

Feasibility and Site Selection for Wind-Powered Road Lighting in Kermanshah Province

B. Dosti¹, A. Asakereh^{1*}

1- Department of Biosystems Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

(*- Corresponding Author Email: A.Asakereh@scu.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2025.91098.1319>

Introduction

Proper lighting and safety equipment on roads are essential for the optimal use of roadside services and the timely, safe transportation of goods. Supplying electricity for road lighting, especially in remote and hard-to-reach areas via the power grid, involves high costs for building power transmission infrastructure. Using renewable energy enables electricity generation directly at the point of use and on a local scale. This approach reduces transmission and distribution costs and significantly lowers the environmental impact associated with fossil fuel-based electricity generation. Kermanshah province plays a key role in road transportation, yet most of its roads lack lighting systems. The province has significant wind energy potential, but wind power has not been utilized to supply electricity for road lighting. This suggests that installing small-scale wind turbines along the roads could be a promising solution. This study aims to assess the wind energy potential for powering road lighting and to prioritize the counties of Kermanshah province for installing small-scale wind turbines to supply electricity to road lighting systems.

Materials and Methods

The main steps of the study include data collection, preparation of the wind atlas, identification of locations with high wind potential, determination of effective factors and indicators for siting wind turbines, weighting of these factors and indicators, scoring counties based on them, and finally ranking the counties for installing wind turbines to supply electricity for the road lighting system using multi-criteria decision-making models. Using the wind atlas, we evaluated wind energy potential within a 3 km buffer zone around roads and identified 46 points with high wind potential. Based on these points, the counties of Kermanshah province were assessed and ranked for installing small-scale turbines to power the road lighting system. The indicators considered to determine suitable turbine locations included wind energy potential, distance from roads, traffic volume, distance from high-voltage power lines, distance from protected areas, distance from rivers and flood-prone zones, distance from faults, distance from residential areas, and land slope. Counties were scored on these indicators based on previous studies and expert opinions. A decision-making matrix was created using these scores, and indicator weights were calculated using Shannon entropy combined with expert evaluation. The SAW, TOPSIS, ELECTRE, and VIKOR methods were then applied to rank and prioritize the counties.

Results and Discussion

The energy potential of wind, with a weight of 0.360, was the most important indicator for selecting locations for wind turbine installation and road lighting systems. Traffic and distance from the road were the next most significant factors, with weights of 0.228 and 0.151, respectively. Kermanshah County had the highest wind energy potential, featuring seven high-potential sites, while Sarpole Zahab and Qasr Shirin counties each had only one suitable site, indicating lower wind potential. The top three counties in terms of wind energy potential were Kermanshah, Ravansar, and Paveh. Kermanshah County also had the highest traffic volume, carrying the greatest weight in that category. For distance from the road, Sanghar and Sahneh ranked first and second, with unscaled weights of 0.094 and 0.070, respectively, and Kermanshah ranked third with 0.047. Kermanshah County scored highest on all indicators except distance from faults and protected areas. Across all decision-making methods, Kermanshah and Sanghar consistently ranked first and second. Overall, Kermanshah, Sanghar, and Ravansar were prioritized as the top three counties for installing wind turbines to supply electricity for road lighting systems.

Conclusion

According to the wind atlas, 46 points with suitable wind potential for the road lighting system were

determined. Based on multi-criteria decision-making methods, Kermanshah, Sanghar, and Ravansar counties were prioritized for installing road lighting systems powered by wind turbines.

Acknowledgement

The authors would like to thank Shahid Chamran University of Ahvaz and its Vice Chancellor for Research and Technology for their financial support in the form of funding (SCU.AA1400.29747).

Keywords: GIS, Multi-criteria decision making, Road lighting system, Traffic, Wind energy atlas, Wind turbine

امکان‌سنجی و مکان‌یابی نصب سامانه روشنایی جاده‌ای با استفاده از انرژی باد در استان

کرمانشاه

بهروز دوستی^۱، عباس عساکره^{۱*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۱

