

Multi-objective mathematical modeling for selection of appropriate research and development in battery auto industry



- **Masoud Latifian** 
Department of Technology Management, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
- **Reza Tavakkoli-Moghaddam**⁺ 
School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran
- **Amir Hossein Latifian** 
Department of Technology Management, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
- **Mahdi Kashani** 
Department of Industrial Management, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Receive date: 23 October 2023, Revise date: 26 April 2025, & Accept date: 03 May 2025

[10.22034/jtd.2025.2014220.1898](https://doi.org/10.22034/jtd.2025.2014220.1898) 

Abstract

One of the problems of domestic manufacturing companies in the battery industry is the lack of research and development (R&D) models to improve technology. The purpose of this research is to present two stages for the development of a mathematical programming model in the automotive industry. At first, R&D models are weighted using the sequential priority method, and then a three-objective mathematical model is used to allocate R&D models to industrial units (car battery manufacturing companies) taking into account the goals. Profit, risk and energy consumption are developed. Finally, in order to solve the model, the enhanced epsilon-constraint method is used and to compare the results of the model, the non-dominated sorted genetic algorithm (NSGA-II) is used. In general, the results of the model analysis show the high validity of the hybrid approach used in the evaluation of the proposed research and development model in car battery manufacturing companies. Finally, in order to solve the model, the enhanced epsilon-constraint method is used and to compare the results of the model, the non-dominated sorted genetic algorithm (NSGA-II) is used. In general, the results of the model analysis show the high validity of the hybrid approach used in the evaluation of the proposed research and development model in car battery manufacturing companies.

Keywords:

Research and development model, Sequential priority method, Multi-objective mathematical optimization, genetic algorithm of non-dominant ranking, Battery industries.

* Corresponding Author

+ Email: tavakoli@ut.ac.ir

| | | | |
|----|-----------------------------|------------------------------|---|
| ۶۹ | شماره شصت و دو، زمستان ۱۴۰۴ | فصلنامه توسعه تکنولوژی صنعتی | https://jtd.iranjournals.ir/ |
|----|-----------------------------|------------------------------|---|

How to cite: Latifian, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Latifian, A. H., Kashani, M. (2026), Multi-objective mathematical modeling for selection of appropriate research and development in battery auto industry, Quarterly journal of Industrial Technology Development, 23(62), 69-84.



مدل برنامه‌ریزی ریاضی چند هدفه برای انتخاب تحقیق و توسعه مناسب در صنعت باتری‌سازی

خودرو

- مسعود لطیفیان^۱ 
دکتری مدیریت تکنولوژی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه
آزاد اسلامی، تهران، ایران
- رضا توکلی مقدم⁺ 
استاد دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه
تهران، تهران، ایران
- امیرحسین لطیفیان^۲ 
دکتری مدیریت انتقال تکنولوژی، واحد تهران مرکزی،
دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
- مهدی کاشانی^۳ 
کارشناس ارشد مدیریت صنعتی، واحد علوم و تحقیقات،
دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران



تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۸/۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۲/۶ و تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۲/۱۳
صفحات: ۸۴-۶۹

[10.22034/jtd.2025.2014220.1898](https://doi.org/10.22034/jtd.2025.2014220.1898) 

چکیده

یکی از مشکلات شرکت‌های تولیدکننده داخلی در صنایع باتری‌سازی، استفاده نکردن از مدل‌های تحقیق و توسعه برای بهبود فناوری است. هدف از این پژوهش ارائه رویکردی دو مرحله‌ای جهت توسعه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی در صنایع باتری‌سازی خودرو است. در ابتدا مدل‌های تحقیق و توسعه با استفاده از روش اولویت‌ترتیبی، وزن‌دهی می‌شوند. در ادامه نیز یک مدل ریاضی سه هدفه جهت تخصیص مدل‌های تحقیق و توسعه به واحدهای صنعتی (شرکت‌های تولیدکننده باتری خودرو) با در نظر گرفتن اهداف سود، ریسک و میزان مصرف انرژی توسعه داده شده است. در نهایت، نیز به منظور حل مدل از روش محدودیت-اپسیلون تقویت شده و جهت مقایسه نتایج مدل نیز از الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II) استفاده گردید. به طور کلی نتایج تجزیه و تحلیل مدل نشان از اعتبار بالای رویکرد ترکیبی استفاده شده در ارزیابی مدل تحقیق و توسعه پیشنهادی در شرکت‌های تولیدکننده باتری خودرو را دارد.

واژگان کلیدی: مدل تحقیق و توسعه، روش اولویت‌ترتیبی، بهینه‌سازی ریاضی چندهدفه، الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب، صنایع باتری‌سازی.

۱ آدرس پست الکترونیکی: latifian.masoud@gmail.com

* عهده دار مکاتبات

+ آدرس پست الکترونیکی: tavakoli@ut.ac.ir

۲ آدرس پست الکترونیکی: latifianamirhossein@gmail.com

۳ آدرس پست الکترونیکی: mahdikashani@yahoo.com

<https://jtd.iranjournals.ir/>

فصلنامه توسعه تکنولوژی صنعتی | شماره شصت و دو، زمستان ۱۴۰۴ | ۶۹

نحوه استناددهی به این مقاله: لطیفیان، مسعود، توکلی مقدم، رضا، لطیفیان، امیرحسین، کاشانی، مهدی. (۱۴۰۴). مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه برای انتخاب تحقیق و توسعه



مناسب در صنعت باتری‌سازی خودرو، فصلنامه توسعه تکنولوژی صنعتی، (۶۲)، ۲۳، ۸۴-۶۹

ناشر: پژوهشکده توسعه تکنولوژی

۱- مقدمه

امروزه شرکت‌های صنعتی به دنبال اتخاذ راهبردهایی هستند که در آن فناوری‌های جدید نقش عمده‌ای در پایداری و رشد صنعت ایفا می‌کنند. رکورد رشد به‌عنوان مهم‌ترین معیار برای موفقیت بلندمدت در اقتصاد، مستلزم نوآوری مستمر در طیف وسیعی از محصولات و خدمات و همچنین روش‌های پیشرفته فرآیند تولید و تحویل است (Aliu Mulaj & Dedaj, 2023).

در دهه‌های اخیر، نقش دانش در اقتصادهای صنعتی بیشتر شده و از این رو اقتصادهای صنعتی، اقتصادهای دانش بنیان نام گرفتند؛ زیرا که تداوم رشد این اقتصادها، منوط به شتاب بخشیدن به تحولات فناوری و نوآوری است. از این رو تحقیق و توسعه از مقولات مهم اقتصاد دانش بنیان تلقی می‌شود که بخشی از عوامل تحول فناوری را توضیح می‌دهد (Azoulay et al., 2019). از طرفی نیز بسیاری از محققان تحقیق و توسعه را به‌عنوان یک عامل مهم در حمایت از رقابت‌پذیری شرکت و همچنین تأثیر آن بر رقابت‌پذیری کشور گزارش کرده‌اند (Kayserili & Kiyak, 2019). به‌طور کلی در کشورهای صنعتی حمایت‌های مالی دولت بسیار رایج است. در واقع اعتقاد بر این است که کمک‌های دولتی منجر به سرمایه‌گذاری خصوصی اضافی می‌گردد (Carboni, 2017). فعالیت‌های تحقیق و توسعه به‌عنوان عوامل تعیین‌کننده بهره‌وری، رشد و رقابت شرکت‌ها در نظر گرفته می‌شوند (Salimi & Rezaei, 2017).

از طرفی دیگر، برون‌سپاری تحقیق و توسعه، باعث افزایش دانش سازمان‌ها می‌شود. این بدان معنی است که نه تنها آنچه این دسته از سازمان‌ها می‌توانند انجام دهند (شایستگی‌ها) بهبود می‌یابد، بلکه کارهایی که باید از آن‌ها دوری کنند (هزینه‌ها) نیز برای سازمان‌ها شفاف می‌گردد (Latifian et al., 2022). به‌طور کلی در شرکت‌ها، تحقیق و توسعه شامل فعالیت‌ها و منابع مختلفی است. برخی از آن‌ها شامل تحقیقات بنیادی، تحقیقات کاربردی، توسعه و برخی فعالیت‌های حمایتی مانند هوش فناوری، پیش‌بینی فناوری و تجزیه و تحلیل بازار هستند (Lazarrotti et al., 2011). اهمیت فعالیت‌های تحقیق و توسعه اندازه‌گیری عملکرد تحقیق و توسعه را به نگرانی اصلی شرکت‌ها تبدیل می‌کند (Kerssens-van Drongelen & Bilderbeek, 1999). از آن جا که پیچیدگی و تنوع دانش فنی و علمی، فعالیت‌های تحقیق و توسعه را پرهزینه و پرمخاطره کرده است، اندازه‌گیری عملکرد تحقیق و توسعه برای شرکت‌ها به موضوعی مهم تبدیل شده است (Moncada-Paternò-Castello

et al., 2010). به‌طور کلی، مدیران تحقیق و توسعه دلایل متعددی برای اندازه‌گیری عملکرد تحقیق و توسعه دارند: (۱) بازار پویاتر می‌شود، نیازهای مشتریان به سرعت تغییر می‌کند و تعداد رقبا ر حال افزایش است؛ (۲) دانش بسیار سریع تولید و بنابراین تنوع محصولات و خدمات بیشتر می‌شود؛ (۳) پیچیدگی دانش موجود در محصولات و خدمات در حال افزایش است (Lazarrotti et al., 2011).

