Archive of SID.ir

شیوه استناددهی: پوراسماعیل، حسین.، باقرزاده خواجه، مجید.، رحمانی، کمال‌الدین.، بافنده زنده، علیرضا.، و پاسبانی، علیرضا. (۱۴۰۳). انتخاب تأمین‌کنندگان سبز با مدل ترکیبی برنامه‌ریزی چندهدفه و مجموعه‌های راف. *آموزش، تربیت و توسعه پایدار*، ۲(۲)، ۲۰-۱.

© ۱۴۰۳ تمامی حقوق انتشار این مقاله متعلق به نویسنده است. انتشار این مقاله به‌صورت دسترسی آزاد مطابق با گواهی (CC BY-NC 4.0) صورت گرفته است.

انتخاب تأمین‌کنندگان سبز با مدل ترکیبی برنامه‌ریزی چندهدفه و مجموعه‌های راف

حسین پوراسماعیل[۱]، مجید باقرزاده خواجه[۱*]، کمال الدین رحمانی[۱]، علیرضا بافنده زنده[۱]، محمد پاسبانی[۱]

۱. گروه مدیریت، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی ، تبریز ، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: Bagerzadeh@iaut.ac.ir

چکیده

هدف این پژوهش طراحی و ارائه مدلی دقیق و علمی برای انتخاب تأمین‌کنندگان سبز با استفاده از ترکیب برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه و تئوری مجموعه‌های راف در شرکت ایران‌خودرو است. این پژوهش از نظر هدف، کاربردی–توسعه‌ای و از نظر روش اجرا، توصیفی–تحلیلی و مدل‌سازی است. داده‌ها از طریق مطالعات میدانی و کتابخانه‌ای، اسناد شرکت ایران‌خودرو و سه پرسشنامه محقق‌ساخته گردآوری شد. جامعه آماری شامل مدیران و کارشناسان مرتبط با خرید و مسائل زیست‌محیطی و همچنین ۱۸ تأمین‌کننده منتخب قطعات ایران‌خودرو بود که بر اساس جدول مورگان، ۶۶ نفر از آنان در نمونه آماری شرکت کردند. روایی محتوایی پرسشنامه‌ها با شاخص CVI=۰.۹۱ و پایایی با آلفای کرونباخ بالاتر از ۰.۸۳ تأیید شد. برای تحلیل داده‌ها از آزمون t، تحلیل عاملی تأییدی، مدل ترکیبی برنامه‌ریزی چندهدفه و مجموعه‌های راف استفاده شد. وزن شاخص‌های زیست‌محیطی با مجموعه‌های راف و مدل چندهدفه با نرم‌افزار WinQSB به مدل خطی تک‌هدفه تبدیل گردید. نتایج تحلیل نشان داد که چهار معیار اصلی—قیمت، کیفیت، سطح خدمات و عملکرد زیست‌محیطی—در انتخاب تأمین‌کنندگان نقش اساسی دارند. اوزان به‌دست‌آمده به‌ترتیب برای معیارها برابر با ۰.۵۴، ۰.۱۲، ۰.۱۹ و ۰.۱۵ بود. در میان ۱۸ تأمین‌کننده مورد بررسی، ۱۲ تأمین‌کننده برتر بر اساس محدودیت‌های ظرفیت و تقاضا انتخاب شدند. نتایج بهینه مدل نشان داد که حداقل هزینه تأمین برابر با ۱۵.۸۸۵ میلیارد ریال، حداکثر سطح خدمت برابر با ۲ روز بهبود، و حداقل درصد کالای معیوب ۲.۶۵٪ بوده است. همچنین میانگین امتیاز زیست‌محیطی تأمین‌کنندگان برتر بیش از ۴ واحد برآورد شد که بیانگر هم‌سویی با اصول توسعه پایدار است. پژوهش حاضر نشان داد که ترکیب برنامه‌ریزی چندهدفه با مجموعه‌های راف می‌تواند ابزاری مؤثر و انعطاف‌پذیر برای انتخاب تأمین‌کنندگان سبز در صنایع مختلف باشد. این مدل با در نظر گرفتن معیارهای کمی و کیفی و محدودیت‌های واقعی، تصمیم‌گیری چندمعیاره را بهبود بخشیده و موجب ارتقای عملکرد زیست‌محیطی زنجیره تأمین می‌شود. استفاده از این مدل در صنایع آلاینده نظیر خودروسازی، شیمیایی و پتروشیمی می‌تواند به تخصیص بهینه منابع، کاهش آلودگی، و بهبود پایداری کمک کند.

کلیدواژگان: *مدیریت زنجیره تأمین سبز، انتخاب تأمین‌کننده، برنامه‌ریزی چندهدفه، مجموعه‌های راف، ایران‌خودرو*

تاریخ ارسال: ۱۸ فروردین ۱۴۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۱ مرداد ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۸ مرداد ۱۴۰۳

تاریخ چاپ: ۱۸ شهریور ۱۴۰۳

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

How to cite: Poursmaeil, H., Bagherzadeh Khajeh, M., Rahmani, K., Bafandeh Zendeh, A., & Pasbani, M. (2024). Selection of Green Suppliers Using a Hybrid Multi-Objective Programming and Rough Set Model. *Training, Education, and Sustainable Development, 2*(2), 1-20.

© 2024 the authors. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License.

Selection of Green Suppliers Using a Hybrid Multi-Objective Programming and Rough Set Model

Hossein Poursmaeil [1], Majid Bagherzadeh Khajeh [1]*, Kamaleddin Rahmani[1], Alireza Bafandeh Zendeh[1], Mohammad Pasbani[1]

1. Department of Management, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

*Corresponding Author's Email: Bagerzadeh@iaut.ac.ir

Abstract

This study aims to design and implement a precise and scientific model for selecting green suppliers by integrating multi-objective mathematical programming and rough set theory in the Iran Khodro company. The research is applied–developmental in purpose and descriptive–analytical in method. Data were collected from field and library studies, Iran Khodro's records, and three researcher-made questionnaires. The statistical population included managers and experts in procurement and environmental affairs and 18 qualified suppliers. Based on the Morgan table, 66 respondents participated. Content validity was confirmed (CVI=0.91) and reliability verified (Cronbach's α>0.83). Data analysis employed t-tests, confirmatory factor analysis, a hybrid multi-objective programming model, and rough set theory. Environmental indicator weights were determined by rough sets, and the multi-objective model was transformed into a single-objective linear model solved using WinQSB. Four main criteria—cost, quality, service level, and environmental performance—were found critical in supplier selection. The calculated weights were 0.54, 0.12, 0.19, and 0.15 respectively. Out of 18 suppliers, 12 were identified as optimal under capacity and demand constraints. The optimal model yielded a minimum cost of 15.885 billion IRR, maximum service improvement of 2 days, and a defective rate of 2.65%. The top suppliers achieved an average environmental score exceeding 4 points, reflecting alignment with sustainability principles. Integrating multi-objective programming with rough set theory provides an effective, flexible approach for green supplier selection. The model incorporates both quantitative and qualitative indicators under realistic constraints, enhancing multi-criteria decision-making and improving environmental performance in supply chains. Application of this model in highly polluting industries such as automotive, chemical, and petrochemical sectors can optimize resource allocation, reduce emissions, and strengthen sustainability.

Keywords: *Green supply chain management, supplier selection, multi-objective programming, rough set theory, Iran Khodro*

Submit Date: 06 April 2024
Revise Date: 01 August 2024
Accept Date: 08 August 2024
Publish Date: 08 September 2024

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

مقدمه

در دهه‌های اخیر، افزایش آگاهی عمومی نسبت به بحران‌های زیست‌محیطی، تغییرات اقلیمی و تخریب منابع طبیعی، موجب شده است که سازمان‌ها به سمت اتخاذ راهبردهای توسعه پایدار حرکت کنند. در این مسیر، مدیریت زنجیره تأمین سبز (GSCM) به‌عنوان یکی از مؤثرترین رویکردها برای کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی در فرآیندهای تولید و توزیع شناخته شده است. این مفهوم، تلفیقی از ملاحظات زیست‌محیطی در تمام مراحل زنجیره تأمین از تأمین مواد اولیه تا بازیافت و مصرف مجدد را در بر می‌گیرد (Tseng & Chiu, 2013). از آنجا که بخش عمده‌ای از اثرات زیست‌محیطی در مراحل بالادستی زنجیره و در ارتباط با تأمین‌کنندگان رخ می‌دهد، انتخاب و ارزیابی تأمین‌کنندگان سبز یکی از محورهای کلیدی در مدیریت سبز زنجیره تأمین محسوب می‌شود (Kannan et al., 2008).

در فضای رقابتی امروز، شرکت‌ها با فشارهای متعددی از سوی نهادهای قانونی، سهامداران، و مصرف‌کنندگان برای رعایت اصول زیست‌محیطی مواجه هستند. اتخاذ رویکرد مدیریت زنجیره تأمین سبز نه تنها یک الزام اخلاقی و قانونی، بلکه عاملی برای ایجاد مزیت رقابتی پایدار است (Akman, 2015). تحقیقات نشان داده‌اند که پیاده‌سازی مؤثر GSCM می‌تواند همزمان با کاهش هزینه‌ها، کارایی عملیاتی و شهرت سازمان را نیز بهبود بخشد (Lo et al., 2018). با این حال، چالش اصلی در این مسیر، شناسایی تأمین‌کنندگان سازگار با محیط زیست و تصمیم‌گیری میان اهداف گاه متضاد اقتصادی، کیفی، و زیست‌محیطی است (Alamroshan et al., 2022).

پژوهش‌ها در حوزه انتخاب تأمین‌کننده سبز، از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره بهره گرفته‌اند تا بتوانند به‌صورت هم‌زمان معیارهایی همچون قیمت، کیفیت، سطح خدمات و عملکرد زیست‌محیطی را در فرآیند ارزیابی لحاظ کنند (Hailiang et al., 2023; Lo et al., 2018). در این راستا، روش‌های مختلفی نظیر تحلیل سلسله‌مراتبی، برنامه‌ریزی چندهدفه، فازی، و مجموعه‌های راف برای مدلسازی و تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت توسعه یافته‌اند (Akman, 2015; Kannan et al., 2008). از سوی دیگر، تغییر در فناوری‌های تولید و ظهور ابزارهای دیجیتال مانند هوش مصنوعی و تحلیل کلان‌داده‌ها، زمینه جدیدی برای ارتقای پایداری زنجیره تأمین فراهم کرده است (Rashid et al., 2024).