چکیده

بهره‌برداری مؤثر از مراکز خدمات‌رسانی بین‌راهی و حمل به‌موقع و ایمن کالاهای، نیازمند وجود راه‌هایی با سیستم روشنایی و تجهیزات ایمنی مناسب است. استفاده از انرژی باد با نصب توربین‌های بادی در حاشیه جاده‌ها، یک راهکار امیدوارکننده در راستای افزایش ایمنی و تسهیل حمل و نقل جاده‌ای مبتنی بر انرژی پایدار، پاک و تجدیدپذیر با حداقل اثرات زیست‌محیطی به‌شمار می‌رود. هدف این مطالعه، ارزیابی پتانسیل انرژی باد برای تولید برق سیستم روشنایی جاده‌ها و اولویت‌بندی شهرستان‌های استان کرمانشاه برای نصب سامانه روشنایی مبتنی بر انرژی باد است. با استفاده از اطلس باد، مناطق با پتانسیل باد بالا در محدوده ۳ کیلومتری جاده‌ها شناسایی شدند که در نتیجه، ۴۶ نقطه در استان کرمانشاه شناسایی گردید و تحلیل‌های مکان‌یابی بر اساس این نقاط انجام شد. سپس شهرستان‌های استان کرمانشاه بر اساس معیارهای مختلف شامل پتانسیل انرژی باد، فاصله از جاده‌ها، حجم ترافیک، فاصله از خطوط برق فشار قوی، فاصله از مناطق حفاظت‌شده، نوع کاربری اراضی، فاصله از رودخانه و مناطق در معرض سیل، فاصله از گسل‌ها، فاصله از مناطق مسکونی و شیب زمین، با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره جهت نصب سیستم روشنایی جاده‌ای مبتنی بر انرژی باد اولویت‌بندی شدند. نتایج نشان دادند که پتانسیل انرژی باد، حجم ترافیک و فاصله از جاده‌ها بیشترین اهمیت را در تعیین مکان نصب سامانه روشنایی دارند. شهرستان‌های کرمانشاه، سنقر و روانسر به‌ترتیب در اولویت نصب سامانه روشنایی با توربین بادی قرار گرفتند، در حالی که شهرستان‌های قصر شیرین و سرپل ذهاب در رتبه‌های پایین‌تری قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: اطلس انرژی باد، ترافیک، تصمیم‌گیری چندمعیاره، توربین باد، سامانه روشنایی جاده‌ای، سیستم اطلاعات جغرافیایی

مقدمه

ایمنی در حمل و نقل، نقشی اساسی در دستیابی به توسعه اجتماعی، اقتصادی و سیاسی هر کشور ایفا می‌کند. جمعیت یک جامعه به‌عنوان مهم‌ترین سرمایه و عامل پیشرفت آن کشور تلقی می‌شود و حفظ امنیت و ایمنی افراد، مسئولیتی است که هرگونه تعلل در ارتقای آن می‌تواند مانع تعالی و پیشرفت جامعه گردد. یکی از فاکتورهای اصلی حوادث، شبکه‌های جاده‌ای کشور و نیز عدم توجه به تأمین و نصب تجهیزات ایمنی و ایجاد سامانه‌های روشنایی جاده‌ای است. جاده‌ها و راه‌های کشور به‌عنوان زیرساخت‌های اساسی، نقش مهمی در حمل و نقل و رونق اقتصادی دارند. برای بهره‌برداری مؤثر از مراکز خدمات‌رسانی بین‌راهی و حمل به‌موقع و ایمن کالاهای، به‌ویژه مواد فاسدشدنی، وجود راه‌ها با سامانه‌های روشنایی و تجهیزات ایمنی ضروری است. منبع اصلی تأمین انرژی سیستم‌های روشنایی جاده‌ای، برق شبکه سراسری است که نه‌تنها هزینه بالای آن را به همراه دارد

بلکه عمدتاً از منابع سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود که موجب انتشار حجم عظیمی از گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها می‌گردد و اثرات مخرب زیست‌محیطی به همراه دارد (Soleymani, Keyhani, & Omid, 2018). تأمین برق برای سیستم روشنایی در مناطق دورافتاده و صعب‌العبور از طریق شبکه برق سراسری، مستلزم صرف هزینه‌های بالا و ایجاد تأسیسات سنگین برای تولید و انتقال برق است (Hatefi Ardekani & Rezaei Moghaddam, 2016).

برخلاف سیستم‌های تولید انرژی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی که معمولاً متمرکز هستند، انرژی‌های تجدیدپذیر را می‌توان به‌صورت غیرمتمرکز در محل مصرف استفاده کرد. این قابلیت به کاهش هزینه‌های انتقال و توزیع، کاهش حجم سرمایه‌گذاری و تسهیل ورود بخش خصوصی کمک کرده و همچنین امنیت و پایداری تأمین انرژی را افزایش می‌دهد و تبعات مالی و اجتماعی ناشی از تولید برق را کاهش می‌دهد (Hasnaki, 2018). یکی از ویژگی‌های مهم منابع انرژی تجدیدپذیر، ظرفیت بالای آن‌ها در فراهم کردن انرژی مقرون به‌صرفه برای جوامع دورافتاده و توسعه‌نیافته است (Ghobadian, Najafi, Rahimi, & Yusaf, 2009). بنابراین، استفاده از