بیش از ۲۰۰ سال از اختراع اولین باتری با جنس مس-روی در سال ۱۷۹۹ می‌گذرد. از زمان تجاری‌سازی اولیه باتری‌های لیتیوم در سال ۱۹۹۱، آن‌ها به سرعت بر بازار اصلی تسلط یافتند و به بخشی جدایی‌ناپذیر از جامعه مدرن تبدیل شدند و زندگی ما را به شدت تحت تأثیر قرار دادند. اگر چه باتری‌های لیتیوم موفقیت فوق‌العاده‌ای را تجربه کرده‌اند، نیاز به انرژی و چگالی توان بالاتر برای تقویت انتقال از وسایل نقلیه موتور احتراقی به حمل و نقل کاملاً الکتریکی هنوز ادامه دارد (Tidd, & Bessant, 2020). باتری جزء اصلی خودرو است و فناوری تحقیق و توسعه آن در دست تأمین‌کنندگان باتری است. بسیاری از تولیدکنندگان خودروها در زمینه باتری با سه حالت مواجه شده‌اند: (۱) سرمایه‌گذاری مشترک با تأمین‌کنندگان باتری برای ساخت کارخانه؛ (۲) توسعه باتری‌ها توسط خود تولیدکنندگان؛ (۳) بدست آوردن تأمین‌کنندگان باتری. از طرفی، بسیاری از تولیدکنندگان خودروها، سرمایه‌گذاری مشترک را به‌عنوان مدل تحقیق و توسعه انتخاب می‌کنند. به‌عنوان مثال، شرکت‌های Saic Volkswagen، Gac Motor و Geely Auto به ترتیب از سال ۲۰۱۷ سرمایه‌گذاری مشترکی با شرکت باتری‌سازی Calt ایجاد کرده‌اند. از این رو، در این پژوهش ضرورت ایجاد می‌کند تا به بررسی مدل‌های تحقیق و توسعه در صنایع باتری‌سازی خودرو در کشور پرداخته شود (Lu et al., 2019).

با توجه به سادگی و کم هزینه بودن مدل‌های ریاضی و امکان تحلیل سریع آنها مدل‌های ریاضی در علم مدیریت اهمیت بسزایی دارد. عناصر اصلی یک مدل ریاضی شامل متغیرهای تصمیم‌گیری، محدودیت‌ها و تابع هدف است. مدل ریاضی بیان مهم‌ترین ویژگی‌های یک سیستم واقعی به وسیله تجربه ریاضی است. به‌عبارت دیگر، مدل ریاضی نمایش ساده و کلی جهان عینی است. از دیدگاه مشخصه علم مدیریت، استفاده از مدل‌های ریاضی در ارائه رهنمودهایی جهت تصمیم‌گیری صحیح به مدیران است. به تعبیری می‌توان گفت مدل‌سازی ریاضی بر ارزش علم مدیریت افزوده است و شیوه‌های گوناگون مدل‌سازی هر کدام عوامل عناوین برجسته‌ای از مجموعه مباحث مهم علم

مرزهای شناخت علمی و گنجینه دانش انسان و جامعه انسانی و کاربرد این دانش در عرصه‌های گوناگون برای بهبود زندگی انسان و به‌طور خلاصه در جهت نوآوری و ایجاد فرآورده‌ها، فرایندها، وسایل، ابزارها، نظام‌ها، خدمات و روش‌های جدید صورت پذیرد، اطلاق می‌شود (Ke & Chen, 2022). امروزه فعالیت‌های تحقیق و توسعه محرک و عامل اصلی توسعه صنعتی و اقتصادی کلیه بنگاه‌ها شناخته شده‌اند و یکی از عوامل مهم در تقویت توان فناورانه و رشد اقتصادی کشورهاست. روش‌ها و مکانیسم‌های مختلفی برای توسعه فناوری از طریق تحقیق و توسعه، مانند تحقیق و توسعه داخلی، تحقیق و توسعه مشترک، قرارداد تحقیق و توسعه و برون سپاری تحقیق و توسعه وجود دارد (Lukach et al., 2007). واحدهای وظیفه‌ای، همانند واحدهای تحقیق و توسعه نیاز به راهبرد ویژه جهت پیشبرد اهداف و وظایف واحد خود را دارند. این راهبردها باید هماهنگ و همگام با راهبردهای شرکت طراحی شوند.

۲-۲- مرور ادبیات پژوهش

همان‌طور که از مرور ادبیات تحقیق مشاهده می‌شود، بیشتر تحقیقات در زمینه بررسی مدل‌های (متدهای) تحقیق و توسعه از تحلیل آماری و تئوری تصمیم استفاده کرده‌اند و مدل‌های ریاضی پیشنهادی توسط محققین بیشتر در حوزه بررسی کارایی مدل‌های تحقیق و توسعه با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها بوده‌اند. از این رو، به‌منظور پوشش شکاف تحقیق در این پژوهش یک مدل ریاضی سه هدفه جهت تخصیص مدل‌های تحقیق و توسعه به واحدهای صنعتی (شرکت‌های تولیدکننده باتری خودرو) با در نظر گرفتن اهداف سود، ریسک و میزان مصرفی انرژی پیشنهاد شده است. به‌منظور حل مدل نیز از الگوریتم‌های محدودیت-اپسیلون تقویت شده و ژنتیک چند هدفه استفاده شده است. در ادامه در جدول شماره ۱ خلاصه بررسی پژوهش‌های پیشین مرتبط با موضوع تحقیق پیشنهادی در سال‌های اخیر از منظر نوع مسئله، روش حل‌های استفاده شده اشاره شده است.

مدیریت را به خود اختصاص داده‌اند. مدل‌های ریاضی می‌توانند نتایج گزینه‌ها و راهبردهای گوناگون را مشخص کنند. به این ترتیب با مقایسه نتایج می‌توان بهترین راهبرد و راه‌حل را انتخاب کرد. اگر پارامترها و متغیرهای مدل را براساس سیاست‌های مختلف تغییر دهیم، می‌توان تاثیر سیاست‌ها در وضعیت سیستم را همانگونه که مدل نمایش می‌دهد، مشاهده نمود. کاربرد مدل در تصمیم‌گیری تلاشی است به‌منظور ایجاد روشی سیستماتیک برای یاری رساندن به تصمیم‌گیرنده در انتخاب یک گزینه مناسب از طریق مقایسه پیامدهای راهبردهای گوناگون (کاظمی، ۱۳۷۴).

بنابراین هدف از این پژوهش ارائه رویکردی دو مرحله‌ای جهت تخصیص مدل‌های تحقیق و توسعه در باتری‌سازی است. در مرحله اول ضریب اهمیت مدل‌های تحقیق و توسعه با به‌کارگیری از روش اولویت‌ترتیبی نتیجه محاسبه می‌شوند. سپس یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی سه هدفه با در نظر گرفتن اهداف پیشینه‌سازی سود، کمینه‌سازی ریسک و کمینه‌سازی میزان مصرفی انرژی توسعه داده می‌شود. در نهایت، به دلیل چند هدفه بودن مدل پیشنهادی از رویکرد محدودیت-اپسیلون تقویت شده^۴ و الگوریتم ژنتیک رتبه بندی نامغلوب^۵ (NSGA-II) جهت حل مدل ریاضی و مقایسه نتایج بهره گرفته خواهد شد. در ادامه ساختار پژوهش به شرح زیر تقسیم‌بندی شده است. بخش دوم به مرور ادبیات پژوهش می‌پردازد، بخش سوم رویکرد دو مرحله‌ای پیشنهادی پژوهش را شرح می‌دهد، بخش چهارم به بحث در مورد نتایج محاسبات می‌پردازد. در نهایت در بخش پنجم نیز نتیجه‌گیری کلی و برخی پیشنهادها برای تحقیق‌های آینده ارائه می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

در این بخش به بررسی مبانی نظری و پیشینه پژوهش پرداخته می‌شود.

۲-۱- تحقیق و توسعه

تحقیق و توسعه، به مجموع فعالیت‌های بدیع، خلاق، نوآورانه، نظام یافته و برنامه‌ریزی شده‌ای که به‌طور کلی با هدف گسترش

— هر مدل در مدل یک ضریب اهمیت دارد که مقدار آن عددی مشخص بین صفر و یک است که از طریق به کارگیری از روش اولویت ترتیبی نتیجه می‌گردد.

نگاه کلی‌تر به این مسئله این است که براساس تعداد شهرک‌های صنعتی مدل‌ها تخصیص یابد و سپس با نگاه جزئی‌تر به مسئله برای کارخانه‌ها و واحدهای صنعتی در نظر گرفته شود. در تحقیق پیش‌رو به دلیل حل مسئله در دنیای واقعی نگاه جزئی‌تری به مسئله اتخاذ شده است. در ادامه به معرفی اجزای مدل ریاضی بیان شده پرداخته شده است:

مجموعه‌ها

مجموعه مدل‌های تحقیق و توسعه
 $m = \{1, 2, \dots, p\}$ موجود و قابل استفاده در کارخانه‌ها (واحدهای صنعتی)
 مجموعه تولیدکننده‌های باتری
 $n = \{1, 2, \dots, q\}$ (کارخانه‌ها یا واحدهای صنعتی)

پارامترها

V_m ضریب اهمیت مدل m ام.
 W_{mn} سرمایه مورد نیاز جهت انتخاب (به کارگیری مدل) m ام در تولید کننده n
 L_{mn} میزان فروش انتظاری از طریق ارائه محصول جدید توسط به کارگیری و اجرای مدل m ام در تولید کننده n
 R_{mn} عدد اولویت ریسک (RPN) ناشی از عدم رضایت مشتری از طریق اجرای مدل m ام برای تولید کننده n ام (ریسک از دست دادن مشتری) برای توسعه محصول جدید
 $Prob_{mn}$ احتمال وقوع رخداد ریسک ناشی از عدم رضایت مشتری از طریق اجرای مدل m ام برای تولید کننده n ام (ریسک از دست دادن مشتری)
 D_n تعداد مدل‌های مجاز جهت تخصیص به تولید کننده n ام
 B_n میزان بودجه در دسترس تولید کننده n ام برای اجرای مدل‌های تحقیق و توسعه مختلف
 C_{mn} ضریب مصرف انرژی برای میانگین مصرف انرژی برای اجرای مدل m ام در کارخانه n ام با توجه کارایی و خروجی مدل m ام در کارخانه n ام.
 K_n حداکثر میزان میانگین مصرف انرژی در کارخانه n ام.
 Q_{mn} میزان مشوق مالی تخصیص یافته توسط سازمان شهرک‌های صنعتی به اجرای مدل m ام در کارخانه n ام.
 P_n میزان مشوق مالی در دسترس برای سازمان شهرک‌های صنعتی برای کارخانه n ام با توجه به سهمیه سالانه

