مقاله پژوهشی

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و شش، شماره دو، اردیبهشت ماه ۱۴۰۳ (۴۷-۳۵)

ارائه روش تلفیقی نوین سلکا جهت ارزیابی، رتبه‌بندی و انتخاب تأمین‌کننده سبز در زنجیره‌تأمین

الهام شادکام [1*]

e.shadkam@khayyam.ac.ir

فاطمه آدینه [2]

تاریخ دریافت: ۹۹/۶/۲۳ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۷**

چکیده

زمینه و هدف: با افزایش روزافزون معضلات و مشکلات زیست محیطی، توجه به معیارهای زیست محیطی در زنجیره‌تأمین بسیار ضروری است و منجر به ایجاد زنجیره‌تأمین سبز گردیده است که کمترین آسیب را به محیط زیست وارد کند. ارزیابی، رتبه‌بندی و انتخاب تأمین‌کننده سبز در زنجیره‌تأمین امری مهم در جهت کاهش هزینه‌ها و دستیابی به سود بیشتر و در نتیجه افزایش کارایی و عملکرد زنجیره‌تأمین می‌باشد. هدف از ارائه این مقاله، ارزیابی و انتخاب بهترین تامین‌کنندگان سبز تجهیزات نیروگاه برق بادی با استفاده از رویکرد پیشنهادی سلکا می‌باشد و اولویت‌بندی تامین‌کنندگان با توجه به معیارهای اقتصادی و زیست محیطی در زنجیره‌تأمین با استفاده ازاین روش صورت می‌گیرد. شایان ذکر ا ست که داده‌های این پژوهش مربوط به سال ۱۳۹۹ می با شد و این پژوهش نیز در همین زمان انجام شده است.

روش بررسی: در این مقاله رویکرد ترکیبی به نام روش سلکا ارائه می‌گردد که ترکیبی از روش‌های تحلیل پوششی داده‌ها و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی می‌باشد و در واقع به فرآیند تحلیل سلسله مراتبی کارایی تامین‌کنندگان می‌پردازد و از ماتریس متقاطع کارایی بجای ماتریس اوزان استفاده می‌گردد.

یافته‌ها: مهم ترین مزیت رویکرد پیشنهادی در نظر گرفتن همزمان کارایی تامین کنندگان و ارزیابی آنها با توجه به معیارهای موجود می‌باشد که در هیچ یک از روش‌های تصمیم‌گیری تا کنون لحاظ نشده است و در نتیجه به ارزیابی دقیق تر و کاراتر تامین کنندگان منجر می‌گردد.

بحث و نتیجه گیری: به منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی سلکا، به مساله ارزیابی و انتخاب تامین کنندگان سبز در نیروگاه‌های برق-بادی پرداخته می‌شود و نتایج با روش‌های مشابه مقایسه می‌گردید. نتایج نشان دهنده برتری روش پیشنهادی مقاله در رتبه بندی تامین‌کنندگان می‌باشد و تامین کنندگانی کاراتر را انتخاب می‌نماید.

واژه های کلیدی: زنجیره‌تأمین، تامین‌کنندگان سبز، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، تحلیل پوششی داده‌ها، نیروگاه برق بادی.

۱- استادیار مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه خیام، مشهد، ایران. *(مسوول مکاتبات)

۲- کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه خیام، مشهد، ایران.

J. Env. Sci. Tech., Vol 26, No. 2, May, 2024

The new hybrid SELKA method for evaluation, ranking and selection of green suppliers in the supply chain

Elham Shadkam [1 *]

e.shadkam@khayyam.ac.ir

Fatemeh Adineh [2]

Admission Date: March 8, 2022 Date Received:September 13, 2020

Abstract

Background and Objective: With the increasing number of environmental problems, it is very important to pay attention to environmental standards in the supply chain and has led to the creation of a green supply chain that causes the least damage to the environment. Evaluating, ranking and selecting a green supplier in the supply chain is important in order to reduce costs and achieve more profit and thus increase the efficiency and performance of the supply chain. The purpose of this article is to evaluate and select the best green suppliers of wind farm equipment using SELKA proposed approach and to prioritize suppliers according to economic and environmental criteria in the supply chain using this method.

Material and Methodology: In this paper, a hybrid approach called SELKA method is presented, which is a combination of data envelopment analysis methods and hierarchical analysis process, and the crossover matrix of efficiency is used instead of the matrix of weights.

Findings: The most important advantage of the proposed approach is to simultaneously consider the efficiency of suppliers and evaluate them according to the existing criteria, which is not considered in any of the decision-making methods, and thus leads to a more accurate and efficient evaluation of suppliers.

Discussion and Conclusion: In order to validate SELKA's proposed method, the issue of evaluation and selection of green suppliers in wind power plants is discussed and the results are compared with similar methods. The results show the superiority of the proposed method of the article in the ranking of suppliers and selects more efficient suppliers.

Keywords: Supply Chain, Green Suppliers, Analytical Hierarchy, Data Envelopment Analysis, Wind Power Plant.

1- Assistant Pprofessor of Industrial Engineering, Faculty of Eng., Khayyam University, Mashhad, Iran. *(*Corresponding Author*)

2- Master of Science of Industrial Engineering, Faculty of Eng., Khayyam University, Mashhad, Iran.