۱- گروه مهندسی بیوسستم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

(Email: A.asakereh@scu.ac.ir)

(*) نویسنده مسئول:

<https://doi.org/10.22067/jam.2025.91098.1319>

انرژی‌های تجدیدپذیر برای تأمین برق سامانه‌های روشنایی در طول و حاشیه جاده‌ها می‌تواند به عنوان یک هدف مهم و بلندمدت در راستای افزایش ایمنی و تسهیل حمل و نقل جاده‌ای مطرح شود. در این میان، تولید برق از انرژی باد معمولاً نسبت به سایر انرژی‌های تجدیدپذیر هزینه کمتری داشته و دارای تکنولوژی ساده‌تری است (Esfahani, Ifaei, Kim, & Yoo, 2016). سرمایه‌گذاری در انرژی باد نه تنها فرصتی برای تولیدکنندگان انرژی، بلکه برای مصرف‌کنندگان و ارائه‌دهندگان تسهیلات تولید انرژی نیز به شمار می‌آید. توربین‌های بادی با ظرفیت حدود یک کیلووات یا کمتر برای مناطق مسکونی و همچنین توربین‌های بادی در مقیاس بزرگ برای تولید برق در دسترس هستند (Asakereh, Omid, Alimardani, & Sarmadian, 2015). مطالعات متعددی در زمینه استفاده از انرژی باد برای تأمین روشنایی خیابان‌ها و جاده‌ها انجام شده است؛ برخی از این مطالعات به صورت مستقل و برخی به صورت سامانه‌های هیبریدی همراه با انرژی خورشیدی بوده‌اند (Ali & Ammari, 2022; Ibrahim & Asari, 2019; Khare, Nema, & Baredar, 2016; Wadi, Shobole, Tur, & Baysal, 2018). بررسی مصرف انرژی توسط چراغ‌های روشنایی جاده‌ای که با توربین‌های بادی کوچک تأمین می‌شوند، در منطقه بیتلیس-رهوا صورت گرفت و نتایج نشان داد که استفاده از توربین‌های بادی محور عمودی کوچک در مقیاس کوچک بر روی تیرک‌های روشنایی امکان‌پذیر است و میزان انرژی تولیدی بیشتر از مصرف چراغ‌های روشنایی خواهد بود (Oral, 2023). مطالعات نشان می‌دهد که نصب توربین‌های بادی علاوه بر نیاز به ارزیابی پتانسیل انرژی باد، مستلزم توجه به عوامل و معیارهای مختلفی همچون مسائل زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی است. بنابراین، انتخاب مکان مناسب برای نصب توربین از اهمیت زیادی برخوردار است. مرشدی و همکاران (Morshedi, Borna, Asgharipour, Ahmadi, & Zaheri, 2011) در مطالعه‌ای با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و GIS، بر اساس معیارهای اقلیمی، جغرافیایی، اقتصادی و اجتماعی به مکان‌یابی سایت‌های احداث توربین‌های بادی پرداخته‌اند. همچنین، در تحلیل تناسب اراضی برای استقرار نیروگاه‌های بادی در استان اردبیل از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در محیط GIS استفاده شده که نتایج حاکی از مناسب بودن برخی نواحی در منطقه می‌باشد (Jafari, Azizi, Nasiri, & Abedi, 2013). فاصله از کانون زلزله، گسل‌ها، مناطق حفاظت‌شده، رودخانه‌ها، راه‌های ارتباطی، شهرها، روستاها، ارتفاع، شیب، سرعت باد، سرعت باد غالب، فشار و دما به عنوان معیارهای تعیین مکان‌های مناسب جهت احداث نیروگاه بادی در استان سمنان در نظر گرفته شدند که از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی جهت وزن‌دهی آن‌ها استفاده گردید. در این مطالعه از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی برای پتانسیل‌سنجی ایجاد نیروگاه بادی استفاده گردید (Rezaei, Karami, & Shakeri, 2021). جلوخانی و حاجیلو (Jelokhani Niyaraki & Hajiloo, 2016) سرعت باد، فاصله از راه‌های ارتباطی، مناطق شهری، روستایی، مناطق حفاظت‌شده، کاربری اراضی، گسل‌ها و رودخانه‌ها را به عنوان معیارهای مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی انتخاب کردند. رفعتی و همکاران (Rafati, Daliri, Karimi, 2019) به ارزیابی اقتصادی انرژی باد و کارایی توربین‌های بادی در استان کرمانشاه با ملاحظات اقلیمی پرداختند. نتایج آنان نشان داد که احداث نیروگاه در محدوده ایستگاه گیلان غرب در تمامی انواع مختلف توربین صرفه اقتصادی بیشتری در مقایسه با مناطق دیگر استان دارد. در مطالعه دیگری پتانسیل انرژی باد و انتخاب مکان بهینه، جهت احداث نیروگاه بادی در استان کرمانشاه بر اساس داده‌های بلندمدت سه‌ساعته ایستگاه‌های همدید استان کرمانشاه مورد ارزیابی قرار گرفت. چگالی توان باد در ایستگاه‌های کرمانشاه، کنگاور، سرپل ذهاب، روانسر و اسلام‌آباد غرب به ترتیب ۶۶/۸، ۱۴۶/۱، ۲۷۰/۹، ۲۴۵/۴ و ۱۰۰/۸ وات بر مترمربع محاسبه شد. در نهایت ایستگاه همدید روانسر به عنوان مکانی مناسب جهت بهره‌برداری از انرژی باد پیشنهاد شد (Bafkar, Azari, & Ahmadi, 2012). نتایج مطالعه‌ای در منطقه دهلران نشان داد که پتانسیل بالای انرژی باد منطقه با اوج مصرف برق کشور در طول روز، ماه‌های گرم سال و فصل تابستان تقرارن زمانی دارد و با احداث مزارع بادی در این مناطق می‌توان به افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سبد انرژی کشور و پایداری و ثبات برق منطقه در ایام گرم سال کمک نمود (Omidi, Alimardani, & Khanali, 2019). بررسی پتانسیل انرژی باد در شهر پارس‌آباد واقع در شمال غربی ایران، نشان داد که این شهر از نظر پتانسیل تولید انرژی باد در موقعیت ضعیف تا متوسط قرار دارد. بنابراین، این منطقه می‌تواند برای پروژه‌های اتصالات غیرشبکه‌ای مناسب باشد، که به معنای امکان استفاده از انرژی باد در مقیاس‌های کوچک است. در نهایت، این تحقیق بر اهمیت برنامه‌ریزی دقیق برای شناسایی و گسترش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر تأکید می‌کند (Keyhani Nasab, Mesri, Gundoshmian, & Zargar Ershadi, 2018). در مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی در کشور تایلند از ترکیب مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره و GIS با در نظر دادن معیارهای ارتفاع، پتانسیل باد، ناهمواری‌های سطح زمین، فاصله از روستا، نقاط زیستی، فرودگاه، مناظر طبیعی، بزرگراه‌ها و رودخانه‌ها استفاده گردید (Bennui, Rattanamanee, Puetaipoon, Phukpattaranont, & Chetpattananondh, 2007). در مطالعه‌ای پتانسیل انرژی باد در هشت نقطه از شمال قبرس مورد مطالعه قرار گرفت. داده‌های سرعت باد از اداره هواشناسی جمع‌آوری و ویژگی‌های سرعت و پتانسیل انرژی باد تحلیل شد. نتایج نشان‌دهنده منابع ضعیف انرژی باد است. با این حال، استفاده از توربین‌های بادی کوچک برای تولید برق