متغیرهای تصمیم

برابر ۱ است اگر مدل m ام به تولید کننده n ام تخصیص یابد و در غیر این صورت برابر ۰ است.
 x_{mn}
 برابر ۱ است اگر ارائه مشوق مالی ارائه شده توسط سازمان شرکت‌های صنعتی به اجرای مدل m ام در کارخانه n ام تخصیص یابد، در غیر این صورت برابر ۰ است.
 I_{mn}

به‌طور کلی مدل ریاضی خطی روش اولویت ترتیبی جهت تعیین ضرایب وزنی مدل‌های تحقیق و توسعه در صنعت باتری سازی به شرح زیر بیان می‌گردد:

$$\begin{aligned} & \text{Max } Z \\ & \text{s.t.} \\ & Z \leq i(j(W_{ij}^r - W_{ij}^{r+1})) \quad \forall i, j \text{ and } r \\ & Z \leq ij m W_{ij}^m \quad \forall i, j \\ & \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^n W_{ij} = 1 \\ & W_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \end{aligned} \quad (1)$$

به‌طوری که W_{ij}^r بیانگر وزن شاخص j ام توسط شخص خبره i ام در رتبه r ام است. در نهایت نیز وزن مدل‌های تحقیق و توسعه از طریق رابطه ۲ تعیین می‌شود:

$$W_j = \sum_{i=1}^p W_{ij} \quad \forall j \quad (2)$$

۴-۲- مدل ریاضی پیشنهادی

در این بخش یک مدل ریاضی سه هدفه جهت تخصیص مدل‌های تحقیق و توسعه به واحدهای صنعتی (شرکت‌های تولیدکننده باتری خودرو) با در نظر گرفتن اهداف سود، ریسک و میزان مصرفی انرژی پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی بر مبنای توسعه مدل ارائه شده در پژوهش لطیفیان و همکاران (Latifian et al., 2022) است. برای مدل‌سازی مسئله موردنظر، همچون سایر مدل‌های ریاضی نیاز به در نظر گرفتن فرضیاتی است. مفروضات به کار گرفته شده در این پژوهش به شرح زیر است:

- تعداد مدل‌های تحقیق و توسعه مشخص و محدود است؛
- تعداد کارخانه‌های تولیدکننده باتری مشخص و محدود است؛
- هزینه پیاده‌سازی هر یک از مدل‌ها، درجه رضایت‌مندی مشتریان از هر مدل و کل بودجه در نظر گرفته شده برای مدل‌ها مقادیری متفاوت و مشخص است؛
- ارائه مشوق‌های مالی توسط سازمان شرکت شهرک‌های صنعتی برای به کارگیری و اجرای مدل‌های تحقیق و توسعه؛
- امکان انتخاب چند مدل برای هر تولیدکننده وجود دارد؛
- مقادیر مربوط به پارامترهای مدل قطعی است؛
- برای اجرا و به کارگیری هر یک از مدل‌ها در کارخانه‌ها و واحدهای صنعتی ضریب مصرف انرژی در نظر گرفته شده است.

مدل ریاضی

سازمان‌های مرتبط تجاوز نکند. محدودیت ۱۰ بیانگر این مورد است که میزان مشوق مالی تخصیص یافته به کارخانه‌ها براساس مدل‌های مورد استفاده توسط شرکت شهرک‌های صنعتی از سقف تعیین شده تجاوز نکند. محدودیت ۱۱ بیانگر این مورد است که به کارخانه‌هایی که برای استفاده از مدل موردنظر انتخاب می‌شوند، مشوق مالی تخصیص یابد. محدودیت ۱۲ بیانگر نوع متغیرهای مورد استفاده است که هر دو متغیر از نوع باینری (صفر و یک) هستند.

شهرک‌های صنعتی و کارخانه‌های صنعتی بدنه اصلی و مهم فعالیت‌های نوآورانه و فعالیت‌های علمی و ملی هستند. ظرفیت خروجی بهبود روش‌های تحقیق و توسعه، نقش کلیدی در تعیین تقویت توانایی‌های ملی را دارد. فرآیند تحقیق و توسعه یک فرآیند ورودی و خروجی است که نتایج آن شکل‌های مختلفی دارد. استفاده از مدل چندهدفه برای بهینه‌سازی مسئله سرمایه‌گذاری تحقیق و توسعه می‌تواند به‌طور پیش‌گویانه‌ای برای بهینه‌سازی مسئله سرمایه‌گذاری نسبت به بهبود تحقیق و توسعه در آینده مورد استفاده قرار بگیرد (Song et al., 2021). در مدل ارائه شده با رویکردی چند هدفه و با در نظر گرفتن ابعاد مختلف مسئله تخصیص بهینه سرمایه‌گذاری بر روی روش‌های تحقیق و توسعه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. برای حل مدل ارائه شده از دو روش مدل محدودیت-اپسیلون تقویت شده و الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II) استفاده شده است که در ادامه به بیان توضیحات تکمیلی در مورد این روش‌ها پرداخته شده است.

۳-۴- رویکرد حل مدل پیشنهادی

در این بخش گام‌های مربوط به روش‌های حل مدل پیشنهادی ارائه شده است.

۳-۴-۱- روش محدودیت-اپسیلون تقویت شده

روش محدودیت-اپسیلون تقویت شده یکی از رویکردهای شناخته شده برای مواجهه با مسائل چندهدفه است که با انتقال تمامی توابع هدف به جز یکی از آن‌ها در هر مرحله به محدودیت، به حل این نوع مسائل می‌پردازد (Yuan et al., 2022; Mavrotas, 2013; Florios, 2013). مسئله زیر را در نظر بگیرید:

$$\begin{aligned} \max & (f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)) \\ \text{s.t} & \\ & x \in S \end{aligned} \quad (13)$$

که در آن x بردار متغیرهای تصمیم و $f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)$ توابع هدف و S ناحیه شدنی است. در روش محدودیت-اپسیلون تقویت شده یکی از توابع هدف برای بهینه‌سازی انتخاب می‌شود

$$\text{Max} Z_1 = \sum_{m=1}^p \sum_{n=1}^q V_m L_{mn} x_{mn} + \sum_{m=1}^p \sum_{n=1}^q I_{mn} Q_{mn} \quad (3)$$

$$\text{Min} Z_2 = \sum_{m=1}^p \sum_{n=1}^q R_{mn} x_{mn} \quad (4)$$

$$\text{Min} Z_3 = \sum_{m=1}^p \sum_{n=1}^q C_{mn} x_{mn} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t.} \\ \sum_{m=1}^p W_{mn} x_{mn} & \leq B_n \quad \forall n \quad (6) \end{aligned}$$

$$\sum_{m=1}^p x_{mn} \leq D_n \quad \forall n \quad (7)$$

$$\sum_{m=1}^p x_{mn} \geq 1 \quad \forall n \quad (8)$$

$$\sum_{m=1}^p C_{mn} x_{mn} \leq K_n \quad \forall n \quad (9)$$

$$\sum_{m=1}^p Q_{mn} I_{mn} \leq P_n \quad \forall n \quad (10)$$

$$I_{mn} \leq x_{mn} \quad \forall m, n \quad (11)$$

$$x_{mn} \text{ and } I_{mn} \in \{0,1\} \quad \forall m, n \quad (12)$$

مدل ارائه شده دارای سه تابع هدف است که در ادامه به توضیح آن‌ها پرداخته می‌شود. تابع هدف یک (معادله ۳) به بیشینه‌سازی میزان فروش انتظاری محصول جدید از طریق به‌کارگیری مدل‌های تحقیق و توسعه در تولیدکنندگان باتری می‌پردازد. همچنین میزان مشوق دریافتی از طرف شرکت شهرک‌های صنعتی نیز حداکثر می‌شود. تابع هدف دوم (معادله ۴) به کمینه‌سازی ریسک از دست رفتن مشتری از طریق اجرای مدل‌های تحقیق و توسعه در کارخانه تولیدکنندگان باتری می‌پردازد. تابع هدف سوم (معادله ۵) به حداقل‌سازی میزان میانگین انرژی مصرفی در کارخانه و شهرک‌های صنعتی با توجه به، به‌کارگیری مدل موردنظر می‌پردازد.

مدل همچنین دارای هفت محدودیت است. عبارت ۶ محدودیت مربوط به بودجه را برآورده می‌کند. عبارت ۷ تضمین می‌کند که تعداد مدل‌های تخصیص یافته به هر تولیدکننده از حد مجاز تجاوز نکند. محدودیت ۸ تضمین می‌کند که به هر تولیدکننده حداقل یک مدل تخصیص یابد. محدودیت ۹ بیان می‌کند میزان مصرف انرژی به سبب به‌کارگیری مدل‌های تحقیق و توسعه در کارخانه‌ها از میزان حد مجاز تعیین شده توسط

تعداد کل اجزا $(q_1 + 1) \times (q_2 + 1) \times \dots \times (q_p + 1)$ و r_k دامنه تابع هدف است.