مقدمه

در دنیای امروز مسائل و مشکلات زیست محیطی تنها چالشی برای فعالان محیط زیست نیست. بلکه این مشکلات تقریبا بر همه اجزا جوامع اثر می‌گذارند (۱). ایران به دلیل واقع شدن در بخش غربی فلات و جنوب غربی آسیا، کشوری کوهستانی محسوب می‌گردد و قابلیت تولید برق بادی در ایران ۶۵۰۰ مگاوات است. بر همین اساس، ایران دارای پتانسیل قابل توجه در زمینه احداث نیروگاه‌های بادی به منظور تولید برق است(۲). گسترش روز افزون نیاز به انرژی و در نتیجه افزایش قابل توجه استفاده از سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گل خانه‌ای ناشی از آن، باعث شده تا توسعه سبز به مرکز توجه جهانی تبدیل شود. مدیریت زنجیره‌تأمین سبز، رویکردی است که بر استفاده هر چه بهتر از منابع و کاهش اثرات زیان بار ناشی از آن بر روی محیط زیست در طول تمام مراحل چرخه عمر محصول تمرکز دارد (۳). تحقیقات متعددی در زمینه انتخاب تامین‌کننده سبز صورت گرفته است که هر یک دارای مزایا و معایبی می‌باشد. هدف اصلی‌این پژوهش ارائه روشی نوین جهت ارزیابی و انتخاب گزینه‌ها در مسایل تصمیم‌گیری می‌باشد که بتواند با دقت خوبی گزینه برتر را انتخاب نماید و تمایز و رتبه بندی خوبی بین سایر گزینه‌هاایجاد نماید. مهم‌ترین مزیت‌این روش در نظر گرفتن همزمان کارایی در کنار تصمیم‌گیری و ارزیابی گزینه‌ها می‌باشد که تا کنون در روش‌های تصمیم‌گیری مورد بررسی قرار نگرفته است. به منظور بررسی عملکرد این روش مساله انتخاب تامین کننده سبز بررسی شده است که یکی دیگر از اهداف‌این پژوهش می‌باشد. در واقع هدف تعیین بهترین و کاراترین تامین کننده در زنجیره تامین سبز در صنعت نیروگاه‌های برق-بادی می‌باشد. در ادامه در ابتدا به بررسی زمینه و هدف پژوهش پرداخته می‌شود. سپس روش پژوهش و ابزارهای مورد استفاده در مقاله تشریح می‌گردند. پس از آن یک مساله کاربردی، مربوط به مقایسه و رتبه‌بندی شرکت‌های تولید توربین‌های بادی در یک نیروگاه برق بررسی می‌گردد و در نهایت به منظور نشان دادن کارایی مدل رویکرد پیشنهادی با رویکرد مشابه مقایسه خواهد شد.

با توجه به مزایای انفرادی که هر یک از دو روش تحلیل پوششی داده‌ها DEA (Data Envelopment Analysis) و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی AHP (Analytic hierarchy process) بصورت مجزا دارند، با ترکیب آنها می‌توان از تمام مزایا به‌صورت همزمان بهره برد. در این مقاله رویکرد ترکیبی سلکا ارائه شده است که به صورت همزمان از مزایای روش‌های تحلیل پوششی داده‌ها و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی بهره می‌برد. هر یک از این روش‌ها کاربردی متفاوت و منحصر به خود دارند، تحلیل پوششی داده‌ها برای محاسبه صرفا کارایی می‌باشد و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی جهت ارزیابی و انتخاب گزینه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش از ترکیب آنها جهت فرآیند تحلیل سلسله مراتبی کارایی استفاده گردیده است و به همین دلیل عنوان روش (سلسله مراتبی کارایی) سلکا نامیده شده است. بنابراین با ترکیب آنها، کاربردی جدید و متفاوت از کاربردهای انفرادی‌این دو روش ایجاد شده است. تاکنون در هیچ کدام از روش‌های تصمیم‌گیری به ارزیابی کارایی به‌صورت همزمان پرداخته نشده است و وجه تمایز روش پیشنهادی در نظر گرفتن همزمان‌این دو هدف می‌باشد. روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی یکی از روش‌های خوب و کاربردی در زمینه تصمیم‌گیری می‌باشد و به دلیل استفاده از فرآیند سلسله مراتبی ابهام در درک مساله را برطرف می‌سازد و همچنین به دلیل استفاده از ماتریس مقایسات زوجی می‌توان نظرات تصمیم‌گیرنده را در مورد اولویت و اهمیت معیارها بصورت دقیق‌تر در مساله منعکس نمود. گاهی دسترسی به ماتریس مقایسات زوجی دشوار می‌باشد که دراین مقاله با استفاده از ماتریس متقاطعی که از روش تحلیل پوششی داده‌هاایجاد می‌گردد، می‌توان‌این مشکل را برطرف نمود واین ماتریس را جایگزین ماتریس مقایسات زوجی نمود و از طرفی به دلیل استفاده از مقادیر متقاطع کارایی می‌توان نتایج دقیق‌تری جهت ارزیابی گزینه‌ها به دست آورد. همچنین روش پیشنهادی مشکلاتی که در روش تحلیل سلسله مراتبی وجود دارد را تا حد

زیادی برطرف می‌نماید و شاید بتوان گفت نسخه‌ای اصلاح شده از روش فرآیند سلسله مراتبی می‌باشد.

به منظور بررسی روش پیشنهادی سلکا، یکی از مسایل مهم و کاربردی درنظر گرفته شده است. مساله ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان، یک مساله تصمیم‌گیری چندمعیاره است که در طی آن تامین‌کنندگان به عنوان جزئی از زنجیره تأمین مورد تحلیل، ارزیابی و انتخاب قرار می‌گیرند و در این زمینه تاکنون مقالات بسیاری به چاپ رسیده است که در ادامه در جدول ۱ به بررسی تعدادی از آنها پرداخته می‌شود.