انرژی‌های تجدیدپذیر برای تأمین برق سامانه‌های روشنایی در طول و حاشیه جاده‌ها می‌تواند به عنوان یک هدف مهم و بلندمدت در راستای افزایش ایمنی و تسهیل حمل و نقل جاده‌ای مطرح شود. در این میان، تولید برق از انرژی باد معمولاً نسبت به سایر انرژی‌های تجدیدپذیر هزینه کمتری داشته و دارای تکنولوژی ساده‌تری است (Esfahani, Ifaei, Kim, & Yoo, 2016). سرمایه‌گذاری در انرژی باد نه تنها فرصتی برای تولیدکنندگان انرژی، بلکه برای مصرف‌کنندگان و ارائه‌دهندگان تسهیلات تولید انرژی نیز به شمار می‌آید. توربین‌های بادی با ظرفیت حدود یک کیلووات یا کمتر برای مناطق مسکونی و همچنین توربین‌های بادی در مقیاس بزرگ برای تولید برق در دسترس هستند (Asakereh, Omid, Alimardani, & Sarmadian, 2015). مطالعات متعددی در زمینه استفاده از انرژی باد برای تأمین روشنایی خیابان‌ها و جاده‌ها انجام شده است؛ برخی از این مطالعات به صورت مستقل و برخی به صورت سامانه‌های هیبریدی همراه با انرژی خورشیدی بوده‌اند (Ali & Ammari, 2022; Ibrahim & Asari, 2019; Khare, Nema, & Baredar, 2016; Wadi, Shobole, Tur, & Baysal, 2018). بررسی مصرف انرژی توسط چراغ‌های روشنایی جاده‌ای که با توربین‌های بادی کوچک تأمین می‌شوند، در منطقه بیتلیس-رهوا صورت گرفت و نتایج نشان داد که استفاده از توربین‌های بادی محور عمودی کوچک در مقیاس کوچک بر روی تیرک‌های روشنایی امکان‌پذیر است و میزان انرژی تولیدی بیشتر از مصرف چراغ‌های روشنایی خواهد بود (Oral, 2023). مطالعات نشان می‌دهد که نصب توربین‌های بادی علاوه بر نیاز به ارزیابی پتانسیل انرژی باد، مستلزم توجه به عوامل و معیارهای مختلفی همچون مسائل زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی است. بنابراین، انتخاب مکان مناسب برای نصب توربین از اهمیت زیادی برخوردار است. مرشدی و همکاران (Morshedi, Borna, Asgharipour, Ahmadi, & Zaheri, 2011) در مطالعه‌ای با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و GIS، بر اساس معیارهای اقلیمی، جغرافیایی، اقتصادی و اجتماعی به مکان‌یابی سایت‌های احداث توربین‌های بادی پرداخته‌اند. همچنین، در تحلیل تناسب اراضی برای استقرار نیروگاه‌های بادی در استان اردبیل از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در محیط GIS استفاده شده که نتایج حاکی از مناسب بودن برخی نواحی در منطقه می‌باشد (Jafari, Azizi, Nasiri, & Abedi, 2013). فاصله از کانون زلزله، گسل‌ها، مناطق حفاظت‌شده، رودخانه‌ها، راه‌های ارتباطی، شهرها، روستاها، ارتفاع، شیب، سرعت باد، سرعت باد غالب، فشار و دما به عنوان معیارهای تعیین مکان‌های مناسب جهت احداث نیروگاه بادی در استان سمنان در نظر گرفته شدند که از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی جهت وزن‌دهی آن‌ها استفاده گردید. در این مطالعه از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی برای پتانسیل‌سنجی ایجاد نیروگاه بادی استفاده گردید