ما برای هر تابع هدف، $p \dots 2$ محدوده تابع هدف را محاسبه می‌کنیم. سپس محدوده k امین تابع هدف را بر فاصله‌های مساوی q_k تقسیم می‌کنیم. r_k محدوده تابع هدف k ام $(k = 2, \dots, p)$ می‌شود. گام گسسته‌سازی برای این تابع هدف این گونه تعریف می‌شود:

$$step_k = r_k / q_k \quad (17)$$

مقادیر سمت راست برای محدودیت متناظر در t امین تکرار در تابع هدف مشخص این گونه است:

$$e_{kt} = fmin_k + t \times step_k \quad (18)$$

$fmin_k$ حداقل تابع و t شمارنده تابع هدف خاص است. پس از بهینه‌سازی، متغیر مازاد بدست می‌آید و ضریب گذر^۲ به صورت $b = int(s_2 / step_2)$ محاسبه می‌شود که $int()$ تابع جزء صحیح است. هنگامی که متغیر مازاد s_2 از $step_2$ بزرگ‌تر باشد، تکرار بعدی همان نتیجه را می‌دهد با این تفاوت که متغیر مازاد مقدار $s_2 - step_2$ را به خود می‌گیرد که منجر به زائد بودن تکرار می‌شود؛ به این ترتیب، ضریب گذر نشان می‌دهد که چگونه می‌توان بسیاری از تکرارهای متوالی را نادیده گرفت.

در مسئله پیشنهادی این پژوهش، با توجه به اهمیت بعد اقتصادی از دیدگاه صاحبان صنایع، هدف اول به عنوان هدف اصلی و دو هدف دیگر به عنوان اهداف فرعی مورد بررسی قرار می‌گیرند. بنابراین بنا بر روش محدودیت-اپسیلون تقویت شده، فرمولاسیون اهداف مسئله پیشنهادی به صورت زیر است:

$$Max Obj1 \quad (19)$$

$$\begin{aligned} Obj2 &\leq \varepsilon_2 \\ Obj3 &\leq \varepsilon_3 \end{aligned} \quad (20)$$

رابطه اول بیانگر تابع هدف اصلی مسئله و دو رابطه بعدی به مجموعه محدودیت‌های مسئله افزوده می‌شود.

۴-۳-۲- الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب

الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II) یکی از پرکاربردترین و قدرتمندترین الگوریتم‌های موجود برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است و کارایی آن در حل مسائل مختلف، به اثبات رسیده است. نسخه دوم الگوریتم ژنتیک چندهدفه را که در آن، علاوه بر کیفیت جواب‌ها، تنوع و گوناگونی جواب‌های بهینه پارتویی مدنظر قرار داده بودند برای رفع نواقص نسخه اولیه توسعه دادند (Deb & Jain, 2012).

و سایر توابع هدف تبدیل به محدودیت با یک حد بالای ε می‌شوند. مانند:

$$\begin{aligned} &max f_1(x) \\ &s.t \\ &f_2(x) \geq e_2 \\ &f_3(x) \geq e_3 \\ &\dots \\ &f_p(x) \geq e_p \\ &x \in S \end{aligned} \quad (14)$$

در واقع در روش محدودیت-اپسیلون تقویت شده مسئله به این صورت بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} &max \left(f_1(x) + eps \times \left(\frac{s_2}{r_2} + \frac{s_3}{r_3} + \dots + \frac{s_p}{r_p} \right) \right) \\ &s.t. \\ &f_2(x) - s_2 = e_2 \\ &f_3(x) - s_3 = e_3 \\ &\dots \\ &f_p(x) - s_p = e_p \\ &x \in S \\ &s_i \in R \end{aligned} \quad (15)$$

که e_2, e_3, \dots, e_p پارامترهای مقادیر سمت راست و r_2, r_3, \dots, r_p محدوده توابع هدف هستند. s_2, s_3, \dots, s_p متغیرهای کمکی محدودیت‌ها است و اپسیلون می‌تواند بین 10^{-6} و 10^{-3} باشد. اما با توسعه‌ای در روش محدودیت-اپسیلون تقویت شده، تابع هدف این گونه تغییر می‌کند:

$$\begin{aligned} &max \left(f_1(x) + eps \times \left(\frac{s_2}{r_2} + 10^{-1} \times \frac{s_3}{r_3} + \dots \right. \right. \\ &\left. \left. + 10^{-(p-2)} \times \frac{s_p}{r_p} \right) \right) \end{aligned} \quad (16)$$

این تغییرات اعمال می‌شود تا یک نوع از بهینه‌سازی لکسیکوگراف بر روی بقیه توابع هدف صورت پذیرد، که شاید بهینه‌های دیگری وجود داشته باشند. برای مثال، با این فرمول، حل کننده جواب بهینه را برای f_1 پیدا می‌کند و سپس تلاش می‌کند که f_2 و سپس f_3 و ... را بهینه کند. اما با روش فرمول‌سازی قبلی ترتیب بهینه‌سازی $f_3 \dots f_2$ متفاوت بود. درحالی که با این روش توابع هدف محدود شده را مجبور به بهینه‌ترتیبی می‌کنیم.

در این روش ابتدا از جدول موازنه، دامنه تغییرات $p - 1$ تابع هدفی که در محدودیت استفاده خواهد شد، بدست می‌آید. سپس دامنه k امین تابع هدف به q_k فاصله مساوی تقسیم می‌شود و بنابراین کل نقاط شبکه^۱ $q_k + 1$ است که به منظور تغییر پارامتر مقادیر سمت راست e_p از k امین تابع هدف استفاده می‌شود.

2 Bypass Coefficient

1 Grid Points

یکپارچه (A_1) ؛ برون‌سپاری تحقیق و توسعه (A_2) ؛ تحقیق و توسعه داخلی (A_3) ؛ جذب سرمایه در تحقیق و توسعه (A_4) ؛ جذب سیاست‌های حمایتی (A_5) ؛ تحقیق و توسعه پیشرفته نیاز محور (A_6) ؛ نقشه راه تحقیق و توسعه (A_7) ؛ تحقیق و توسعه مشترک (A_8) ؛ نگاه به آینده تحقیق و توسعه (A_9) ؛ تحقیق و توسعه کامل شرکتی (A_{10}) در نظر گرفته شدند. پس از دستیابی به نظرات خبرگان در رابطه با شاخص‌ها، پارامترهای ورودی مدل روش اولویت‌ترتیبی (معادلات ۱ و ۲) در نرم‌افزار GAMS وارد گردید. پس از حل مدل مطابق با جدول شماره ۳ ضرایب وزنی مدل‌های تحقیق و توسعه جهت ورود به مدل چند هدفه پیشنهادی گزارش می‌گردد.



شکل ۳: نحوه کار الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II)

جدول ۳: ضرایب وزنی مدل‌های تحقیق و توسعه

| نماد | ضریب اهمیت |
|-----------------|------------|
| A ₁ | 0.2032 |
| A ₂ | 0.0320 |
| A ₃ | 0.0362 |
| A ₄ | 0.0630 |
| A ₅ | 0.0521 |
| A ₆ | 0.1129 |
| A ₇ | 0.0978 |
| A ₈ | 0.2281 |
| A ₉ | 0.0199 |
| A ₁₀ | 0.1542 |

۲-۵- تخصیص بهینه مدل‌های تحقیق و توسعه: حل مدل ریاضی پیشنهادی

روش کار و الگوریتم کلی NSGA-II که یکی از حالت‌های چندهدفه الگوریتم ژنتیک است، به شرح زیر است:

- ۱- ایجاد جمعیت اولیه؛
 - ۲- محاسبه معیارهای برازندگی؛
 - ۳- مرتب کردن جمعیت براساس شرط‌های غلبه کردن؛
 - ۴- محاسبه فاصله ازدحامی؛
 - ۵- انتخاب: به محض این که جمعیت اولیه براساس شرط‌های غلبه کردن مرتب شد، مقدار فاصله ازدحامی در آن محاسبه خواهد شد و انتخاب از میان جمعیت اولیه آغاز می‌شود. این انتخاب براساس دو المان صورت می‌پذیرد:
- رتبه جمعیت: جمعیت‌ها در رتبه‌های پایین‌تر انتخاب می‌شوند.
 - محاسبه فاصله: با فرض این که p و q دو عضو از یک رتبه باشند، عضوی انتخاب می‌شود که فاصله ازدحامی بیشتری دارد. گفتنی است که اولویت انتخاب، ابتدا با رتبه و سپس براساس فاصله ازدحامی است.

- ۶- انجام تقاطع و جهش برای تولید فرزندان جدید؛
- ۷- تلفیق جمعیت اولیه و جمعیت بدست آمده از تقاطع و جهش؛
- ۸- جایگزین کردن جمعیت والدین با بهترین اعضای جمعیت تلفیق شده در مراحل قبل. در مرحله نخست، اعضای رتبه‌های پایین‌تر جایگزین والد‌های قبلی می‌شوند و سپس براساس فاصله ازدحامی مرتب می‌شوند. جمعیت اولیه و جمعیت ناشی از تقاطع و جهش، ابتدا برحسب رتبه‌دسته بندی می‌شوند و قسمتی از آن‌ها که دارای رتبه پایین‌تری هستند، حذف می‌گردند. در مرحله بعد، جمعیت باقیمانده براساس فاصله ازدحامی مرتب می‌شوند. در این‌جا مرتب‌سازی داخل یک جبهه انجام می‌شود؛
- ۹- تمامی مراحل تا نسل (و یا شرایط بهینگی) مورد نظر تکرار می‌شوند.

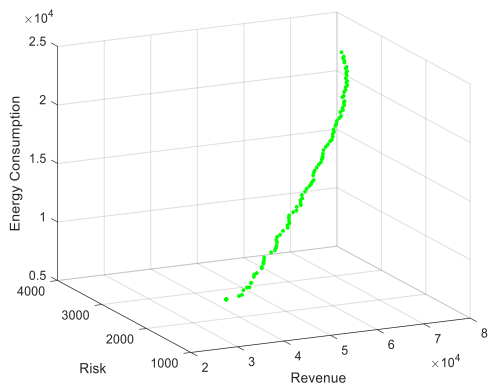
به‌طورکلی در شکل شماره ۳ نحوه کار الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II) به تصویر کشیده شده است.

