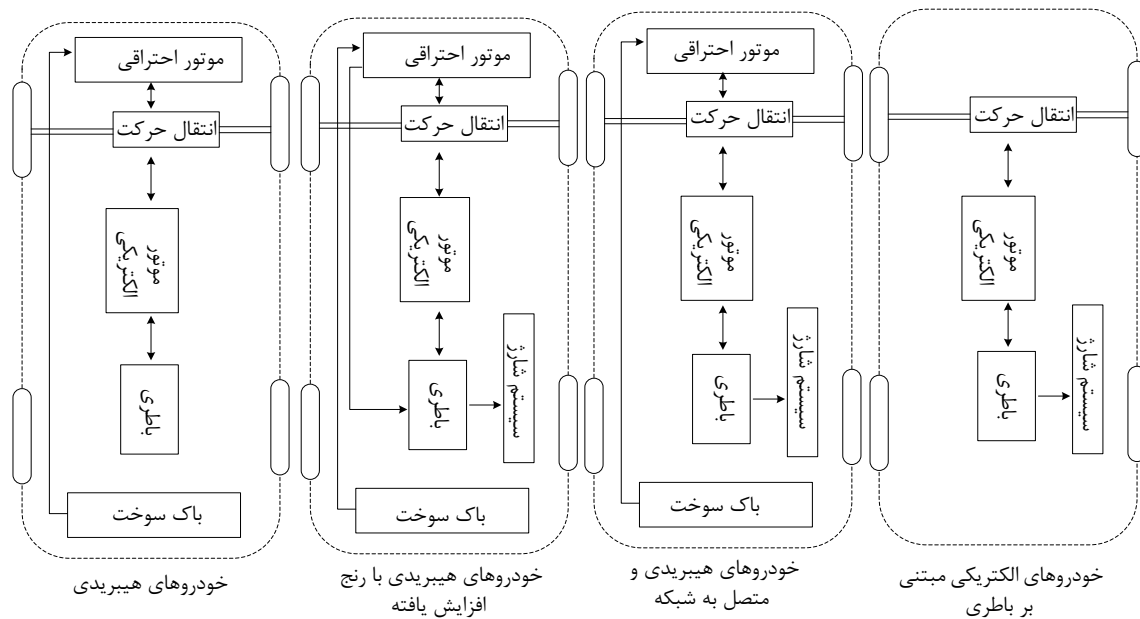
در سطح اول از ولتاژ AC ۱۱۰ برای شارژ استفاده می‌شود در این حالت، زمان شارژ کامل یک خودرو ۸ ساعت می‌باشد. بنابراین، این سطح شارژ فقط برای باتری‌ها و خودروهای الکتریکی کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در سطح دوم، شارژ در ولتاژ AC ۲۲۰ انجام می‌شود و با این کار زمان شارژ به نصف کاهش می‌یابد. این سطح برای شارژ خودروهای الکتریکی در منازل و اماکن عمومی ارائه شده است [۲].

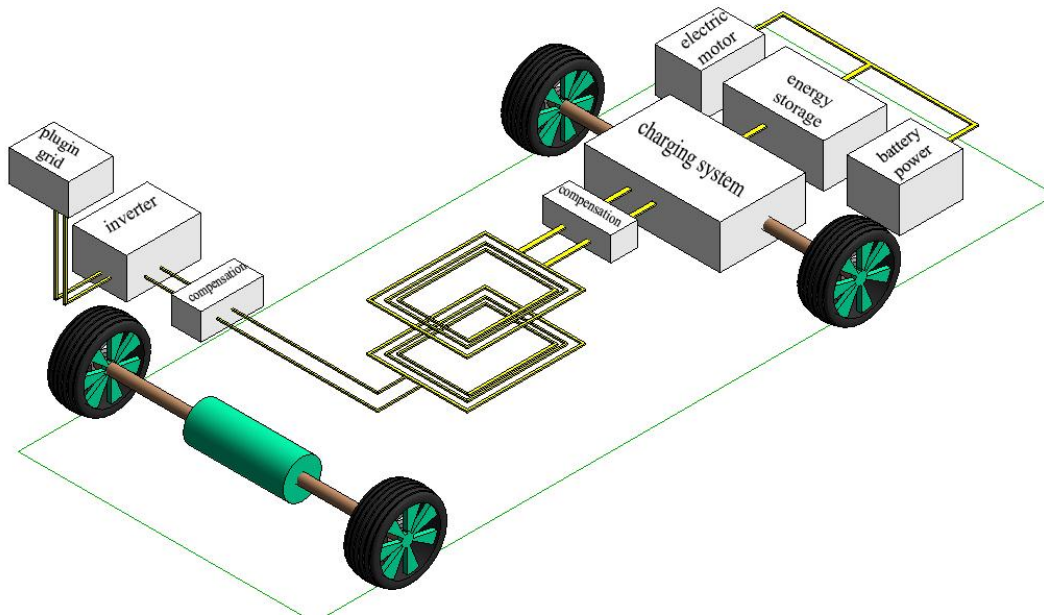
سطح سوم که شارژ جریان مستقیم سریع نامیده می‌شود، زمان شارژ را برای یک خودرو الکتریکی به زمان مورد نیاز برای پر کردن باک بنزین کاهش داده است اما چنین سیستمی نیاز به انتقال توان بالایی از انرژی الکتریکی دارد. در نتیجه نیاز به سیستم‌های الکتریکی بسیار پیشرفته و پر هزینه و با حفاظت الکتریکی بالا می‌باشد.

همان طور که از استانداردهای ارائه شده برای شارژ خودروهای الکتریکی مشخص است، برای کاهش زمان مورد نیاز برای شارژ خودرو، توان انتقالی افزایش می‌یابد؛ اما انجام این کار هزینه‌های بسیار زیادی را برای ارتقای سیستم‌های الکتریکی و بالا بردن امنیت سیستم در پی خواهد داشت که استفاده از آن‌ها به خصوص در اماکن عمومی و منازل را محدود می‌کند.

یک سیستم انتقال انرژی القایی (سیستم انتقال انرژی بدون تماس)، انرژی الکتریکی را به صورت مغناطیسی و بدون تماس انتقال می‌دهند. با استفاده از چنین سیستم‌هایی می‌توان توان انتقالی را بدون نیاز به ارتقای سیستم الکتریکی و هم‌چنین در حفاظت بالای الکتریکی افزایش داد. چنین سیستم‌هایی هم‌چنین قابل استفاده در محیط‌های با رطوبت و گرد و خاک بالا بوده و هزینه تعمیرات و نگهداری کمی دارند. شارژرهای بدون تماس می‌توانند خودروهای الکتریکی را در حال ساکن [۱۸، ۲۰] و یا در حال حرکت [۲۱، ۲۲] شارژ کنند. در ادامه توضیحات مربوط به مدل‌سازی و نحوه عملکرد شارژ بدون تماس خودرو ارائه می‌گردد. شکل (۲)، مدلی از یک سیستم شارژ بدون تماس خودرو الکتریکی را نشان می‌دهد.