پاوه، جوانرود، سرپل ذهاب، سنقر، صحنه، قصر شیرین، کرمانشاه، کنگاور، گیلان غرب و هرسین می‌باشند. شهر کرمانشاه مرکز شهرستان و استان کرمانشاه است. این استان در مسیر جبهه‌های مرطوب مدیترانه‌ای قرار داشته که در اثر برخورد با رشته‌کوه زاگرس، ریزش نزولات آسمانی را به‌وجود می‌آورد.

مراحل کلی پژوهش

فرآیند کلی پژوهش کنونی شامل جمع‌آوری اطلاعات، تهیه اطلس باد، تعیین مکان‌ها با پتانسیل بالای باد، تعیین شاخص‌های تعیین‌کننده و امتیازدهی به شاخص‌ها، امتیازدهی به شهرستان‌ها بر اساس شاخص‌ها و در نهایت رتبه‌بندی شهرستان‌ها جهت نصب سامانه روشنایی جاده‌ها با استفاده از انرژی باد می‌باشد. جهت رتبه‌بندی شهرستان‌ها از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه استفاده گردید. داده‌های سه‌ساعته ۱۰ ساله سرعت باد از ایستگاه‌های هواشناسی موجود سطح استان جمع‌آوری گردید. بررسی موقعیت مکانی ایستگاه‌های هواشناسی و راه‌ها نشان داد که داده‌های به‌دست‌آمده از ایستگاه‌های هواشناسی قابلیت تسری یافتن به تمامی نقاط استان کرمانشاه به‌خصوص راه‌های مواصلاتی با فاصله زیادی از ایستگاه‌های هواشناسی را ندارد. لذا از داده‌های اطلس جهانی باد استفاده گردید و نقشه رستری باد استان کرمانشاه با دقت ۱۰ در ۱۰ متر استخراج گردید. جهت صحت‌سنجی از داده‌های ایستگاهی استفاده گردید. داده‌های مختلفی مانند سرعت متوسط باد، چگالی انرژی باد، نمودارهای سرعت ساعتی، روزانه و ماهیانه سرعت باد، گلباد باد از این اطلس قابل استخراج می‌باشد. نقشه‌های ویکتوری و رستری کاربری اراضی، راه‌ها و جاده‌های استان کرمانشاه، شهرها، روستاها، مناطق حفاظت‌شده، گسل، خطوط برق فشار قوی، راه‌آهن و نقشه رقومی ارتفاع^۱ از سازمان نقشه‌برداری کشور و اداره منابع طبیعی استان کرمانشاه تهیه گردید. ترافیک جاده‌های استان کرمانشاه از اداره کل راهداری و حمل و نقل جاده‌ای استان کرمانشاه تهیه گردید.