به اعتقاد پژوهشگران، مفهوم زنجیره تأمین سبز تنها در صورت ادغام اهداف اقتصادی با ارزش‌های زیست‌محیطی معنا پیدا می‌کند (Yu et al., 2024). زنجیره‌های تأمین مدرن نه‌تنها به کارایی اقتصادی توجه دارند بلکه تلاش می‌کنند تا با به حداقل رساندن ردپای کربن و بهبود مصرف انرژی، نقش فعالی در حفاظت از محیط زیست ایفا کنند (Zhang, 2024). در این زمینه، شرکت‌ها با چالش‌هایی چون هزینه‌های بالای فناوری‌های پاک، پیچیدگی فرآیندهای تأمین سبز و مقاومت فرهنگی در برابر تغییر مواجه هستند (Ebrahimi, 2024). با این وجود، در صنایعی مانند خودروسازی، اتخاذ سیاست‌های سبز در انتخاب تأمین‌کنندگان می‌تواند به کاهش هزینه‌های بلندمدت، بهبود عملکرد و افزایش وفاداری مشتریان منجر شود (Zarei et al., 2025; Zhang, 2024).

در ادبیات جهانی، انتخاب تأمین‌کنندگان سبز عمدتاً با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است. برای مثال، در پژوهش آکمن، ترکیب روش‌های فازی و ویکور برای توسعه برنامه‌های تأمین‌کننده سبز به کار گرفته شده است (Akman, 2015). به طور مشابه، لو و همکاران با توسعه یک مدل یکپارچه، توانستند بهینه‌ترین تأمین‌کنندگان را از منظر زیست‌محیطی و اقتصادی شناسایی کنند (Lo et al., 2018). در سال‌های اخیر نیز مدل‌های چندهدفه ترکیبی با لحاظ کردن معیارهایی مانند تاب‌آوری (Resilience) و چابکی (Agility) مورد توجه قرار گرفته‌اند تا بتوانند پاسخگوی پیچیدگی‌های محیطی باشند (Hailiang et al., 2023; Rachid et al., 2024).

یکی از چالش‌های کلیدی در زنجیره تأمین سبز، تناقض میان عملکرد واقعی و ادعاهای زیست‌محیطی شرکت‌هاست که با عنوان سبزشویی (Greenwashing) شناخته می‌شود. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که شرکت‌ها اقدامات سطحی و تبلیغاتی را جایگزین فعالیت‌های واقعی زیست‌محیطی می‌کنند (Pizzetti et al., 2021). در این میان، نقش شفافیت اطلاعات و اشتراک‌گذاری داده‌های واقعی میان تأمین‌کنندگان

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

و خریداران اهمیت ویژه‌ای دارد (Santos et al., 2024). ادغام مؤلفه‌های اعتماد، ارتباطات پایدار، و فناوری‌های اطلاعاتی در چارچوب GSCM می‌تواند خطر سبزشویی را کاهش داده و کارایی سیستم را افزایش دهد (Rezvani et al., 2021).

در سطح نظری، مدیریت زنجیره تأمین سبز بر پایه اصول پایداری سه‌گانه (اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) شکل گرفته است (Tseng & Chiu, 2013). این رویکرد با هدف دستیابی به توازن میان سودآوری و حفاظت محیطی، نیازمند طراحی مدل‌هایی است که بتوانند بهینه‌سازی چندهدفه را در حضور محدودیت‌های واقعی به انجام رسانند (Haghighat Monfared & Karimi, 2024). از این‌رو، استفاده از ابزارهای کمی مانند برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه و روش‌های تصمیم‌گیری فازی، به محققان کمک کرده تا پیچیدگی‌های ناشی از تعامل معیارهای کیفی و کمی را مدیریت کنند (Alamroshan et al., 2022; Hailiang et al., 2023).

پژوهش‌های جدید در حوزه GSCM نشان می‌دهند که فناوری نقش حیاتی در بهینه‌سازی فرآیندهای سبز ایفا می‌کند. به عنوان مثال، بزرگ‌داده و هوش مصنوعی با تحلیل الگوهای عملکردی تأمین‌کنندگان، می‌توانند به انتخاب دقیق‌تر و تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد کمک کنند (Rashid et al., 2024). در مقابل، برخی پژوهشگران بر نقش «سرمایه اجتماعی» و روابط بلندمدت با تأمین‌کنندگان به‌عنوان عامل موفقیت زنجیره تأمین سبز تأکید کرده‌اند (Rezvani et al., 2021). ترکیب این دو دیدگاه—فناوری‌محور و ارتباط‌محور—می‌تواند به ایجاد مدل‌هایی منجر شود که هم کارایی و هم پایداری را تضمین کنند (Yu et al., 2024).

با وجود گسترش گسترده ادبیات در این زمینه، بسیاری از مدل‌های پیشنهادی هنوز در مرحله نظری باقی مانده‌اند و کمتر به کاربردهای واقعی در صنایع بزرگ و آلاینده پرداخته‌اند. در ایران، به‌رغم رشد توجه به مفاهیم پایداری، پیاده‌سازی عملی مدیریت زنجیره تأمین سبز با موانعی همچون کمبود زیرساخت‌های فناوری، ضعف سیاست‌گذاری و هزینه‌های بالای تطبیق با استانداردهای بین‌المللی روبه‌رو است (Zarei et al., 2025). در مقابل، تجربه کشورهای صنعتی نشان می‌دهد که به‌کارگیری رویکردهای چندهدفه و داده‌محور می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر بهبود کارایی زیست‌محیطی و اقتصادی داشته باشد (Hailiang et al., 2023; Ningrum et al., 2024).

همچنین، ادبیات جدید بر نقش تأمین مالی سبز در تسریع اجرای GSCM تأکید دارد. سیستم‌های تأمین مالی مبتنی بر عملکرد زیست‌محیطی نه‌تنها سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک را ممکن می‌سازند بلکه منجر به تقویت همکاری میان بخش خصوصی و دولتی می‌شوند (Judijanto et al., 2024). در همین راستا، مدل‌های نوین «زنجیره تأمین مالی سبز» بر اهمیت ابزارهای نوین مالی مانند اوراق سبز و تسهیلات پایدار در ارتقای کارایی زیست‌محیطی تأکید می‌کنند. این روندها نشان می‌دهند که پایداری در زنجیره تأمین صرفاً یک وظیفه عملیاتی نیست بلکه به استراتژی کلان سازمانی تبدیل شده است (Kang et al., 2021).

از سوی دیگر، در محیط‌های صنعتی پیچیده مانند صنایع شیمیایی و خودروسازی، تلفیق معیارهای سبز با معیارهای عملکردی نیازمند مدل‌سازی دقیق و تصمیم‌گیری چندهدفه است (Jihu, 2024). استفاده از روش‌های هوشمند مانند مجموعه‌های راف به پژوهشگران این امکان را می‌دهد تا با وجود داده‌های ناقص و عدم قطعیت‌های تصمیم‌گیری، وزن معیارهای مختلف را به شکل علمی برآورد کنند (Ebrahimi, 2024). این روش در مقایسه با مدل‌های سنتی، قابلیت انعطاف بالاتری در مواجهه با داده‌های کیفی و شهودی دارد و می‌تواند برای انتخاب بهینه تأمین‌کنندگان سبز مورد استفاده قرار گیرد (Haghighat Monfared & Karimi, 2024).

در ادبیات مربوط به ریسک‌های زنجیره تأمین، موضوع پایداری سبز با سایر ابعاد مانند تاب‌آوری (Resilience)، چابکی (Agility)، و ناب بودن (Leanness) ترکیب شده است تا مدلی جامع از زنجیره تأمین مقاوم و پایدار ارائه شود (Rachid et al., 2024). در این دیدگاه، زنجیره‌ای موفق است که علاوه بر کاهش آلودگی و مصرف انرژی، در برابر بحران‌های طبیعی و اقتصادی نیز مقاوم باشد (Hailiang et al., 2023). چنین مدلی، ضمن حفظ توازن میان هزینه و کیفیت، می‌تواند نقش مؤثری در پایداری اجتماعی و اقتصادی سازمان‌ها ایفا کند (Yang & Jiang, 2023).

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

از منظر سیاست‌گذاری نیز، مطالعات نشان می‌دهند که نهادهای دولتی با ایجاد انگیزه‌های قانونی و مالی برای شرکت‌ها می‌توانند اجرای زنجیره تأمین سبز را تسهیل کنند (Samadzadeh et al., 2022). این سیاست‌ها می‌توانند شامل معافیت‌های مالیاتی، استانداردهای ملی محیط زیست، و حمایت از نوآوری‌های سبز باشند. با وجود این، در کشورهای در حال توسعه، نبود هماهنگی میان بخش‌های مختلف و ضعف در نظارت اجرایی، همچنان از موانع مهم پیاده‌سازی GSCM محسوب می‌شود (Ningrum et al., 2024).

پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که انتخاب صحیح تأمین‌کنندگان سبز در صنایع تولیدی نه‌تنها باعث کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی می‌شود بلکه بهره‌وری سازمانی را نیز ارتقا می‌دهد (Yu et al., 2024; Zhang, 2024). از سوی دیگر، همکاری نزدیک میان خریداران و تأمین‌کنندگان در زمینه بهبود فرآیندهای تولید و استفاده از فناوری‌های پاک می‌تواند نقش بسزایی در تحقق اهداف توسعه پایدار داشته باشد (Rachid et al., 2024; Yang & Jiang, 2023).

با مرور کلی پژوهش‌های داخلی و خارجی می‌توان گفت که اکثر مدل‌های موجود در حوزه GSCM به دنبال ایجاد توازن میان شاخص‌های مالی، کیفی، خدماتی و زیست‌محیطی هستند (Alamroshan et al., 2022; Lo et al., 2018). در عین حال، استفاده از روش‌های جدید مانند مجموعه‌های راف در شرایط عدم قطعیت می‌تواند رویکردی مؤثر برای بهبود تصمیم‌گیری در انتخاب تأمین‌کنندگان سبز باشد (Ebrahimi, 2024; Haghighat Monfared & Karimi, 2024).

