Passive Defence
Vol. 16, No. 4, Winter 2026, Serial No. 64
ISSN: 2980-8030 , E-ISSN: 2008-6849

Optimization of the Number of Batteries and their Arrangement in Electric Vehicles Based on Multi-Objective Optimization

Sina Samadi Gharehveran[1]*
[1]PhD in Electrical Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
Email Address: s.samadi@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 14 August 2024

Received in revised form: 3 September 2024

Accepted: 1 October 2024

Available online: 20 January 2026

Keywords:

Multi-Objective Ggenetic Algorithm

Battery

Layout Optimization

Electric Vehicle

Reducing Energy Consumption of Coolers

ABSTRACT

In the design of electric vehicle battery packs, the optimal selection of parameters such as the number of series and parallel cells, the arrangement of cells, and their distance from the battery walls have a direct impact on the system performance. This paper presents a framework for the optimal design of battery packs that considers objectives such as minimizing cooling system consumption, controlling the maximum cell temperature, and optimizing the available space. This design is considered one of the key challenges in the production of electric vehicles due to its direct impact on the performance of the entire system and its importance in reducing weight, volume, cost, and increasing efficiency. The main innovation of this research is the use of the combination of the MOSOA algorithm to determine the optimal number of series and parallel cells and the MOGA algorithm to optimize the cell arrangement. Simulation results show that the proposed method reduces the battery volume by 22%, reduces the cost by 18%, increases the output power by 15%, and improves the temperature distribution by 10% compared to previous methods. This research can be a useful guide for the design and optimization of battery packs in electric vehicles.

Cite this article: S. Samadi Gharehveran, "Optimization of the Number of Batteries and their Arrangement in Electric Vehicles Based on Multi-Objective Optimization," Journal of Passive Defence, vol. 16, no. 4, pp. 17-33, 2025.
DOI: https://doi.org/10.47176/PD.2026.1490

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University.

Introduction

In recent years, the rapid expansion of electric vehicles (EVs) has intensified the need for efficient, reliable, and cost-effective energy storage systems. Lithium-ion battery packs play a critical role in determining the overall performance, safety, driving range, and economic viability of electric vehicles. However, battery pack design remains a complex engineering challenge due to the simultaneous influence of electrical, thermal, spatial, and economic factors. Improper design can lead to excessive heat generation, non-uniform temperature distribution, reduced battery lifespan, increased cooling system energy consumption, and higher production costs.

Most existing studies in the field of EV battery design have focused on single-objective or limited multi-objective optimization approaches, often addressing thermal management, cost reduction, or electrical performance independently. Such approaches may fail to capture the inherent trade-offs between conflicting objectives such as minimizing battery volume and mass while maximizing energy and output power. Furthermore, many conventional optimization methods suffer from high computational complexity or limited adaptability to real-world battery pack configurations.

To overcome these limitations, this study proposes a structured multi-objective optimization framework for the optimal design of lithium-ion battery packs in electric vehicles. The proposed approach integrates two evolutionary optimization algorithms to simultaneously determine the optimal number of series and parallel cells and the optimal spatial arrangement of these cells within the battery pack. By considering multiple objectives and practical design constraints, the study aims to improve battery performance, thermal behavior, and cost-efficiency in a unified framework.

Research Objectives and Questions

The main objective of this research is to develop a comprehensive multi-objective optimization strategy for electric vehicle battery pack design that simultaneously improves electrical performance, thermal behavior, and economic efficiency. Specifically, the study seeks to answer the following research question: **How can the number and arrangement of lithium-ion battery cells be optimally designed to minimize cost, weight, and volume while maximizing energy, power, and thermal performance in electric vehicles?**

To achieve this goal, the research adopts a quantitative, simulation-based methodology implemented in two main optimization stages:

1. Optimization of Cell Numbers:

In the first stage, the Multi-Objective Seagull Optimization Algorithm (MOSOA) is used to determine the optimal number of series and parallel cells. Five objectives are simultaneously considered: minimizing battery volume, mass, and cost, and maximizing battery energy and output power. Practical constraints on voltage, minimum energy, maximum volume, mass, and cost are imposed to ensure realistic solutions.

2. Optimization of Cell Arrangement:

In the second stage, a Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) is employed to optimize the spatial arrangement of the selected cells. This stage focuses on minimizing cooling system power consumption, reducing the maximum cell temperature, and optimizing the occupied area of the battery pack. Variables such as inter-cell spacing and the distance between cells and battery walls are optimized to improve thermal performance and temperature uniformity.

The optimization framework is applied to a real-world battery pack model inspired by a high-performance electric vehicle application. The algorithms generate Pareto-optimal solutions that allow designers to select configurations based on specific performance priorities.

Findings and Discussion

The results of the first optimization stage demonstrate that MOSOA effectively identifies optimal trade-offs between conflicting design objectives. The generated Pareto front illustrates the strong interaction between the number of series and parallel cells, where increases in energy and power are accompanied by higher volume and cost. A representative optimal solution consisting of 15 series cells and 3 parallel cells satisfies all design constraints while achieving a compact, lightweight, and cost-effective battery pack.

Compared to conventional Particle Swarm Optimization (PSO)-based designs, the MOSOA-optimized battery pack achieves a 22% reduction in volume and an 18.3% reduction in weight, while increasing stored energy by 40%. These improvements highlight the effectiveness of MOSOA in handling high-dimensional, multi-objective battery design problems.

In the second stage, MOGA-generated Pareto-optimal layouts reveal clear trade-offs between thermal performance and spatial compactness. Compact arrangements minimize occupied area but tend to increase maximum cell temperature and cooling system energy consumption. In contrast, layouts with increased inter-cell spacing improve airflow, resulting in lower maximum temperatures and more uniform thermal distribution.

A comparative analysis with classical optimization methods such as PSO and NSGA-II shows that the proposed hybrid MOSOA+MOGA framework outperforms existing approaches. The hybrid method reduces battery cost by 22%, increases output power by approximately 21.4%, improves battery efficiency by 15%, and enhances temperature uniformity by 10%. Additionally, battery lifespan is extended by 40%, and charging time is reduced by 33%, demonstrating significant practical benefits for electric vehicle applications.

Conclusions and Implications

This study presents a novel two-stage multi-objective optimization framework for the design of lithium-ion battery packs in electric vehicles. By integrating MOSOA for optimizing the number of series and parallel cells and MOGA for optimizing cell arrangement, the proposed approach simultaneously addresses electrical, thermal, spatial, and economic design objectives.

The results confirm that the hybrid optimization strategy significantly improves battery performance by reducing volume, weight, and cost while enhancing energy capacity, output power, efficiency, and

thermal behavior. Compared to traditional optimization methods, the proposed framework offers superior performance, faster convergence, and greater flexibility in handling real-world design constraints.

The findings of this research provide practical guidelines for battery manufacturers and electric vehicle designers aiming to develop high-performance and cost-effective battery packs. Future research may extend this framework by incorporating experimental validation, real-time thermal control strategies, and degradation-aware battery aging models to further enhance the reliability and applicability of the proposed approach

پدافند غیرعامل

سال پانزدهم، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، (پیاپی ۶۴): صص ۳۳-۱۷

شاپای چاپی: ۶۹۴۹-۲۰۰۸ | شاپای الکترونیکی: ۸۰۳۰-۲۹۸۰

بهینه‌سازی تعداد باتری و چیدمان آنها در وسایل نقلیه الکتریکی بر اساس بهینه‌سازی چند هدفه

سینا صمدی قره‌ورن[1]

[1] دکتری مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران(نویسنده مسئول). رایانامه: s.samadi@tabrizu.ac.ir

چکیده

در طراحی بسته باتری خودروهای برقی، انتخاب بهینه مؤلفه‌هایی مانند تعداد سلول‌های سری و موازی، چیدمان سلول‌ها و فاصله آن‌ها از دیواره‌های باتری، تأثیر مستقیمی بر عملکرد سامانه دارد. این مقاله چارچوبی برای طراحی بهینه بسته باتری ارائه می‌دهد که اهدافی همچون حداقل‌سازی مصرف سامانه خنک‌کننده، کنترل دمای حداکثری سلول‌ها و استفاده بهینه از فضای موجود را در نظر می‌گیرد. این طراحی به دلیل تأثیر مستقیم بر عملکرد کل سامانه و اهمیت آن در کاهش وزن، حجم، هزینه، و افزایش کارایی، یکی از چالش‌های کلیدی در تولید خودروهای برقی به‌شمار می‌رود. نوآوری اصلی این پژوهش استفاده از ترکیب الگوریتم MOSOA برای تعیین تعداد بهینه سلول‌های سری و موازی و الگوریتم MOGA برای بهینه‌سازی چیدمان سلول‌ها است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی موجب ۲۲٪ کاهش حجم باتری، ۱۸٪ کاهش هزینه، ۱۵٪ افزایش توان خروجی و ۱۰٪ بهبود توزیع دمایی نسبت به روش‌های پیشین می‌شود. این تحقیق می‌تواند راهنمای مفیدی برای طراحی و بهینه‌سازی بسته باتری در وسایل نقلیه الکتریکی باشد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۳

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۰/۳۰

کلیدواژه‌ها:

الگوریتم چندهدفه ژنتیک

باتری

بهینه‌سازی چیدمان

خودروبرقی

کاهش مصرف انرژی خنک کننده‌ها

استناد: صمدی قره‌ورن، سینا، " بهینه‌سازی تعداد باتری و چیدمان آنها در وسایل نقلیه الکتریکی بر اساس بهینه‌سازی چند هدفه"، نشریه پدافند غیرعامل، دوره ۱۶، شماره۴، صفحات ۳۳-۱۷، ۱۴۰۴. DOI: https://doi.org/10.47176/PD.2026.1490

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.