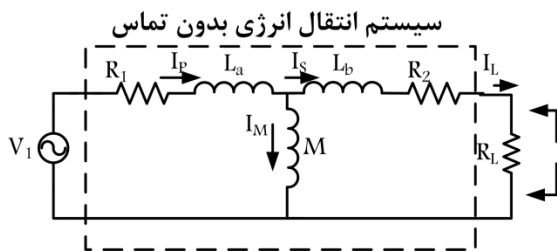
شکل (۱): انواع خودروهای الکتریکی



شکل (۲): استفاده از سیستم انتقال انرژی الکتریکی بدون تماس القایی برای شارژ بدون تماس خودروهای الکتریکی

## ۲-۲- شارژ بدون تماس خودروهای الکتریکی

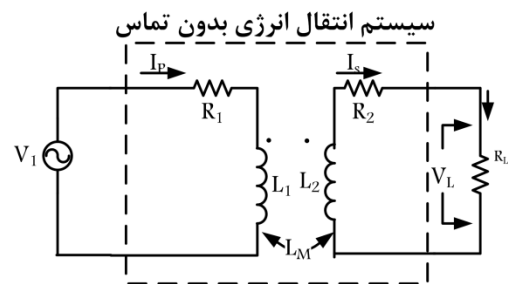
در شکل (۳)، دیاگرام مداری یک سیستم انتقال انرژی الکتریکی القایی نشان داده شده است. در چنین سیستم‌هایی، فرکانس کاری سیستم بسیار کم‌تر از فرکانس نوسان طبیعی سیم‌پیچ‌ها در نظر گرفته می‌شود تا بتوان از خازن پخشی بین سیم‌پیچ‌ها صرف نظر کرد.



شکل (۴): معادل سیستم انتقال انرژی الکتریکی القایی

این امر در کاربرد شارژ خودروهای الکتریکی بسیار اهمیت دارد چرا که یکی از مهم‌ترین نکات در طراحی و استفاده از چنین سیستم‌هایی در شارژ خودروهای الکتریکی نحوه عملکرد سیستم زمانی که مرکز سیم‌پیچ‌ها از هم فاصله می‌گیرند. هم‌چنین با افزایش سطح پوشش داده شده به وسیله سیم‌پیچ‌ها می‌توان انتقالی را افزایش داد که این امر سبب افزایش سرعت شارژ خودروهای الکتریکی می‌شود. در شکل (۵) نتایج شبیه‌سازی اندوکتانس متقابل دو سیم‌پیچ مستطیل شکل و دایره شکل که عرض سیم‌پیچ مستطیل شکل برابر قطر سیم‌پیچ دایره شکل (۲۰cm) و طول آن ۱/۵ برابر قطر سیم‌پیچ مستطیل شکل می‌باشد نشان داده شده است. لازم به ذکر است از مدل ارائه شده در مرجع [۱۲] برای شبیه‌سازی سیم‌پیچ دایره شکل استفاده شده است. در این شکل تمام مقادیر نسبت به اندوکتانس سیم‌پیچ‌ها زمانی که هم‌مرکز می‌باشند نرمال شده‌اند.

همان‌طور که از شکل (۵) مشخص است اندوکتانس متقابل دو سیم‌پیچ‌های مستطیل شکل با جابه‌جایی مرکز سیم‌پیچ‌ها بسیار کم‌تر تحت تاثیر قرار می‌گیرد و این مشخصه در کاربرد شارژ خودروهای الکتریکی بسیار اهمیت دارد؛ بنابراین، در این مقاله سیستم انتقال



شکل (۳): دیاگرام مداری یک سیستم انتقال انرژی الکتریکی القایی

در شکل (۳)  $L_M$  اندوکتانس متقابل دو سیم‌پیچی،  $R_1$  و  $R_2$  مقاومت اهمی سیم‌پیچ‌ها و  $R_L$  مقاومت بار می‌باشند. هم‌چنین  $V_1$  ولتاژ خروجی از منبع اینورتری می‌باشد.

برای دیاگرام مداری نشان داده شده در شکل (۳) می‌توان از مدار معادلی بر اساس عناصر پسیو ارائه کرد. شکل (۴) مدار معادل سیستم انتقال را (انتقال داده شده به ثانویه ترانسفورماتور) نمایش می‌دهد.

اشکال هندسی متفاوتی می‌توان برای سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه سیستم‌های انتقال توان در نظر گرفت. با توجه به سطح مستطیل شکل کف خودروهای الکتریکی در صورت استفاده از سیم‌پیچ‌های مستطیل شکل، سطح بیشتری از کف قابل پوشش می‌باشد.

است برای دو سیم پیچ نشان داده شده در شکل (۶) تنها مولفه در راستای Z دو سیم پیچ با هم کوپل می شوند. با استفاده از رابطه (۳) و قوانین پایه‌ای الکترومغناطیس چگالی شار در راستای Z برای سیم پیچ اولیه نشان داده شده در شکل (۶) به صورت زیر محاسبه می شوند [۲۴]:

$$B_z = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \sum_{\alpha=1}^4 \frac{(-1)^\alpha d_\alpha}{r_\alpha [r_\alpha + (-1)^{\alpha+1} c_\alpha]} - \frac{c_\alpha}{r_\alpha [r_\alpha + d_\alpha]} \quad (۴)$$

$$r_1 = \sqrt{(a_1 + x)^2 + (y + b_1)^2 + z^2} \quad (۵)$$

$$r_2 = \sqrt{(a_1 - x)^2 + (y + b_1)^2 + z^2} \quad (۶)$$

$$r_3 = \sqrt{(a_1 - x)^2 + (y - b_1)^2 + z^2} \quad (۷)$$

$$r_4 = \sqrt{(a_1 + x)^2 + (y - b_1)^2 + z^2} \quad (۸)$$

با توجه به رابطه (۳) برای به دست آوردن اندوکتانس متقابل دو سیم پیچ، باید از رابطه (۷) در سطح سیم پیچ ثانویه انتگرال گیری کرد. همان طور که مشخص است نمی توان رابطه تحلیلی به عنوان اندوکتانس متقابل دو سیم پیچ به دست آورد. لذا از روش های انتگرال گیری عددی برای به دست آوردن شار پیوندی و در نتیجه اندوکتانس متقابل استفاده می شود. به عبارت دیگر از رابطه زیر انتگرال گیری عددی خواهد شد.

$$\Phi_2 = \int_{-a_2}^{a_2} \int_{-b_2}^{b_2} \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \left( \sum_{\alpha=1}^4 \frac{(-1)^\alpha d_\alpha}{r_\alpha [r_\alpha + (-1)^{\alpha+1} c_\alpha]} - \frac{c_\alpha}{r_\alpha [r_\alpha + d_\alpha]} \right) dz \quad (۹)$$

برای به دست آوردن مقاومت خودی سیم پیچ ها با توجه به ابعاد سیستم می توان از رابطه زیر استفاده کرد [۲۳]:

$$R_{ac} = \frac{\rho l}{\pi \delta (D - \delta)} \quad (۱۰)$$

که در این رابطه  $\delta$  عمق پوسته،  $\rho$  مقاومت ویژه مس،  $D$  قطر سطح مقطع سیم و  $l$  طول سیم می باشد.