انتخاب شاخص‌های مکان‌یابی

در مطالعات، شاخص‌ها و معیارهای متعددی برای انتخاب مکان مناسب جهت نصب توربین بادی مانند عوامل اقتصادی، زیست‌محیطی، اقلیمی، زمین‌شناسی، اقتصادی و اجتماعی در نظر گرفته شده است (Al-Yahyai, Charabi, Gastli, & Al-Badi, 2012; Noorollahi, Yousefi, & Mohammadi, 2016; Rediske et al., 2021; Xu et al., 2020). در این مطالعه ابتدا شاخص‌های موثر با استفاده از مطالعات گذشته استخراج گردید و سپس با توجه به محدودیت دسترسی به اطلاعات و داده‌ها و

در این مناطق مناسب است و توربین ۵ کیلوواتی می‌تواند نیازهای انرژی سالانه یک خانه متوسط را تأمین کند (Alayat, Kassem & Çamur, 2018).

کرمانشاه، به‌عنوان یکی از استان‌های غرب کشور، به دلیل مرز مشترک با کشور عراق و همچنین هم‌مرز بودن با چهار استان دیگر، از نظر تردد و حمل و نقل جاده‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با این حال، بخش قابل‌توجهی از راه‌های این استان فاقد سیستم روشنایی است. بر اساس داده‌های اداره راهداری و حمل و نقل جاده‌ای استان کرمانشاه، طول کلی راه‌های این استان در سال ۱۴۰۱ حدود ۸۰۵۱ کیلومتر بوده و تنها ۱۳۶ کیلومتر آن با بهره‌گیری از ۶۰۴۰ شعله دارای سامانه روشنایی است، که عموماً از شبکه برق سراسری تأمین می‌شود. این وضعیت نشان می‌دهد که تجهیز راه‌ها و جاده‌های این استان به سامانه روشنایی با بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر، مانند توربین‌های بادی منفصل یا متصل به شبکه‌ی برق سراسری، می‌تواند به‌عنوان یک ایده و راهکار جدی در راستای افزایش ایمنی و سلامتی سرنشینان ناوگان حمل و نقل مورد بررسی قرار گیرد. مطالعات نشان داده است که برخی از مناطق استان کرمانشاه از نظر انرژی باد، پتانسیل مناسبی دارند (Rafati et al., 2019).

با توجه به عدم استفاده از سامانه‌های روشنایی و گسترده‌ی جاده‌های استان کرمانشاه، تجهیز این راه‌ها به سامانه‌های روشنایی با توربین بادی می‌تواند یک راهکار امیدوارکننده باشد تا برق سیستم روشنایی به‌صورت محلی و از انرژی‌های تجدیدپذیر تأمین گردد و هزینه انتقال شبکه به مناطق دورافتاده کاهش یابد. مطالعات گذشته عمدتاً بر تحلیل داده‌های هواشناسی جهت احداث نیروگاه‌های بادی با توربین‌های بزرگ تمرکز داشته و کمتر به تأمین برق سیستم روشنایی جاده‌ها از انرژی باد پرداخته‌اند. لذا در این مطالعه، به‌منظور تأمین برق سیستم روشنایی جاده‌ها استان کرمانشاه با استفاده از انرژی باد، موقعیت‌های مناسب جهت احداث توربین بادی و سیستم روشنایی جاده‌ای مبتنی بر انرژی باد تعیین گردید. همچنین شهرستان‌های استان کرمانشاه از نظر احداث سیستم روشنایی مبتنی بر انرژی باد اولویت‌بندی شدند.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

استان کرمانشاه با حدود ۲ میلیون نفر جمعیت، ۴۳۴۲۴ کیلومتر مربع وسعت در میانه ضلع غربی کشور، بین ۳۳ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۳۰ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. استان کرمانشاه دارای ۱۴ شهرستان است که شامل اسلام‌آباد غرب،

1- Digital Elevation Model (DEM)

جدول ۱- امتیازدهی از نظر معیار ترافیک

Table 1- Scoring based on traffic criteria

	تردد کم	تردد متوسط	تردد زیاد
	Low traffic	Medium traffic	High traffic
امتیاز	3	6	9
Score			