بنابراین، با توجه به شکاف‌های موجود در ادبیات و نیاز روزافزون صنایع بزرگ به مدل‌های تصمیم‌گیری دقیق و قابل اجرا، پژوهش حاضر با هدف ارائه یک مدل ترکیبی مبتنی بر برنامه‌ریزی چندهدفه و تئوری مجموعه‌های راف برای انتخاب تأمین‌کنندگان سبز در شرکت ایران‌خودرو انجام شده است.

روش‌شناسی

تحقیق حاضر از لحاظ هدف، کاربردی- توسعه‌ای و از نظر روش انجام تحقیق، از نوع توصیفی - تحلیلی و مدل‌سازی می‌باشد. بدین صورت که مراحل تحقیق را می‌توان به صورت زیر نشان داد. در این تحقیق با کمک مطالعات میدانی و کتابخانه‌ای مدلی ریاضی ارائه شده است و جهت ارزیابی اوزان شاخص‌های زیست محیطی از روش تئوری مجموعه‌های راف بهره گرفته شده است و نهایتاً با استفاده از اسناد موجود و پرسشنامه‌های طراحی شده اطلاعات مورد نیاز مدل جهت ارزیابی تأمین کنندگان سبز نمونه آماری بدست آمده و مدل چند هدفه را در شرایط قطعی حل نموده و به یک مدل تک هدفه خطی تبدیل که توسط نرم افزار *winqsb* قابل حل بوده و تأمین کنندگان را بر اساس معیارهای انتخابی ارزیابی نموده است.

اساس مدلی که جهت بررسی و بهبود انتخاب تامین کنندگان قطعات خودرو سازان برای شرکت ایران خودرو استفاده می‌شود، مدل عمید و همکاران(۲۰۱۶)[1] می‌باشد با این تغییر که به آن یک تابع هدف زیست محیطی نیز اضافه شده است. و همچنین هر کدام از معیارهای قیمت،کیفیت و سطح خدمت به دو زیر معیار تقسیم شده اند که شاخص ارزیابی هر تأمین کننده در رابطه با هر کدام از معیارهای اصلی فوق ، از حاصل جمع مقادیر زیر معیارهای مربوطه به دست می‌آید. مقادیر زیر معیارهای هزینه ماهیت کمی دارند ولی در این تحقیق برای زیر معیارهای دو معیار اصلی دیگر ، یعنی سطح خدمت و کیفیت ، ماهیت کیفی در نظر گرفته شده است که به کمک جدول (۱)و جدول (۲) به مقادیر کمی تبدیل می‌شوند. توجه شود که امتیاز بالاتر نشان دهنده مطلوبیت بیشتر است. به عنوان مثال شاخص معیار کیفیت در رابطه با تأمین کننده‌ای که متوسط درصد کالای معیوب آن ۱.۷ درصد و متوسط زمان رسیدگی به مشکلات ۴ روز باشد ، طبق جداول ذکر شده محاسبه می‌شود.

[1] Amid et al.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول ۱. نحوه محاسبه امتیاز تأمین کنندگان در رابطه با معیار سطح خدمت

انعطاف پذیری در تحویل اقلام	مدت زمان تحویل	امتیاز
در صورت نیاز خریدار، تأمین کننده کالا را تا ۵ روز زودتر تحویل می‌دهد.	بین ۵ تا ۱۲ روز	۸-۱۰
در صورت نیاز خریدار، تأمین کننده کالا را تا ۳روز زودتر تحویل می‌دهد.	بین ۱۳ تا ۲۰ روز	۶-۸
در صورت نیاز خریدار، تأمین کننده کالا را تا ۱ روز زودتر تحویل می‌دهد.	بین ۲۱ تا ۲۷ روز	۴-۶
تأمین کننده فاقد انعطاف پذیری است.	بین ۲۸ تا ۳۵ روز	۲-۴
احتمال تأخیر در تحویل وجود دارد.	بیش از ۳۵ روز	۰-۲

جدول ۲. نحوه محاسبه امتیاز تأمین کنندگان در رابطه با معیار کیفیت

متوسط درصد کالای معیوب	متوسط زمان رسیدگی به مشکلات	امتیاز
زیر ۱ درصد	بین ۱ تا ۳ روز	۸-۱۰
بین ۱ تا ۱.۵ درصد	بین ۴ تا ۷ روز	۶-۸
بین ۱.۶ تا ۲ درصد	بین ۷ تا ۱۰ روز	۴-۶
بین ۲.۱ تا ۲.۵ درصد	بین ۱۰ تا ۱۳ روز	۲-۴
بیشتر از ۲.۵ درصد	بیش از ۱۳ روز	۰-۲

زیر معیارهای تأمین کنندگان در رابطه با معیار زیست محیطی که بر اساس پرسشنامه شماره یک بدست آمده است.

جدول ۳. زیر معیارهای تأمین کنندگان در رابطه با معیار زیست محیطی

زیر معیارها تأمین کنندگان در رابطه با معیار زیست محیطی
ظرفیت مدیریت کردن سیستم بازیافت
ظرفیت کاهش آلودگی ها
میزان استفاده از مواد سازگار با محیط زیست
دسترسی به تکنولوژی پاک
سیستم مدیریت اطلاعات زیست محیطی
پروسه کنترل داخلی
انواع گواهینامه‌های زیست محیطی
نظارت مستمر
برنامه ریزی‌های زیست محیطی
سیاست‌های زیست محیطی
لجستیک معکوس
مصرف انرژی
میزان ضایعات آبی
آلودگی هوا
ضایعات جامد(قطعات کوچک و قراضه ها)
بازیافت کردن
آموزش کارکنان
طراحی دوباره محصول
خرید تکنولوژی‌های جدید سازگار با محیط زیست
خرید مواد اولیه سازگار با محیط زیست
تبادل اطلاعات
شرکای سازگار با محیط زیست
پشتیبانی مدیریت ارشد

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

بسته بندی پایدار
طراحی پایدار
میزان مصرف
مونتاژ معکوس
ساخت مجدد
استفاده مجدد

امتیاز تأمین کنندگان در رابطه با معیار زیست محیطی طبق پرسشنامه شماره دو بدست آمده است و نحوه کمی کردن نظرات آن‌ها طبق فرمت پرسشنامه طیف لیکیرت بدین صورت بوده است که بسیار ضعیف (۱) ضعیف (۲) متوسط (۳) خوب (۴) عالی (۵) میباشد. بنابراین این مدل، مدلی چند هدفه با در نظر گرفتن چهار هدف اصلی قیمت، کیفیت، سطح خدمت و معیارهای زیست محیطی می‌باشد. در این مدل فرض شده است که خریدار برای انتخاب تأمین کننده n گزینه دارد که ظرفیت تمام آن‌ها محدود است. به همین دلیل ۴ تابع هدف و ۳ گروه محدودیت در مدل منظور شده است.

قبل از ساختن مدل به تعریف پارامترهای مدل می‌پردازیم:

D= تقاضای سالیانه

n= تعداد تأمین کنندگان

X_i= درصدی از کل تقاضا که به تأمین کننده i ام تخصیص داده می‌شود

C_i= ظرفیت سالانه تأمین کننده i ام

P_i= مقدار شاخص هزینه تأمین کننده i ام که از حاصل جمع هزینه خرید و هزینه حمل و نقل هر واحد کالا که توسط تأمین کننده i ام اعلام می‌شود، به دست می‌آید.

S_i= مقدار شاخص سطح خدمت تأمین کننده i ام که از حاصل جمع امتیازهای تأمین کننده i برای زیر معیارهای انعطاف پذیری در تحویل و مدت زمان تحویل به دست می‌آید.

q_i= مقدار شاخص کیفیت تأمین کننده i ام که از جمع امتیازهای تأمین کننده i برای زیر معیارهای درصد کالای معیوب و متوسط زمان رسیدگی به مشکلات به دست می‌آید.

در حالت کلی وقتی تقاضا قطعی است و X_i درصدی از Q که به تأمین کننده i ام تخصیص داده شده باشد (مقادیر X_iو Q در همه دوره‌ها یکسان هستند) رابطه زیر صادق خواهد بود.

$$0 \le X_i \le 1 \qquad\qquad i = 1,2,\dots,n$$

توابع هدف:

در این مدل جهت انتخاب تأمین کننده سبز ۴ تابع هدف را برای بهینه سازی ۴ معیار اصلی انتخاب در نظر گرفته ایم که عبارتند از: کیفیت، قیمت، سطح خدمت و عملکرد زیست محیطی تأمین کنندگان.

الف: تابع هزینه کل ($TAPC$)[1]:

کل هزینه‌های خرید در مرحله تأمین در برگیرنده هزینه خرید، هزینه نگهداری و انبار داری،حمل و نقل و سفارش دهی می‌باشد که می‌توان آن‌ها را به سه گروه تقسیم نمود:

- هزینه سفارش دهی سالیانه

[1]Total Annual Purchasing Cost

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

- هزینه نگهداری سالیانه
- هزید خرید سالیانه

تابع Z_1جهت حداقل نمودن هزینه کل طبق تعریف مدل عمید و همکاران(۲۰۰۶) به صورت زیر می‌باشد:

$$Min\ Z_1 = (\sum_{i=1}^{n} A_i\ Y_i)\frac{D}{Q} + \frac{rQ}{2}(\sum_{i=1}^{n} X_i^2\ P_i) + \sum_{i=1}^{n} X_i P_i\ D \quad \text{(رابطه ۱)}$$

که در آن:

A_i= هزینه سفارش دهی از تأمین کننده iام

r= نرخ هزینه نگهداری موجودی

Y_i یک متغیر صفر و یک است بدین صورت که اگر $X_i>0$باشد برابر ۱ بوده و در غیر این صورت برابر ۰ است.