۵- نتایج

در این بخش نتایج حاصل از اجرای رویکرد ترکیبی به شرح زیر گزارش شده است.

۱-۵- تعیین رتبه مدل‌های تحقیق و توسعه: روش OPA

در این بخش نظرات خبرگان در رابطه با مدل‌های تحقیق و توسعه در صنعت باتری‌سازی تعیین می‌شوند. به‌همین منظور براساس پرسشنامه مربوطه رتبه مدل‌های تحقیق و توسعه به ازای هر خبره تعیین گردید که مطابق با جدول بخش پیوست گزارش شده است. مطابق با پژوهش لطیفیان و همکاران [۲۱] ده مدل شناسایی شده تحقیق و توسعه یعنی تحقیق و توسعه کاملاً



شکل ۳: جبهه پارتو رسم شده براساس الگوریتم NSGA-II پس از حل مسئله با توجه به اطلاعات فوق، تعداد ۱۰ نقطه پارتویی تشکیل شد. البته تعداد نقاط را می توان بر حسب تعداد تکرارهای روش محدودیت-اپسیلون تقویت شده تغییر داد. در این مثال تعداد تکرارها ۱۰ در نظر گرفته شده است. با توجه به این که مسئله مورد بررسی دارای سه تابع هدف است، اطلاعات جبهه پارتویی به صورت جدول شماره ۵ برای روش محدودیت-اپسیلون تقویت شده قابل مشاهده است.

جدول ۵: مقادیر توابع هدف براساس روش محدودیت-اپسیلون تقویت شده

| ردیف | Obj1 | Obj2 | Obj3 |
|------|----------|---------|----------|
| 1 | 81341.36 | 3537.75 | 26199.00 |
| 2 | 79924.01 | 3281.99 | 24320.00 |
| 3 | 76980.57 | 3025.42 | 22676.00 |
| 4 | 72399.97 | 2801.06 | 20821.00 |
| 5 | 67611.42 | 2575.21 | 18840.00 |
| 6 | 62642.87 | 2317.01 | 17287.00 |
| 7 | 56778.78 | 2085.35 | 15693.00 |
| 8 | 50403.63 | 1829.95 | 13886.00 |
| 9 | 43924.70 | 1572.66 | 12095.00 |
| 10 | 37925.60 | 1353.09 | 10460.00 |

در ادامه تعداد تکرارهای روش محدودیت-اپسیلون تقویت شده و الگوریتم ژنتیک چندهدفه برابر با ۱۰۰ در نظر گرفته شده است که نتایج مربوط برای مسئله ای با تعداد مدل های تحقیق و توسعه برابر ۱۰ و تعداد کارخانه های (تولیدکننده باتری) برابر با ۸ در جدول شماره ۶ نمایش داده شده است.

جدول ۶: مقایسه نتایج روش محدودیت-اپسیلون تقویت شده و

الگوریتم NSGA-II

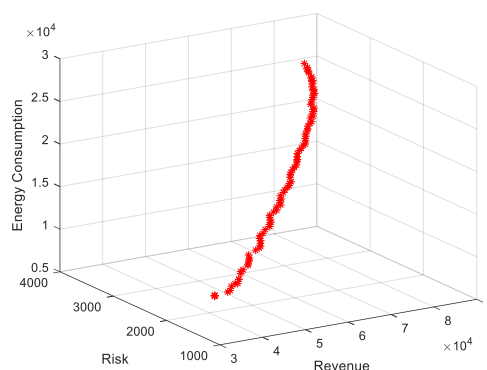
| روش محدودیت-اپسیلون تقویت شده | | |
|-------------------------------|----------|-----------|
| Obj3 | Obj2 | Obj1 |
| 9,754.00 | 1,282.32 | 32,300.17 |
| الگوریتم NSGAII | | |
| Obj3 | Obj2 | Obj1 |
| 10,046.62 | 1,307.97 | 32,623.17 |
| خطا | | |
| Obj3 | Obj2 | Obj1 |
| 3% | 2% | 1% |

در این بخش از طریق حل یک مدل برنامه ریزی ریاضی مجموعه مدل های تحقیق و توسعه به هر تولیدکننده تخصیص داده می شود. در ادامه در مثال ارائه شده، مسئله ای با اندازه واقعی و داده های جمع آوری شده واقعی توسط نرم افزار GAMS و محدودیت-اپسیلون تقویت شده و الگوریتم NSGA-II حل شده است. اطلاعات ورودی مدل براساس جدول شماره ۴ ارائه شده است. جبهه بدست آمده برای سه تابع هدف در شکل شماره ۲ برای روش محدودیت-اپسیلون تقویت شده و در شکل شماره ۳ برای الگوریتم NSGA-II ارائه شده است.

در این مثال واقعی در نظر گرفته شده فرض شده است، تعداد مورد مدل تحقیق و توسعه برای توسعه محصول برای تعداد ۸ واحد صنعتی و کارخانه های تولیدکننده باتری موجود است. با حل مدل به دنبال این مورد هستیم که ضمن تخصیص بهینه مدل ها به کارخانه ها اهداف میزان فروش، ریسک و مصرف انرژی نیز به طور هم زمان بهینه شوند.

جدول ۴: اطلاعات ورودی مدل

| مطابق با جدول ۳. | V_m |
|--|-------------|
| در بازه [100,000; 600,000] در نظر گرفته شده است - بر مبنای دلار. | W_{mn} |
| در بازه [5,000; 45,000] در نظر گرفته شده است - بر مبنای دلار. | L_{mn} |
| در بازه [1,000; 10,000] در نظر گرفته شده است. | R_{mn} |
| در بازه [0; 1] در نظر گرفته شده است - بر مبنای درصد. | $Prob_{mn}$ |
| در بازه [1; 3] در نظر گرفته شده است. | D_n |
| در بازه [200,000; 450,000] در نظر گرفته شده است - بر مبنای دلار. | B_n |
| در بازه [10,000; 20,000] در نظر گرفته شده است - بر مبنای BTU/hr | C_{mn} |
| در بازه [10,000; 20,000] در نظر گرفته شده است - بر مبنای BTU/hr | K_n |
| در بازه [20,000; 50,000] در نظر گرفته شده است - بر مبنای دلار. | Q_{mn} |
| در بازه [10,000; 25,000] در نظر گرفته شده است - بر مبنای دلار. | P_n |



شکل ۲: جبهه پارتو رسم شده براساس روش محدودیت-اپسیلون تقویت شده

ندارد؛ زمان کافی برای حل مساله وجود داشته و از این نظر محدودیتی مورد توجه نیست. لذا می‌توان در ارزیابی الگوریتم‌های حل این نوع مسائل از معیار زمان چشم‌پوشی نمود. اما فاصله از جبهه بهینه یکی از مهمترین معیارهای اندازه‌گیری عملکرد الگوریتم‌هاست که به‌طور گسترده در تحقیقات این حوزه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ادبیات تحقیق معیارهای متنوعی برای اندازه‌گیری فاصله جبهه پارتویی تولید شده توسط الگوریتم با جبهه بهینه سراسری ارائه شده که در این بین محاسبه فاصله اقلیدسی بین اعضای جبهه پارتویی الگوریتم با نقطه ایده‌آل دارای بیشترین کاربرد است.

در این تحقیق نیز یک ساختار ریاضی برای محاسبه این فاصله با نام معیار MID مورد استفاده قرار گرفته است. قابل ذکر است که سایر معیارهای ارائه شده در ادبیات تحقیق برای محاسبه فاصله بین جبهه الگوریتم با جبهه بهینه سراسری براساس مفهوم این معیار طراحی شدند. موضوع مهم دیگر، محاسبه پراکندگی اعضای جبهه پارتویی الگوریتم در فضای مجموعه پاسخ‌ها است. برای محاسبه این مفهوم دو ساختار ریاضی پر کاربرد ارائه شده که از دو جنبه مختلف میزان پراکندگی اعضای پارتویی را محاسبه می‌کند. (۱) معیار MS از طریق محاسبه فاصله اقلیدسی بین حدود بالا و پایین جبهه پارتویی، گستردگی فضای پارتویی شناسایی شده توسط الگوریتم را نشان می‌دهد. از آن جایی که گسترده بودن فضای پارتویی نشان‌دهنده کارایی بالای الگوریتم‌ها است، بنابراین مقادیر بزرگ MS مطلوب است. اما این معیار دارای نقضی است که در آن ممکن است یک جبهه پارتویی با فاصله زیاد از جبهه پارتویی بهینه سراسری را به‌عنوان یک جبهه خوب ارائه دهد؛ چراکه تنها دارای گستردگی زیاد بین حدود بالا و پایین جبهه است. برای رفع این مشکل، معیار (۲) SNS ارائه شده که از طریق محاسبه انحراف معیار بین اعضای جبهه پارتویی الگوریتم و نقطه ایده‌آل ضعف معیار MS را پوشش می‌دهد. براساس این معیار، مطلوب است که اعضای پارتویی در دو طرف نقطه ایده‌آل و با فاصله کم از آن، پراکنده شوند. بنابراین مقادیر بزرگتر برای SNS نشان‌دهنده کارایی بالاتر الگوریتم است. با استفاده از معیارهای MS، MID و SNS می‌توان کارایی الگوریتم را به‌طور مناسب از لحاظ فاصله با نقطه ایده‌آل و همچنین پراکندگی در مجموعه پاسخ‌ها محاسبه نمود.

همچنین مقدار متغیرهای تصمیم مربوط به تخصیص مدل‌های محدودیت-اپسیلون تقویت شده به کارخانه‌ها و تخصیص مشوق‌های مالی به کارخانه‌ها، مربوط جبهه پارتو بهینه به ترتیب در جداول شماره ۷ و ۸ نمایش داده شده است.