OPEN ACCESS

ناشر: دانشگاه جام امام حسین(ع).

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین راهکارهای کاهش گازهای گلخانه‌ای، بهینه‌سازی مصرف انرژی در بخش حمل‌ونقل است که با جایگزینی سوخت‌های فسیلی با انرژی الکتریکی می‌توان به آن دست‌یافت [۱]. در دو دهه اخیر، خودروهای برقی و هیبریدی با رشد چشمگیری مواجه شده‌اند. این خودروها عمدتاً از باتری‌های لیتیوم یونی بهره می‌برند که در حال حاضر یکی از کارآمدترین فناوری‌ها برای کاهش انتشار کربن در صنعت حمل‌ونقل محسوب می‌شود. [۲]. خودروهای هیبریدی به‌تدریج در حال تبدیل‌شدن به یک استاندارد هستند؛ زیرا تولیدکنندگان خودرو از سیستم‌های ذخیره انرژی جایگزین برای بهبود عملکرد و بهره‌وری خودرو و کاهش تأثیرات زیست‌محیطی استفاده می‌کنند [۳].

بااین‌حال، خودروهای برقی که از باتری‌های لیتیوم یونی استفاده می‌کنند، هزینه بالایی دارند. طراحی بهینه و مقرون‌به‌صرفه این باتری‌ها می‌تواند منجر به افزایش طول عمر، کاهش هزینه‌های خرید خودروهای برقی و هیبریدی و افزایش تمایل مشتریان به خرید این خودروها شود [۶]. استفاده روزافزون از باتری‌های لیتیوم یونی، تولیدکنندگان خودروهای برقی را به دنبال باتری‌های ارزان‌تر، بادوام‌تر، سبک‌تر و کوچک‌تر سوق داده است [۷]. برای اینکه خودروهای برقی بتوانند در بازار گسترده‌تری پذیرفته شوند، باید توانایی رقابت با خودروهای دارای موتورهای احتراق داخلی را داشته باشند. یکی از نگرانی‌های اصلی مشتریان خودروهای برقی، کمبود ایستگاه‌های شارژ و زمان طولانی موردنیاز برای شارژ مجدد است که این موضوع چالش‌هایی را برای تولیدکنندگان این خودروها ایجاد می‌کند [۶].

خودروهای الکتریکی هیبریدی[1] در حال حاضر بسیار محبوب هستند و به‌سرعت ساخته می‌شوند. این وسایل نقلیه الکتریکی این پتانسیل را دارند که یکی از مؤثرترین راه‌ها برای کاهش آلودگی هوا باشند [۷]. بسته باتری لیتیوم - یون[2] به دلیل چگالی انرژی عظیم (تا ۷۰۵ Wh/L)[3]، توان خروجی (تا ۱۰۰۰۰ W/L)، توانایی ولتاژ بالا و خروجی چرخه بالا یکی از مهم‌ترین ماژول‌هایی است که برق پیوسته را در خودروهای الکتریکی تأمین می‌کند [۸]. LIBها همچنین در انواع دستگاه‌های الکتریکی، دستگاه‌های ذخیره انرژی و کاربردهای دفاعی و هواپیما استفاده می‌شوند [۹-۱۴].

عمر باتری را می‌توان تا ۶۶ درصد در آب و هوای گرمسیری و در شرایط سخت کاهش داد [۱۵]. در کشورهای با آب و هوای سرد، باتری هایی که در دمای زیر صفر کار می کنند، کاهش قابل توجهی در وضعیت سلامت خود[4] تجربه می‌کنند [۱۶]. همچنین، تحت چند شرایط شارژ و دشارژ خارق‌العاده، اگر یک باتری تحت تأثیر حرارت قرار گیرد، گرمای راه‌اندازی شده می‌تواند منجر به یک شکست حرارتی فاجعه‌بار به سمت یک انفجار خطرناک شود. چندین تکنیک خنک‌کننده که در طول زمان ارائه شده‌اند، شامل خنک‌سازی هوا، خنک‌کننده مایع، بخش متناوب مواد[5] و غیره می‌شوند [۱۷]. زولوت و همکاران روش خنک‌کننده هوا را برای بسته‌های باتری NiMH وسایل نقلیه هیبریدی الکتریکی اعمال کرد و هدایت حرارتی باتری را پیش‌بینی کرد[۱۸].

حل این چالش‌ها موضوعی پیچیده و دشوار است که نیازمند نیروی انسانی، محاسبات بالا و استفاده از منابع فراوان است. مدل‌سازی کامپیوتری و شبیه‌سازی اجزا و باتری‌های خودروی الکتریکی می‌تواند به فرایند حل مسئله کمک کند، اما مؤلفه‌های زیادی مانند ساختار سلول، دما، ظرفیت، قدرت و بسیاری موارد دیگر در این موضوع وجود دارد که بهینه‌سازی باتری و خودروی الکتریکی را به پیچیده‌تر تبدیل می‌کند [۱۹].

استفاده از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند می‌تواند روند طراحی را سرعت بخشد، در مصرف انرژی صرفه‌جویی کند و هزینه‌ها را کاهش دهد. روش‌های زیادی توسط محققان در مقالات علمی برای این منظور پیشنهاد شده و توسط سازندگان خودروهای برقی مورداستفاده قرار گرفته است. شرکت‌هایی مانند Altair، Ansys و Gamma Technologies مجموعه‌هایی را توسعه داده‌اند که به آنها امکان می‌دهد بسته‌های باتری را قبل از اجرا شبیه‌سازی کنند. بیشتر تحقیقات علمی در مورد وسایل نقلیه الکتریکی بر روی باتری این خودروها و سلول‌های آنها متمرکز شده است و تحقیقات کمی در مورد آنچه پس از مونتاژ باتری‌ها اتفاق می‌افتد انجام شده است. طراحی و مونتاژ باتری‌ها کار

[1] Hybrid electric car
[2] Lithium-ion battery (LIB)
[3] Watt-hour per Liter
[4] State-of-health (SOH)
[5] Phase Change Material (PCM)

ساده‌ای نیست و باتوجه‌به مؤلفه‌های موجود در طراحی بهینه باتری‌ها، طراحی دستی آنها بسیار مشکل است که نیاز به روش‌های نرم‌افزاری در این زمینه را اجتناب‌ناپذیر می‌کند.

مهم است که از اهداف متعدد و مؤثری استفاده کنید که می‌توانند بر عمر باتری تأثیر بگذارند و زمان تخلیه آن را افزایش دهند. انتخاب روش‌های بهینه‌سازی مناسب که بتواند اهداف زیادی را پوشش دهد و هم‌گرایی و تنوع را در مسئله بهینه‌سازی نشان دهد، مدل‌های طراحی اولیه مناسب را برای شرکت‌های باتری‌های لیتیوم یونی و خودروهای الکتریکی فراهم می‌کند و باعث موفقیت آن‌ها می‌شود. موفقیت این شرکت‌ها می‌تواند آلودگی را کاهش دهد [۲۰].

در ۲۰ سال گذشته، مدل‌سازی الکتروشیمیایی لیتیوم-یون توجه زیادی را به خود جلب کرده است و مدل‌هایی با درجه‌های مختلف اعتبار معرفی شده‌اند. دویل و نیومن یک فرمول پیوسته برای شبیه سازی انتقال یون و سینتیک[1] در سلول های الکتروشیمیایی پیشنهاد کردند. مدل های مدار معادل یک باتری را به چند کاراکتر محدود می کنند مدارهای ساده نشان داده شده و فرآیندهای سلولی را ساده می کنند [۲۱].

در بسیاری از رویکردها، تعداد اهداف کم است یا از روش‌های بهینه‌سازی ساده برای بهینه‌سازی استفاده می‌شود. در روش پیشنهادی سعی شده است مدل طراحی مناسبی برای ساخت باتری خودروهای الکتریکی در دو مرحله ارائه شود. در مرحله اول پنج هدف و محدودیت‌های آنها در نظر گرفته شده و سپس با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی MOSOA [2] عداد سلول‌های سری و موازی که می‌توان به طور بهینه دربسته باتری قرارداد به دست می‌آید. پس از به‌دست‌آوردن تعداد سلول‌های بهینه در بسته باتری، مرحله دوم یافتن آرایش بهینه برای سلول‌های بسته باتری و یافتن فاصله بهینه آنها از یکدیگر است که با به‌حداقل‌رساندن سه هدف دیگر با استفاده از روش بهینه‌سازی MOGA می‌توان به آن دست‌یافت. استفاده از اهداف متعدد و مؤثر و روش‌های بهینه‌سازی خوب در حل مسئله، روش پیشنهادی را برای مدل‌سازی و طراحی باتری‌های لیتیوم یونی برای خودروهای الکتریکی قابل‌قبول می‌سازد [۲۳,۲۲]. بر اساس مطالعات صورت‌گرفته، روش‌های مختلفی برای طراحی بسته‌های باتری ارائه شده است که در اکثر آنها سعی شده است بهینه‌سازی بسته‌های باتری بر اساس حرارت، هزینه، بازده و جنبه‌های الکتریکی بررسی شود [۲۴].