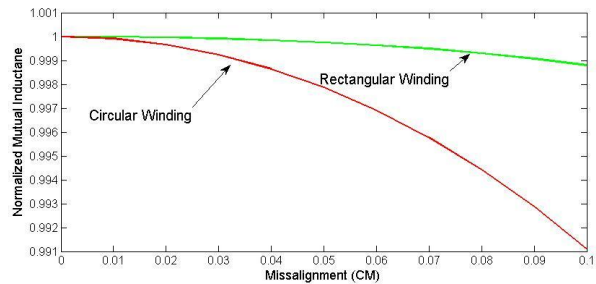
با توجه به مدار معادل نشان داده شده، رابطه ای برای بازده انتقال سیستم القایی به صورت زیر می توان به دست آورد:

$$\eta = \frac{R_L |\vec{I}_2|^2}{R_L |\vec{I}_2|^2 + R_2 |\vec{I}_s|^2 + R_1 |\vec{I}_p|^2} = \frac{R_L}{R_L + R_2 + R_1 * \left( \frac{L_b + M}{M} \right)^2 + \left( \frac{R_2 + R_L}{\omega M} \right)^2} \quad (۱۱)$$

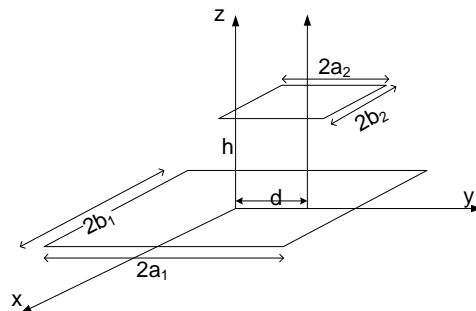
همان طور که از رابطه بالا مشخص است افزایش فرکانس، یکی از راه های مناسب برای افزایش بازده انتقال القایی می باشد. اما افزایش فرکانس سیستم موجب افزایش امپدانس های القایی در سیستم شده و در نتیجه، جریان های القایی بسیار بالایی باید در سیستم تزریق شود. افزایش جریان های القایی در سیستم، سبب افزایش مقادیر نامی سیستم، افزایش هزینه اجرای سیستم و کاهش بازده کلی سیستم می شود. این امر اساسی ترین مشکل با سیستم های انتقال توان القایی بدون جبران می باشد.

انرژی الکتریکی القایی، با سیم پیچ های مستطیل شکل در اولیه و ثانویه در نظر گرفته شده است (شکل (۶)).

جهت طراحی مناسب سیستم انتقال لازم است ابتدا پارامترهای مدار معادل سیستم با توجه به هندسه مسئله ( $a_1, b_1, d, b_2, a_2, z$ ) که به ترتیب ابعاد سیم پیچ اولیه و ثانویه، فاصله مرکز دو سیم پیچ از یکدیگر و فاصله دو سیم پیچ از یکدیگر می باشند) به دست آید. این پارامترها شامل اندوکتانس های خودی و متقابل سیم پیچ اولیه و ثانویه می باشد.



شکل (۵): تغییرات اندوکتانس متقابل دو سیم پیچ مستطیل شکل و دایره ای شکل با جابه جایی مرکز دو سیم پیچ از یکدیگر



شکل (۶): شماتیک سیم پیچ های سیستم انتقال انرژی القایی

برای به دست آوردن اندوکتانس های خودی و متقابل سیم پیچ ها، پتانسیل برداری تولید شده از توزیع جریان در هر سیم پیچ باید با استفاده از قوانین الکترومغناطیس مطابق روابط زیر محاسبه شود [۱۲]:

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (۱)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (۲)$$

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{I dl'}{R} \quad (۳)$$

در روابط فوق،  $\Phi$  شار مغناطیسی،  $ds$  بردار سطح سیم پیچ ها،  $A$  پتانسیل برداری،  $B$  چگالی شار میدان مغناطیسی،  $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$ ،  $R$  فاصله از هر مقدار جزئی  $dl'$  تا نقطه ای است که چگالی شار محاسبه می شود و  $I$  جریان سیم پیچ می باشد.

برای به دست آوردن اندوکتانس متقابل سیم پیچ ها باید ابتدا چگالی شار تولید شده از یک سیم پیچ را در سطح سیم پیچ دیگر به دست آورده و سپس آن قسمت از شار را که در سیم پیچ دوم کوپل می شود با انتگرال گیری در سطح سیم پیچ دوم به دست آورد. واضح

یکدیگر می‌باشد. لازم به ذکر است در مرحله طراحی دو سیم‌پیچ هم‌مرکز در نظر گرفته می‌شوند. قید پنجم محدودیت بر روی تعداد دورهای سیم‌پیچ‌ها بوده که با توجه به وزن سیستم، هزینه اجرای سیستم، و دیگر پارامترهای سیستم انتقال تعریف می‌شود. در این مقاله، در طراحی تعداد دور سیم‌پیچ‌های اولیه با توجه به قید عنوان‌شده در رابطه (۱۸) به دست می‌آید. اما تعداد دور سیم‌پیچ ثانویه، در هر مرحله به نحوی به دست می‌آید که ولتاژ در ترمینال‌های خروجی برابر مقدار مشخصی باشد. به عبارت دیگر:

$$N_2 = \{N_2 \in \mathbb{N} | N_2 < N_{2,max}, V_{out} = V_{مشخص}\} \quad (20)$$

### ۲-۲- صورت مسئله مورد استفاده برای بهینه‌سازی

یکی از راه‌های افزایش بازده سیستم، بالا بردن ابعاد سیستم می‌باشد. در ابعاد بالا اندوکتانس متقابل دو سیم‌پیچ افزایش یافته و در نتیجه بازده انتقال افزایش می‌یابد. از سویی دیگر، بالا رفتن ابعاد سیستم، امکان‌پذیر نیست چرا که سیستم انتقال انرژی طراحی شده برای شارژ خودرو الکتریکی طراحی می‌شود و در نتیجه باید ابعاد محدودی داشته باشد. همچنین، با افزایش ابعاد سیستم مس بیشتری در پیاده‌سازی سیستم به کار می‌رود که سبب بالا رفتن هزینه اجرای سیستم و وزن سیستم می‌شود.