فاصله نصب نیروگاه بادی از راه‌های ارتباطی از دو دیدگاه موردتوجه است. از دیدگاه حفظ ایمنی و کاهش سوانح رانندگی و ایجاد تاسیسات در حریم قانونی راه، یکی از عوامل افزایش سوانح رانندگی محسوب می‌شود. از نگاه دیگر، افزایش فاصله نیروگاه بادی از راه‌ها می‌تواند هزینه انتقال شبکه برق و نگهداری تاسیسات برقی را افزایش دهد و عوامل زیست‌محیطی و کاربری اراضی کشاورزی را به خطر اندازد (Gorsevski et al., 2013; Xu et al., 2020). براساس قوانین، حریم قانونی راه‌ها از ۱۲/۵ متر برای راه‌های روستایی تا ۶۰ متر برای آزادراه‌ها تعیین شده است که این محدوده‌ها غیرقابل استفاده برای نصب توربین می‌باشد. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، فاصله بیش از ۳ کیلومتر به جهت افزایش هزینه انتقال شبکه برق اقتصادی نمی‌باشد. در این مطالعه امتیازدهی نقاط انتخاب‌شده از نظر فاصله از جاده‌ها بر اساس جدول ۲ انجام گرفت. محدوده حریم جاده غیرقابل استفاده برای توربین بادی در نظر گرفته شد و فاصله تا ۱۰۰ متر از دو طرف جاده بیشترین امتیاز را به خود اختصاص داد. با افزایش فاصله از جاده از امتیاز و اولویت مناطق جهت نصب توربین کاسته می‌شود.

ایجاد صدا و نویز و امکان اختلال در شبکه مخابراتی و رادیویی از معایب توربین بادی می‌باشد. همچنین توربین‌های بادی از منظر ایمنی و دیداری ممکن است مشکلاتی را برای مناطق مسکونی ایجاد کنند (Al-Yahyai et al., 2012; Arnette & Zobel, 2011). بنابراین یک حداقل فاصله اطمینان از مناطق مسکونی جهت نصب توربین بادی در نظر گرفته می‌شود که در این مطالعه بر اساس عباسی و همکاران (Abbasi, Monazzam Esmailpour, Akbarzadeh, 2015) حداقل فاصله ۵۰۰ متر در نظر گرفته شد. فاصله بیشتر از مناطق مسکونی به‌عنوان مزیت محسوب می‌شود و امتیاز بیشتری دریافت می‌کند. نقاط با پتانسیل بالا (۴۶ نقطه) از نظر فاصله از مناطق مسکونی جهت نصب توربین بر اساس جدول ۳ امتیازدهی شدند.

همچنین شرایط منطقه و تایید کارشناسان، معیارها و شاخص‌های نهایی انتخاب شدند. شاخص‌های نهایی در نظر گرفته‌شده شامل پتانسیل انرژی باد (C1)، حجم ترافیک (C2)، فاصله از جاده‌ها (C3)، فاصله از شهرها و روستاها (مناطق مسکونی) (C4)، فاصله از مناطق حفاظت‌شده (C5)، فاصله از رودخانه و مناطق در معرض سیل (C6)، فاصله از خطوط برق فشار قوی (C7)، فاصله از گسل (C8) و شیب زمین (C9) می‌باشند.

سرعت بالای باد و وجود پتانسیل کافی انرژی باد شرط ضروری در نصب توربین و تولید برق است (Xu et al., 2020). بنابراین تعیین نقاط و مناطق با سرعت و چگالی انرژی بالای باد جهت تجزیه و تحلیل نصب توربین بادی الزامی است. از سوی دیگر توربین‌های بادی جهت سیستم روشنایی جاده‌ها باید در اطراف جاده نصب شوند به‌طوری‌که فاصله بیش از ۳ کیلومتر از جاده به جهت افزایش هزینه شبکه انتقال برق اقتصادی نیست. از این‌رو مناطق و نقاطی که دارای بیشترین سرعت و پتانسیل انرژی باد بر اساس نقشه حاصل از اطلس جهان باد بودند و در محدوده ۳ کیلومتر از جاده‌های استان کرمانشاه قرار دارند، برای تجزیه و تحلیل نصب توربین بادی جهت سیستم روشنایی جاده‌ها انتخاب شدند. بر این اساس ۴۶ نقطه شناسایی گردید که با توجه به موقعیت مکانی آن‌ها، شهرستان‌ها جهت نصب سیستم روشنایی بادی امتیازبندی و به‌عنوان گزینه‌ها در روش‌های مجموع ساده وزن^۱، تاپسیس^۲، الکت^۳ و ویکور^۴ به‌کار گرفته شدند. جهت امتیازدهی به پتانسیل انرژی باد از تابع عضویت فازی ارائه‌شده توسط عساکره (Asakereh, 2014) استفاده شد. این تابع بر اساس سطح‌بندی انرژی باد توسط آزمایشگاه ملی انرژی باد وزارت نیروی ایالات متحده آمریکا و تحقیقات صورت‌گرفته استخراج گردیده است. ایجاد امنیت ناوگان عبوری و کاهش سوانح جاده‌ای از اهداف مهم نصب سامانه‌های روشنایی می‌باشد. با افزایش حجم تردد، خطر سوانح رانندگی افزایش می‌یابد، لذا مناطق با ترافیک بالا از امتیاز بالاتری جهت نصب سامانه روشنایی برخوردار می‌باشد. تعداد ۸۲ دستگاه نقلیه‌شمار توسط سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای کشور، در کف جاده‌های استان نصب می‌باشد که موقعیت مکانی و اطلاعات آن‌ها جهت تعیین ترافیک راه‌ها استفاده گردید. امتیازدهی مناطق از نظر این معیار توسط کارشناسان اداره راه و ترابری انجام گرفت که در راستای ایمن‌سازی، جاده‌ها با ترافیک و تردد وسایل نقلیه بیشتر امتیاز بالاتری دریافت کردند (جدول ۱).