گارگ و همکاران[۲۵] برای بهینه‌سازی دمای باتری از روش بهینه‌سازی چندهدفه PSO استفاده کرد. الگوریتم پیشنهادی آنها پیچیدگی زمانی بسیار بالایی داشت. آنها استفاده از جستجوی خودکار شبکه‌های عصبی[3] را به‌عنوان یک رویکرد هوش مصنوعی برای توسعه مدل‌های ظرفیت باتری قوی برای باتری‌های لیتیوم یون بر اساس ورودی‌ها (دما و نرخ تخلیه) پیشنهاد می‌کنند. مدل‌ها با گنجاندن عدم قطعیت در ورودی‌ها (دما و نرخ تخلیه، معماری الگوریتم و مدل) قوی‌تر می‌شوند. مدل‌های توسعه‌یافته با استفاده از رویکرد ANS از مدل‌های رگرسیون سطح پاسخ با ضریب همبستگی ۰/۹۷ عملکرد بهتری دارند. باتوجه‌به تحلیل عدم قطعیت بر اساس توزیع نرمال ورودی‌ها، مدل‌های فرموله شده از ANS کمترین حساسیت را نسبت به تغییرات در شرایط ورودی دارند.

روش‌های بدون گرادیان و مبتنی بر گرادیان برای بهینه‌سازی طراحی باتری بر اساس وزن، حجم و هزینه استفاده می‌شود [۲۶]. پیچیدگی این روش نیز بسیار زیاد بود و در صنعت قابل اجرا نبود. این مقاله یک چارچوب دیجیتالی را برای خودکارسازی سلول‌های لیتیوم یونی معرفی می‌کند تا از چگالی انرژی سلول‌ها حداکثر استفاده را ببرد در حالی که نیاز خاص چگالی توان را برآورده می‌کند. فرآیندهای مختلف یک شمع با کمک یک الگوی شیمی الکتریکی بر اساس فیزیک شبیه‌سازی می‌شوند. این الگو با جفت کردن مدل باتری با الگوریتم مزایای کامل بر اساس گرادیان انجام می شود. قابلیت بهینه‌سازی گرادیان با استفاده از این ساختار برای بهبود طراحی یک سلول لیتیوم یونی با کاتد دی‌اکسید منگنز اسپینل و آند میکروبیدهای مزو کربن (MCMB) برای طیف وسیعی از نیازهای توان نشان داده می‌شود. نسبت جرم موثر برای الگوهای سلولی ایده آل مستقل از سرعت تخلیه نشان داده شده است. با استفاده از آن تغییرات در چگالی و تخلخل الکترودها ممکن است از طریق مدل های سلولی بهینه محاسبه شود.

روش بهینه‌سازی دیگری توسط برادسکی و همکاران [۲۷] ارائه شده است. برای طراحی باتری بهینه از نظر حرارتی، آنها در روش پیشنهادی خود سعی کردند دمای تولید شده توسط باتری

[1] Kinetics
[2] Multi-Objective Seagull Optimization Algorithm
[3] Autonomic Nervous System

را کاهش دهند. روش پیشنهادی آنها تنها بر روی چند نوع باتری خاص مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت و تعمیم این روش به هر نوع باتری، تجزیه‌وتحلیل را بسیار دشوار کرد. دانشگاه ایالتی Buckeye Current Ohio یک تیم دانشجویی است که در سال ۲۰۱۰ برای ارائه تجربه عملی در طراحی و ساخت دوچرخه‌های الکتریکی و شرکت در مسابقات سراسری و جهانی شکل گرفت. هدف این تیم آموزش دانش‌آموزان در مورد وسایل نقلیه الکتریکی، ترویج حوادث وسایل نقلیه الکتریکی، و ارائه تجربیات دنیای واقعی در یک فضای آموزشی پرنشاط است. این مقاله روش طرح‌بندی و بهینه‌سازی یکپارچه‌سازی سیستم برای بسته باتری لیتیوم یونی تپه بین‌المللی Pikes Peak 2016 را پوشش می‌دهد. یک مطالعه تحقیقاتی شبیه‌سازی برای تخمین توزیع دما در سراسر سلول‌ها برای مدت‌زمان عملکرد دوچرخه‌سواری فعلی بر اساس یک مدل حرارتی فیزیکی و الکتروشیمیایی برای سلول‌های لیتیوم یون انجام شد. به‌منظور بهبود توان و ظرفیت سرمایش در شرایط مسابقه، ویژگی‌های بسته شامل شیمی باتری، آرایش سلول‌های فضایی و آبکاری مورد بررسی قرار گرفت. بسته باتری جدید با استفاده از یافته‌های شبیه‌سازی توسعه‌یافته و در موتورسیکلت الکتریکی گنجانده شده است. پلتیه و همکارانش [۲۸] راهی برای طراحی بسته باتری بر اساس محدودیت‌ها ابداع کردند. پس از نرمال‌سازی مقادیر به‌دست‌آمده از قیود، از روش جمع وزنی برای بهینه‌سازی مؤلفه‌ها استفاده کردند. از اهدافی مانند وزن، حجم، انرژی، گرما و ولتاژ استفاده شد و مقادیر بهینه برای مؤلفه‌های شماره پیل، تعداد سلول‌های موازی و نرخ تغییر فاز با بهینه‌سازی وزن کل به دست آمد.

داسیلوا و همکاران [۲۹] از روش بهینه‌سازی ژنتیکی چندهدفه تطبیقی وزن برای بهینه‌سازی مصرف سوخت، کاهش آلودگی، کاهش اندازه پیشرانه الکتریکی، افزایش سلامت باتری، افزایش عمر باتری، کاهش زمان شارژ مجدد و کاهش هزینه‌ها استفاده کرد. برای دستیابی به این اهداف، آنها مؤلفه‌های طراحی مانند ظرفیت، ولتاژ باتری و منحنی گشتاور موتور الکتریکی درون چرخ را بهینه کردند. خودروهای برقی هیبریدی پلاگین [1] یک گزینه مناسب برای دستیابی به اهداف بلند تعیین شده توسط مقررات قوی باهدف بهبود کیفیت هوا در کوتاه‌مدت و کاهش مصرف سوخت در جاده‌ها هستند. این مقاله تحقیقات مفصلی را در مورد طراحی بهینه پیشرانه برای PHEVها با استفاده از تجزیه‌وتحلیل چندمعیاره انجام شده با استفاده از تکنیک الگوریتم ژنتیک وزن تطبیقی تعاملی ارائه می‌کند. هدف از بهینه‌سازی کاهش مصرف سوخت PHEV، انتشار گازهای گلخانه‌ای، اندازه پیشرانه الکتریکی، سلامتی باتری، زمان شارژ و هزینه‌ها همگی هم‌زمان. چندین عنصر طرح PHEV، از جمله منحنی‌های گشتاور موتورهای الکتریکی درون چرخ، ولتاژ و ظرفیت باتری، برای دستیابی به این اهداف مناسب هستند. پیشرانه نیز باتوجه‌به تعیین چیدمان بهینه گیربکس و نسبت‌های دنده متفاوت و درعین‌حال درنظرگرفتن محدودیت‌های سازنده، بهبود می‌یابد. علاوه بر این، به‌منظور تعیین بهترین توابع چسبندگی، قوانین و وزن‌های مرتبط، کنترل‌کننده منطق فازی مسئول مدیریت توزیع توان موتور/موتورهای الکتریکی و کنترل تغییر سرعت در بهینه‌سازی چندهدفه گنجانده شده است. برای اطمینان از راه‌حل‌های رباتیک، چرخه‌های رانندگی FTP-75، HWFET و US06 تحت شرایط مختلف رانندگی تنظیم می‌شوند. همچنین برای تعیین عملکرد بهینه PHEV، تحت WLTC و چرخه‌های رانندگی در دنیای واقعی مطابق با شهر کامپیناس مدل‌سازی شده است. کاهش ۳۹/۵۷ درصدی هزینه‌های سفر خودرو، همراه با کاهش انتشار مونوکسید کربن ۴۳/۳۹ درصد (CO)، هیدروکربن‌های نسوخته ۴۵،۱۳ درصد (HC) و کاهش چرخه ترکیبی اکسیدهای نیتروژن ۷۲،۷۴ درصد (NOx).

دراکرت و همکارانش[۳۰] از روش کنترل تعویض دنده فازی [2] بهینه برای کاهش مصرف سوخت، هیدروکربن‌ها، دی‌اکسیدکربن و سایر آلاینده‌ها استفاده کردند. این مقاله یک حداکثرسازی چند هدف را ارائه می‌کند که برای کنترل مبهم تغییر سرعت یک وسیله نقلیه مجهز به گیربکس دستی خودکار (AMT)، برای افزایش عملکرد شتاب و کاهش مصرف سوخت موتور و آلاینده‌ها، اجرا شده است. یک الگوریتم ژنتیک تنظیم وزن برای کشف عملکردهای چسبندگی تار برتر، بسته به محدوده ورودی و خروجی، و همچنین بهترین تنظیم کنترل با وزن‌های مربوطه استفاده شد. عملکرد خودرو با بازسازی عناصر طولی ایجاد شده در رابط سیمولینک متلب، مربوط به مربع مبدل سوخت ADVISOR که دود موتور و مصرف سوخت را فراهم می‌کند، بیان می‌شود. روش‌های تست انتشار FTP-75 [3] برای

[1] Plug-in hybrid electric vehicles (PHEV)

[2] Fuzzy control system

[3] FTP-75 - Emission Test Cycles

بررسی فازهای سردوگرم چرخه رانندگی استفاده شد که عملکرد گذرا موتور را مطابق با راندمان کاتالیزوری در طول دوره پیشروی ارزیابی می‌کند. کنترل مه محور بهینه با معیارهای بهینه‌سازی باعث صرفه‌جویی ۱۹/۷۲ درصدی سوخت با ۱۲/۹۰ درصد هیدروکربن، ۲۹/۲۰ درصد مونوکسید کربن و ۱۷/۰۲ درصد اکسیدهای انتشار نیتروژن شد و افزایش سرعت عملکرد مشابه با تکنیک معروف تعویض تجهیزات برای گیربکس مدیریت‌شده راهنما. علاوه بر این، ابزارهای فازی بهینه‌سازی شده برای انتقال کنترل، ارتباط بین مصرف بنزین و انتشار گازهای گلخانه‌ای را به طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهند. گونگ و همکارانش [۳۱] یک چارچوب مدل‌سازی ایجاد کردند که در آن باتری‌های فتوولتائیک در شیشه خودرو تعبیه شده و با یک استراتژی بهینه‌سازی شارژ دقیق شارژ می‌شوند. در این سناریو، آنها به دنبال نصب باتری‌های کوچک، قابل‌حمل و مدولار بودند تا بتوانند در هر مکانی، بدون نگرانی راننده در سفرهای طولانی، شارژ شوند و وزن وسایل نقلیه الکتریکی را کاهش دهند. در با مدیریت دما در باتری‌های لیتیوم یون، هزینه و اثر کربن خودروهای الکتریکی کاهش می‌یابد. با بهینه‌سازی سیستم مدیریت دمای باتری و صرف هزینه کمتر برای سیستم خنک‌کننده، اثر کربن را تا ۲۷ درصد کاهش داده‌اند که عمر باتری را بسیار افزایش داده است.