برای حل این مسئله صورت مسئله بهینه‌سازی به نحوی تغییر داده شده است که الگوریتم بهینه‌سازی علاوه بر بالا بردن بازده سیستم، حجم مس به کار رفته در سیستم را نیز کاهش دهد. می‌توان صورت مسئله را به صورت زیر نوشت:

$$\text{Maximize: } q_1 \cdot \eta - q_2 \cdot C \quad (21)$$

Where,  $q_1 + q_2 = 1$ . and

$$C = \frac{V_1 + V_2}{V_{1,max} + V_{2,max}} \quad ("V_i" \text{ is the volume of the windings}) \quad (22)$$

در این مقاله از الگوریتم تکاملی زنبور عسل برای بهینه‌سازی مسئله عنوان شده استفاده شده است. علل استفاده از الگوریتم‌های تکاملی در بخش پنجم مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

### ۴- جبران خازنی در سیستم‌های انتقال توان بدون تماس القایی

همان طور که پیش از این اشاره شد در سیستم‌های انتقال توان القایی برای دستیابی به عملکرد کارآمد، ملزم به استفاده از جبران‌کننده‌های خازنی در سمت اولیه و ثانویه سیستم هستیم. این خازن‌ها می‌توانند به صورت سری و یا موازی با سیم‌پیچ‌ها قرار بگیرند. بنابراین همان طور که در شکل (۷) نشان داده شده است، چهار حالت جبران خازنی که عبارتند از: جبران سری-سری (SS)، سری-موازی (SP)، موازی-سری (PS) و موازی-موازی (PP). برای سیستم‌های انتقال انرژی بدون تماس می‌توان در نظر گرفت.

برای حل چنین مشکلی، تکنیک‌های جبران جریان القایی متفاوتی مطرح شده است که مهم‌ترین آن‌ها جبران خازنی می‌باشد. خازن جبران می‌تواند به حالت سری و یا موازی با سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه سیستم قرار گیرد. در نتیجه، چهار حالت جبران مختلف می‌توان برای سیستم‌های انتقال انرژی القایی در نظر گرفت. انواع مختلف جبران‌های خازنی به همراه بهترین روش جبران برای شارژ بدون تماس خودروهای الکتریکی در بخش چهارم این مقاله مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

### ۳- صورت مسئله

#### ۳-۱- صورت کلی مسئله

هدف اصلی در این مقاله طراحی یک سیستم انتقال بهینه برای انتقال کارآمد انرژی الکتریکی به صورت القایی و بدون تماس می‌باشد. همان طور که پیش از این نشان داده شد، بازده انتقال چنین سیستم‌هایی تابعی از مقاومت بار، مقاومت اهمی سیم‌پیچ‌ها، فرکانس کاری سیستم، اندوکتانس‌های متقابل و خودی سیم‌پیچ‌ها است. تمامی این پارامترها را می‌توان به صورت تابعی از ابعاد سیستم، تعداد دور سیم‌پیچ‌ها معرفی کرد. بنابراین:

$$\eta = f(a_p, a_s, b_p, b_s, N_p, N_s, R_L, \omega, z, d) \quad (12)$$

که در این رابطه،  $\eta$  بازده سیستم،  $a_i$  و  $b_i$  مطابق با شکل (۵) ابعاد سیستم،  $\omega$  فرکانس کاری سیستم،  $z$  فاصله دو سیم‌پیچ از یکدیگر و  $N_i$ ، تعداد دور سیم‌پیچ‌ها می‌باشد. پارامتر  $d$  به عنوان فاصله محور دو سیم‌پیچ از یکدیگر تعریف می‌شود.

بنابراین مسئله بهینه‌سازی را برای چنین سیستمی می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$\text{Maximize: } \eta = f(a_p, a_s, b_p, b_s, N_p, N_s, R_L, \omega, z, d) \quad (13)$$

$$\text{Subject to: } D_{min} < a_i, b_i < D_{max} \quad (14)$$

$$\omega_{min} < \omega < \omega_{max} \quad (15)$$

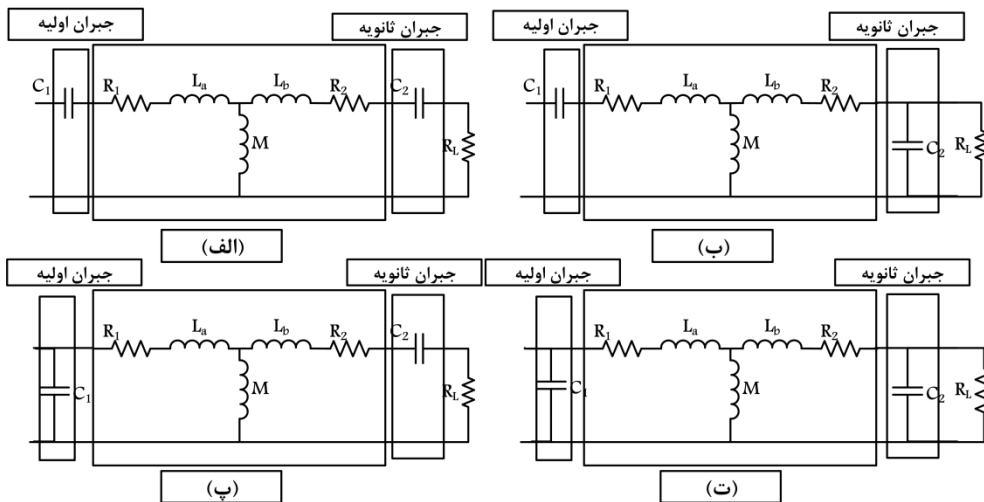
$$Z_{min} < Z < Z_{max} \quad (16)$$

$$d=0 \text{ (two coils are aligned)} \quad (17)$$

$$N_{1,min} < N_1 < N_{1,max} \quad (18)$$

$$R_L = \text{مشخص و ثابت مقداری} \quad (19)$$

در روابط بالا قید اول مربوط به محدودیت بر روی ابعاد سیم‌پیچ‌ها می‌باشد چرا که این سیم‌پیچ‌ها باید در کف ماشین قرار گرفته و در نتیجه هر اندازه‌ای نمی‌توانند داشته باشند. قید دوم مربوط به فرکانس سیستم می‌باشد که با توجه به محدودیت‌های عملی و فرکانس نوسانات طبیعی سیم‌پیچ‌ها تعریف می‌شود. فاصله دو سیم‌پیچ از یکدیگر ( $Z$ ) برای شارژ خودرو الکتریکی فاصله کف ماشین تا سطح زمین تعریف می‌شود که در قید سوم محدود آن مشخص شده است. قید چهارم محدودیت فاصله مرکزهای دو سیم‌پیچ از



شکل (۷): انواع روش‌های جبران خازنی (الف) جبران سری-سری، (ب) جبران سری-موازی، (پ) جبران موازی-سری، (ت) جبران موازی-موازی

با توجه به جدول (۱) می‌توان نتیجه گرفت که در تمام حالت‌های جبران به جز حالت سری-سری، بازده حداکثر و خازن جبران در سمت اولیه تابعی از اندوکتانس متقابل دو سیم‌پیچ اولیه و ثانویه هستند. این مسئله به خصوص برای سیستم‌های شارژ خودرو الکتریکی که امکان دارد راننده خودرو را در محل دقیق پارک نکرده و پارامترهای سیستم از جمله اندوکتانس متقابل تغییر کند بسیار مفید است چرا که در صورت جابه‌جایی مرکز سیم‌پیچ‌ها، جبران خازنی همواره انجام می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت برای کاربردهایی مانند شارژ بدون تماس خودرو الکتریکی استفاده از جبران سری سری مزایای بسیاری خواهد داشت. در این مقاله برای بهینه‌سازی، تمام روابط با در نظر گرفتن جبران سری-سری برای سیستم انتقال به دست آمده است.