جدول ۷: تخصیص مدل‌های تحقیق و توسعه به کارخانه‌ها برای

جبهه بهینه

| مدل‌های تحقیق و توسعه | کارخانه‌های تولیدکننده باتری | | | | | | | |
|-----------------------|------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |

جدول ۸: تخصیص مشوق‌های مالی ارائه شده به کارخانه‌ها برای

جبهه بهینه

| مدل‌های تحقیق و توسعه | کارخانه‌های تولیدکننده باتری | | | | | | | |
|-----------------------|------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |

۶- تجزیه و تحلیل کارایی الگوریتم پیشنهادی

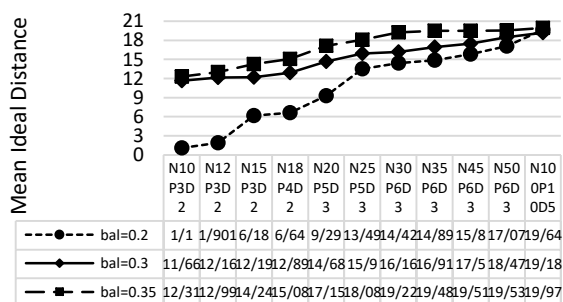
در این بخش به منظور ارزیابی کارایی الگوریتم، دو نوع تحلیل متفاوت انجام می‌شود. در ابتدا تعدادی مثال عددی با داده‌های تصادفی تولید شده و نتایج حاصل از حل الگوریتم و مدل ریاضی به کمک شاخص متوسط شاخص ایده‌آل (MID) مقایسه می‌گردد. عملکرد الگوریتم‌های ابتکاری/ فراابتکاری باید از دیدگاه‌های مختلف شامل زمان حل، فاصله از جبهه بهینه سراسری و پراکندگی در فضای مجموعه پاسخ‌ها مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به این که در حل مسائل تاکتیکال حصول پاسخ‌هایی با کیفیت بالا مدنظر قرار دارد، زمان حل الگوریتم اهمیت چندانی

بهینه بر یکدیگر منطبق هستند. اما در ابعاد بزرگتر این فاصله بیشتر می‌شود. شکل شماره ۵ روند تغییرات MID را به ازای مقادیر bal نشان می‌دهد.

جدول ۹: مقایسه نتایج حاصل از حل مدل ریاضی و الگوریتم

پیشنهادی

| Instances Size | Instances Code | bal=0.2 | bal=0.3 | bal=0.35 |
|----------------|----------------|---------|---------|----------|
| | | MID | MID | MID |
| Small | 1 | 1.1 | 11.66 | 12.31 |
| | 2 | 1.901 | 12.16 | 12.99 |
| | 3 | 6.18 | 12.19 | 14.24 |
| | 4 | 6.64 | 12.89 | 15.08 |
| | 5 | 9.29 | 14.68 | 17.15 |
| | 6 | 13.49 | 15.9 | 18.08 |
| | 7 | 14.42 | 16.16 | 19.22 |
| | 8 | 14.89 | 16.91 | 19.48 |
| | 9 | 158 | 17.5 | 19.51 |
| | 10 | 17.07 | 18.47 | 19.53 |
| Medium | 11 | 19.64 | 19.18 | 19.97 |



شکل ۵: تغییرات مقدار MID در مقادیر مختلف bal

مطابق شکل شماره ۵ مشاهده می‌شود که با افزایش ابعاد نموده‌ها، مقدار MID در تمام مقادیر bal افزایش می‌یابد. نکته مهم این است که در بزرگترین نمود، مقدار MID برای تمام مقادیر bal تقریباً برابر است؛ چراکه در این نمود، پاسخ‌های تولیدشده دارای تفاوت معناداری در bal های مختلف نیست. به عبارت دیگر، بالا بودن ابعاد مثال عددی باعث شده می‌شود که تغییر از فاز Exploration به فاز Exploitation در الگوریتم تغییر محسوسی بر کیفیت پاسخ‌های نهایی ایجاد نکند.

به منظور بررسی دقیق‌تر رفتار الگوریتم و صحت عملکرد آن در حل نموده‌های عددی، گپ بهینگی Cplex به صورت ۱۰٪ و ۱۵٪ تنظیم شده و نتایج حاصل از حل مدل با Cplex و الگوریتم با یکدیگر مقایسه می‌شود. این تحلیل نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی می‌تواند پاسخ‌های زیر بهینه را مغلوب کرده و قابلیت کشف پاسخ‌هایی نزدیک‌تر به بهینه سراسری را دارد. بدین منظور مثال‌های کوچک ارائه شده در جدول شماره ۱۰ با در نظر گرفتن گپ بهینگی ۱۰٪ و ۱۵٪ مجدداً اجرا شده و گپ حاصل از معیار MID الگوریتم و Cplex با یکدیگر مقایسه می‌شود.

۶-۱- مقایسه الگوریتم پیشنهادی با مدل ریاضی به کمک

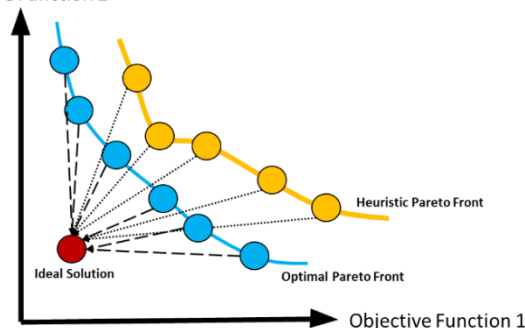
شاخص MID

در این بخش به منظور بررسی نتایج حاصل از حل الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با نتایج مدل ریاضی، تعدادی مثال عددی تصادفی تولید شده و به کمک شاخص MID، کارایی الگوریتم پیشنهادی و مدل ریاضی مورد سنجش قرار می‌گیرد. ساختار این شاخص بدین صورت است که فاصله اقلیدسی بین پاسخ‌های غیرمغلوب نهایی تولید شده توسط الگوریتم و مجموعه پرتو بهینه تولیدشده توسط Cplex را مطابق با رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^{|Q|} \left(\sqrt{\sum_{j=1}^{n_{obj}} \left(\frac{f_i^j - f_{best}^j}{f_{max}^j - f_{min}^j} \right)^2} \right)}{|Q|} \quad (21)$$

که در آن f_i^j بیانگر i -امین پاسخ و j -امین تابع هدف است. همچنین f_{best}^j نقطه ایده‌آل تابع هدف j -ام و f_{max}^j و f_{min}^j به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار بین تمام پاسخ‌های پارتویی برای تابع هدف j -ام است. $|Q|$ تعداد نقاط موجود در ناحیه بهینه پارتویی و n_{obj} تعداد توابع هدف است. شکل شماره ۴ نمای مفهومی این شاخص را نشان می‌دهد.

Objective Function 2



شکل ۴: ساختار مفهومی شاخص MID

در جدول شماره ۹ به تشریح نتایج عددی پرداخته می‌شود. قابل ذکر است که به منظور عمق بخشیدن به تحلیل نتایج، احتمال پذیرش یک پاسخ در نسل بعد پاسخ‌ها (bal) در مقادیر مختلف ۰٫۲، ۰٫۳ و ۰٫۳۵ درصد در نظر گرفته می‌شود. از این طریق می‌توان حساسیت الگوریتم را نسبت به حضور پاسخ‌های برتر در نسل بعدی را مورد بررسی قرار داد؛ چراکه این معیار به طور مستقیم بر توانایی الگوریتم جهت گذر از فاز Exploration به فاز Exploitation اثرگذار است.

در مورد مقادیر محاسبه شده MID نیز می‌توان مشاهده نمود که در مثال با ابعاد کوچک تقریباً جبهه پارتویی الگوریتم و جبهه

است که جبهه الگوریتم توانسته است پاسخ‌های Cplex را مغلوب کرده و به نقطه ایده‌آل نزدیکتر شود. این موضوع بیانگر عملکرد مناسب الگوریتم در یافتن جبهه پارتویی نزدیک به بهینه است.

۶-۲- ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی به کمک MS و شاخص‌های

به منظور ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی در تولید پاسخ‌های مناسب، تعداد ۱۰ نمود در ابعاد کوچک، ۱۰ نمود در ابعاد متوسط و ۱۰ نمود در ابعاد بزرگ تولید شده و با استفاده از شاخص‌های Spread of Non-dominance Solution (SNS) و Maximum Spread (MS) به ازای مقادیر مختلف bal مورد بررسی قرار گرفته است. اما شاخص‌های SNS و MS به صورت معادلات ۲۲ و ۲۳ محاسبه می‌شود.

$$SNS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{|Q|} \left(MID - \sum_{j=1}^{n_{obj}} f_i^j \right)^2}{|Q| - 1}} \quad (22)$$

$$MS = \sqrt{\sum_{j=1}^{n_{obj}} \left(f_{\max}^j - f_{\min}^j \right)^2} \quad (23)$$

نتایج حاصل از حل نمودهای طراحی شده به ازای مقادیر مختلف پارامتر bal در قالب شاخص‌های SNS و MS، در جداول شماره ۱۱ الی ۱۳ ارائه می‌شود.