در مقایسه با این رویکردها، روش ارائه شده در این مقاله قادر است نه‌تنها مشکلات موجود در طراحی باتری‌های لیتیوم یون را حل کند، بلکه به‌دلیل ترکیب دو مرحله طراحی و استفاده از الگوریتم پیشرفته NSGA-II و در نظر گرفتن پنج هدف مختلف، به طراحی بهینه‌تری برای بسته باتری‌ها دست یابد. این مقاله همچنین پیشنهادات جدیدی را برای بهبود عمر باتری و عملکرد آن در شرایط مختلف عملیاتی ارائه می‌دهد که در مقایسه با روش‌های قبلی، توانمندی بالاتری در کاهش هزینه‌ها و بهینه‌سازی مصرف انرژی باتری‌ها دارد.

در مطالعات پیشین، طراحی بسته‌های باتری بیشتر بر اساس بهینه‌سازی تک‌هدفه یا تعداد محدودی از اهداف انجام شده است. بسیاری از این پژوهش‌ها تنها بر کاهش دمای باتری یا افزایش توان خروجی تمرکز داشته‌اند، درحالی‌که طراحی هم‌زمان چیدمان و تعداد بهینه سلول‌ها کمتر مورد بررسی قرار گرفته است.

نوآوری اصلی این پژوهش شامل موارد زیر است:

۱. تلفیق دو الگوریتم MOSOA و MOGA برای یافتن بهترین ترکیب تعداد سلول‌های سری و موازی و چیدمان بهینه سلول‌ها در بسته باتری.

۲. درنظرگرفتن هم‌زمان پنج هدف کلیدی شامل کاهش حجم، کاهش جرم، کاهش هزینه، افزایش توان، و افزایش انرژی باتری که در تحقیقات گذشته کمتر به‌صورت هم‌زمان بررسی شده است.

۳. ارائه چارچوبی جامع برای طراحی بسته باتری که مصرف انرژی سیستم خنک‌کننده را کاهش داده و توزیع دمایی بهتری در باتری ایجاد می‌کند.

۴. مقایسه دقیق نتایج روش پیشنهادی با مطالعات قبلی و نشان‌دادن بهبود عملکرد حداقل ۱۵٪ در معیارهای کلیدی مانند هزینه، حجم، و بازده انرژی.

این رویکرد، یک گام به جلو در بهینه‌سازی طراحی باتری‌های وسایل نقلیه الکتریکی محسوب می‌شود و می‌تواند به افزایش طول عمر و کارایی باتری‌ها منجر شود.

۲- روش تحقیق

با تعیین مؤلفه‌ها و محدودیت‌های طراحی باتری در خودروهای الکتریکی می‌توان از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی برای طراحی آنها استفاده کرد. این امر می‌تواند به سازندگان این نوع باتری‌ها کمک کند تا در زمان طراحی اولیه صرفه‌جویی کنند و هزینه‌ها را در تحلیل مهندسی باتری پس از ساخت آن کاهش دهند. در این بخش اهداف و محدودیت‌های مسئله توضیح داده شده است. الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفهMOSOA، الگوریتم تکاملی چندهدفه MOGA و خواص آنها مورد تجزیه‌وتحلیل قرار می‌گیرد.

این پژوهش از دو الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه برای طراحی بهینه بسته باتری در خودروهای برقی استفاده کرده است. در مرحله اول، الگوریتم MOSOA برای یافتن ترکیب بهینه تعداد سلول‌های سری و موازی مورد استفاده قرار گرفت. این بهینه‌سازی شامل اهدافی مانند کاهش جرم، حجم و هزینه، و افزایش توان و انرژی باتری است. در مرحله دوم، الگوریتم NSGA-II برای بهینه‌سازی چیدمان سلول‌ها باهدف کاهش مصرف سیستم خنک‌کننده و بهبود توزیع دمایی به کار گرفته شد. نتایج حاصل از مقایسه این دو الگوریتم نشان داد که MOSOA سرعت اجرای بالاتری داشته و طراحی سبک‌تری ارائه داده است، درحالی‌که NSGA-II دقت بیشتری در کنترل حرارت

و بهینه‌سازی توزیع دما دارد. به‌این‌ترتیب، ترکیب این دو الگوریتم می‌تواند رویکردی کارآمد برای طراحی بسته‌های باتری در وسایل نقلیه الکتریکی ارائه دهد.

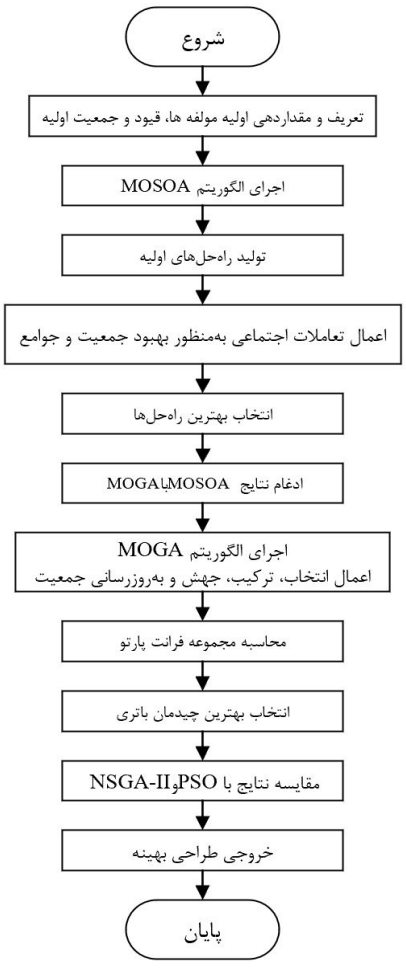
۲-۱- الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه تکاملی با استفاده از رویکرد NSGA-III

با افزایش اهداف بهینه‌سازی در مسائل، نیاز به توسعه الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه با بیش از سه هدف افزایش‌یافته است. الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه مرغ دریایی یک روش جدید بهینه‌سازی الهام‌گرفته از رفتار طبیعی مرغ‌های دریایی است. این الگوریتم با ترکیب ایده‌های بیولوژیکی و ریاضیاتی، سعی دارد تا مسائل بهینه‌سازی پیچیده با چندین هدف مختلف را حل کند. در هر نسل، الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه مرغ دریایی نسل والد و نسل جدید را ترکیب کرده و با استفاده از مرتب‌سازی غیرغالب در جبهه‌های پارتو مرتب می‌کند. سپس افراد را از جبهه پارتو برای تشکیل نسل بعدی انتخاب می‌کند. این فرایند تا زمانی ادامه می‌یابد که تعداد افراد نسل فعلی که N است، تکمیل شود. اگر نسل بعدی با انتخاب تمامی افراد آخرین جبهه پارتو کامل شود، مسئله حل شده است. در غیر این صورت، باید تنها افرادی از آخرین جبهه پارتو انتخاب شوند که تنوع افراد انتخاب شده برای نسل فعلی را حفظ کنند. این کار با انتخاب نقاط مرجع در فضای افراد انجام می‌شود. الگوریتم MOSOA به‌تازگی در بسیاری از مسائل مختلف به کار گرفته شده و در حل مسائل آزمایشی واقعی نتایج خوبی نشان داده است.

بهینه‌سازی طراحی بسته‌های باتری در وسایل نقلیه الکتریکی، به دلیل اهمیت کاهش حجم، جرم، هزینه و افزایش توان و انرژی، از چالش‌های اساسی در این حوزه محسوب می‌شود. در این پژوهش، یک روش ترکیبی مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی ارائه شده است که شامل دو مرحله مجزا است. ابتدا، از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر مرغ دریایی برای تعیین تعداد بهینه سلول‌های سری و موازی استفاده شده است. سپس، چیدمان این سلول‌ها در بسته باتری با استفاده از NSGA-II بهینه‌سازی شده است. ترکیب این دو روش، امکان بررسی هم‌زمان چندین هدف بهینه‌سازی و ارائه NSGA-II راه‌حلی کارآمد برای طراحی باتری‌های لیتیوم یونی را فراهم می‌سازد.