جدول ۱- بررسی مقالات موجود در زمینه انتخاب تامین کننده

Table 1. Review of existing articles on supplier selection

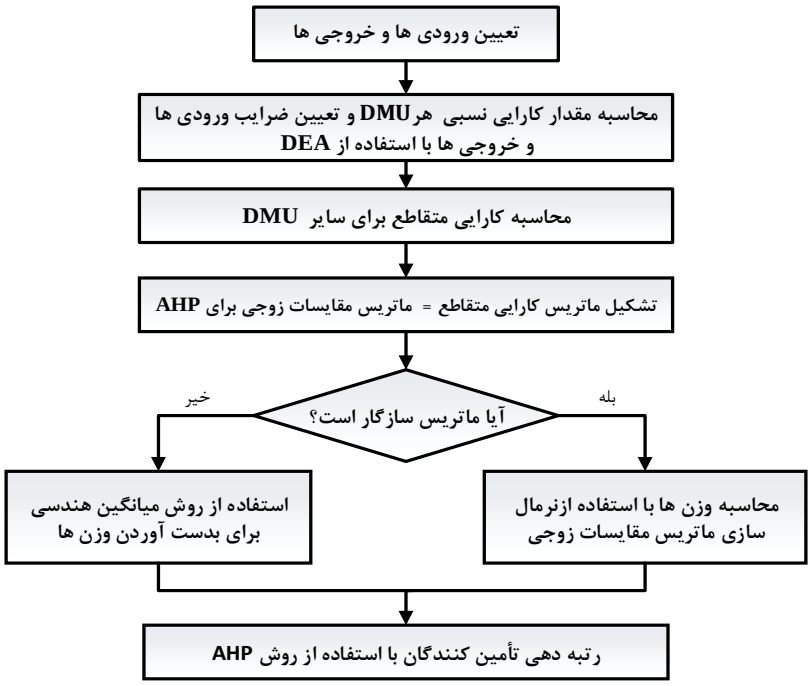
نویسنده	سال	مساله	ابزار مورد استفاده	مرجع
باتاک وهاک	۲۰۰۲	فرآیند ارزیابی و انتخاب تأمین‌کننده	مساله تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه	(۴)
پن	۱۹۸۹	انتخاب وتعیین‌سفارش‌ها تأمین‌کننده	برنامه‌ریزی خطی	(۴)
وبر و کارنت	۱۹۹۳	انتخاب تامین‌کننده و میزان سرمایه‌گذاری	روش برنامه‌ریزی آرمانی	(۴)
هاجیدیمتریس و جورجیو	۲۰۰۲	انتخاب تامین‌کننده و میزان سرمایه‌گذاری	روش برنامه‌ریزی آرمانی	(۴)
جارایامن و دیگران	۱۹۹۹	انتخاب تامین‌کنندگان	برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط	(۴)
روزنتال و دیگران	۱۹۹۵	انتخاب تامین‌کنندگان	برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط	(۴)
چه و وانگ	۲۰۰۸	زمان بندی تولید قطعات یک محصول	مدل ریاضی بهینه‌ای	(۵)
نارازیمان	۱۹۸۳	انتخاب تامین‌کنندگان	AHP	(۵)
باربار اسوقلو و یزگاک	۱۹۹۷	انتخاب تامین‌کنندگان	روش ترکیبی AHP و برنامه‌ریزی خطی	(۵)
قدسی پور و اوبراین	۱۹۹۸	انتخاب تامین‌کنندگان	روش ترکیبی AHP و برنام‌ریزی خطی	(۵)
کارامن و دیگران	۲۰۰۳	حل مسئله انتخاب تامین‌کنندگان	AHP فازی	(۵)
هاک و کانن	۲۰۰۶	انتخاب تامین‌کنندگان	AHP فازی	(۵)
پای و لو	۲۰۰۹	انتخاب تامین‌کنندگان	AHP و تاگوچی	(۶)
وبر	۱۹۹۱	انتخاب تامین‌کنندگان	AHP و تاگوچی	(۶)
لیو و دیگران	۲۰۰۰	ارزیابی فروشندگان	AHP و تاگوچی	(۷)
ماشلی و محمدی تبار	۲۰۱۷	انتخاب تأمین‌کننده	رویکرد تئوری بازی	(۸)
وبر و دیگران	۲۰۱۸	تعیین تعداد تأمین‌کننده موردنیاز	مدل ترکیبی برنامه‌ریزی چندهدفه و DEA	(۸)

در دهه اخیر، بسیاری از محققان بر روی مساله ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان سبز در مدیریت زنجیره‌تأمین سبز تمرکز کرده اند و از روش‌های تصمیم گیری مختلفی برای تعیین تأمین‌کننده استفاده کرده اند (۹) و (۱۰). به عنوان مثال‌هاشمی و همکارانش، یک مدل ارزیابی و انتخاب تأمین‌کننده سبز ارایه داد ند که علاوه بر در نظر گرفتن فاکتور های اقتصادی به فاکتورهای زیست محیطی نیز توجه شده است (۹). همچنین لین و همکارانش با اشاره به اهمیت روز افزون توجه به خرید سبز، مدلی بر مبنای روش فرآیند تحلیل شبکه‌ای و روش برنامه‌ریزی خطی برای سیستم خرید سبز ارایه کردند (۱۰). کو و همکارانش تامین‌کنندگان سبز یک شرکت الکترونیکی را با استفاده از یک روش جدید تصمیم‌گیری چندمعیاره ارزیابی کردند (۱۱). بسیاری از پژوهشگران برای در نظر گرفتن عدم قطعیت و ابهامات در قضاوت‌های کلامی‌کار شناسان در فرآیند

ارزیابی تأمین‌کننده سبز از نظریه فازی استفاده کردند (۱۲). بعنوان مثال لی و همکارانش مدلی به منظور انتخاب منا سب‌ترین تأمین‌کننده ی سبز برای یک شرکت تولیدی ال سی دی در تایوان ارایه دادند (۱۳). در همین راستا، کنان و همکارانش نیز برای ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان یک شرکت الکترونیکی در برزیل، چارچوبی بر اساس روش فازی تاپسیس ارایه دادند (۱۴). همچنین شن و همکارانش مدیریت زنجیره‌تأمین سبز را برای ارایه یک رویکرد چند معیاره فازی مورد بررسی قرار دادند (۱۵). علاوه بر مبحث انتخاب تأمین‌کننده سبز، تحقیقاتی در زمینه مکانیابی، مسیریابی و موجودی سبز نیز توسط محجوب‌نیا و همکاران انجام شده است (۱۶). در حوزه روش‌های ترکیبی در زمینه انتخاب تامین‌کننده سبز می‌توان به پژوهش عروجنی و همکاران (Oroojeni) اشاره کرد که با استفاده از روش‌های بهترین-بدترین و تاپسیس فازی به مساله انتخاب تامین کننده سبز برای شرکت فولاد پرداخته شده است (۱۷). کلیس و یالسین (Kilic and Yalcin) رویکردی دوفاز انتخاب تامین کننده سبز برمبنای روش‌های تاپسیس شهودی و برنامه ریزی آرمانی فازی ارایه کردند (۱۸). در مقاله ای دیگر چارچوبی مبتنی بر تصمیم‌گیری چند معیاره برای ارزیابی انتخاب تامین کننده سبز ارائه شده است که با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی و سه روش در حوزه تصمی‌گیری ایجاد شده است (۱۹). قادری و همکارانش روشی ترکیبی به منظور انتخاب مناسب‌ترین تأمین‌کننده توربین‌های بادی در یک نیروگاه برق ارائه دادند که از ترکیب روش‌های مولفه‌های اصلی و تاپسیس ایجاد شده است (۲۰). با توجه به مقالات بررسی شده مشاهده می‌گردد که روش AHP در بسیاری از مقالات‌این زمینه مورد استفاده قرار گرفته است. دراین مقاله اشکالات موجود در روش AHP برطرف گردیده است و به صورت همزمان علاوه بر انتخاب گزینه برتر به بررسی کارایی نیز پرداخته می‌شود. قطعا استفاده در نظر گرفتن مقادیر کارایی همزمان با ارزیابی گزینه‌ها منجر به‌ایجاد نتایج دقیق‌تر و کاراتر می‌گردد. در واقع در روش پیشنهادی بجای استفاده از ماتریس مقایسات زوجی که محاسبه آن بسیار زمانبر و گاهی ناممکن است، از ماتریس کارایی متقاطع استفاده می‌گردد. به منظور پیاده سازی روش پیشنهادی مساله مهم و کاربردی انتخاب تامین کننده سبز بررسی خواهد گردید و نتایج مقایسه می‌گردد.