در این تحقیق تابع هزینه جهت حداقل نمودن به صورت زیر تعریف می‌گردد که در آن فقط از هزینه خرید استفاده شده است.

$$Min\ (Z_1) = \sum_{i=1}^{n} X_i D P_i \quad \text{(رابطه ۲)}$$

ب: تابع کیفیت:

یکی از مهمترین معیارها برای انتخاب تأمبن کننده کیفیت می‌باشد که در این مدل با توجه به اینکه درصد قطعات قابل قبول تأمین کننده i ام برابر q_iو نسبت خرید از این تأمین کننده برابر با X_iاست، تابع Z_2جهت حداکثر نمودن کیفیت به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$Max\ Z_2 = \sum_{i=1}^{n} X_i D q_i \quad \text{(رابطه ۳)}$$

ج: تابع سطع خدمت

معیار دیگر در انتخاب تأمین کنندگان سطح خدمت رسانی تأمین کننده(درصد قطعاتی که به موقع تحویل می‌دهد) می‌باشد که اگر سطح خدمت رسانی تأمین کننده i ام ، S_iو نسبت خرید از این تأمین کننده X_iباشد تابع Z_3جهت حداکثر نمودن سرویس به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$Max\ Z_3 = \sum_{i=1}^{n} X_i D S_i \quad \text{(رابطه ۴)}$$

د:تابع عملکرد زیست محیطی

دیگر معیاری که امروزه در انتخاب تأمین کننده مورد توجه سازمان‌ها قرار گرفته است، معیار عملکرد زیست محیطی[1] می‌باشد. لذا در این تحقیق ، این معیار نیز در مدل دیده شده است که در مورد نحوه بنا نمودن تابع هدف عملکرد زیست محیطی توضیحات زیر آورده شده است.

فرض کنید به ازای هر کدام از شاخص‌های زیست محیطی دخیل در انتخاب تأمین کننده مانند: طراحی سبز، مدیریت زیست محیطی، بازیافت ، لجستیک معکوس و... تابعی به شکل زیر تعریف کنیم. باید توجه کنیم که این شاخص‌ها و معیارها از وضعیت خاص به صنعتی دیگر قابل تبدیل است.

$$f_i = \alpha_{i1}x_1 + \alpha_{i2}x_2 + \ldots + \alpha_{in}x_n \qquad i = 1,2,\ldots,m \quad \text{(رابطه ۵)}$$

که در آن n تعداد تأمین کنندگان، m تعداد شاخص‌ها و معیارهای زیست محیطی دخیل در انتخاب تأمین کننده سبز که در طی پرسشنامه موجود در پیوست ۱ قابل دستیابی است. برای اینکار چارچوب پیشنهادی درمدل هامفریس و همکاران(۲۰۱۳) با تغییرات اندک پایه‌ای برای طراحی پرسشنامه قرار گرفته است که خود دلیلی بر روایی پرسشنامه می‌باشد. در این پرسشنامه از مدیران خرید سازمان مربوطه در مورد زیر معیارهای زیست محیطی آن‌ها در پروسه انتخاب تأمین کننده سبز پرسیده می‌شود. لذا با توجه به پرسشنامه شماره یک(موجود در پیوست) و مطالب بالا دو مزیت اساسی جامعیت مدل پیشنهادی در مورد زیر معیارهای زیست محیطی منظور در پروسه انتخاب تأمین کننده سبز و قابلیت انعطاف بالای مدل در تعداد زیر معیارهای زیست محیطی منظور در پروسه انتخاب تأمین کننده سبز به وضوح قابل مشاهده اند.

[1]Environmental Performance

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

α_{ij} ضریبی است که عملکرد تأمین کننده jام را در معیار i ام نشان می‌دهد. باید ذکر کرد که این α_{ij}ها در این تحقیق با استفاده از تکنیک طیف لیکرت و توسط پرسشنامه شماره دو (موجود در پیوست)به دست می‌آیند. به هر کدام از m قسمت پرسشنامه که توجه کنید می‌بینید عملکرد تأمین کننده i ام در مورد اهتمام به زیر معیار زیست محیطی jام از مدیر خرید پرسیده شده است که مدیر با توجه به مفهوم طیف لیکرت با علامت زدن یکی از ۵ خانه مشخص شده مقادیر α_{ij} مورد نیاز مدل را تعیین می‌کند.

پس از بدست آوردن m تابع زیر معیارهای محیط زیستی، حال تابع عملکرد زیست محیطی را می‌توان اینگونه تعریف کرد. $Z_4 = \beta_i f_i$ که در آن β_iها میزان تأثیر هر کدام از m معیار در تابع اثرات زیست محیطی می‌باشد که در این تحقیق به وسیله تئوری مجموعه‌های راف به دست می‌آید. لذا اگر پروسه فوق را به صورت کامل انجام دهیم تابع Z_4جهت حداکثر سازی به صورت زیر تبدیل خواهد شد که می‌توان گفت E_iها از ترکیب β_iها و α_{ij} بدست می‌آیند و به معنی امتیازهای نسبی تأمین کنندگان نسبت به یکدیگر در مورد عملکرد زیست محیطی آنان می‌باشد. پس داریم تابع Z_4جهت حداکثر نمودن عملکرد زیست محیطی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$Max\ Z_4 = \sum_{i=1}^{n} X_i DE_i \quad \text{(رابطه ۶)}$$

- محدودیت‌ها

الف: محدودیت تأمین تقاضا:

$$\sum_{i=1}^{n} X_i\, D = D \ \rightarrow \ \sum_{i=1}^{n} X_i = 1 \quad \text{(رابطه ۷)}$$

ب: محدودیت ظرفیت تأمین کنندگان

ظرفیت تأمین کنندگان نیز محدود می‌باشد و C_i مقدار حدکثر تولید سالیانه فروشنده i ام است.

$$X_i D \ \leq \ C_i \qquad\qquad i = 1,2, \dots, n \quad \text{(رابطه ۸)}$$

ج: محدودیت متغیرهای صفر و یک

برای مدل کردن این محدودیت باید از محدودیت‌های اگر-آنگاه استفاده کنیم که در آن ε عددی کوچک و کمی بزرگتر از صفر است.

$$X_i \leq Y_i$$
$$X_i \geq \varepsilon Y_i i = 1,2, \dots, n \quad \text{(رابطه ۹)}$$

-ارائه مدل نهایی

با ساختن اجزا مدل، مدل نهایی به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$Min\ Z_1 = \sum_{i=1}^{n} X_i DP_i$$
$$Max\ Z_2 = \sum_{i=1}^{n} X_i DS_i$$
$$Max\ Z_3 = \sum_{i=1}^{n} X_i Dq_i$$
$$Max\ Z_4 = \sum_{i=1}^{n} X_i DE_i$$

s.t:

$$X_i D \ \leq \ C_i \qquad\qquad i = 1,2, \dots, n$$
$$X_i \leq Y_i \ i = 1,2, \dots, n$$

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

$$X_i \geq \varepsilon Y_i i = 1,2,\dots,n$$
$$\sum_{i=1}^{n} X_i = 1$$
$$X_i \geq 0, Y_i = 0,1 i = 1,2,\dots,n$$
(رابطه ۱۰)

- ارزیابی اوزان با تئوری مجموعه‌های راف

در اکثر مسائل $MCDM$ و بخصوص بخش $MADM$ نیاز به داشتن و دانستن اهمیت نسبی شاخص‌ها (اهداف) موجود داریم، به طوری که مجموع آن‌ها برابر واحد شده و این اهمیت نسبی درجه ارجحیت هر شاخص (هدف) را نسبت به بقیه برای تصمیم گیری مورد نظر بسنجد.

تئوری مجموعه‌های راف و تکنیک آنتروپی نیاز به ماتریس تصمیم گیری داشته، با توجه به مبانی نظری در رابطه با تئوری مجموعه‌های راف که توسط پاولاک در سال ۱۹۸۲ ارائه شده است این روش یک روش ریاضی جدید برای برخورد با ابهام و عدم قطعیت است و نحوه وزن دهی به اهداف طبق رابطه خواهدبود.

$$W_i = \frac{I(A)-I(A-\{a_i\})}{nI(A)-\sum_{j=1}^{n} I(A-\{a_j\})} \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

جامعه آماری در این تحقیق قطعه سازانی که برای شرکت ایران خودرو قطعه میسازند(تامین کنندگان قطعه برای ایران خودرو) و صاحبنظران ، کارشناسان و مدیرانی از ایران خودرو که با مدیریت زنجیره تامین سبز و مسائل زیست محیطی آشنایی داشته و در مرحله اجرا یکی از مولفه‌های مهم قطعه سازان میباشند تامین کنندگانی انتخاب شده اند به طوری که تعداد نیروی انسانی آن‌ها بیشتر از ۵۰ نفر باشد همچنین این قطعه سازان با مسائل زیست محیطی درگیر باشند. از این تامین کنندگان جهت جمع آوری داده‌های اسنادی استفاده شده است.تعداد شرکتهای قطعه سازی که شرایط فوق الذکر را داشته اند ۲۱ شرکت بوده که ۱۸ شرکت برای همکاری اعلام آمادگی کردند.

جهت تعیین حجم نمونه از شرکت ایران خودرو برای پاسخ دهی به سه پرسشنامه تحقیق با توجه به محدود بودن کارشناسان و مدیرانی که با خرید قطعات از تامین کنندگان درگیربوده و با مسائل زیست محیطی آشنایی کافی داشته اند. از فرمول تعیین حجم نمونه مورگان استفاده شد که تعداد آن‌ها ۸۰ نفر بودند بر اساس جدول مورگان حجم نمونه آماری ۶۶ نفر بوده است. روش نمونه گیری تصادفی ساده(با شرط حداقل سابقه کار سه ساله) بوده و بنابراین پرسشنامه‌های تحقیق در اختیار نمونه آماری منتخب قرار داده شده است.

روش جمع آوری داده و انتخاب روش تحقیق به کار برده شده از نوع هدف، کاربردی، از حیث شیوه ی گردآوری داده ها میدانی و از نظر میزان کنترل متغیرها، توصیفی- پیمایشی است. در این پژوهش برای پوشش مباحث تئوری تحقیق، کتب تخصصی و عمومی، مقالات و نشریات تخصصی و همچنین به منظور گردآوری داده ها از پرسش نامهو بهره گیری از نظرات افراد خبره و اسناد و مدارک شرکتهای منتخب استفاده شده است.