هدف از جبران در سمت ثانویه بالا بردن توان انتقال یافته از اولیه به ثانویه است. برای افزایش توان انتقال یافته باید اندوکتانس القایی سیستم کاهش یابد. برای ارضا هدف جبران در سمت ثانویه کافی است خازن جبران ثانویه در فرکانس کاری مدار در تشدید با اندوکتانس خودی سیم‌پیچ ثانویه قرار گیرد [۱۳]. هدف از جبران در سمت اولیه سیستم کاهش مقادیر نامی سیستم با از بین بردن جریان‌های القایی در سیستم است. بنابراین خازن جبران اولیه به گونه‌ای انتخاب می‌شود که کل امپدانس دیده شده از منبع انرژی در سمت اولیه سیستم اولیه اهمی باشد. حداکثر بازده تئوری و خازن جبران اولیه مورد نیاز برای هر یک از حالات جبران در جدول (۱)، خلاصه شده است.

جدول (۱): بازده حداکثر و خازن جبران اولیه برای انواع روش‌های جبران خازنی

	اندازه خازن جبران اولیه	حداکثر بازده تئوری
SS	$\frac{1}{\omega_0^2 \left( \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 * (L_1) \right)}$	$\eta_{\max} = \frac{R_L}{R_L + R_2}$
SP	$\frac{(L_2)}{\omega_0^2 \left( \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 * (L_1) * (L_2) \right) - M^2}$	$\eta_{\max} = \frac{R_L}{R_L + R_2 + \frac{R_1(L_b+M)^2}{M^2}}$
PP	$\frac{(L_b + M)^2 ((L_a + M)(L_b + M) - M^2) C_2}{((L_a + M)(L_b + M) - M^2)^2 + M^4 R_L^2 (L_b + M) C_2}$	$\eta_{\max} = \frac{R_L}{R_L + R_2 + \frac{R_1(L_b+M)^2}{M^2}}$
PS	$\frac{(L_a + M)(L_b + M)^2 C_2^2 R_L^2}{M^4 + (L_a + M)(L_b + M) R_L^2}$	$\eta_{\max} = \frac{R_L}{R_L + R_2}$

## ۵- الگوریتم تکاملی زنبورهای عسل

### ۱-۵ مقدمه‌ای بر بهینه‌سازی مقید

امروزه الگوریتم‌های ابتکاری بسیار زیاد برای حل مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این الگوریتم‌ها به دو دسته کلی مبتنی بر جمعیت و مبتنی بر تکرار تقسیم می‌شوند. از سویی دیگر این الگوریتم‌ها به دو دسته قطعی و تصادفی تقسیم می‌شوند. یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت از یک مجموعه داده اولیه شدنی شروع کرده و بردار پارامترها را برای بهینه کردن تابع هدف تغییر می‌دهد. روش‌های قطعی، به پیوسته‌بودن و مشتق‌پذیر بودن سیستم بسیار وابسته می‌باشند و به همین دلیل برای بسیاری از مسائل بهینه‌سازی مقید کاربرد ندارند. الگوریتم‌های تصادفی مانند الگوریتم ژنتیک بر پیوسته‌بودن و یا مشتق‌پذیر بودن معادلات سیستم تحت مطالعه وابسته نمی‌باشند از این رو در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

همان طور که پیش از این اشاره شد در سیستم‌های انتقال توان بدون تماس القایی اندوکتانس متقابل سیم‌پیچ‌ها به صورت عددی محاسبه می‌شود. بنابراین استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری و تصادفی اجتناب‌ناپذیر است.

کارابوگا [۲۵]، الگوریتمی را از مدل‌سازی رفتار زنبورهای عسل برای پیدا کردن منبع بهینه شهد گل تحت عنوان الگوریتم تکاملی زنبورهای عسل ارائه کرده است که در بخش بعد این الگوریتم مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۲-۵- مراحل اجرای الگوریتم تکاملی زنبورهای عسل

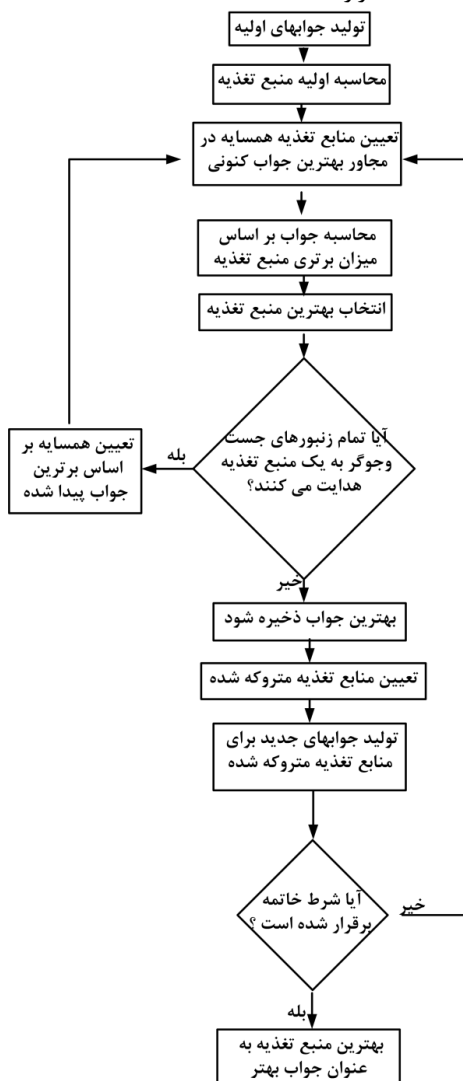
الگوریتم تکاملی زنبور عسل برگرفته از رفتار زنبورهای عسل برای پیدا کردن منابع غنی شهد است. زنبورها در یک کلونی به سه دسته زنبورهای کارگر، زنبورهای ناظر و زنبورهای دیده‌بان تقسیم می‌شوند. در این الگوریتم منبع غذایی با کیفیت‌های مختلف (تابع هدف) بر اساس پارامترهای رسیدن به آن منبع غذایی (بردار پارامترهای بهینه‌سازی) مورد بررسی قرار گرفته و بهترین منبع غذایی انتخاب می‌شود. الگوریتم با به وجود آوردن مجموعه‌ای تصادفی از بردار پارامترهای بهینه‌سازی آغاز می‌شود. سپس در یک حلقه تکراری، زنبورهای کارگر، ناظر و دیده‌بان با انجام وظایف خود به دنبال منبع شهد غنی می‌گردند. در پایان هر حلقه تکرار تمامی زنبورها اطلاعات به دست آورده خود را به اشتراک گذاشته تا مسیر بهینه برای شروع حلقه تکرار بعدی انتخاب شود. این انتخاب بر اساس احتمال و با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{n=1}^{SN} fit_n} \quad (23)$$

که در این رابطه،  $fit$  بیانگر ارزش یک منبع غذایی و یا به عبارت دیگر مقدار تابع هدف مسئله بهینه‌سازی و  $SN$  تعداد منابع غذایی در

حال بررسی است. بنابراین می‌توان مراحل الگوریتم زنبورهای عسل را به صورت زیر خلاصه کرد.