جدول ۱۱: مقایسه نتایج حاصل از حل نمودهای مختلف با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در ابعاد کوچک

| Instances Code | Instance size (m × n) | bal=0.3 | | bal=0.35 | | bal=0.4 | | bal=0.45 | |
|----------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | SNS | MS | SNS | MS | SNS | MS | SNS | MS |
| 11 | (5×5) | 2535210.6 | 1708351.7 | 2043098.4 | 2311610.5 | 2018891 | 2393256.3 | 2503714.6 | 2816309.2 |
| 12 | (5×7) | 5905981.4 | 3244752.5 | 5568606.9 | 4016504 | 6749917.5 | 4496162.3 | 5745311.1 | 5197613.6 |
| 13 | (6×8) | 9243979.6 | 4561726.3 | 8238284.6 | 5736075.2 | 8064452.4 | 5045030.5 | 7915497.5 | 5403691.5 |
| 14 | (6×9) | 11416995 | 5686095.5 | 11606701 | 5757494.5 | 10551825 | 5681683.7 | 10483301 | 6411090.3 |
| 15 | (6×10) | 17580934 | 7037298 | 16628486 | 6736382.7 | 18508684 | 7402324.2 | 17337274 | 8357901.9 |
| 16 | (7×10) | 22835380 | 7072896.9 | 23576118 | 10392625 | 22872262 | 8701997.9 | 23443263 | 11643043 |
| 17 | (8×11) | 24627420 | 8415395.8 | 24266836 | 8327252.8 | 24784816 | 8566707.5 | 25504544 | 9358624.7 |
| 18 | (8×13) | 31497990 | 8634202.1 | 30820002 | 8792236.3 | 32144647 | 8544102 | 32625278 | 9434840.6 |
| 19 | (9×15) | 49986316 | 11558768 | 43974235 | 10603039 | 45837060 | 13029762 | 42918108 | 13844703 |
| 20 | (10×15) | 52579911 | 12219213 | 49151322 | 13661915 | 45328433 | 14117129 | 52075357 | 15613441 |

کم bal است. علاوه بر آن، تقریباً تمام نمودها با ابعاد کوچک در مقادیر مختلف bal دارای SNS تقریباً برابری هستند. اما با افزایش مقدار bal، مقدار SNS نیز افزایش می‌یابد که نشان از بهتر شدن diversity پاسخ‌های پارتویی دارد. در حقیقت، مشابه با MS با افزایش bal، فضای پاسخ گسترده‌تر شده و اعضای پارتویی به صورت مناسب‌تری تولید می‌شوند.

جدول ۱۰: مقایسه نتایج عددی به ازای گپ بهینگی ۱۰٪ و ۱۵٪

| CPLEX optimally gap | Instance Code | bal=0.2 | bal=0.3 | bal=0.35 |
|---------------------|---------------|----------|----------|----------|
| | | MID Gap% | MID Gap% | MID Gap% |
| 10% | 1 | -3.14 | -3.77 | -2.16 |
| | 2 | -1.77 | 0.14 | 1.22 |
| | 3 | 0.42 | 0.77 | 4.37 |
| | 4 | 1.22 | 1.96 | 6.94 |
| | 5 | 2.19 | 4.22 | 7.19 |
| | 6 | 5.54 | 6.17 | 7.86 |
| | 7 | 6.19 | 7.51 | 8.79 |
| | 8 | 4.22 | 8.22 | 9.19 |
| | 9 | 7.84 | 8.94 | 9.88 |
| | 10 | 7.19 | 9.44 | 10.02 |
| 15% | 1 | -7.12 | -6.19 | -5.33 |
| | 2 | -6.19 | -4.11 | -3.74 |
| | 3 | -4.12 | -4.01 | -2.38 |
| | 4 | -3.17 | -3.97 | -1.78 |
| | 5 | -2.11 | -1.45 | 0.28 |
| | 6 | 0.41 | 1.22 | 2.19 |
| | 7 | 0.36 | 1.37 | 3.67 |
| | 8 | 2.77 | 3.19 | 5.22 |
| | 9 | 3.16 | 4.01 | 6.77 |
| | 10 | 4.11 | 5.17 | 7.39 |

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش گپ بهینگی، مقدار گپ محاسباتی بین MID الگوریتم Cplex کاهش یافته و در برخی از موارد منفی شده است. مقدار منفی نشان‌دهنده این

جدول ۱۱: مقایسه نتایج حاصل از حل نمودهای مختلف با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در ابعاد کوچک

مطابق با نتایج عددی مشاهده می‌شود که مقدار MS به ازای bal=0.3 دارای کمترین مقدار و به ازای bal=0.45 دارای بیشترین مقدار است. در واقع با افزایش پارامتر bal، میزان پراکندگی پاسخ‌ها بیشتر می‌شود. این موضوع نشان از بهتر شدن الگوی پراکندگی تولید اعضای پارتویی در دامنه جبهه پارتویی به دلیل تولید تعداد اعضای بیشتری دارد. بنابراین تصمیم‌گیری در مورد انتخاب عضو نهایی در مقادیر بزرگتر bal به مراتب بهتر از مقادیر

جدول ۱۲: مقایسه نتایج حاصل از حل نمود های مختلف با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در ابعاد متوسط

| Instances Code | Instance size (m × n) | bal=0.3 | | bal=0.35 | | bal=0.4 | | bal=0.45 | |
|----------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | SNS | MS | SNS | MS | SNS | MS | SNS | MS |
| | | 11 | (10×16) | 3333603.7 | 2163380 | 3342444.2 | 2619452.1 | 3872836.1 | 2586597.9 |
| 12 | (10×18) | 7472759.4 | 3905583.1 | 6859181.6 | 4711764.4 | 7496800 | 4310015.5 | 6242485 | 6305971.1 |
| 13 | (12×20) | 11901225 | 5103766.7 | 10583532 | 6089452.8 | 9915473.8 | 6383508 | 9342111 | 7339845.6 |
| 14 | (12×22) | 17232216 | 5557699.8 | 13981927 | 6422994.9 | 16936184 | 7281580.2 | 13854489 | 8013862.8 |
| 15 | (14×24) | 23813299 | 8626919.7 | 20885267 | 7202235.7 | 25325227 | 9173970.5 | 20827960 | 8357901.9 |
| 16 | (10×26) | 24398764 | 8334506.2 | 27688029 | 13835736 | 24747479 | 9890963.5 | 25731827 | 12109774 |
| 17 | (16×27) | 29966921 | 10137616 | 32233926 | 9148820.9 | 34899760 | 9257735 | 28840785 | 11139714 |
| 18 | (18×27) | 41959269 | 10414060 | 42094140 | 9577257.4 | 39797320 | 9317234.2 | 35737389 | 10729413 |
| 19 | (20×28) | 57372921 | 14905847 | 58624122 | 12677546 | 57000667 | 15676662 | 52204324 | 14688341 |
| 20 | (21×29) | 58459554 | 14963176 | 54512510 | 15817526 | 61239213 | 14705343 | 51325293 | 16506138 |

در این مثال‌های عددی با ابعاد بزرگ، رفتار MS و NSN مشابه با تحلیل انجام شده در نمودهای کوچک و متوسط است. در حالت کلی، افزایش bal منجر به تولید پاسخ‌های پارتویی با پراکندگی و diversity بیشتری می‌شود که امکان انتخاب عضو نهایی را برای تصمیم‌گیرندگان آسان‌تر می‌سازد.

در ادامه مقادیر MS و SNS به ازای مقادیر مختلف bal در نمودهای عددی با ابعاد متوسط ارائه شده است. در این مثال‌ها می‌توان تحلیلی مشابه با روند تغییرات MS و SNS برای نمودها با ابعاد کوچک ارائه داد. در این مثال‌ها نیز با افزایش مقدار bal، MS و SNS افزایش می‌یابد. در این نمودها افزایش مقدار bal باعث گستردگی فضای پاسخ شده و تعداد اعضای پارتویی افزایش می‌یابد که منجر به تولید جبهه‌هایی با کیفیت بیشتری می‌شود.

جدول ۱۳: مقایسه نتایج حاصل از حل نمودهای مختلف با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در ابعاد بزرگ

| Instances Code | Instance size (m × n) | bal=0.3 | | bal=0.35 | | bal=0.4 | | bal=0.45 | |
|----------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| | | SNS | MS | SNS | MS | SNS | MS | SNS | MS |
| | | 21 | (23×30) | 3628794.4 | 2834806.8 | 3184680.2 | 3575291.6 | 2593649.1 | 3679812.5 |
| 22 | (24×32) | 7153809.2 | 5613043.4 | 7801389.3 | 6463474.6 | 7532066.1 | 7559076.5 | 8763705.1 | 7720773.6 |
| 23 | (25×34) | 11223009 | 6983097.5 | 11029971 | 6962059.4 | 10622815 | 7542734 | 10702003 | 7744859.6 |
| 24 | (25×36) | 17854411 | 7261068.7 | 15409441 | 8021423.1 | 16728570 | 11382614 | 14047118 | 8682918.3 |
| 25 | (25×38) | 26408911 | 10068564 | 24331329 | 10586079 | 23414814 | 6433762.2 | 24489458 | 16948820 |
| 26 | (26×40) | 28989133 | 12299644 | 26792134 | 13636110 | 26405252 | 10728166 | 27436400 | 16462708 |
| 27 | (27×42) | 38280272 | 11401952 | 35101491 | 11540196 | 32843413 | 12391352 | 35572452 | 13172893 |
| 28 | (28×44) | 41382871 | 11587071 | 41352734 | 10760482 | 37762391 | 10003539 | 43046200 | 11806386 |
| 29 | (29×46) | 59862381 | 16773443 | 64755001 | 16978216 | 54510849 | 18823170 | 66025223 | 18610168 |
| 30 | (30×50) | 74033612 | 17614616 | 66038543 | 19516802 | 73668716.65 | 18730498 | 66999623.68 | 22913479 |

۷- جمع بندی و نتیجه‌گیری

استفاده قرار گرفته‌اند. در این پژوهش یک مدل ریاضی سه هدفه جهت تخصیص مدل‌های تحقیق و توسعه به واحدهای صنعتی (شرکت‌های تولیدکننده باتری خودرو) با در نظر گرفتن اهداف سود و ریسک و میزان مصرفی انرژی پیشنهاد گردید. در ادامه مسئله‌ای با اندازه واقعی و داده‌های جمع آوری شده واقعی توسط نرم‌افزار GAMS و روش محدودیت-پسیلون تقویت شده و الگوریتم NSGA-II حل گردید. مطابق با نتایج بدست آمده از حل مثال واقعی در جدول شماره ۷، مدل جذب سیاست‌های حمایتی به تولیدکنندگان ۱ و ۶، مدل نگاه به آینده تحقیق و توسعه به تولیدکنندگان ۲ و ۳، مدل تحقیق و توسعه کامل