روش بررسی

در این مقاله روش دو مرحله ای سلکا برای رتبه‌بندی کامل DMUها در یک مسئله ارزیابی و انتخاب ارائه می شود. در این روش ابتدا مدل DEA برای سنجش کارایی واحد های تصمیم‌گیری، در حالتی که معیارها کیفی و غیر دقیق هستند، به‌کار می‌رود. بدین منظور با استفاده از تئوری فازی امتیاز هر تأمین‌کننده به صورت قطعی مشخص می‌شود. سپس با توجه به نتایج این مدل و استخراج ماتریس کارایی متقاطع (رابطه ۳)، از مدل AHP و ماتریس مقایسات زوجی برای رتبه‌بندی کامل و تصمیم‌گیری نهایی استفاده می شود. فرآیند روش پیشنهادی سلکا در شکل ۱ نمایش داده شده است. نوآوری اصلی‌این روش استفاده از ماتریس کارایی متقاطع به‌جای ماتریس مقایسات زوجی می‌باشد. همان‌طور که در بخش‌های قبلی ذکر شد، علی‌رغم مزایای فراوران روش AHP گاهی به دلیل مشکلاتی که در محاسبه ماتریس مقایسات زوجی وجود دارد، نمی‌توان ازاین روش استفاده کرد. درحالی که با جایگزینی ماتریس متقاطع حاصل از کارایی می‌توان‌این مشکل را حل کرد و علاوه بر آن به‌صورت همزمان به بررسی کارایی در کنار انتخاب گزینه برتر پرداخت. بررسی همزمان کارایی و تصمیم‌گیری در انتخاب گزینه‌ها قطعا منجر به ارزیابی دقیق‌تر خواهد گردید و گزینه‌ای مطلوب‌تر را انتخاب خواهد نمود.



شکل ۱- نمودار روش پیشنهادی ترکیبی سلکا

Figure 1. The flowchart of the proposed SELKA hybrid method

جمع آوری اطلاعات

در این بخش به منظور بررسی روش پیشنهادی سلکا از داده‌های مقاله قادری و همکاران استفاده می‌شود که مربوط به داده‌های تامین‌کنندگان سبز توربین‌های بادی برای احداث نیروگاه می‌باشد. در این پژوهش با مطالعه مقالات علمی، مصاحبه با متخصصان و کارشناسان سازمان انرژی‌های ایران (سانا) از طریق مصاحبه و همچنین مرور ادبیات این حوزه صد معیار به عنوان پیش‌فرض در سال ۱۳۹۹ جمع‌آوری گردیده است. افراد مصاحبه‌شوند شامل مدیران سطح میانی و ارشد این سازمان می-باشند. همچنین به منظور جمع‌آوری اطلاعات از همه سطوح سازمان، با تعدادی از مدیران سطوح پایین‌تر سازمان مصاحبه شده است. سپس به منظور تعیین اثرگذارترین معیارها، پرسش-نامه‌ای در اختیار متخصصان این حوزه در صنعت نیروگاه قرار گرفته است. این پرسش‌نامه حاوی ماتریس‌های مقایسات زوجی می‌باشد که اهمیت معیارها را دو به دو مقایسه می نماید و در نهایت با استفاده از روش AHP و ماتریس‌های مقایسات زوجی، تمام معیارها رتبه‌بندی می‌گردند و سی معیار که در جایگاه برتر قرار دارند به عنوان معیارهای اثرگذار شناسایی می‌شوند. در نتیجه در این پژوهش سی معیار که به صورت پنج معیار کلی در نظر گرفته شده است، به منظور مقایسه تامین‌کنندگان لحاظ خواهد گردید. به دلیل مشابهت تعداد زیادی از معیارها به یکدیگر، به صورت معیارهای کلی در جدول ۲ نمایش داده شده اند. همچنین تامین‌کنندگان تجهیزات برق-بادی گزینه‌های اصلی مسئله می‌باشند که شامل پنج تامین کنندگان زیر هستند:

Torque Wind (GS01), Gamesa (GS02), GE Renewable Energy(GS03), Vestas (GS04), Inox Wind Ltd (GS05)

در ادامه با توجه به نظر کارشناسان و خبرگان و از طریق پرسشنامه، امتیاز هر تأمین‌کننده در هر زیر معیار مشخص می‌گردد که در جدول ۴ نمایش داده شده است. به منظور کمی‌سازی این مقادیر از تئوری فازی برای تعیین امتیازات هر تأمین‌کننده ا ستفاده شده ا ست (۲۱). همچنین برای غیرفازی نمودن متغیرها از روش ارائه شده تو سط چن و هوانگ ا ستفاده

گردیده اســـت (۲۲). نتایج مقادیر قطعی برای متغیرهای زبانی (M_i) در جدول ۳ نمایش داده شده است.

جدول ۲- معیارهای انتخاب تأمین‌کننده سبز

Table 2. Criteria for selecting a green supplier

زیر معیارها	نوع	کد زیر	معیارها (کد)
عملکرد مالی	خروجی	Cr_{01}	**هزینه (C_{01})**
وضعیت اقتصادی سازمان	خروجی	Cr_{02}	
قیمت محصول	ورودی	Cr_{03}	
کل هزینه حمل و نقل	ورودی	Cr_{04}	
هزینه سفارش دهی	ورودی	Cr_{05}	
میزان تناسب قیمت محصول با کیفیت آن	خروجی	Cr_{06}	
انطباق با کیفیت	خروجی	Cr_{07}	**کیفیت (C_{02})**
برنامه‌های بهبود مستمر	خروجی	Cr_{08}	
کنترل و بازرسی	ورودی	Cr_{09}	
دارا بودن گواهینامه کیفیت	خروجی	Cr_{10}	
قابلیت تجهیزات تولید	ورودی	Cr_{11}	**تکنولوژی (C_{03})**
انعطاف پذیری	خروجی	Cr_{12}	
زمان راه اندازی	ورودی	Cr_{13}	
ظرفیت	ورودی	Cr_{14}	
طرح کسب و کار الکترونیک	ورودی	Cr_{15}	**نوآوری (C_{04})**
راه اندازی فن آوری جدید	خروجی	Cr_{16}	
راه اندازی محصولات جدید	خروجی	Cr_{17}	
رعایت استانداردهای زیست محیطی از قبیل ایزو ۱۴۰۰۰	خروجی	Cr_{18}	**سیستم مدیریت زیست محیطی (C_{05})**
حمایت مدیران میانی و ارشد از زنجیره‌تأمین سبز	خروجی	Cr_{19}	
آموزش مسائل مربوط به حفاظت از محیط زیست به کارکنان	ورودی	Cr_{20}	
برنامه ریزی تولید سبز	ورودی	Cr_{21}	
بسته بندی سبز	خروجی	Cr_{22}	
رعایت استانداردهای فنی و زیست محیطی در خرید ابزار و تجهیزات	خروجی	Cr_{23}	
استفاده از فن آوری‌ها و تجهیزات تولیدی سازگار با محیط زیست	ورودی	Cr_{24}	
استفاده از الگوهای صحیح مصرف انرژی در تولید محصول	ورودی	Cr_{25}	
طراحی فرآیند تولید سازگار با محیط زیست	خروجی	Cr_{26}	
طراحی محصولات بر پایه عدم استفاده از مواد خطرناک برای محیط زیست	خروجی	Cr_{27}	
طراحی محصولات در راستای کاهش اتلاف انرژی	خروجی	Cr_{28}	
تولید زباله‌های شیمیایی	ورودی	Cr_{29}	
کنترل آلودگی	ورودی	Cr_{30}	