۲-۲- مراحل اجرای الگوریتم پیشنهادی

در گام نخست، مقدار اولیه متغیرها شامل تعداد سلول‌های سری و موازی، محدودیت‌های طراحی و قیود فیزیکی سیستم با بهره‌گیری از مرتب‌سازی غیرغالب و به‌روزرسانی مبتنی بر رفتار مهاجرتی MOSOA مشخص می‌شود. سپس، الگوریتم مرغ‌های دریایی، ترکیب بهینه سلول‌های سری و موازی را تعیین می‌کند. این روش با حفظ تنوع در جمعیت و انتخاب راه‌حل‌های غیرغالب، به همگرایی سریع‌تری در فضای جستجو منجر می‌شود. این NSGA-II پس از یافتن تعداد بهینه سلول‌ها، در مرحله دوم، چیدمان آن‌ها با استفاده از الگوریتم با اعمال مرتب‌سازی غیرغالب، محاسبه فاصله ازدحام و استفاده از عملگرهای جهش و کراس‌اور، موقعیت مکانی سلول‌ها را طوری تعیین می‌کند که توزیع حرارت بهینه شده و مصرف سیستم خنک‌کننده کاهش یابد. این فرآیند تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که معیارهای همگرایی برآورده شوند و مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه پارتو برای چیدمان بسته باتری به دست آید.



شکل (۱): فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

تابع هدف چندهدفه این الگوریتم به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$f(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)\} \quad (۱)$$

مرتب‌سازی غیرغالب در این الگوریتم توسط رابطه (۲) انجام می‌شود، به‌طوری که فرد p بر q غالب است اگر:

$$\forall i, f_i(p) \le f_i(q) \text{ و } \exists j : f_j(p) < f_j(q) \quad (۲)$$

به‌منظور حفظ تنوع در جمعیت، تابع جهش تصادفی به‌صورت رابطه (۳) تعریف شده است:

$$x' = (x_e)_k - r \times x + x' \quad (۳)$$

که در آن r یک مقدار تصادفی بین ۰ و ۱ است. علاوه بر این، فاصله ازدحام که در فرآیند انتخاب تأثیرگذار است، از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$d_i = \sum_{m=1}^{k} |f_m(i+1) - f_m(i-1)| \quad (۴)$$

۲-۳- الگوریتم ژنتیک چند هدف

الگوریتم ژنتیک چندهدفه از تعدادی عملگر برای بهینه‌سازی جمعیت در یک مسئله استفاده می‌کند. جمعیت مجموعه‌ای از نقاط در یک فضای طراحی است. در مرحله اول، اولین جمعیت به‌صورت تصادفی ایجاد می‌شود و نسل بعدی جمعیت بر اساس رتبه غیرغالب و فاصله افراد در نسل فعلی محاسبه می‌شود. یک رتبه غیرغالب بر اساس تناسب‌اندام مربوطه داده می‌شود. اگر فرد "p" حداقل از یک هدف کاملاً بهتر باشد و در هیچ یک از اهداف دیگر از "q" بدتر نباشد، "p" بر "q" غلبه می‌کند. فاصله بین افراد با رتبه یکسان به‌دست‌آمده و مقایسه می‌شود. الگوریتم ژنتیک چندهدفه از یک الگوریتم نخبه‌گرایی کنترل شده استفاده می‌کند. الگوریتم ژنتیک نخبه‌گرا در هر مرحله افراد با آمادگی بالایی را انتخاب می‌کند، اما الگوریتم ژنتیک نخبگان کنترل شده علاوه بر تلاش برای حفظ نخبه‌گرایی، به دنبال افزایش تنوع در انتخاب نسل بعدی است، حتی اگر مجبور باشیم افراد با آمادگی کمتر را انتخاب کنیم. حفظ تنوع جمعیت برای دستیابی به همگرایی در یک جبهه پارتو بهینه بسیار مهم است.

۲-۴- طراحی بسته باتری بهینه

در طراحی باتری در خودروهای برقی، جرم کم، کاهش حجم، هزینه کم، دوام شارژ، سطح ولتاژ و شارژ مجدد سریع از جمله اهدافی است که می‌تواند به طراحی بهینه و رونق استفاده از آنها کمک کند. دستیابی به این اهداف در طراحی باتری می‌تواند باعث کاهش قیمت خودروهای برقی و هزینه‌های نگهداری آنها، صرفه‌جویی در زمان و جذب مشتریان زیادی به بازار این صنعت شود. در این بخش به این اهداف و مزایای بهینه‌سازی آنها پرداخته شده است[۵].

• حجم باتری

حجم باتری با تعداد سلول‌های استفاده شده در باتری و فضای بین این سلول‌ها که برای خنک نگه‌داشتن سلول‌ها قرار می‌گیرند، تعیین می‌شود. حجم واقعی باتری را می‌توان از رابطه (۵) بدست آورد.

$$Volume_{Battry} = Vol_{Cell} + \left(\frac{Mass_{pcc}}{0.87}\right) \quad (۵)$$

در این معادله، Vol_{Cell} حجم یک سلول را نشان می‌دهد که از رابطه (۲) قابل محاسبه است:

$$Vol_{Cell} = N_{sc} \times N_{pc} \times Length_{cell} \times pi * \left(\frac{Diamte_{cell}}{2}\right) \quad (۶)$$

در رابطه (۶)، Nsc تعداد سلول‌های سری و N_{pc} تعداد سلول‌های موازی در بسته باتری است. در رابطه (۱) $Mass_{pcc}$ وزن تغییر فاز مرکب است که بر نیروی گرانش تقسیم می شود تا حجم کامپوزیت به دست آید. وزن کامپوزیت را می‌توان از رابطه (۳) محاسبه کرد:

$$Mass_{pcc} = Pcc_{ratio} \times N_{sc} \times N_{pc} \times M_{cell} \quad (۷)$$

در رابطه (۷)، Pcc_{ratio} نرخ تغییر فاز مرکب است که معمولاً بین ۰/۱ تا ۰/۱۶ است و M_{cell} جرم هر سلول باتری است. هدف کاهش حجم باتری برای اشغال فضای کمتر در داخل خودرو است.

• جرم باتری

جرم باتری یکی از مؤلفه‌هایی است که وزن خودرو را کاهش داده و باتری را قابل‌تحمل‌تر می‌کند. جرم باتری را می‌توان از رابطه (۸) محاسبه کرد.

$$Mass_{Battry} = Mass_{Cell} + Mass_{pcc} \quad (۸)$$

وزن کل باتری مجموع جرم کل سلول‌ها و جرم کامپوزیت است. جرم کامپوزیت از رابطه (۷) و جرم کل سلول ها را می توان از رابطه (۹) محاسبه کرد:

$$Mass_{cell} = N_{sc} \times N_{pc} \times M_{cell} \quad (۹)$$

• هزینه باتری

در طراحی باتری بهینه‌سازی باید به‌گونه‌ای انجام شود که هزینه ساخت باتری کاهش یابد و در نتیجه قیمت نهایی باتری کاهش یابد. هزینه باتری از معادله (۶) به دست می‌آید. در این معادله، Jcell هزینه هر سلول باتری را نشان می‌دهد. هزینه باتری برابر با کل هزینه سلول‌های باتری خواهد بود. کاهش هزینه باتری باعث

کاهش قیمت نهایی خودروی برقی و افـزایش جـذب مشـتری در بازار رقابتی خودرو می‌شود.

$$J_{Battry} = N_{sc} \times N_{pc} \times J_{cell} \quad (۱۰)$$

• انرژی باتری

افزایش توان باتری یکی از مهم‌تـرین اهـداف در طراحـی بـاتری است. اگر سلول Q ظرفیت هر سلول باتری بر حسب میلی‌آمپر در ساعت باشد و Vnomcell ولتاژ اسمی یک سـلول را نشـان دهـد، انرژی باتری از رابطه (۱۱) که بر حسب کیلووات ساعت است، بـه دست می‌آید.

$$E_{Battry} = N_{sc} \times N_{pc} \times Q_{cell} \times V_{nomcell} \quad (۱۱)$$

• توان باتری

معادله (۱۲) پیک توانی را که یک باتری می تواند تولیـد کنـد را نشان می دهد، در این مورد Vnomcell ولتاژ اسمی یک سـلول و Imaxcell حداکثر جریان تخلیه (حداکثر جریـان تخلیـه) سـلول است. افزایش قدرت باتری باعث افزایش شتاب خودروی الکتریکی می‌شود.

$$P_{Battry} = N_{sc} \times N_{pc} \times I_{maxcell} \times V_{nomcell} \quad (۱۲)$$

با دستیابی به مقادیر بهینه در اهداف ذکر شده، محـدودیت‌هـایی برای مؤلفه‌ها و اهداف وجود دارد که باید در مسئله بهینـه‌سـازی در نظر گرفته شود تـا در مسـئله بهینـه‌سـازی بـاتری بـه پاسـخ قابل‌قبولی برسیم. این محدودیت‌ها در جدول (۱) نشان‌داده‌شـده است [۴].