- ۱- مقدر دهی اولیه به عنوان جواب‌های اولیه  $X_{ij}$ ,
- ۲- محاسبه جواب‌های اولیه در تابع هدف،
- ۳- حرکت به سمت منابع غذایی جدید  $V_{ij}$  در همسایگی  $X_{ij}$ ، که از رابطه زیر برای پیدا کردن منابع تغذیه جدید استفاده می‌شود.
 
$$V_{ij} = v_{ij} + \Phi_{ij}(X_{ij} - X_{kj}) \quad (24)$$
 که در این رابطه  $\Phi$  یک عدد تصادفی بین (۱، -۱) است.
- ۴- انتخاب جواب بهتر بین  $V_{ij}$  و  $X_{ij}$ .
- ۵- محاسبه میزان احتمال برای جواب‌های  $X_{ij}$  با استفاده از رابطه داده شده (رابطه (۲۳))،
- ۶- تولید منابع جدید  $V_i$  بر اساس زنبورهای دیده‌بان از جواب‌های  $X_i$  و میزان احتمال آن‌ها،
- ۷- تعیین منابع فاسد و جایگزین منابع تصادفی با آن‌ها،
- ۸- ذخیره‌سازی بهترین جواب‌های به دست آمده،
- ۹- تکرار مراحل تا رسیدن به شرط پایان برنامه (پایان تعداد دفعات تکرار).



شکل (۸): روند نمای الگوریتم زنبور عسل



## ۶- نتایج

### ۱-۶ سیستم تحت مطالعه

در این مقاله یک سیستم انتقال انرژی الکتریکی القایی که توان ۷kW را در ولتاژ خروجی ۴۸۰V برای شارژ خودرو الکتریکی انتقال دهد، طراحی شده است. به این منظور محدودیت‌های پارامترهای مورد استفاده در مسئله بهینه‌سازی (طراحی)، در جدول (۲) نشان داده شده است. لازم به ذکر است این محدودیت‌ها با توجه به ابعاد خودرو و نوع منبع ولتاژ به دست آمده است.

جدول (۲): محدودیت‌های پارامترهای سیستم برای بهینه‌سازی

	a <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	b <sub>2</sub>	n <sub>1</sub>	z	D	F
Min	0.1m	0.1m	0.1m	0.1m	1	20cm	0	5000Hz
Max	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	100	20cm	0	30000Hz

### ۲-۶ نتایج و بحث

#### ۱-۲-۶ نتایج طراحی

در این مقاله پارامترهای سیستم برای رسیدن به بازده حداکثر و قیمت حداقل با استفاده از الگوریتم تجمعی زنبورهای عسل بهینه‌سازی شده است. هم‌چنین برای مقایسه نتایج بهینه‌سازی و کارآمدی الگوریتم تجمعی زنبورهای عسل (ABC)، نتایج بهینه‌سازی با استفاده از دو روش بهینه‌سازی دیگر (الگوریتم ژنتیک<sup>۵</sup> (GA) و الگوریتم ذرات<sup>۶</sup> (PSO)) نیز ارائه شده است. در جدول (۳) نتایج حاصل از بهینه‌سازی پارامترهای سیستم با استفاده از سه روش عنوان شده بهینه‌سازی خلاصه شده است.

از نتایج خلاصه شده در جدول (۳) به راحتی می‌توان مشاهده کرد الگوریتم زنبور عسل، به صورت کارآمدتری مسئله بهینه‌سازی تابع چندهدفه را انجام داده است. با توجه به جدول فوق، مقدار عددی تابع هدف به دست آمده از الگوریتم زنبور عسل برابر ۰/۵۵۴۸ بوده که این عدد برای دو روش الگوریتم ذرات و الگوریتم ژنتیک به ترتیب برابر ۰/۵۴۴۵ و ۰/۵۵۲۳ می‌باشد. این بدین معنی است که با استفاده از الگوریتم زنبورهای عسل در بازدهی نه چندان پایین‌تر (۹۸/۱۵٪) نسبت به نتایج حاصل از دو روش دیگر (۹۹/۰۸٪ و ۹۸/۸۹٪) حجم مس لازم مورد استفاده در سیستم را بسیار کاهش یافته است (۴kg) نسبت به ۱۱/۲kg و ۶/۱kg) و در نتیجه هزینه ساخت را کاهش دهد.

جدول (۳): نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی

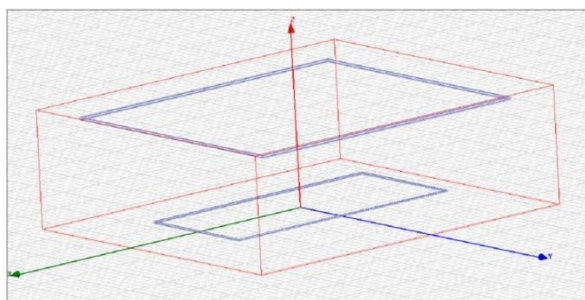
پارامترها	ABC	PSO	GA
a <sub>1</sub>	0.1m	0.5m	0.18
a <sub>2</sub>	0.32m	0.5m	0.2
b <sub>1</sub>	0.35m	0.5m	0.22
b <sub>2</sub>	0.43m	0.5m	0.24
N <sub>1</sub>	39turn	18turn	38turn
r <sub>1</sub>	1.5mm	2.5mm	2.48mm
r <sub>2</sub>	2.27mm	2.5mm	2mm
Freq	28.01KHz	25.82KHz	29.62KHz
N <sub>2</sub>	17turn	7turn	17turn
Objective Function	0.5548	0.5445	0.5523
Efficiency	98.15%	99.08%	98.89%
Weight of copper	4 kg	11.2kg	6.1kg

## ۲-۲-۶ نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت، نتایج به دست آمده از حل مسئله بهینه‌سازی (جدول (۳))، برای به دست آوردن پارامترهای مدار معادل سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این قسمت فرض بر آن است که در هر دو سیم‌پیچ به صورت هم مرکز قرار گرفته‌اند. تاثیر جابه‌جایی مرکز سیم‌پیچ‌ها نسبت به یکدیگر و عملکرد سیستم در حالت غیر هم مرکز در بخش بعد مورد بررسی قرار خواهد گرفت. با این فرض پارامترهای مدار معادل سیستم انتقال انرژی الکتریکی القایی در جدول (۴) خلاصه شده‌اند. هم‌چنین برای اطمینان از صحت اندازه پارامترهای سیستم از شبیه‌سازی المان محدود سیستم استفاده شده است. در روش المان محدود معادلات حاکم بر سیستم به صورت عددی با دقت بسیار بالایی حل می‌شوند. در این مقاله از نرم‌افزار ANSOFT MAXWELL برای انجام شبیه‌سازی المان محدود سیستم استفاده شده است. برای انجام این شبیه‌سازی شماتیک نشان داده شده در شکل (۹) استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان محدود سیستم انتقال انرژی القایی طراحی شده، برای مقایسه با نتایج مدل تحلیلی ارائه شده برای سیستم در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۴): پارامترهای بدست آمده برای مدار معادل سیستم در MATLAB و نرم‌افزار ANSOFT MAXWELL