جدول۳- معادل سازی عددی برای متغیرهای زبانی فازی

Table 3. Numerical equivalence for fuzzy variables

متغیرهای زبانی	مقدار قطعی	متغیرهای زبانی	مقدار قطعی	متغیرهای زبانی	مقدار قطعی
بسیار بسیار پایین (M_1)	۰/۰۴۵	زیر متوسط (M_5)	۰/۴۲۰	خیلی زیاد (M_9)	۰/۷۴۵
بسیار پایین (M_2)	۰/۱۳۵	متوسط (M_6)	۰/۵۰۰	بسیار زیاد (M_{10})	۰/۸۶۵
خیلی پایین (M_3)	۰/۲۵۵	بالای متوسط (M_7)	۰/۵۹۰	بسیار بسیار زیاد (M_{11})	۰/۹۵۵
پایین (M_4)	۰/۳۳۵	زیاد (M_8)	۰/۶۶۵		

جدول۴- امتیازدهی به تامین‌کنندگان در زیر معیارها

Table 4. Scoring suppliers under the criteria

	GS_{01}	GS_{02}	GS_{03}	GS_{04}	GS_{05}		GS_{01}	GS_{02}	GS_{03}	GS_{04}	GS_{05}		GS_{01}	GS_{02}	GS_{03}	GS_{04}	GS_{05}
Cr_{01}	M_5	M_9	M_4	M_2	M_3	Cr_{11}	M_8	M_{10}	M_8	M_5	M_6	Cr_{21}	M_9	M_{11}	M_8	M_6	M_6
Cr_{02}	M_5	M_9	M_4	M_2	M_3	Cr_{12}	M_9	M_{11}	M_8	M_5	M_6	Cr_{22}	M_8	M_{11}	M_8	M_6	M_5
Cr_{03}	M_5	M_8	M_4	M_2	M_3	Cr_{13}	M_8	M_{11}	M_8	M_5	M_6	Cr_{23}	M_9	M_{11}	M_8	M_5	M_5
Cr_{04}	M_5	M_9	M_4	M_3	M_2	Cr_{14}	M_9	M_{11}	M_8	M_6	M_6	Cr_{24}	M_8	M_{11}	M_9	M_4	M_2
Cr_{05}	M_5	M_9	M_4	M_3	M_2	Cr_{15}	M_8	M_{11}	M_8	M_6	M_6	Cr_{25}	M_8	M_{11}	M_9	M_4	M_2
Cr_{06}	M_5	M_9	M_4	M_3	M_2	Cr_{16}	M_9	M_{11}	M_8	M_6	M_6	Cr_{26}	M_8	M_{11}	M_9	M_4	M_2
Cr_{07}	M_7	M_{10}	M_8	M_6	M7	Cr_{17}	M_8	M_{11}	M_8	M_6	M_5	Cr_{27}	M_8	M_{11}	M_9	M_4	M_2
Cr_{08}	M_7	M_{10}	M_8	M_6	M5	Cr_{18}	M_9	M_{11}	M_8	M_5	M_5	Cr_{28}	M_7	M_{11}	M_7	M_5	M_1
Cr_{09}	M_8	M_{10}	M_8	M_6	M_6	Cr_{19}	M_8	M_{11}	M_8	M_5	M_5	Cr_{29}	M_7	M_{11}	M_7	M_5	M_1
Cr_{10}	M_9	M_{10}	M_8	M_5	M_6	Cr_{20}	M_8	M_{11}	M_8	M_5	M_5	Cr_{30}	M_7	M_{10}	M_7	M_5	M_1

یافته‌ها

در ادامه با توجه به مشخص شدن امتیاز هر تأمین‌کننده در هر زیر معیار، کارایی هر تأمین‌کننده محاسبه می‌شود. در این پژوهش عملکرد اقتصادی، مدیریتی و زیست محیطی تامین‌کنند گان مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور معیارهای مورد اشاره با در نظر گرفتن ماهیت آن‌ها به دو دسته ورودی و خروجی تقسیم می‌شوند. با توجه به این‌که معیارهای مورد ا ستفاده در مقاله قادری و همکاران به صورت کلی ارائه شده اند، برای مدل DEA این معیارها باید تفکیک شوند. معیارهای ورودی آن دسته معیارهایی هستند که با افزایش آن‌ها با حفظ سایر عوامل دیگر، کارایی تأمین‌کننده کاهش می‌یابد (معیارهایی از جنس منفی) و بر عکس معیارهای خروجی آن د سته معیارهایی ه ستند که با افزایش آن‌ها با حفظ سایر عوامل دیگر، کارایی تأمین‌کننده افزایش می‌یابد (معیارهایی از جنس مثبت).

جهت محاسبه ماتریس کارایی متقاطع واحدهای تصمیم‌گیری (تامین‌کنندگان)، کارایی هر تأمین‌کننده بر اساس مدل رابطه ۱ محاسبه می‌گردد، سپس بر اساس اوزان بدست آمده از این مدل، کارایی متقاطع سایر واحدهای تصمیم‌گیری از طریق رابطه ۴ محا سبه شده ا ست. در نتیجه ماتریس کارایی متقاطع تامین‌کنندگان بصورت زیر محاسبه و جمع‌آوری شده است.