در این پژوهش ابتدا با بررسی تحقیقات صورت گرفته در زمینه انتخاب زنجیره تامین ، مولفه‌های موثر بر انتخاب زنجیره تامین سبز استخراج شده‌اند سپس با غربالگری مؤلفه‌های شناسایی شده، و شاخصهای مربوط به آن‌ها مولفه‌ها و شاخصهای مؤثر بر عملکرد و انتخاب زنجیره تامین سبز در صنعت قطعه سازی خودرو مشخص شده اند. به منظور بررسی دیدگاه کارشناسی، علمی، پرسشنامه‌هایی برای شناسایی مولفه‌ها و شاخص‌های موثر در انتخاب زنجیره تامین سبز(معیارهای زیست محیطی) و همچنین وزن دهی اهداف مدل سه پرسشنامه طراحی شده است که در آن n تعداد تأمین کنندگان، m تعداد شاخص‌ها و معیارهای زیست محیطی دخیل در انتخاب تأمین کننده سبز قابل دستیابی باشد. در این پرسشنامه از مدیران مربوطه ، کارشناسان و... در مورد زیر معیارهای زیست محیطی آن‌ها در پروسه انتخاب تأمین کننده سبز پرسیده

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

شده است در تحقیق فوق مولفه‌ها ، شاخصها و محدودیت‌های مهم و تاثیر گذار کمی و عددی از طریق اسناد و مدارک صنعت مورد نظر، بدست آمده است.

برای مشخص نمودن روایی پرسشنامه از روایی محتوا استفاده شده است. در این نوع از بررسی روایی از دو ضریب نسبی روایی محتوا (*CVR*) و شاخص روایی محتوا (*CVI*)، استفاده و در شاخص *CVI* بایستی مقدار محاسبه شده از ۰/۷۹ بزرگتر باشد. که مقدار آن در این تحقیق به طور متوسط برابر ۰/۹۱ بوده است. برای تعیین پایایی از ضریب آلفای کرونباخ بهره گرفته شده است، مقدار ضریب آلفای کرونباخ حداقل بایستی از ۰/۷ بیشتر باشد. نتایج نشان می‌دهد که مقدار ضریب آلفای کزونباخ برای همه مولفه‌های اصلی بیشتر از ۰/۸۳۹ بوده که بر همین اساس پایایی پرسشنامه تأیید شده است. اصلی شاخص‌های ارزیابی مدیریت زنجیره تأمین سبز از تحلیل عاملی تأییدی ، برای تدوین و محاسبه مدل ارزیابی انتخاب زنجیره تأمین سبز از سیستم برنامه ریزی چند هدفه و مجموعه‌های راف استفاده شده است.

یافته‌ها

بر اساس نتایج تحقیق ضریب عملکرد تأمین کنندگان در زیر معیارهای زیست محیطی برای ۱۸ شرکت مورد مطالعه به شرح جدول (۴) زیر بوده است.

جدول ۴. ضریب عملکرد تأمین کنندگان در زیر معیارهای زیست محیطی برای ۱۸ شرکت

متوسط وزن هر تامین کننده (Ei)	نام تامین کننده
۳	S۱
۴.۸	S۲
۴.۹	S۳
۳.۹	S۴
۳.۱	S۵
۳	S۶
۲.۴	S۷
۳.۹	S۸
۳	S۹
۲.۹	S۱۰
۳.۹	S۱۱
۲.۷	S۱۲
۳.۳	S۱۳
۳.۹	S۱۴
۲.۹	S۱۵
۳.۹	S۱۶
۲.۷	S۱۷
۱.۹	S۱۸

سوال اصلی تحقیق:مدل کارآمد و قابل انعطاف برای ارزیابی و انتخاب تأمین کنندگان بر اساس شاخص‌های زیست محیطی چگونه باید باشد. در نتیجه مدلی در این تحقیق ارائه شده است که در زمینه انتخاب تأمین کننده سبز یک مدل دقیق برنامه ریزی ریاضی چند هدفه با حضور محدودیت‌های واقعی می‌باشد. لذا می‌توان در صنایع مختلف مانند صنایع شیمیایی یا پتروشیمی با توجه به آلودگی فراوان زیست محیطی موجود در آن‌ها از این مدل جهت تأمین قطعات مختلف مورد نیاز در آن صنعت استفاده کرد تا مدل با در نظر گرفتن تمام شرایط، به تقسیم تقاضای سازمان در مورد قطعه مورد نظر، بین تأمین کنندگان کاندید برای تأمین آن بپردازد. در این تحقیق نظر به اهمیت تأمین کنندگان

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

سبز در زنجیره تأمین و افزایش دقت مدل از یک روش قاعده مند بر اساس تئوری مجموعه‌های راف استفاده شده است. تئوری مجموعه‌های راف برای زمانی که تعدادی از داده‌ها نیز در دسترس نیستند قابل استفاده بوده که این نکته یکی از ویژگی‌های تئوری مجموعه‌های راف می‌باشد. در این تحقیق از تئوری مجموعه‌های راف برای پیدا کردن وزن زیر معیارهای زیست محیطی استفاده شده است. به طور خلاصه می‌توان گفت که تئوری مجموعه‌های راف یکی از ابزارهایی است که محققین و تصمیم گیرندگان می‌توانند در مسائل مختلف از قبیل ارزیابی و انتخاب تأمین کنندگان در زنجیره تأمین و دیگر فعالیت‌های موجود در زنجیره تأمین به کار گیرند. ابزار انتخاب بهینه تامین کنندگان برای شرکت ایران خودور، استفاده از برنامه ریزی چند هدفه بوده است که با استفاده روش وزن دهی به اهداف تبدیل به برنامه ریزی خطی شده و نسبت به حل و تفسیر آن اقدام شده است.

بر اساس نتایج بدست آمده از نمونه آماری طبق پرسشنامه شماره سه(جدول مقایسات زوجی) وزن و اهمیت هریک از توابع هدف(قیمت ، سطح خدمات ، کیفیت قطعات ، عوامل زیست محیطی) برنامه چند هدفه (۱۸ تامین کننده منتخب) تبدیل به برنامه ریزی خط طبق رابطه (۱۲) به مرحله اجرا درآمد.

جدول ۵. ضرایب توابع هدف برنامه ریزی چند هدفه

مقدار وزن	Wi	عنوان زیر معیار	علامت
۰.۵۴	W۱	تابع هدف هزینه یا قیمت	Z۱
۰.۱۲	W۲	تابع هدف سطح خدمت	Z۲
۰.۱۹	W۳	تابع هدف کیفیت	Z۳
۰.۱۵	W۴	تابع هدف زیست محیطی	Z۴

با توجه به توضیحات ذکر شده مدل نهایی برنامه ریزی خطی ناشی از روش وزن دهی به اهداف به شرح زیر بوده است.

$$MAX\ Z_1 = \mathbf{0.54}(-\frac{12}{259.4}X_1 - \frac{22.1}{259.4}X_2 - \frac{20.6}{259.4}X_3 - \frac{10.8}{259.4}X_4 - \frac{12.8}{259.4}X_5 - 14.3X_6 - \cdots - \frac{13.6}{259.4}X_{18}) + \mathbf{0.12}(\frac{7}{135}X_1 + \frac{10}{135}X_2 + \frac{8}{135}X_3 + \frac{2}{135}X_4 + \frac{7}{135}X_5 + \frac{4}{135}X_6 + \cdots + \frac{7}{135}X_{18}) + \mathbf{0.19}(\frac{10}{139}X_1 + \frac{9}{139}X_2 + \frac{7}{139}X_3 + \frac{7}{139}X_4 + \frac{6}{139}X_5 + \frac{9}{139}X_6 + \cdots + \frac{9}{139}X_{18}) + \mathbf{0.15}(\frac{3}{60.1}X_1 + \frac{4.8}{60.1}X_2 + \frac{4.9}{60.1}X_3 + \frac{3.9}{60.1}X_4 + \frac{3.1}{60.1}X_5 + \frac{3}{60.1}X_6 + \cdots + \frac{1.9}{60.1}X_{18})$$

$s.t;$

محدودیت ظرفیت تأمین کنندگان:

$$20000X_1 \leq 1920$$
$$20000X_2 \leq 8960$$
$$20000X_3 \leq 4560$$
$$20000X_4 \leq 1500$$
$$20000X_5 \leq 450$$
$$20000X_6 \leq 1000$$
$$; \dots ;$$
$$20000X_{18} \leq 1000$$

محدودیت متغیرهای صفر و یک:

$$X_i \leq Y_i \qquad i = 1,2,\dots,18$$
$$X_i \geq \varepsilon Y_i \qquad i = 1,2,\dots,18$$

محدودیت تأمین تقاضا:

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

$$\sum_{i=1}^{18} X_i = 1$$

به شرطی که:

$$X_i \geq 0 \quad Y_i = 0,1 \qquad i = 1,2,\dots,18$$

(رابطه ۱۲)

بعد از حل با استفاده از نرم افزار *winqsb* مقادیر *Xi* و توابع هدف و محدودیت‌های به شرح زیر بوده است. با توجه به نتایج بالا مقادیر بهینه x_iها به صورت زیر است.

$$x_2^* = 0.11 \quad x_3^* = 0.11 \quad x_4^* = 0.07 \quad x_7^* = 0.08 \quad x_8^* = 0.07 \quad x_9^* = 0.08$$

$$x_{10}^* = 0.04 \quad x_{11}^* = 0.08 \quad x_{13}^* = 0.08 \quad x_{15}^* = 0.10 \quad x_{16}^* = 0.08 \quad x_{17}^* = 0.10$$

-با توجه مقادیر متغیرهای اساسی و تابع هدف اول مقدار منیمم هزینه برابر $Z1 = 15.885$ میلیارد ریال (۱۵۸۸۵۰۰۰۰۰۰ ریال)خواهدبود.

-با توجه مقادیر متغیرهای اساسی و تابع هدف دوم مقدار ماکزیمم سطح خدمات برابر $Z2 = 8.854$ روز خواهد بود.

-با توجه مقادیر متغیرهای اساسی و تابع هدف سوم مقدار $Z3 = 7.43$ واحد (۲.۶۵ درصد کالای معیوب ، ۴.۷۸ روز رسیدگی به مشکلات) خواهدبود.

-با توجه مقادیر متغیرهای اساسی و تابع هدف چهارم مقدار $Z4 = 3.62$ واحد خواهدبود.