امروزه بسیاری از شرکت‌ها با چالش‌هایی در زمینه تقویت و افزایش توان رقابت‌پذیری خود برای بقا در محیط رقابتی کسب و کار مواجه شده‌اند. در این میان، تنها شرکت‌هایی که از قابلیت‌های کلیدی و مزیت‌های نسبی بهره می‌جویند، توانسته‌اند موفقیت‌پذیری را کسب نمایند. در فرایند ایجاد مزیت‌های رقابتی، تدوین فعالیت‌های تحقیق و توسعه نقش بسیار مهمی ایفا می‌نماید. با توجه به این که، فرایند برنامه‌ریزی تحقیق و توسعه، باید پیش از طراحی و توسعه محصول انجام پذیرد، تاکنون روش‌شناسی‌های ساختارمند محدودی در این زمینه مورد

۸- پیوست

رتبه تخصیص مدل های تحقیق و توسعه در صنایع باتری سازی -

نظرات خبرگان

| E ₈ | E ₇ | E ₆ | E ₅ | E ₄ | E ₃ | E ₂ | E ₁ | شیوه |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | A ₁ |
| 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 10 | 9 | 9 | A ₂ |
| 6 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | A ₃ |
| 5 | 6 | 5 | 5 | 5 | 6 | 5 | 5 | A ₄ |
| 7 | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 6 | A ₅ |
| 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | A ₆ |
| 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | A ₇ |
| 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | A ₈ |
| 8 | 8 | 8 | 9 | 8 | 8 | 8 | 8 | A ₉ |
| 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 10 | A ₁₀ |

شرکتی به تولیدکنندگان ۴، ۷ و ۸، مدل نقشه راه تحقیق و توسعه به تولید کننده ۵ تخصیص داده شد. نتایج تجزیه و تحلیل مدل اعتبار بالای رویکرد ترکیبی استفاده شده در ارزیابی مدل تحقیق و توسعه پیشنهادی در شرکت‌های تولیدکننده باتری خودرو را نشان می‌دهد. استفاده از مدل‌های تحقیق و توسعه متناسب با محصولات و تولید باعث افزایش بازدهی، کاهش ریسک و کنترل و بهبود مصرف انرژی در شرکت‌ها می‌گردد. ضمن این که برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود از الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری جدیدتر برای حل مدل ارائه شده استفاده و با نتایج مقایسه گردد.

فهرست منابع

- Aliu Mulaj L.; Dedaj, B.; "Knowledge-Based Society: R&D Investments in New Economic Transformation." In: New Approaches to CSR, Sustainability and Accountability, vol. IV. 2023, Springer. p.p. 49-67. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9499-8_4
- Azoulay, P.; Graff Zivin, J, S.; Li, D.; Sampat, B, N.; "Public R&D investments and private-sector patenting: evidence from NIH funding rules." The Review of Economic Studies, 2019. 86(1): p.p. 117-152. <https://doi.org/10.1093/restud/rdy034>
- Carboni, O. A.; "The effect of public support on investment and R&D: An empirical evaluation on European manufacturing firms". Technological Forecasting and Social Change, 2017. 117: p.p. 282-295. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.11.017>
- Chachuli, F.S.M.; Chachuli, M.; Mat, S.; Ludin, N.A.; Sopian, k.; "Performance evaluation of renewable energy R&D activities in Malaysia." Renewable Energy, 2021. 163: p. 544-560. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.160>
- Chen, X.; Liu, X.; Gong, Z.; Xie, J.; "Three-stage super-efficiency DEA models based on the cooperative game and its application on the R&D green innovation of the Chinese high-tech industry." Computers & Industrial Engineering, 2021. 156: p.p. 107234. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107234>
- Deb, K.; Jain, H.; "Handling many-objective problems using an improved NSGA-II procedure. In: Proceedings of the 2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation.", Brisbane, Australia, 10-15 June 2012. <https://doi.org/10.1109/CEC.2012.6256519>
- Kazemi, M.; "Mathematical modeling and its application in management." Knowledge and Development Journal. 1374. 2 (1): pp. 155-167. <https://www.noormags.ir/view/fa/articlepage/150762>
- Kayserili, A.; Kıyak, M.; "Evaluation of R&D activities and the perspectives of the participants of pharmaceutical companies on R&D In Turkey." Hacettepe University Journal of the Faculty of Pharmacy. 2019. 39(2): p.p. 65-80. <https://dergipark.org.tr/en/pub/hujpharm/issue/54286/665353>
- Kerssens-van Drongelen, I.C.; Bilderbeek, J.; "R&D performance measurement: more than choosing a set of metrics." R&D Management, 1999. 29(1): p.p. 35-46. <https://doi.org/10.1111/1467-9310.00115>
- Ke, H.; Chen, X.; "Battery R&D decision of electric vehicle manufacturer considering government subsidy." Kybernetes, 2022(ahead-of-print). <https://doi.org/10.1108/K-11-2021-1158>
- Koçak, E.; Kınacı, H.; Shehzad, K.; "Environmental efficiency of disaggregated energy R&D expenditures in OECD: a bootstrap DEA approach." Environmental Science and Pollution Research, 2021. 28(15): p.p. 19381-19390. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12132-w>
- Latifian, M.; Keramati, M. A.; Tavakkoli-Moghaddam, R.; "Assessing Research and development strategies with customer satisfaction (A case study on automotive battery industries)" Consumer Behavior Studies Journal, 2022, Vol. 9, No.1, pp. 182-206. <https://doi.org/10.34785/J018.2022.685>
- Lazarrotti, V.; Manzini, R.; Mari, L.; "A model for R&D performance measurement." International Journal of Production Economics, 2011. 134(1): p.p. 212-223. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.06.018>
- Lu, Y.; Rong, X.; Sheng Hu, Y.; Chen, L.; Li, H.; "Research and development of advanced battery materials in China." Energy Storage Materials, 2019. 23: p.p. 144-153. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.05.019>

- Lukach, R.; Kort, P.M.; Plasmans, J.; "Optimal R&D investment strategies under the threat of new technology entry." International Journal of Industrial Organization, 2007. 25(1): p.p. 103-119. <https://doi.org/10.1016/j.ijindorg.2006.02.002>
- Latifian, M.; Keramati, M.A.; Tavakkoli-Moghaddam, R.; "A Bi-objective model of research and development in battery manufacturing industry to improve customer satisfaction." International Journal of Engineering, 2022. 35(11): p.p. 2077-2091. <https://doi.org/10.5829/IJE.2022.35.11B.03>
- Lee, J.Y.; Woo Choi, J.; Hak Choi, J.; Hee Lee, B.; "Text-mining analysis using national R&D project data of South Korea to investigate innovation in graphene environment technology." International Journal of Innovation Studies, 2023. 7(1): p.p. 87-99. <https://doi.org/10.1016/j.ijis.2022.09.005>
- Moncada-Paternò-Castello, P.; Ciupagea, C.; Smith, K.; Tübke, A.; Tubbs, M.; "Does Europe perform too little corporate R&D? A comparison of EU and non-EU corporate R&D performance." Research Policy, 2010. 39(4): p.p. 523-536. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2010.02.012>
- Mavrotas, G.; Florios, K.; "An improved version of the augmented ϵ -constraint method (AUGMECON2) for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems." Applied Mathematics and Computation, 2013. 219(18): p.p. 9652-9669. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2013.03.002>
- Soltanzadeh, J.; Elyasi, M.; Ghaderifar, E.; Rezaei Soufi, H.; Khoshsirat, M. ; "Evaluation of the effect of R&D subsidies on Iranian firms' innovative behavior." Journal of Science and Technology Policy Management, 2020. 11(1): p.p. 17-48. <https://doi.org/10.1108/JSTPM-11-2018-0109>
- Sinimole, K.; Saini, K.M.; "Performance evaluation of R&D organisations: an Asian perspective." International Journal of the Economics of Business, 2021. 28(2): p.p. 179-196. <https://doi.org/10.1080/13571516.2020.1858703>
- Penan, H.; "R & D strategy in a techno-economic network: Alzheimer's disease therapeutic strategies." Research Policy, 1996. 25(3): p.p. 337-358. [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(95\)00833-0](https://doi.org/10.1016/0048-7333(95)00833-0)
- Song, Y.; Zhang, K.; Hong, X.; Li, X.; "A novel multi-objective mutation flower pollination algorithm for the optimization of industrial enterprise R&D investment allocation." Applied Soft Computing, 2021. 109: p.p. 107530. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107530>
- Salimi, N.; Rezaei, J.; "Evaluating firms' R&D performance using best worst method". Evaluation and programplanning, 2018. 66: p.p. 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2017.10.002>
- Tidd, J.; Bessant, J.R.; "Managing innovation: integrating technological, market and organizational change." 2020: John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.11221/jima.59.494>
- Xu, J.; Wang, X.; Liu, F.; "Government subsidies, R&D investment and innovation performance: analysis from pharmaceutical sector in China." Technology Analysis & Strategic Management, 2021. 33(5): p.p. 535-553. <https://doi.org/10.1080/09537325.2020.1830055>
- Yalcin, A.S.; Kilic, H.S.; Guler, E.; "Research and development project selection via IF-DEMATEL and IF-TOPSIS." In: Proceedings of the International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems, Istanbul, Turkey, 23-25 July 2019. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23756-1_76
- Yuan, Y.; Wang, P.; Wang, M.; "Multi-objective stochastic synchronous timetable optimization model based on a chance-constrained programming method combined with augmented epsilon constraint algorithm." Mathematical Problems in Engineering, 2022. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/9222636>