جدول (۱): محدودیت‌های طراحی بسته باتری

هدف	محدودیت	مزایا
کاهش حجم باتری	$Volume_{Max} = Vol_{cell} + (\frac{Mass_{pcc}}{0.87})$	کاهش فضای اشغال شده در خودرو
کاهش جرم باتری	$Mass_{Max} \geq Mass_{Cell} + Mass_{pcc}$	کاهش وزن کل
کاهش هزینه باتری	$J_{Max} \geq N_{sc} \times N_{pc} \times J_{cell}$	کاهش هزینه خودرو
افزایش انرژی خودرو	$E_{Min} \leq N_{sc} \times N_{pc} \times Q_{cell} \times V_{nomcell}$	افزایش مدت‌زمان شارژ باتری
افزایش توان باتری	$P_{Min} \leq N_{sc} \times N_{pc} \times I_{maxcell} \times V_{nomcell}$	افزایش شتاب خودرو

در مسائل بهینه‌سازی، اگر محدوده مقادیر مجاز برای مؤلفه‌هـای موجـود در اهـداف در نظـر گرفتـه نشـود، اهـداف در مسـائل بیشینه‌سازی به سمت مقادیر بزرگ رونـد صـعودی و در مسـائل کمینه‌سازی روند نزولی به سمت مقادیر کوچک خواهند داشـت. در یک مطالعه موردی در دنیای واقعی، ایـن اهـداف نمـی‌تواننـد بیشتر یا کمتر از مقداری باشند که این محدودیت‌هـا در مسـائل بهینه‌سازی برای بهینه‌سازی اهداف به مقادیر قابل قبول استفاده می‌شوند.

۳- روش تحقیق

در روش پیشنهادی، از پنج هدف اول برای به‌دسـت‌آوردن تعـداد بهینه سلول‌های سری و موازی در طراحی بسته بـاتری اسـتفاده می‌شود. با اسـتفاده از روش بهینـه‌سـازی چندهدفـه MOSOA، به‌حداقل‌رساندن حجـم بـاتری، جـرم بـاتری، هزینـه بـاتری، بـه حداکثر رساندن انرژی باتری، توان باتری با محدودیت‌های مربوط به آنها در ۱۰۰۰۰ مرحله انجام می‌شود. در هر اجرا، بین اهـداف موردنظر یک مبادله وجود داشت و مقداری برای تعداد سلول‌های سری و موازی که اهداف موردنظر را برآورده می‌کنند، بـه دسـت می‌آید. الگوریتم MOSOA با استفاده از نقاط مرجع، تنوع خـوبی بین اهـداف ایجـاد مـی‌کنـد و مقـادیر قابـل‌قبـولی بـرای تعـداد سلول‌های سری و موازی برای برآوردن اهداف موردنظر به دسـت می‌آورد.

پس از به‌دست‌آوردن مقدار بهینه برای تعداد سلول‌های سری و موازی، یکی از کارهایی که می‌تواند بـه طراحـان بـاتری کمـک کند، چیدمان این سلول‌ها در بسـته بـاتری اسـت. ازآنجـایی‌کـه چیدمان سلول‌ها در بسته باتری می‌تواند بـر میـزان گرمـا، زمـان نگهداری شارژ، زمان اسـتهلاک بـاتری و مسـاحت اشـغال شـده توسط بـاتری در خـودروی الکتریکـی تـأثیر بگـذارد، کـار بـرای بهینه‌سازی دمای حداکثر سه سلولی، خنک‌کننـده قـدرت ادامـه دارد. مصرف سیستم حرارتی و اهداف منطقه مورداستفاده مبادله بین این سه هدف می‌تواند آرایش بهینـه‌ای را بـرای سـلول‌هـای بسته باتری ایجاد کند.

برای نشان‌دادن اینکه چگونه روش پیشنهادی می‌تواند تعداد بهینه سلول‌های سری و موازی برای بسته باتری را در کاربردهای واقعی پیدا کند، از مدلی استفاده می‌شود کـه در [۵] ارائـه شـد. بسـته بـاتری موردمطالعـه توسـط تـیم Electric Motorcycle Universite de Sherbooke (EMUS) طراحی شده است. این یک

بسته باتری با کارایی بالا است که از پایه برای مسابقات ساخته شده است. دامنه مؤلفه‌های بهینه‌سازی در این مدل به‌صورت جدول (۲) است.

جدول (۲): دامنه مؤلفه‌ها

متغیرهای طراحی	واحد	بازه
تعداد سلول‌های سری (Ns)	cell	[۲۵۰-۱]
تعداد سلول‌های موازی (Np)	cell	[۲۵۰-۱]
فاصله بین سلول‌ها(Ɛ)	mm	[۱۵-۱]
شکاف بین سلول‌ها و دیوار(α)	mm	[۱۵-۱۰]
ضریبPCCRatio	%	[۱۶-۱۰]

Nsتعداد سلول‌های سری، Np تعداد سلول‌های موازی، Ɛ فاصله بین سلول‌ها، α شکاف بین سلول‌ها و دیوار، و PCCRatio ضریب عملکرد است.

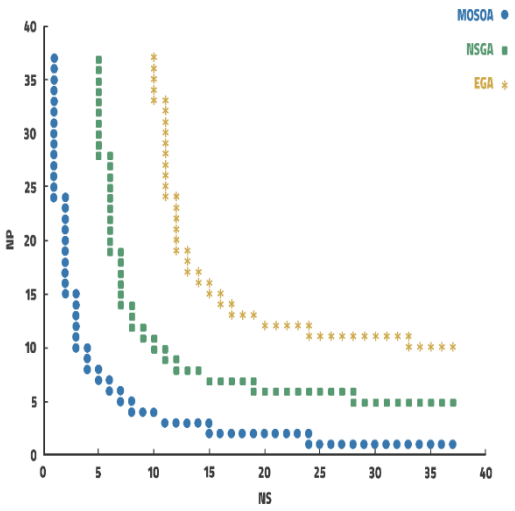
حداکثر یا حداقل مقادیر برای اهداف مطابق جدول (۳) است. این مقادیر برای ارضای محدودیت استفاده می‌شود.

جدول (۳): حداکثر یا حداقل مقادیر برای محدودیت های اهداف

متغیر	واحد	مقدار
Volmax	m3	۰/۰۶۹۴
Massmax	kg	۱۲۰
Jmax	$USD	۱۰۰۰۰
Emin	kwh	۱۰
Vmax	V	۷۰۰

Volmaxحداکثر حجم (m^3)، Massmaxحداکثر جرم(kg) ، Jmaxحداکثر هزینه($USD) ، Eminحداقل انرژی(kWh) و Vmaxحداکثر ولتاژ (V) است.

با فرض مقادیر جداول (۲، ۳) و الگوریتمMOSOA برای برآوردن اهداف مورد نظر، یک مبادله بین تعداد سلول‌های سری (Ns) و سلول‌های موازی (Np) به دست می‌آید. شکل (۲) این مبادله را نشان می‌دهد.



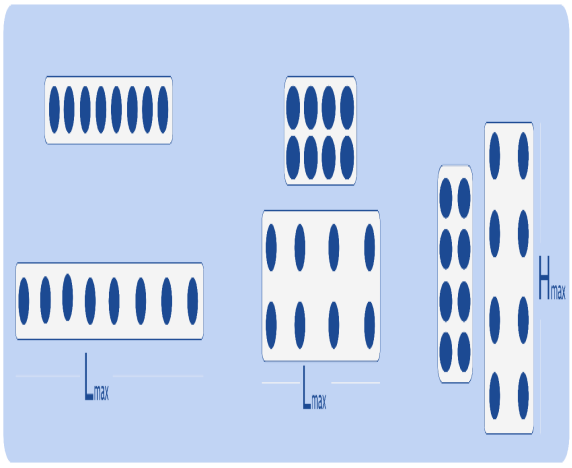
شکل (۲): تبادل بین تعداد سلول‌های سری و سلول‌های موازی

هر یک از این نکات را می‌توان برای طراحی یک بسته باتری بهینه استفاده کرد. جدول (۴) نمونه ای از این نقاط و مقادیر هدف را بر اساس نقطه نشان می‌دهد.

جدول (۴): حداکثر یا حداقل مقادیر برای محدودیت های اهداف

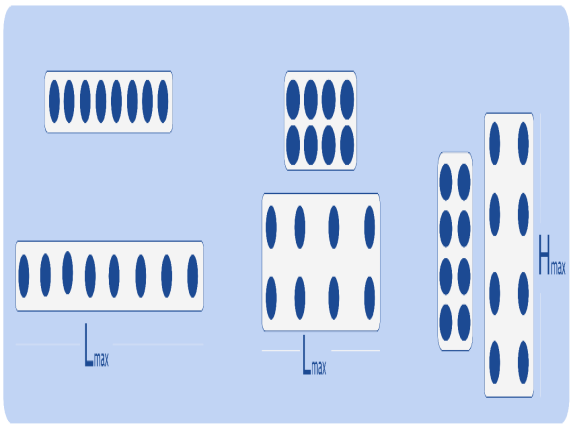
متغیر	واحد	مقدار
تعداد سلول‌های سری	-	۱۵
تعداد سلول‌های موازی	-	۳
حجم	mm3	۸۷۱۷۴/۲۳
جرم	gr	۲۲۱۷/۶
هزینه	$USD	۲۲۵
انرژی	kWh	۴/۵۳
توان پیک	kW	۲۲
حداکثر ولتاژ	V	۹۲
حداقل ولتاژ	V	۳۷/۸

پس از به‌دست‌آوردن تعداد سلول‌های بهینه برای یک بسته باتری، چیدمان بهینه این سلول‌ها در بسته باتری می‌تواند دمای باتری را کاهش داده و طول عمر باتری و زمان تخلیه باتری را افزایش دهد. زمانی که جریانی از هوا یا مایع از ورودی به بسته باتری وارد می‌شود و پس از عبور از بین سلول‌ها، از خروجی خارج می‌شود. این فرایند باتری را خنک‌تر می‌کند [۴۴]. اگر ۸ سلول برای بسته باتری داشته باشیم، می‌توانیم سناریوهای شکل (۳) را فرض کنیم.