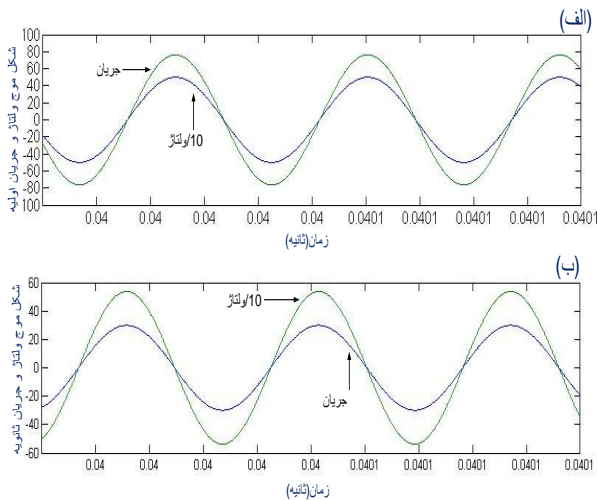
پارامتر	نتایج شبیه‌سازی در متلب	نتایج شبیه‌سازی در ماکسول
r <sub>2</sub>	0.1704 Ω	0.18 Ω
r <sub>1</sub>	0.0713 Ω	0.081 Ω
L <sub>1s</sub>	3.1110e-004 H	3e-4 H
L <sub>2</sub>	6.8855e-004 H	6.2e-4H
L <sub>12s</sub>	4.3510e-005 H	4.35e-5H
C <sub>2</sub>	4.4089e-008 F	4.6e-008
C <sub>1</sub>	9.1019e-008 F	1.2e-008



شکل (۹): مدل سیستم انتقال انرژی القایی در نرم‌افزار ANSOFTMAXWELL

همان‌طور که مشخص است، نتایج حاصل از روابط تحلیلی بسیار نزدیک به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی المان محدود سیستم است.

تماس طراحی شده، جبران سیستم از بین نرفته و هم چنان ولتاژ و جریان با یکدیگر هم فاز هستند.



شکل (۱۱): ولتاژ و جریان سیستم در سمت اولیه و ثانویه با تغییر موقعیت سیم پیچ ها نسبت به یکدیگر (الف) شکل موج ولتاژ و جریان اولیه، (ب) شکل موج ولتاژ و جریان ثانویه

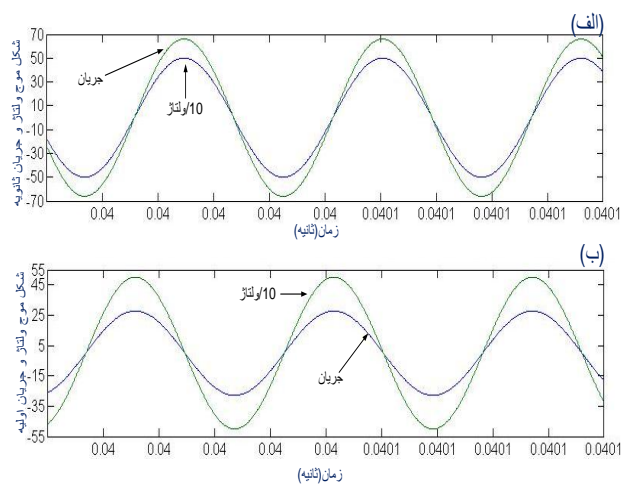
در شکل نشان داده شده (شکل (۱۱)) توان ۸kw در خروجی سیستم (قسمت (ب)) در ولتاژی بالاتر از ۴۸۰V در حال تحویل به بار مقاومتی می باشد. منبع انرژی در سمت اولیه سیستم (قسمت الف) توان ۸/۴kw را به سیستم تزریق می کند که به معنای بازده ۹۵٪ برای سیستم انتقال می باشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت با تغییر مکان دو سیم پیچ نسبت به یکدیگر جبران سیستم از بین نرفته و سیستم توان بالاتری را در ولتاژ بالاتر و بازده پایین تر انتقال می دهد.

### نتیجه گیری

در این مقاله یک سیستم انتقال توان بدون تماس برای شارژ خودروهای الکتریکی با استفاده از سیم پیچ های مستطیل شکل طراحی شده و پارامترهای مختلف سیستم برای رسیدن به حداکثر بازده در حداقل مس به کار رفته به دست آمده است. در مراحل طراحی از الگوریتم تکاملی زنبورهای عسل برای بهینه سازی پارامترهای سیستم استفاده شده و یک مسئله بهینه سازی با دو تابع هدف برای طراحی سیستم انتقال انرژی القایی حل شده است. هم چنین لزوم جبران در سیستم های انتقال انرژی القایی و روش های مختلف جبران خازنی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت و بهترین روش جبران با توجه به کاربرد شارژ خودروهای الکتریکی معرفی شد. مدار معادل الکتریکی سیستم انتقال انرژی القایی ارائه شده و با استفاده از روابط تحلیلی و انتگرال گیری عددی پارامترهای مدار معادل سیستم به دست آمده است. نتایج به دست آمده از شبیه سازی مدار معادل الکتریکی سیستم طراحی شده کاملاً تأیید کننده نتایج به دست آمده از بررسی های تحلیلی سیستم می باشد. هم چنین تأثیر جابه جایی مرکز سیم پیچ ها نسبت به یکدیگر بررسی شد و نشان داده شد که با استفاده

با استفاده از پارامترهای مدار معادل ارائه شده در جدول (۴)، مدار معادل سیستم انتقال انرژی الکتریکی القایی (شکل (۴)) در نرم افزار MATLAB شبیه سازی شده است. شکل موج های ولتاژ و جریان اولیه و ثانویه، حاصل از شبیه سازی سیستم انتقال انرژی بدون تماس در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

همان طور که در شکل (۱۰) مشخص است، ولتاژ ثانویه، خروجی سیستم (قسمت (ب) شکل (۱۰)) برابر با ۴۸۰V است که نشان دهنده صحت محاسبات تئوری می باشد. هم فاز بودن ولتاژها و جریان ها نشان دهنده تأثیر جبران خازنی سیستم می باشد. توان اندازه گیری شده برابر با ۶/۹kW در ترمینال های خروجی (قسمت (ب)) و ۷/۱۱kW (قسمت الف) در ترمینال های ورودی می باشد که بازده ۹۷٪ را برای انتقال انرژی نشان می دهد.