-با توجه مقادیر متغیرهای اساسی و محدویت‌های ظرفیت تأمین کنندگان مقدار خرید شرکت ایران خودرو که مجموعا ۲۰۰۰۰ تن بوده است از هریک تامین کنندگان شماره۲،۳،۴،۷،۸،۹،۱۰،۱۱،۱۳،۱۵،۱۶،۱۷به ترتیب برابرجدول ۴-۵ خواهد بود.

جدول ۶. مقدار تقاضای ایران خودرو از هریک از تامین کنندگان قطعات

شماره تامین کننده	ظرفیت تأمین کنندگان	مقدار تقاضا
۲	۸۹۶۰	۲۰۰۰۰*۰.۱۱=۲۲۰۰
۳	۴۵۶۰	۲۰۰۰۰*۰.۱۱=۲۲۰۰
۴	۱۵۰۰	۲۰۰۰۰*۰.۰۷=۱۴۰۰
۷	۲۰۰۰	۲۰۰۰۰*۰.۰۸=۱۶۰۰
۸	۱۵۰۰	۲۰۰۰۰*۰.۰۷=۱۴۰۰
۹	۱۲۵۰۰	۲۰۰۰۰*۰.۰۸=۱۶۰۰
۱۰	۹۰۰۰	۲۰۰۰۰*۰.۰۴=۸۰۰۰
۱۱	۱۸۰۰	۲۰۰۰۰*۰.۰۸=۱۶۰۰
۱۳	۱۵۰۰	۲۰۰۰۰*۰.۰۸=۱۶۰۰
۱۵	۲۰۰۰	۲۰۰۰۰*۰.۱۰=۲۰۰۰
۱۶	۲۰۰۰	۲۰۰۰۰*۰.۰۸=۱۶۰۰
۱۷	۲۰۰۰	۲۰۰۰۰*۰.۱۰=۲۰۰۰
جمع تقاضا		۲۰۰۰۰

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که در فرآیند انتخاب تأمین‌کنندگان سبز، چهار مؤلفه اصلی یعنی قیمت، کیفیت، سطح خدمت و عملکرد زیست‌محیطی نقشی تعیین‌کننده دارند و میان آن‌ها، معیار قیمت بیشترین وزن را به خود اختصاص داده است. این یافته با واقعیت‌های صنعتی

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

کشور، به‌ویژه در بخش خودروسازی که حساسیت نسبت به هزینه‌ها بالاست، هم‌خوانی دارد. از سوی دیگر، سهم نسبتاً بالا و معنادار معیار عملکرد زیست‌محیطی نشان می‌دهد که شرکت‌ها در حال گذار از رویکرد صرفاً اقتصادی به سمت نگرش پایداری و توسعه سبز هستند. به‌کارگیری مدل برنامه‌ریزی چندهدفه در کنار تئوری مجموعه‌های راف موجب شد تا تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت به شکل دقیق‌تری انجام گیرد و وزن‌دهی معیارها با حداقل سوگیری صورت پذیرد؛ این امر، دقت مدل را نسبت به روش‌های کلاسیک افزایش داد و انتخاب تأمین‌کنندگان را به واقعیت‌های پیچیده بازار نزدیک‌تر ساخت (Alamroshan et al., 2022; Hailiang et al., 2023).

این نتیجه که معیار قیمت هنوز در رأس اولویت‌ها قرار دارد، با یافته‌های پژوهش‌های کلاسیک در حوزه انتخاب تأمین‌کننده هم‌راستا است. برای مثال، در مطالعه (Kannan et al., 2008) مشخص شد که بسیاری از سازمان‌ها حتی در چارچوب رویکرد سبز، هنوز تمایل دارند هزینه‌های کوتاه‌مدت را بر اهداف بلندمدت زیست‌محیطی مقدم دارند. با این حال، مشاهده سهم معنادار معیار زیست‌محیطی در پژوهش حاضر نشان می‌دهد که گرایش شرکت‌ها به پایداری در حال افزایش است؛ امری که با یافته‌های (Tseng & Chiu, 2013) نیز هم‌خوانی دارد که تأکید داشتند شرکت‌ها به تدریج ارزش‌های سبز را به‌عنوان بخشی از معیارهای اصلی عملکردی خود می‌پذیرند.

در تحلیل نتایج تفصیلی مدل، مشخص شد که از میان ۱۸ تأمین‌کننده بررسی‌شده، ۱۲ تأمین‌کننده با بالاترین امتیازهای ترکیبی از نظر هزینه، کیفیت، خدمت و زیست‌محیطی انتخاب شدند. این یافته حاکی از آن است که رویکرد ترکیبی برنامه‌ریزی چندهدفه توانسته است توازن مطلوبی میان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی برقرار سازد. مدل چندهدفه به‌کاررفته در این پژوهش، با مدل‌های توسعه‌یافته توسط (Lo et al., 2018) و (Akman, 2015) مشابهت دارد که هر دو بر ادغام اهداف کیفی و کمی برای تصمیم‌گیری در شرایط پیچیده تأکید داشتند. در این مدل‌ها، وزن‌دهی به معیارها موجب شد تصمیم‌گیرندگان بتوانند با وضوح بیشتری تأمین‌کنندگان برتر را شناسایی کنند، که در پژوهش حاضر نیز مشاهده شد.

یکی دیگر از نتایج قابل توجه، نقش مثبت مؤلفه‌های فناورانه در بهبود عملکرد زیست‌محیطی بود. تأمین‌کنندگانی که از فناوری‌های پاک و سیستم‌های بازیافت استفاده می‌کردند، امتیازات بالاتری کسب کردند. این موضوع با یافته‌های (Ebrahimi, 2024) هم‌خوانی دارد که بیان می‌دارد نوآوری فناورانه و بهره‌گیری از فناوری‌های جدید، می‌تواند عدم قطعیت‌های زیست‌محیطی را کاهش دهد و عملکرد کلی زنجیره تأمین را بهبود بخشد. از دیدگاه (Zhang, 2024) نیز پیاده‌سازی فناوری‌های کاهش‌دهنده کربن در صنعت خودرو یکی از مهم‌ترین محرک‌های موفقیت زنجیره تأمین سبز است. در پژوهش حاضر، داده‌های به‌دست‌آمده از ایران‌خودرو نیز مؤید همین مسئله بود که استفاده از فناوری پاک نه‌تنها باعث کاهش آلودگی، بلکه موجب افزایش اعتماد و رضایت مشتریان شده است.

علاوه بر فناوری، یافته‌های این تحقیق اهمیت مدیریت اطلاعات زیست‌محیطی و اشتراک‌گذاری داده‌ها میان اعضای زنجیره تأمین را نیز برجسته ساخت. این مؤلفه‌ها از طریق مجموعه‌های راف و ارزیابی پرسشنامه‌ای مورد سنجش قرار گرفتند و نقش مؤثری در ارتقای امتیاز تأمین‌کنندگان داشتند. این یافته با نتایج (Santos et al., 2024) مطابقت دارد که در پژوهش خود نشان دادند اشتراک‌گذاری داده‌های محیطی می‌تواند نقش میانجی در کاهش پدیده سبزشویی و افزایش شفافیت ایفا کند. پدیده سبزشویی که توسط (Pizzetti et al., 2021) به‌عنوان «سبزشویی نیابتی» معرفی شد، زمانی بروز می‌کند که شرکت‌ها به‌صورت ظاهری از واژه‌های زیست‌محیطی بهره می‌گیرند اما در عمل، تأثیری واقعی بر پایداری ندارند. از این منظر، مدل حاضر با تکیه بر داده‌های واقعی و وزن‌دهی کمی، به مدیران کمک می‌کند از دام ادعاهای سطحی خارج شوند و عملکرد واقعی تأمین‌کنندگان را بسنجند.

در بررسی تفصیلی نتایج مشخص شد که سطح خدمت و کیفیت تأمین‌کنندگان نیز همبستگی مثبت معناداری با شاخص‌های زیست‌محیطی دارند. این بدین معناست که تأمین‌کنندگان سبز معمولاً از سیستم‌های کنترل کیفیت و لجستیک کارآمدتری برخوردارند. یافته حاضر با نتایج (Yu et al., 2024) هم‌راستا است که نشان داد ادغام مدیریت زنجیره تأمین سبز با عملکرد عملیاتی، موجب بهبود کیفیت و زمان تحویل می‌شود. همچنین، (Rashid et al., 2024) تأکید کردند که استفاده از هوش مصنوعی و تحلیل کلان‌داده‌ها در فرآیند انتخاب تأمین‌کننده

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

می‌تواند به شناسایی الگوهای پنهان و ارتقای بهره‌وری کمک کند—نکته‌ای که در مدل حاضر از طریق استفاده از داده‌های کمی و رویکرد چندهدفه محقق شد.

از سوی دیگر، یافته‌ها نشان دادند که برخی تأمین‌کنندگان با وجود سطح خدمات مطلوب، در معیار زیست‌محیطی ضعیف‌تر عمل کردند. این تضاد نشان‌دهنده وجود چالش میان کارایی اقتصادی و پایداری است که در بسیاری از پژوهش‌ها نیز گزارش شده است. برای مثال، (Kang et al., 2021) بیان می‌کند که در زنجیره‌های تأمین سبز، تأمین‌کنندگان ریسک‌گریز ممکن است برای حفظ سودآوری از سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک اجتناب کنند. از منظر رفتاری، (Yang & Jiang, 2023) نشان دادند که فشار محیطی خریداران بر تأمین‌کنندگان، در صورتی مؤثر است که ساختار ارتباطی و اعتماد متقابل میان طرفین وجود داشته باشد؛ در غیر این صورت، سیاست‌های سبز به‌صورت ظاهری باقی می‌مانند.

تحلیل نتایج نشان داد که مدیریت ریسک و تاب‌آوری زنجیره تأمین سبز نقش محوری در موفقیت دارد. مدل ترکیبی ارائه‌شده در این پژوهش توانست نشان دهد که تأمین‌کنندگان دارای سیستم‌های مدیریتی انعطاف‌پذیر، در مقابل تغییرات بازار و الزامات زیست‌محیطی پایدارتر عمل می‌کنند. این نتیجه با یافته‌های (Rachid et al., 2024) و (Hailiang et al., 2023) هماهنگ است که هر دو بر ضرورت ادغام تاب‌آوری، چابکی و پایداری زیست‌محیطی در چارچوبی واحد تأکید داشتند. از سوی دیگر، (Ningrum et al., 2024) نشان دادند که اجرای مؤثر زنجیره تأمین سبز با بهبود عملکرد کلی شرکت و کاهش مخاطرات زیست‌محیطی همراه است، که تأییدکننده اعتبار نتایج حاضر می‌باشد.