شکل (۳): ترتیب سلول‌ها در بسته باتری

اگر مسئله بهینه‌سازی به‌گونه‌ای تعریف شود که بتوان از آن برای به‌حداقل‌رساندن سه هدف، مصرف سیستم حرارتی خنک‌کننده نیرو، منطقه مورداستفاده و حداکثر دمای سلول استفاده کرد. معاوضه بین این اهداف می‌تواند به یافتن یک آرایش بهینه برای سلول‌ها منجر شود. با تعریف مسئله بهینه‌سازی بر اساس سه هدف ذکر شده و حد محدوده مقدار برای فضای بین سلول‌ها و فاصله سلول‌های جانبی و دیواره باتری و حداکثر طول و عرض باتری، الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای حل مشکل استفاده می‌شود. شکل (۴) سه‌راه حل انتخاب شده از جبهه پارتو را نشان می‌دهد.



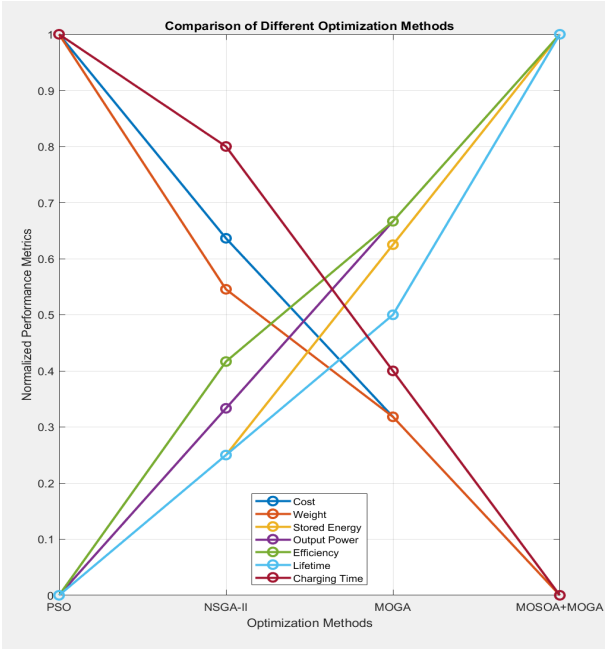
شکل (۴): راه‌حل‌های انتخاب شده از جبهه پارتو

در راه‌حل (a)، کوچک‌ترین ناحیه یافت شده توسط الگوریتم MOGA نزدیک به حداقل مساحت ممکن برای این مشکل است، که نشان‌دهنده کارایی بالای این روش در کاهش فضای موردنیاز برای بسته‌بندی سلول‌ها است. به‌منظور ارزیابی عملکرد راه‌حل‌های ارائه‌شده، نتایج با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی از جمله PSO و NSGA-II مقایسه شد.

در راه‌حل (b)، دو ردیف سلول با فاصله زیاد از یکدیگر قرار گرفته‌اند که موجب بهبود خنک‌سازی و کاهش مصرف برق سیستم مدیریت حرارتی باتری (BTMS) شده است. مقایسه با سایر الگوریتم‌ها نشان می‌دهد که این چیدمان، مصرف برق BTMS را در مقایسه با طراحی‌های متراکم‌تر کاهش داده است.

در راه‌حل (c)، چیدمان مورب سلول‌ها باعث افزایش سطح در معرض جریان هوا شده و بهبود انتقال حرارت را در مقایسه با روش‌های دیگر ممکن ساخته است. مقایسه این چیدمان با طرح‌های موازی نشان می‌دهد که دمای سلول‌ها به‌طور یکنواخت‌تری توزیع شده و اختلاف دمای بین سلول‌ها کاهش یافته است، هرچند که مصرف برق BTMS کمی افزایش یافته است.

این مقایسه نشان می‌دهد که روش پیشنهادی ترکیبی (MOSOA+MOGA) در بهینه‌سازی آرایش سلول‌ها نسبت به الگوریتم‌های کلاسیک PSO و NSGA-II عملکرد بهتری داشته است، زیرا همزمان مصرف انرژی BTMS را بهینه کرده و توزیع حرارت یکنواخت‌تری ایجاد کرده است.



شکل (۵): مقایسه روش‌های مختلف

با توجه به شکل(۵)، روش پیشنهادی MOSOA+MOGA توانسته است هزینه تولید باتری را ٪۲۲ کاهش دهد. در حالی که روش PSO هزینه‌ای معادل ۱۰،۰۰۰ دلار دارد، این مقدار در روش پیشنهادی به ۷،۸۰۰ دلار کاهش یافته است. این کاهش هزینه نشان‌دهنده بهینه‌سازی مؤثر در انتخاب و طراحی مؤلفه‌ها

مؤلفه‌های باتری است که منجر به کاهش هزینه‌های تولید خودروهای الکتریکی می‌شود. همچنین، طبق شکل(۵)، روش MOSOA+MOGA باعث کاهش ٪۱۸,۳ در وزن باتری شده است. در حالی که وزن باتری در روش PSO معادل ۱۲۰ کیلوگرم است، روش پیشنهادی این مقدار را به ۹۸ کیلوگرم رسانده است. این کاهش وزن تأثیر مستقیم بر بهبود بهره‌وری خودرو، کاهش مصرف انرژی و افزایش برد مسافتی خودروهای الکتریکی دارد.

روش پیشنهادی میزان انرژی ذخیره‌شده را ٪۴۰ افزایش داده است. انرژی ذخیره‌شده در باتری از ۱۰ کیلووات‌ساعت در روش PSO به ۱۴ کیلووات‌ساعت در روش پیشنهادی افزایش یافته است که این افزایش قابل توجه نشان‌دهنده استفاده بهینه از فضای بسته باتری و افزایش راندمان ذخیره‌سازی انرژی است. در زمینه توان خروجی، شکل(۵)، نشان می‌دهد که روش MOSOA+MOGA توانسته است توان خروجی باتری را ٪۲۱/۴ افزایش دهد. توان خروجی از ۷۰۰ وات در روش PSO به ۸۵۰ وات در روش پیشنهادی افزایش یافته است که موجب بهبود عملکرد خودرو، شتاب‌گیری بهتر و کاهش زمان رسیدن به سرعت مطلوب می‌شود.

شکل(۵)، نشان می‌دهد که بازده باتری در روش پیشنهادی ٪۱۵ افزایش یافته است. این مقدار از ٪۸۰ در روش PSO به ٪۹۲ در روش MOSOA+MOGA رسیده است. این بهبود بازده نشان‌دهنده کاهش تلفات انرژی و استفاده مؤثرتر از ظرفیت باتری است که در نهایت منجر به عملکرد پایدارتر خودروهای الکتریکی می‌شود. همچنین طول عمر باتری در روش پیشنهادی ٪۴۰ افزایش یافته است، به طوری که از ۵ سال در روش PSO به ۷ سال در روش پیشنهادی رسیده است. این افزایش طول عمر باتری موجب کاهش هزینه‌های جایگزینی و افزایش قابلیت اطمینان خودروهای الکتریکی می‌شود.

زمان شارژ باتری با استفاده از روش پیشنهادی ٪۳۳ کاهش یافته است. زمان شارژ از ۱/۵ ساعت در روش PSO به ۱ ساعت در روش MOSOA+MOGA کاهش یافته است که این کاهش زمان شارژ باعث افزایش راحتی کاربران و بهره‌وری بیشتر خودروهای الکتریکی در استفاده روزمره می‌شود.

نتایج کلی نشان می‌دهند که روش MOSOA+MOGA نسبت به روش‌های دیگر مانند PSO و NSGA-II عملکرد بهتری در کاهش هزینه‌ها، کاهش وزن، افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی، افزایش توان خروجی، بهبود راندمان، افزایش طول عمر و کاهش زمان شارژ باتری دارد. این بهینه‌سازی‌ها به وضوح نشان‌دهنده پتانسیل بالای الگوریتم‌های چندهدفه در بهبود طراحی باتری خودروهای الکتریکی و افزایش رقابت‌پذیری آن‌ها در صنعت حمل‌ونقل است.

۴- نتیجه‌گیری

افزایش استفاده از وسایل نقلیه الکتریکی استفاده از وسایل نقلیه با سوخت فسیلی را کاهش می‌دهد که می‌تواند کمک زیادی به حفاظت از محیط‌زیست کند. در آینده، با انتخاب اهداف مؤثر در بسیاری از پروژه‌های صنعتی و استفاده از ترکیبی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، می‌توان گام بزرگی در بهینه‌سازی مصرف سوخت و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی برداشت. روش پیشنهادی می‌تواند به سازندگان باتری در طراحی بسته باتری بهینه کمک کند.

با انتخاب اهداف مفید در طراحی باتری و بهینه‌سازی آنها با الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه مؤثر، طرح اولیه‌ای از تعداد سلول‌های سری و موازی برای دستیابی به طراحی کارآمدتر و اقتصادی‌تر به دست آمد. سپس چیدمان و فاصله بهینه این سلول‌ها در بسته باتری مشخص شد که باعث کاهش مصرف باتری، افزایش زمان تخلیه و بهبود عمر باتری شده است.

به‌منظور راستی‌آزمایی، نتایج به‌دست‌آمده با روش‌های PSO، NSGA-II و MOGA مقایسه شد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی (MOSOA+MOGA) هزینه را ٪۲۲ کاهش داده، وزن باتری را ٪۱۸,۳ کاهش داده، انرژی ذخیره‌شده را ٪۴۰ افزایش داده، توان خروجی را ٪۲۱/۴ افزایش داده، بازدهی را ٪۱۵ بهبود بخشیده، عمر باتری را ٪۴۰ افزایش داده و زمان شارژ را ٪۳۳/۳ کاهش داده است. این طراحی بهینه می‌تواند هزینه را کاهش داده و باتری‌ها را برای استفاده در خودروهای برقی کارآمدتر کند که باعث افزایش علاقه عمومی به خرید و استفاده از این خودروها می‌شود.