شکل (۱۰): ولتاژ و جریان سیستم در سمت اولیه و ثانویه، (الف) شکل موج ولتاژ و جریان اولیه، (ب) شکل موج ولتاژ و جریان ثانویه

### ۲-۳ بررسی عملکرد در شرایط جا به جا شدن ماشین

برای بررسی نحوه عملکرد سیستم، زمانی که مرکز دو سیم پیچ بر یکدیگر منطبق نیستند (۱۰ سانتی متر مرکز دو سیم پیچ از یکدیگر فاصله گرفته اند)، سیستم مجدد در وضعیت جدید تحلیل شده و پارامترهای جدید سیستم به دست می آید. با جابجایی سیم پیچ ها نسبت به یکدیگر تنها اندوکتانس متقابل دو سیم پیچ تغییر می کند. در این مثال، با فاصله گرفتن مرکز دو سیم پیچ به اندازه ۱۰cm تغییر می کند. در این مثال، اندوکتانس متقابل دو سیم پیچ به ۴۰/۴mH کاهش یافته و در نتیجه پارامترهای  $L_{1s}$  و  $L_2$  در مدار معادل سیستم انتقال تغییر کرده و به ترتیب برابر  $6.91e-4H$  و  $3.142e-4H$  خواهند بود. نتایج شبیه سازی مدار معادل سیستم انتقال در حالت جدید سیم پیچ ها نسبت به یکدیگر و با استفاده از پارامترهای جدید عنوان شده در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

همان طور که از شکل (۱۱) مشخص است، با تغییر مکان سیم پیچ ثانویه نسبت به سیم پیچ اولیه در سیستم انتقال انرژی بدون

- Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 1, pp. 53-62, 2013.
- [16] S. Raju, R. Wu, M. Chan and C. Yue, "modeling of mutual coupling between planar inductors in wireless power applications," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, No. 1, pp. 481-490, 2013.
- [17] H. Matsumoto, Y. Neba, K. Ishizaka and R. Itoh, "Model for a three-phase contactless power transfer system," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 26, No. 9, pp. 2676-2687, 2011.
- [18] M. Budhia, G. A. Covic, J. T. Boys and C. Y. Huang, "Development and evaluation of single sided flux couplers for contactless electric vehicle charging," in Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress, pp. 614-621, 2011.
- [19] M. Yilmaz and P. T. Krein, "Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, No. 5, 2013.
- [20] J. L. Villa and L. Juan, "High-misalignment tolerant compensation topology for ICPT systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, No. 2, pp. 945-951, 2012.
- [21] J. P. C. Smeets, T. T. Overboom, J. W. Jansen and E. A. Lomonova, "Comparison of position-independent contactless energy transfer systems," IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 28, No. 4, 2013.
- [22] J. Huh, S. W. Lee, W. Y. Lee, G. H. Cho and C. T. Rim, "Narrow-width inductive power transfer system for online electrical vehicles," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 26, No. 12, pp. 3666-3679, 2011.
- [23] M. Budhia, J. T. Boys, G. A. Covic and C. Huang, "Development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 1, pp. 318-328, 2013.
- [24] A. M. Azpurua, "A semi-analytical method for the design of coil-systems for homogeneous magnetostatic field generation," Progress in Electromagnetics Research, Vol. 37, pp. 171-189, 2012.
- [25] D. Karaboga and B. Basturk, "Artificial bee colony (ABC) optimization algorithm for solving constrained optimization problems," Foundations of Fuzzy Logic and Soft Computing, Springer, pp. 789-798, 2007.

### زیر نویس ها

- <sup>1</sup> Inductive Power Transmission (IPT)  
<sup>2</sup> Core-less Transformer  
<sup>3</sup> Planar  
<sup>4</sup> Trifoliate  
<sup>5</sup> Genetic Algorithm  
<sup>6</sup> Partial Swarm Optimization

از جبران سری-سری در صورت جابه‌جایی مرکز سیم‌پیچ‌ها نسبت به یکدیگر هم چنان جبران در سمت اولیه و ثانویه سیستم همچنان انجام شده و ولتاژها و جریان‌ها در سمت اولیه و ثانویه سیستم انتقال به صورت هم‌فاز باقی می‌مانند و انتقال در ولتاژ و توان بالاتر اما در بازده پایین‌تر انجام می‌شود.

### مراجع

- [1] D. Galus, R. A. Waraich, F. Noembrini and K. Steurs, "Integrating power systems, transport systems and vehicle technology for electric mobility impact assessment and efficient control," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, No. 2, pp. 934-949, 2012.
- [2] M. Yilmaz and P. T. Krein, "Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, No. 5, pp. 2151-2169, 2013.
- [3] J. Luis Villa, J. Sallan, A. Liombart and J. Fco Sanz, "Design of a high frequency inductively coupled power transfer system for electric vehicle battery charge," Applied Energy, Vol. 86, No. 3, pp. 355-363, 2009.
- [4] "Microwave Theory and Techniques," Special issue on wireless power transfer, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 61, No. 6, pp. 2523, 2013.
- [5] H. Kamath, "Program on technology innovation: impact of wireless power transfer technology," EPRI Report, 2009.
- [6] M. P. Kazmierkowski and A. J. Moradewicz, "Unplugged but connected: review of contactless energy transfer systems," IEEE Industrial Electronics Magazine, Vol. 6, No. 4, pp. 47-55, 2012.
- [7] C. Liu, A. P. Hu and N. Nair, "Modelling and analysis of a capacitively coupled contactless power transfer system," IET Power Electronics, Vol. 4, No. 7, pp. 808-815, 2011.
- [8] R. M. Dickinson, "Power in the sky: Requirements for microwave wireless power beamers for powering high-altitude platforms," IEEE Microwave Magazine, Vol. 14, No. 2, pp. 36-47, 2013.
- [9] Y. Zhu, S. Moheimani and M.R. Yuce, "A 2-DOF MEMS ultrasonic energy harvester," IEEE Sensors Journal, Vol. 11, No. 1, pp. 155-161, 2011.
- [10] A. Kural, R. Pullin, K. Holford, J. Lees, J. Naylor, C. Paget and C. Featherston, "Design and characterization of an ultrasonic lamb-wave power delivery system," IEEE Transactions on, Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 60, No. 6, 2013.
- [11] P. Bagheri, W. Xu, W. Freitas, "A Resonant Tertiary Winding-Based Novel Air-Core Transformer Concept," IEEE Transactions on Power Delivery, pp. 1519-152, 2012.
- [12] S. Hasanzadeh, S. Vaez-Zadeh and A. H. Isfahani, "Optimization of a contactless power transfer system for electric vehicles" IEEE Transaction on Vehicular technology, Vol. 61, No. 8, 2012.
- [13] T. Hiroya, "A large air gap 3 kW wireless power transfer system for electric vehicles" Energy Conversion Congress and Exposition, 2012.
- [14] C. Swagat and P. Bauer "Driving range extension of ev with on-road contactless power transfer—a case study," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013.
- [15] H. Matsumoto, Y. Neba, H. Iura, D. Tsutsumi, K. Ishizaka and I. Ryoza, "trifoliate three-phase contactless power transformer in case of winding-alignment," IEEE