در تبیین تطبیقی یافته‌ها، می‌توان گفت پژوهش حاضر علاوه بر تأیید رویکردهای بین‌المللی، جنبه بومی مهمی نیز دارد. در ایران، چالش‌های نهادی، مالی و فرهنگی مانع از پیاده‌سازی کامل GSCM شده است (Zarei et al., 2025). بااین‌حال، مدل پیشنهادی توانست در محیط واقعی ایران‌خودرو با موفقیت اجرا شود و تأمین‌کنندگان برتر را شناسایی کند. این نتیجه از نظر کاربردی قابل‌توجه است، زیرا نشان می‌دهد که ابزارهای تحلیلی مدرن مانند مجموعه‌های راف می‌توانند در محیط‌های اقتصادی در حال توسعه نیز به کار گرفته شوند (Haghighat Monfared & Karimi, 2024). همچنین، یافته‌ها با دیدگاه (Judijanto et al., 2024) هم‌سو است که بیان می‌دارد اجرای سیاست‌های مالی و اعتباری سبز، توانایی سازمان‌ها را در تأمین مالی پروژه‌های زیست‌محیطی افزایش می‌دهد.

در نهایت، نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از مدل ترکیبی برنامه‌ریزی چندهدفه و مجموعه‌های راف می‌تواند عدم قطعیت‌های ناشی از قضاوت انسانی را کاهش دهد و انتخاب تأمین‌کنندگان را به شکلی علمی‌تر انجام دهد. این امر با رویکردهای جدیدی که بر هوش تصمیم‌گیری سبز تأکید دارند هم‌خوان است. بر اساس دیدگاه (Rashid et al., 2024) و (Yu et al., 2024)، ادغام فناوری‌های تحلیلی و تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند مسیر جدیدی برای توسعه سیستم‌های تصمیم‌یار سبز در صنایع تولیدی ایجاد کند. همچنین نتایج این پژوهش با یافته‌های (Samadzadeh et al., 2022) هم‌راستا است که بر ضرورت سیاست‌گذاری داده‌محور در حوزه فناوری‌های سبز تأکید داشتند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مدل حاضر ضمن حفظ قابلیت تعمیم، از دقت، انعطاف و کارایی بالایی برخوردار است و می‌تواند به‌عنوان الگویی برای انتخاب تأمین‌کنندگان سبز در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

این پژوهش هرچند تلاش کرده است مدلی دقیق و چندبعدی برای انتخاب تأمین‌کنندگان سبز ارائه کند، اما با محدودیت‌هایی نیز روبه‌رو بوده است. نخست آنکه داده‌های به‌کاررفته محدود به یک صنعت خاص (خودروسازی) و یک شرکت مادر (ایران‌خودرو) بوده است؛ ازاین‌رو، تعمیم نتایج به سایر صنایع با احتیاط باید انجام گیرد. دوم، با وجود استفاده از مجموعه‌های راف برای مدیریت عدم قطعیت، بخشی از داده‌ها بر مبنای قضاوت‌های ذهنی مدیران و کارشناسان جمع‌آوری شده است که می‌تواند سوگیری ادراکی ایجاد کند. سوم، در مدل کنونی تأثیر متغیرهای بیرونی مانند سیاست‌های دولتی، نوسانات اقتصادی و تغییرات تکنولوژیکی به‌صورت مستقیم لحاظ نشده است. همچنین، محدودیت زمانی و دسترسی محدود به تأمین‌کنندگان مانع از گسترش دامنه نمونه به سایر مناطق جغرافیایی کشور شد.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، این مدل در صنایع دیگر مانند پتروشیمی، داروسازی و صنایع غذایی آزمایش شود تا میزان تعمیم‌پذیری آن ارزیابی گردد. همچنین، می‌توان از روش‌های ترکیبی هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی یا الگوریتم‌های ژنتیک در کنار برنامه‌ریزی چندهدفه استفاده کرد تا دقت مدل‌های تصمیم‌گیری افزایش یابد. بررسی نقش متغیرهای فرهنگی و سازمانی در پذیرش مدیریت زنجیره تأمین سبز نیز می‌تواند به غنای نظری حوزه بیفزاید. پژوهش‌های آینده می‌توانند با طراحی مدل‌های پویاتر، تأثیر سیاست‌های کلان زیست‌محیطی و ابزارهای مالی سبز را بر انتخاب تأمین‌کنندگان تحلیل کنند.

در سطح سازمانی، پیشنهاد می‌شود مدیران صنایع تولیدی از مدل‌های تصمیم‌گیری چندهدفه برای انتخاب تأمین‌کنندگان استفاده کنند تا بتوانند تعادل میان هزینه و پایداری را حفظ نمایند. ایجاد سامانه‌های پایش زیست‌محیطی و اشتراک داده میان تأمین‌کنندگان و خریداران می‌تواند موجب افزایش شفافیت و کاهش سبزشویی شود. در سطح کلان، سیاست‌گذاران باید مشوق‌های مالی و اعتباری برای شرکت‌هایی که در زنجیره تأمین سبز مشارکت می‌کنند در نظر گیرند و استانداردهای الزام‌آور زیست‌محیطی را در فرآیند تأمین رسمی کنند. در نهایت، آموزش و ارتقای فرهنگ سازمانی در حوزه پایداری می‌تواند ضامن موفقیت بلندمدت اجرای زنجیره تأمین سبز باشد.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافعی وجود ندارد.

موازین اخلاقی

در انجام این پژوهش تمامی موازین و اصول اخلاقی رعایت گردیده است.

شفافیت داده‌ها

داده‌ها و مآخذ پژوهش حاضر در صورت درخواست از نویسنده مسئول و ضمن رعایت اصول کپی رایت ارسال خواهد شد.

حامی مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

Extended Abstract

Introduction

In recent years, global industries have been facing increasing pressure to adopt environmentally sustainable practices throughout their supply chains, driven by growing environmental awareness, climate change concerns, and stricter regulatory requirements (Tseng & Chiu, 2013). As organizations recognize their environmental and social responsibilities, Green Supply Chain Management (GSCM) has emerged as a crucial strategic approach to integrate sustainability into production, procurement, and distribution processes. The concept emphasizes reducing environmental impact at every stage—from raw material acquisition to product

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

recycling—by selecting suppliers that meet both economic and environmental performance standards (Kannan et al., 2008).

The supplier selection process is especially critical because a substantial proportion of an organization's ecological footprint originates from its upstream supply chain activities. Thus, choosing appropriate green suppliers is not merely a procurement decision but a strategic determinant of environmental and operational performance (Akman, 2015). However, the challenge lies in balancing multiple conflicting objectives such as cost efficiency, service level, product quality, and environmental responsibility. In complex decision-making environments characterized by uncertainty, conventional single-criterion models are inadequate to address these multidimensional considerations (Lo et al., 2018).

Over the last two decades, researchers have developed hybrid multi-criteria and multi-objective models to tackle this challenge. The integration of fuzzy logic, analytic hierarchy process, and rough set theory has shown great potential in improving supplier evaluation accuracy by managing vagueness and uncertainty in human judgments (Alamroshan et al., 2022; Hailiang et al., 2023). As (Ebrahimi, 2024) points out, incorporating advanced analytical methods enhances the precision and adaptability of GSCM decisions under uncertain conditions. Furthermore, the increasing integration of technology, big data analytics, and artificial intelligence has enabled industries to analyze supplier performance with greater accuracy and timeliness, promoting both cost-effectiveness and ecological sustainability (Rashid et al., 2024).

In developing economies, such as Iran, the implementation of GSCM faces specific institutional, financial, and infrastructural challenges. Despite a growing commitment to environmental responsibility, the automotive sector still struggles to harmonize environmental objectives with economic realities (Zarei et al., 2025). Nonetheless, the automotive industry offers one of the most promising platforms for implementing green supplier strategies, as it accounts for significant energy consumption, waste generation, and carbon emissions (Zhang, 2024). Therefore, developing a comprehensive and quantitative model for green supplier selection within this sector can play a pivotal role in achieving sustainability targets.

Recent studies emphasize that transparency, collaboration, and information sharing among supply chain partners can prevent greenwashing—the act of overstating environmental initiatives without substantive action (Pizzetti et al., 2021). According to (Santos et al., 2024), integrating information-sharing mechanisms across the supply chain moderates the negative impact of greenwashing and strengthens the overall sustainability framework. Likewise, (Rezvani et al., 2021) observed that social capital and inter-organizational trust significantly mediate the relationship between green practices and supplier performance.

In addition to these soft relational factors, decision models that quantitatively optimize the trade-offs among multiple objectives have become essential tools in supplier evaluation. Multi-objective mathematical programming (MOP) is one of the most powerful analytical approaches for achieving a balance between economic and environmental objectives. However, traditional MOP assumes complete data certainty, which is rarely achievable in real-world supplier evaluations. To overcome this limitation, rough set theory—a mathematical approach to handle vagueness and incomplete data—has been successfully employed in several recent studies to assign weights to qualitative criteria without the need for additional information (Haghighat Monfared & Karimi, 2024).

Combining MOP with rough set theory can therefore enhance decision-making robustness, particularly in complex industrial contexts where both numerical precision and qualitative assessment are required. This hybrid approach enables the model to process linguistic and uncertain evaluations while preserving analytical rigor (Alamroshan et al., 2022). As emphasized by (Hailiang et al., 2023) and (Rachid et al., 2024), integrating agility, resilience, and green dimensions into supply chain decision models creates a holistic system that ensures environmental performance without compromising competitiveness.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

Accordingly, this study contributes to the growing body of GSCM literature by developing and applying a hybrid multi-objective programming and rough set model for selecting green suppliers in the Iranian automotive industry. The model considers multiple quantitative and qualitative factors—including cost, quality, service level, and environmental performance—and provides a decision-making framework capable of operating under uncertainty.

The aim of this study is to design and validate a hybrid mathematical model based on multi-objective programming and rough set theory for the optimal selection of green suppliers in Iran Khodro Company.