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0.75 & 0.86 \\ 0.75 & 1 & 0.8 & 0.46 & 0.28 \\ 1 & 1 & 1 & 0.76 & 0.8 \\ 0.9 & 0.9 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0.96 & 0.97 & 0.75 & 1 \end{bmatrix}$$

با توجه به این‌که در ماتریس کارایی متقاطع، کارایی هر واحد تصمیم‌گیری با وزن‌های کلیه‌ی واحدهای تصمیم‌گیری دیگر به صورت ترکیب زوجی محاسبه می‌شود و بدین ترتیب کارایی هر واحد با شرایط محاسبه کارایی‌های سایر واحدها مقایسه می‌شود، این ماتریس به تعبیری یک ماتریس مقایسات زوجی ا ست که می‌توان به کمک آن با ا ستفاده از ا صول روش AHP

اوزان نهایی را برای رتبه‌بندی واحدهای تصمیم‌گیری به دست آورد. در مرحله بعد سازگاری ماتریس بررسی می‌شود، اگر ماتریس سازگار باشد می‌توان با نرمال سازی یک ستون از ماتریس مقایسات زوجی، وزن‌ها را به‌دست آورد؛ در غیر این صورت باید از روش‌هایی مانند کمترین مربعات خطا، بردار ویژه، روش میانگین هندسی و غیره استفاده کرد. به دلیل اینکه ماتریس کارایی متقاطع ایجاد شده دراین مساله ناسازگار است، بنابراین با استفاده از روش میانگین هندسی وزن‌های نهایی با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد. در این رابطه a_{ij} نشان دهنده آرایه‌های ماتریس مقایسات زوجی می‌باشد. وزن‌های حاصل از پیاده‌سازی روش میانگین هندسی در جدول ۵ نمایش داده شده است.

$$W = \sqrt[5]{\prod_{i=1}^{5} a_{ij}} \quad ; i = 1,2,3,4,5 \qquad (۴)$$

جدول ۵- نتایج محاسبه اوزان نهایی جهت رتبه‌بندی تامین‌کنندگان

Table 5. Results of calculating the final weights for ranking suppliers

تأمین‌کننده	GS01	GS02	GS03	GS04	GS05
وزن‌های حاصل از روش میانگین هندسی	۰/۲۱۵۴	۰/۱۳۸۱	۰/۲۰۹۹	۰/۲۲۱۷	۰/۲۱۴۸

بحث

در ادامه روش پیشنهادی، پس از محاسبه وزن‌ها و ایجاد ماتریس مقایسات زوجی یا همان ماتریس کارایی متقاطع با استفاده از DEA، DMU‌ها با استفاده از روش AHP رتبه‌بندی می‌گردند و نتایج رتبه‌بندی تامین‌کنندگان سبز با روش سلکا به صورت زیر می‌باشد:

GS04:Vestas> GS01:Torque> GS05:Inox Wind Ltd> GS03:GE Renewable Energy> GS02:Gamesa

همان‌طور که مشاهده می‌گردد تأمین‌کننده چهارم، شرکت Vestas بهترین تامین‌کننده خواهد بود و ضمن منطقی بودن ماتریس تصمیم‌گیری، رتبه‌بندی کامل میان تامین‌کنندگان ارائه شده است. در ادامه به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی سلکا به مقایسه نتایج به‌دست آمده در این پژوهش با نتایج ارائه شده در مقاله قادری و همکاران پرداخته می شود. با پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی قادری و همکاران که از ترکیب روش تحلیل مولفه‌های اصلی و تاپسیس ایجاد شده است و رتبه نهایی هر یک از تامین‌کنندگان به صورت زیر می‌با شد و دراین روش نیز تامین‌کننده Vestas به عنوان تامین‌کننده برتر انتخاب شده است.

GS04:Vestas> GS03: GE Renewable Energy > GS02: Gamesa> GS05: Inox Wind Ltd > GS01: Torque

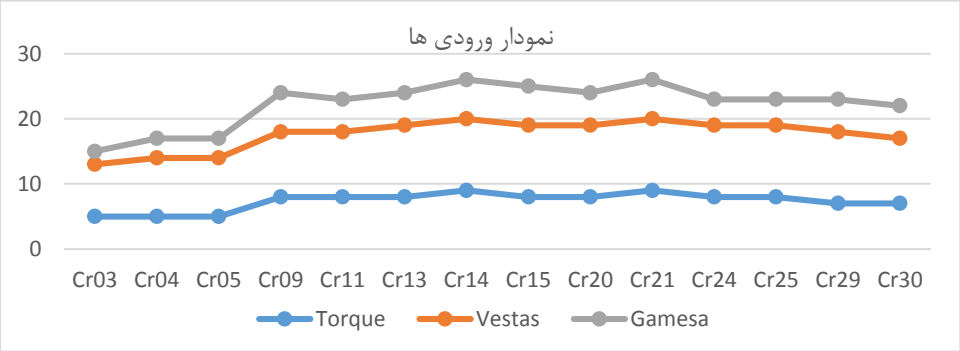
به منظور تعیین این که کدام یک ازاین دو روش رتبه‌بندی بهتری ارائه نموده‌اند، در ادامه از رویکردی ابتکاری به منظور مقایسه نتایج در جهت رتبه‌بندی تامین‌کنندگان استفاده می‌گردد. در ابتدا کارایی هر یک از پنج تامین‌کننده با روش DEA محاسبه می شود، سپس اولویت انتخاب تامین‌کنندگان با توجه به مقادیر کارایی ایجاد شده، مشخص می‌گردد. در واقع به هر یک از تامین کنندگان یک شماره جایگاه اختصاص می‌یابد. با توجه به الویت‌بندی تامین‌کنندگان، از بهترین تا بدترین تأمین‌کننده، به ترتیب ضرایب ۵ تا ۱ اختصاص داده شده است کارایی شرکت GS01 برابر با یک، GS02 برابر با ۰/۹۹۹۹۹۹۶، GS03 برابر با ۰/۹۹۹۹۹۹۶، GS04 برابر با یک و GS05 برابر با ۰/۹۹۹۹۹۹۸ می‌باشد.

رتبه: GS04:Vestas> GS01: Torque> GS05: Inox Wind Ltd> GS03: GE Renewable Energy> GS02: Gamesa

در مرحله بعد با توجه به رتبه‌بندی ایجاد شده از دو روش سلکا و روش قادری و همکاران، به هر تامین‌کننده با توجه به رتبه (جایگاه)، امتیازی اختصاص می‌یابد و در نهایت با استفاده از مقادیر کارایی هر تأمین‌کننده و امتیاز مربوط به جایگاه، امتیاز نهایی با محاسبه مجموع اعداد مطابق رابطه ۵ محاسبه می شود.