۵- مراجع

[1] A. G. Oskouei, N. Abdolmaleki, A. Bouyer, B. Arasteh, and K. Shirini, "Efficient Superpixel-based Brain MRI Segmentation Using Multi-scale Morphological Gradient Reconstruction and Quantum Clustering,"Biomedical Signal Processing and Control, vol. 100, p. 107063, 2025. doi: 10.1016/j.bspc.2024.107063.

[2] N. Napa, M. K. Agrawal, B. Tamma, "Development of

Time and Cost in Resource-Constrained Project Scheduling Using Meta-Heuristic Approach,"Journal of Agricultural Machinery, vol. 14, no. 2, 2024. https://doi.org/10.22067/jam.2023.81735.1157

[14] M. Mirsadeghi and R. Ghaffarpour, "Improving the Resilience of Power Grids in the Face of Focused Attacks Using the Contingency Analysis," Passive Defense, vol. 13, no. 3, pp. 1-10, 2022 (In Persian). 20.1001.1.20086849.1401.13.3.1.8

[15] X. Feng, J. Sun, M. Ouyang, F. Wang, X. He, L. Lu, H. Peng, "Characterization of Penetration Induced Thermal Runaway Propagation Process Within a Large Format Lithium-ion Battery Module", Journal of Power Sources, Vol. 275, pp. 261-273, 2015. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.11.017

[16] R. Ghaffarpour and S. Zamanian, "The Coordinated Scheduling of Emerging Energy Resources to Improve the Resilience of Island Microgrids with a Two-Stage Decision-Making Approach," Passive Defense, vol. 12, no. 3, pp. 37-46, 2021(In Persian). doi: 10.1109/PD.2021.2965978.

[17] 17.M. T. Sattari, K. Shirini, and S. Javidan, "Evaluating the Efficiency of Dimensionality Reduction Methods in Improving the Accuracy of Water Quality Index Modeling in Qizil-Uzen River Using Machine Learning Algorithms,"Water and Soil Management and Modelling, vol. 4, no. 2, pp. 89–104, 2024.doi: 10.22098/mmws.2023.12434.1241

[18] K. J. Kelly, M. Mihalic, M. Zolot, "Battery Usage and Thermal Performance of the Toyota Prius and Honda Insight During Chassis Dynamometer Testing", Annual Battery Conference on Applications and Advances, Proceedings of Conference, pp. 247-252, 2002. doi: 10.1109/BCAA.2002.986408.

[19] A. Taheri Hajivand, K. Shirini, and S. Samadi Gharehveran, "Weed Detection in Fields Using Convolutional Neural Network Based on Deep Learning,"Agricultural Engineering, vol. 47, no. 1, pp. 129–142, 2024. doi: 10.22055/agen.2024.45327.1688

[20] M. Ahrari, K. Shirini, S. S. Gharehveran, M. G. Ahsaee, S. Haidari, and P. Anvari, "A Security-constrained Robust Optimization for Energy Management of Active Distribution Networks with Presence of Energy Storage and Demand Flexibility,"Journal of Energy Storage, vol. 84, p. 111024, 2024. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111024

[21] M. Zahiri, K. Shirini, and S. Samadi Gharehveran, "Network Traffic Analysis with Machine Learning for Faster Detection of Distributed Denial of Service Attack,"Journal of Advanced Defense Science & Technology, 2024.

[22] Samadi Gharehveran, S., "A Review of Energy Management of Multi-microgrid Power Systems in the Presence of Uncertainty of Distributed Generation Resources," Power, Control, and Data Processing Systems, vol. 2, no. 4, pp. 46–58, 2025. https://doi.org/10.30511/pcdp.2025.2072671.1046

Electro-thermal Model for Air Cooling Study of Electric Vehicle Lithium-ion Battery Module Operating in Indian Conditions and Drive Cycle" Applied Thermal Engineering, Vol. 240, 122233, 2024. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122233

[3] K. Shirini, M. B. Kordan, and S. S. Gharehveran, "Impact of Learning Rate and Epochs on LSTM Model Performance: A Study of Chlorophyll-a Concentrations in the Marmara Sea,"Journal of Supercomputing, vol. 81, p. 265, 2025. https://doi.org/10.1007/s11227-024-06806-2

[4] S. S. Gharehveran, K. Shirini, S. C. Khavar,et al., "Deep Learning-based Demand Response for Short-term Operation of Renewable-based Microgrids,"Journal of Supercomputing, vol. 80, pp. 26002–26035, 2024. https://doi.org/10.1007/s11227-024-06407-z

[5] K. Shirini, H. S. Aghdasi, and S. Saeedvand, "Multi-objective Aircraft Landing Problem: A Multi-population Solution Based on Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II,"Journal of Supercomputing, vol. 80, pp. 25283–25314, 2024. https://doi.org/10.1007/s11227-024-06385-2

[6] K. Shirini, H. S. Aghdasi, and S. Saeedvand, "A Comprehensive Survey on Multiple-runway Aircraft Landing Optimization Problem,"International Journal of Aeronautical and Space Sciences, vol. 25, no. 4, pp. 1574–1602, 2024. https://doi.org/10.1007/s42405-024-00747-z

[7] Taherihajivand, A. , Shirini, K. and Samadi Gharehveran, S. (2024). An Overview of Product Performance Prediction Using Artificial Algorithms. Journal of Agricultural Mechanization, 9(3), 1-14. doi: 10.22034/jam.2024.61899.1276

[8] Samadi Gharehveran, S., N. Najafpour, and K. Shirini, "A Hybrid Approach for Vehicle Detection and Tracking in Low-Visibility Conditions Based on AWBLP, YOLOv8, and GM-PHD Algorithms," Journal of Machine Vision and Image Processing, pp. 1–11, 2025 (In Persian).

[9] B. Scrosati, J. Hassoun, Y. K. Sun, "Lithium-ion batteries. A look into the future", Energy & Environmental Science, Vol. 4, No. 9, pp. 3287-3295, 2011. https://doi.org/10.1039/C1EE01388B

[10] M. C. Smart, B. V. Ratnakumar, L. D. Whitcanack, F. J. Puglia, S. Santee, R. Gitzendanner, "Life Verification of Large Capacity Yardney Li-ion Cells and Batteries in Support of NASA Missions", International Journal of Energy Research, Vol. 34, No. 2, pp. 116-132, 2010. https://doi.org/10.1002/er.1653

[11] K. Shirini, H. S. Aghdasi, and S. Saeedvand, "Modified Imperialist Competitive Algorithm for Aircraft Landing scheduling problem," Journal of Supercomputing, vol. 80, pp. 13782–13812, 2024. https://doi.org/10.1007/s11227-024-05999-w

[12] H. Zaki Dizaji, K. Shirini, A. Taheri Hajivand, and N. Monjezi, "Modelling Variables Affecting the Yield of Sugarcane Fields Using Deep Recurrent Neural Network,"Iranian Journal of Biosystems Engineering, vol. 55, no. 2, pp. 93–108, 2024. doi: 10.22059/ijbse.2025.378958.665557

[13] K. Shirini and S. Samadi Gharehveran, "Balancing

[23] Y. Gheibi, K. Shirini, S. N. Razavi,et al., “CNN-Res: Deep Learning Framework for Segmentation of Acute Ischemic Stroke Lesions on Multimodal MRI Images,”BMC Medical Informatics and Decision Making, vol. 23, p. 192, 2023. https://doi.org/10.1186/s12911-023-02289-y

[24] K. Shirini, A. Taheri Hajivand, and S. Samadi Gharehveran, “A Review of Algorithms for Solving the Project Scheduling Problem with Resource-constrained Considering Agricultural Problems,”Journal of Agricultural Mechanization, vol. 8, no. 1, pp. 1–14, 2023. doi: 10.22034/jam.2023.55751.1227

[25] S. F. da Silva, J. J. Eckert, F. L. Silva, L. C. Silva, F. G. Dedini, "Multi-objective Optimization Design and Control of Plug-in Hybrid Electric Vehicle Powertrain for Minimization of Energy Consumption, Exhaust Emissions and Battery Degradation," Energy Conversion and Management, vol. 234, pp. 113909, 2021. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113909

[26] Gholinavaz, S., N. Saeedi, and S. S. Gharehveran, “Robustness Analysis of YOLO and Faster R-CNN for Object Detection in Realistic Weather Scenarios with Noise Augmentation,” Scientific Reports, vol. 15, p. 44888, 2025. https://doi.org/10.1038/s41598-025-28737-5

[27] S. F. da Silva, J. J. Eckert, F. L. Silva, L. C. Silva, and F. G. Dedini, "Multi-objective Optimization Design and Control of Plug-in Hybrid Electric Vehicle Powertrain for Minimization of Energy Consumption, Exhaust Emissions, and Battery Degradation," Energy Conversion and Management, vol. 234, pp. 113909, 2021. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113909

[28] S. S. Gharehveran, K. Shirini, and A. Abdolahi, “Optimizing Energy Storage Solutions for Grid Resilience: A Comprehensive Overview,” 2025. https://doi.org/ 10.5772/intechopen.1006499

[29] Deb, K.; Jain, H. “An Evolutionary Many-objective Optimization Algorithm Using Reference-point-based Nondominated Sorting approach, Part I: Solving Problems with Box Constraints”: IEEE transactions on evolutionary computation, Vol. 18(4), pp. 577-601, 2023. doi: 10.1109/TEVC.2013.2281535