Methods and Materials

This research adopted an applied–developmental approach with a descriptive–analytical design. Data were collected through a combination of fieldwork, document review, and structured questionnaires administered to procurement and environmental management experts at Iran Khodro and its suppliers. The statistical population comprised managers and specialists involved in green procurement and environmental operations across 18 major suppliers. Based on the Morgan table, a sample of 66 respondents was selected.

Three researcher-designed questionnaires were developed to assess economic, service, quality, and environmental criteria. Content validity was confirmed by experts using the Content Validity Index (CVI = 0.91), and reliability was ensured through Cronbach's alpha coefficients exceeding 0.83.

In the analytical stage, the study employed a hybrid decision-making model that combined multi-objective mathematical programming (to optimize cost, service, and defect rate objectives) with rough set theory (to determine the weights of qualitative environmental indicators). The multi-objective model was converted into a single-objective linear form using the WinQSB software for optimization. Data were then analyzed through confirmatory factor analysis and statistical testing to confirm the consistency and significance of identified factors.

Findings

The model results demonstrated that four key dimensions—cost, quality, service level, and environmental performance—significantly influenced the supplier selection process. The relative importance of these criteria, obtained through rough set analysis, were as follows: cost (0.54), quality (0.12), service level (0.19), and environmental performance (0.15).

From the 18 suppliers analyzed, 12 achieved optimal scores that satisfied all operational and environmental constraints. The optimized results showed that the minimum total procurement cost was approximately 15.885 billion IRR, while the maximum service improvement achieved was two days faster delivery compared to the baseline. Furthermore, the average defect rate across selected suppliers decreased to 2.65%, indicating a considerable enhancement in product quality and process efficiency.

The study also found that suppliers investing in clean technologies and energy-efficient production systems obtained significantly higher environmental scores. Their average environmental performance exceeded 4.0 on a 5-point scale, reflecting strong alignment with the company's sustainability goals. Conversely, suppliers with limited technological innovation or inadequate waste management practices scored substantially lower.

Additionally, a positive correlation was observed between service level and environmental performance, suggesting that environmentally responsible suppliers often maintain more efficient logistics and better customer responsiveness. This highlights the potential of GSCM not only to reduce environmental impact but also to enhance operational agility.

Overall, the hybrid model effectively balanced economic and ecological objectives, outperforming traditional single-objective or purely qualitative models in terms of precision, reliability, and applicability to real-world conditions.

Discussion and Conclusion

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

The findings of this study reveal that the hybrid multi-objective programming and rough set model provides a reliable, flexible, and scientifically grounded framework for green supplier selection in complex industrial environments. By integrating quantitative optimization with uncertainty management, the model bridges the gap between theoretical sustainability objectives and practical decision-making challenges.

The dominance of the cost criterion in the final weight distribution underscores the economic constraints under which most industrial firms—particularly in developing economies—operate. Nevertheless, the significant weighting of environmental performance (15%) indicates a notable shift toward sustainability-conscious procurement. This confirms a growing awareness among Iranian automotive manufacturers of the strategic importance of green operations as both an ethical obligation and a source of long-term competitive advantage.

The results also affirm that suppliers with higher levels of technological innovation and proactive environmental policies achieve superior overall performance. These findings reinforce the argument that green technology adoption can simultaneously improve quality, reduce defect rates, and enhance brand reputation. The correlation between service level and environmental performance further highlights that operational efficiency and ecological responsibility are not conflicting but complementary objectives.

Moreover, the model demonstrates that employing rough set theory enables decision-makers to deal effectively with incomplete and subjective information, a common challenge in developing countries where data accuracy is limited. The ability to transform vague expert opinions into measurable inputs allows managers to make informed and transparent decisions. This aligns with the broader trend of data-driven sustainability management, where advanced analytics and decision-support systems are increasingly integrated into corporate governance.

From a policy perspective, the study's results emphasize the need for institutional support mechanisms—such as green financing incentives, tax reductions, and regulatory frameworks—to accelerate the adoption of GSCM practices. Encouraging collaboration and transparency across the supply chain can reduce the risk of greenwashing and strengthen environmental accountability.

The hybrid model developed in this research not only identifies optimal green suppliers but also provides a scalable decision-making tool that can be adapted to other sectors, including petrochemical, food, and pharmaceutical industries. Its adaptability to uncertainty makes it particularly valuable for dynamic markets undergoing technological transitions.

In conclusion, the study contributes both theoretically and practically to the field of sustainable supply chain management by offering a robust, integrative model that captures the multidimensional nature of supplier evaluation. It demonstrates that sustainability and profitability can coexist through scientific modeling, data-driven analysis, and strategic collaboration.

Ultimately, by applying this hybrid multi-objective and rough set approach, industrial organizations can enhance their competitive edge, fulfill environmental responsibilities, and contribute meaningfully to the broader agenda of sustainable development.

References

Akman, G. (2015). Evaluating suppliers to include green supplier development programs via fuzzy c-means and VIKOR methods. *Computers & Industrial Engineering*, *86*, 69-82. https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.10.013

Alamroshan, F., La'li, M., & Yahyaei, M. (2022). The green-agile supplier selection problem for the medical devices: a hybrid fuzzy decision-making approach. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(5), 6793-6811. https://doi.org/10.1007/s11356-021-14690-z

Ebrahimi, M. (2024). Optimizing the Green Supply Chain Considering Technology which Used in Production Under Uncertainty. *Supply chain management*, *25*(81), 77-85.

Haghighat Monfared, J., & Karimi, F. (2024). Identifying and prioritizing factors affecting green supply chain management in the offshore industry with the analytical network process (ANP) approach. *Business Management*, *6*(24), 21-48.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

Hailiang, Z., Khokhar, M., Islam, T., & Sharma, A. (2023). A model for green-resilient supplier selection: fuzzy best–worst multi-criteria decision-making method and its applications. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(18), 54035-54058. https://doi.org/10.1007/s11356-023-25749-4

Jihu, L. (2024). *Green Supply Chain Management Optimization Based on Chemical Industrial Clusters*.

Judijanto, L., Utami, E. Y., & Harsono, I. (2024). Green Supply Chain Finance: A Bibliometric Review of Financing Instruments, Challenges, and Opportunities. *West Science Interdisciplinary Studies*, *2*(03), 647-655. https://doi.org/10.58812/wsis.v2i03.745

Kang, K., Gao, S., Gao, T., & Zhang, J. (2021). Pricing and Financing Strategies for a Green Supply Chain With a Risk-Averse Supplier. *IEEE Access*, *9*, 9250-9261. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3050130

Kannan, G., Haq, A. N., Sasikumar, P., & Arunachalam, S. (2008). Analysis and selection of green suppliers using interpretative structural modelling and analytic hierarchy process. *International Journal of Management and Decision Making*, *9*(2), 163-178. https://doi.org/10.1504/IJMDM.2008.017198

Lo, H.-W., Liou, J. J. H., Wang, H.-S., & Tsai, Y.-S. (2018). An integrated model for solving problems in green supplier selection and order allocation. *Journal of Cleaner Production*, *190*, 339-352. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.105

Ningrum, E., Nugroho, A., Darmansyah, D., & Ahmar, N. (2024). A Scoping Review of Green Supply Chain and Company Performance. *International Journal of Quantitative Research and Modeling*, *5*, 26-30. https://doi.org/10.46336/ijqrm.v5i1.608

Pizzetti, M., Gatti, L., & Seele, P. (2021). Firms talk, suppliers walk: Analyzing the locus of Greenwashing in the blame game and introducing 'Vicarious greenwashing'. *Journal of Business Ethics*, *170*(1), 21-38. https://doi.org/10.1007/s10551-019-04406-2

Rachid, B., Roland, D., Sebastien, D., & Ivana, R. (2024). Risk Management Approach for Lean, Agile, Resilient and Green Supply Chain. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic, Business and Industrial Engineering*, *11*(4), 742-750. https://publications.waset.org/10006688/risk-management-approach-for-lean-agile-resilient-and-green-supply-chain

Rashid, A., Baloch, N., Rasheed, R., & Ngah, A. H. (2024). Big data analytics-artificial intelligence and sustainable performance through green supply chain practices in manufacturing firms of a developing country. *Journal of Science and Technology Policy Management*.

Rezvani, H. R., Nikmohammadi, A., & Mohammadi, S. (2021). Investigating the effect of green supply chain management on improving supplier performance with regard to the mediating role of social capital (case study: raw material suppliers of units located in Rasht Industrial Park). *Modern Research Approaches in Management and Accounting*(65), 65-84.

Samadzadeh, M., Givarian, H., Rabiee Mandjin, M. R., & Hashemzadeh Khorasani, G. (2022). identification and ranking of strategic policy -making components in information technology outsourcing (case study of islamic azad University). *Public Policy In Administration*, *13*(45), 35-49. https://doi.org/10.30495/ijpa.2022.19956

Santos, C., Coelho, A., & Cancela, B. L. (2024). The impact of greenwashing on sustainability through green supply chain integration: the moderating role of information sharing. *Environment, Development and Sustainability*. https://doi.org/10.1007/s10668-024-05009-2

Tseng, M.-L., & Chiu, A. S. F. (2013). Evaluating firm's green supply chain management in linguistic preferences. *Journal of Cleaner Production*, *40*, 22-31. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.08.007

Yang, Y., & Jiang, Y. (2023). Does suppliers slack influence the relationship between buyers environmental orientation and green innovation? *Journal of Business Research*, *157*(1), 113569. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.113569

Yu, W., Chavez, R., Feng, M., & Wiengarten, F. (2024). Integrated green supply chain management and operational performance. *Supply Chain Management: An International Journal*, *19*(5/6), 683-696.

Zarei, K., Mashaikhi Nezam Abadi, E., & Zarei. (2025). Identification of key factors and success model in implementing green supply chain management in Iran's construction industry. *Dynamic Management and Business Analysis*, *3*(4), 1-22. https://www.noormags.ir/view/en/articlepage/2212328

Zhang, R. (2024). Methods for Carbon Reduction Through Green Supply Chain Management in the Automotive Industry. *Frontiers in Business Economics and Management*, *17*(3), 301-303. https://doi.org/10.54097/s5vaf884

Archive of SID.ir