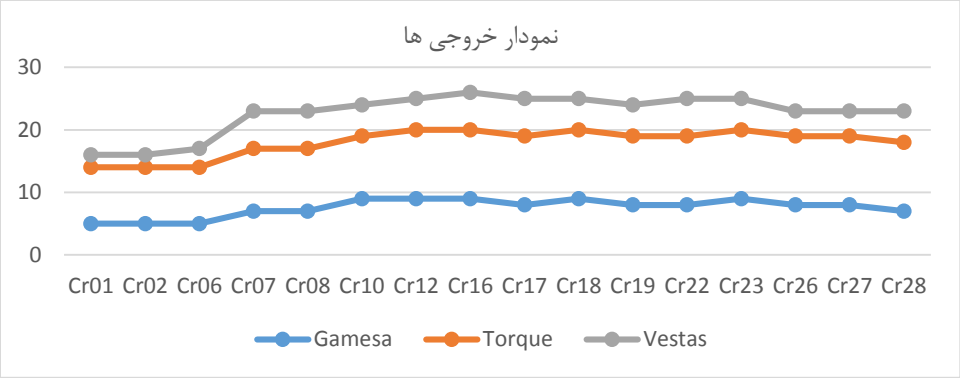
$$\text{امتیاز روش} = \sum_{i=1}^{5}(6-i) \times \text{مقدار کارایی تامین کننده جایگاه } i \quad (۵)$$

بیشترین امتیاز مربوط به روش DEA می‌باشد و در نهایت هر روشی که نزدیک‌ترین امتیاز را به امتیاز روش DEA داشته باشد، روش منا سب‌تری خواهد بود. امتیاز مربوط روش DEA برابر با ۱۴/۹۹۹۹۹۹، روش سلکا برابر با ۱۴/ ۹۹۹۹۹۸و روش قادری و همکاران برابر با ۱۴/۹۹۹۹۹۰ می‌باشد. با توجه به امتیازات بدست آمده، امتیاز روش سلکا بیشتر از روش قادری و همکاران می‌باشد و به امتیاز روش DEA نزدیک‌تر است. بنابراین رتبه‌بندی دقیق‌تری از تامین‌کنندگان نسبت به روش قادری و همکاران ارائه می‌کند. در نتیجه بهترین تامین‌کننده سبز، تأمین‌کننده چهارم (شرکت Vestas) خواهد بود و به منظور خرید توربین‌های بادی انتخاب می‌گردد. شایان ذکر است که با مشاهده مقادیر هر یک از معیارها برای هر یک از تأمین‌کنندگان با توجه به جدول ۴ و نوع معیارها (ورودی یا خروجی)، رتبه‌بندی روش پیشنهادی مقاله به صورت شهودی نیز صحیح‌تر می‌باشد. به این دلیل که تامین‌کننده برتر از دیدگاه روش سلکا (Vestas) دارای مقادیر بالا در شاخص‌هایی با جنس خروجی و مقادیر کوچک در شاخص‌هایی با جنس ورودی می‌باشد که منجر به افزایش بهره‌وری و کارایی این گزینه می‌گردد. درحالی که تامین‌کننده‌ای که در جایگاه آخر از دیدگاه سلکا (Gamesa) قرار دارد، دارای مقادیر بزرگ ورودی‌ها و مقادیر کوچک در خروجی‌ها می‌باشد که منجر به کاهش بهره‌وری و کارایی این تامین‌کننده می‌گردد. همچنین تامین کننده Torque در جایگاه آخر قرار گرفته است و با بررسی مقادیر ورودی‌ها و خروجی‌های این تامین‌کننده مشاهده می‌گردد که دارای مقادیر بزرگ در شاخص هایی با جنس خروجی و مقادیر کوچک در شاخص هایی با جنس ورودی می‌باشد و در واقع می‌توان گفت تامین‌کننده‌ای کارا و مطلوب است، درحالی که در جایگاه آخر در روش قادری و همکاران قرار دارد و همین تامین‌کننده در جایگاه دوم در روش سلکا قرار گرفته است. در مجموع با مشاهده مقادیر هر یک از پارامترها با توجه به جنس ورودی و خروجی بودن آنها می‌توان نتیجه گرفت که روش سلکا رتبه‌بندی منطقی‌تری نسبت به روش قادری ارائه کرده است. به منظور درک بهتر نتایج تمام پارامترهای مساله بر اساس ورودی یا خروجی بودن تفکیک شده‌اند و نمودارهای ورودی و خروجی برای سه شرکت Torque، Vestas و Gamesa در شکل های ۲ و ۳ ترسیم شده است.



شکل ۲- نمودار مقایسه ورودی‌های سه شرکت Torgue ،Vestas و Gamesa

Figure 2. Comparison chart of inputs of three companies Torque, Vestas and Gamesa



شکل ۲- نمودار مقایسه خروجی‌های سه شرکت Torque، Vestas و Gamesa

Figure 2. Comparison chart of outputs of three companies Torque, Vestas and Gamesa

به منظور اعتبارسنجی بیشتر رویکرد پیشنهادی، نتایج روش سلکا با روش دیگری به نام پرامتی ۳ (Promethee III) مقایسه می‌گردد(۲۳). در روش پرومتی برای جبران ضعف یک معیار یا قوت معیار دیگر، محدودیت وجود دارد و لذا یک گزینه ایده‌ال باید حداقل‌ها را از تمام معیارها کسب کند. این روش بسیار دقیق ولی زمان‌بر و پیچیده می‌باشد و دارای مراحل فراوانی جهت تعیین شش نوع تابع ارجحیت و ارزیابی گزینه‌ها می باشد. در این پژوهش این روش برای مساله انتخاب تامین‌کننده سبز مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج به صورت زیر است.

GS04:Vestas> GS01:Torque> GS05:Inox Wind Ltd> GS03:GE Renewable Energy> GS02:Gamesa

با مقایسه نتایج به دست آمده از روش سلکا و روش پرومتی، ملاحظه می‌گردد که نتایج هر دو روش دقیقا یکسان می‌باشد. در نتیجه روش سلکا از دقت مورد نیاز جهت تصمیم‌گیری برخوردار است و نسبت به روش پرومتی دارای پیچیدگی کمتری است و در زمانی کوتاه‌تر و تعداد مراحل کم‌تر قادر به شناسایی گزینه برتر می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش ترکیبی نوین سلکا برای رتبه‌بندی و انتخاب تامین‌کنندگان سبز توربین‌های بادی ارایه گردید. این روش ترکیبی از دو روش تحلیل پوششی داده‌ها و تحلیل سلسله مراتبی می‌باشد و علاوه بر این‌که به‌صورت همزمان از مزایای هر دو روش بهره می‌برد، محدودیت‌های هردو روش را نیز برطرف می‌کند. به منظور پیاده‌سازی روش پیشنهادی برای انتخاب تامین کننده سبز، پنج تأمین‌کننده که دارای شرایط مناسب بودند، انتخاب گردیدند و روش پیشنهادی سلکا مورد استفاده قرار گرفت و در پایان شرکت Vestas به منظور خرید توربین‌های بادی انتخاب گردید. همچنین به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی در این مقاله، از روش ترکیبی قادری و همکاران و روش پرومتی استفاده شد و با بررسی مقادیر کارایی تامین‌کنندگان و نتایج به دست آمده از هر دو روش، برتری روش پیشنهادی سلکا نسبت به روش مشابه اثبات گردید. روش سلکا از نظر دقت دارای عملکرد مطلوب مشابه روش پرومتی می‌باشد، با این تفاوت که دارای پیچیدگی این روش نیست و زمان کمتری جهت محاسبات و حل مساله با روش سلکا صرف می‌شود. به منظور تحقیقات آتی در این پژوهش می‌توان رویکرد پیشنهادی را در صنایع دیگر و به منظور ارزیابی و تصمیم‌گیری مسائل کاربردی دیگر مانند انتخاب سبد بهینه سهام، انتخاب استراتژی مناسب تولید، انتخاب ماشین‌آلات در خط تولید و غیره پیاده‌سازی کرد. همچنین می‌توان از روش های دیگر تصمیم‌گیری مانند روش تاپسیس، پرومتی، فرآیند تحلیل شبکه و غیره جهت ایجاد روش تلفیقی استفاده کرد. علاوه برایجاد رویکردهای تلفیقی با روش‌های تصمیم‌گیری، می‌توان آن را به حوزه های دیگر نیز تعمیم داد و به عنوان نمونه از روش های حوزه آماری چندمتغیر یا الگوریتم های حوزه فراابتکاری نیز استفاده نمود.

References

1. HART, S. L., DOWELL, G., “invited editorial: a natural-resource-based view of the firm: fifteen years after”, Journal of Management, 2011, 37: 1464-1479.
2. “Renewable energy organization of iran (suna).” (Online). Available: http://www.suna.org.ir
3. Fallahian-Najafabadi, A., Kazemi, S., Latifi, I., Soltanmohammad, N., “A green managerial criteria pyramid model and key criteria for green supplier evaluation,” Adv. Environ. Biol., 2013, 7 (11): 3505–3516.
4. Che Z. H, Wang H. S. “Supplier selection and supply quantity allocation of common and non-common parts with multiple criteria under multiple products”, Computers & Industrial Engineering; 2008, 55, 110–133.
5. Pi, WN., Low, C., “Supplier evaluation and selection via Taguchi loss functions and an AHP”, International Journal of Advance Manufacturing Technology; 2006, 27 (5–6): 625-630.
6. Shen, Z, Zhu, Q., Wu, G., *Theory, methodology and application of DEA*, 1996, Science Press, Beijing.
7. Liu, J., Ding, F., Lall, V., “Using data envelopment analysis to compare suppliers for supplier selection and performance improvement”, The Journal of Supply Chain Management, 2000, 5(3): 143-150.
8. Mashli, A., Mohammadi Tabar, D., “Selecting suppliers with a cooperative game theory approach, taking into account capacity constraints and simultaneous delivery of items”, Industrial Engineering Research in Production Systems, 2017, No. 10, 83-97. (In Persian)
9. Hashemi, S. H., Karimi, A., Tavana, M., “An integrated green supplier selection approach with analytic network process and improved Grey relational analysis,” Int. J. Prod. Econ., 2015, 159, 178–191.
10. Lin, C.-T., Chen, C.-B., Ting, Y.-C., “a green purchasing model by using ANP and LP methods” J. Test. Eval., 2012, 40 (2): 03–210.
11. Kuo, T. C., Hsu, C.-W., Li, J.-Y., “Developing a green supplier selection model by using the DANP with VIKOR” 2015, 7 (2): 1661-1689.
12. Dobos, I., Vorosmarty, G., “Green supplier selection and evaluation using DEA-type composite indicators” Int. J. Prod. Econ., 2014, (157): 273–278.
13. Lee, A. H. I., Kang, H.-Y., Hsu C.-F., Hung, H.-C., “A green supplier selection model for high-tech industry,” Expert Syst. Appl., 2009, 36 (4): 7917–7927.
14. Kannan, D., Jabbour, A. B. L. D. S., Jabbour, C. J. C., “Selecting green suppliers based on GSCM practices: Using fuzzy TOPSIS applied to a Brazilian electronics company,” Eur. J. Oper. Res., 2014, 233 (2): 432–447.
15. Shen, L., Olfat, L., Govindan, K., “A fuzzy multi criteria approach for evaluating green supplier’s performance in green supply chain with linguistic preferences,” Resour. Conserv., 2013, (74): 70–179.
16. Mahjoubnia, M., Dabiri, N., Bozorgi Amiri, A., “Presenting a new model of location-routing-green inventory under uncertainty Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems, 2017, 5(10), 99-115. (In Persian)
17. Oroojeni, M. J., Darvishi, M., “Green supplier selection for the steel industry using BWM and fuzzy TOPSIS: A case

study of Khouzestan steel company", *Sustainable Futures*, 2020, (2), 14-43.

18. Kilic, H. S., Yalcin, A. S., "Modified two-phase fuzzy goal programming integrated with IF-TOPSIS for green supplier selection", *Applied Soft Computing*, 2020, 93. 34-57,
19. Gupta, Sh., Soni, U., Girish Kumar, G., "Green supplier selection using multi-criterion decision making under fuzzy environment: A case study in automotive industry", *Computers & Industrial Engineering*, 2019, (136): 663-680.
20. Ghaderi, S. F., Hakimi Asl, M., Nasrollahi M., Hakimi Asl A. " Provide a hybrid approach to ranking and selecting green suppliers of wind farm equipment using principal component analysis and TOPSIS", International Conference on Industrial Engineering. Tehran, 2016, 510-518. (In Persian)
21. LA Zadeh, L. A., "Fuzzy sets," Inf. Control, 1965, 8 (3): 338–353.
22. Chen, S. J. J., Hwang, C. L., Beckmann, M. J., Krelle, W., *Fuzzy multiple attribute decision making: methods and applications*. 1992, Springer-Verlag New York, Inc.
23. Tong, Li Zhong, Jindan Wang, and Zhongmin Pu. "Sustainable supplier selection for SMEs based on an extended PROMETHEE II approach." *Journal of Cleaner Production*, 330 (2022): 129830.