- 1- Simple Additive Weighting (SAW)
- 2- Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)
- 3- Elimination et Choice Translating Reality (ELECTRE)
- 4- Vlse Kriterijumsk Optimizacija Kompromisno Resenje (VIKOR)

جدول ۲- امتیازدهی از نظر فاصله از جاده‌ها

Table 2- Scoring based on distance from roads

فاصله از جاده								
Distance from roads (m)								
	حریم جاده‌ها	حریم جاده تا ۱۰۰ متر	100-200	200-500	500-1000	1000-2000	2000-3000	>3000
	Road buffer	Road buffer to 100 m						
امتیاز Score	0	9	8	7	6	4	2	0

جدول ۳- امتیازدهی از نظر فاصله از محدوده مناطق مسکونی

Table 3- Scoring based on distance from residential areas

	فاصله از محدوده مناطق مسکونی				
	Distance from residential areas (m)				
	0- 500	500-1000	1000-2000	2000-3000	>3000
امتیاز Score	0	3	5	7	9

داشته باشد (Arnette & Zobel, 2011; Xu *et al.*, 2020). جلوخانی و حاجیلو (Jelokhani Niyaraki & Hajiloo, 2016) حداقل فاصله از مناطق حفاظت‌شده برای نصب توربین بادی را ۵۰۰ متر در نظر گرفتند. فاصله بیشتر مکان نصب توربین بادی از مناطق حفاظت‌شده مزیت است و از اولویت بالاتری برخوردار می‌باشد. جدول ۴ نشان می‌دهد، به مناطق حفاظت‌شده و ۵۰۰ متر اطراف آن، امتیاز صفر داده شد و بیشترین امتیاز به مناطق با فاصله بیش از ۲ کیلومتر از مناطق حفاظت‌شده، تعلق گرفت.

توجه به مسائل زیست‌محیطی در مکان‌یابی نیروگاه بادی یکی از مهم‌ترین معیارها و شاخص‌هایی است که در مطالعات در نظر گرفته شده است. در مقایسه با توربین‌های بادی بزرگ و متوسط، اثرات زیست‌محیطی توربین‌های کوچک بسیار کمتر می‌باشند، ولی در حد امکان باید مسائل زیست‌محیطی در نظر گرفته شوند تا اثرات جانبی نصب توربین به حداقل برسد. نصب توربین بادی ممکن است خطراتی را جهت عبور پرندگان و زیستگاه جانوری ایجاد کند. برای جلوگیری از برخورد پرندگان توربین باید دارای کمینه فاصله مشخص تا مسیر پرواز پرندگان یا زیستگاه آن‌ها و مناطق حفاظت‌شده را

جدول ۴- امتیازدهی از نظر فاصله تا مناطق حفاظت‌شده

Table 4- Scoring based on distance to protected areas

	فاصله از مناطق حفاظت‌شده				
	Distance to protected areas (m)				
	0-500	500-1000	1000-1500	1500-2000	>2000
امتیاز Score	0	3	5	7	9

جهت جلوگیری از تخریب سازه‌های نیروگاهی ناشی از حرکت سیلاب و آب رودخانه در مواقع بارندگی شدید، حداقل حریم لازم جهت نصب توربین بادی بر اساس مطالعات گذشته ۵۰۰ متر منظور گردید (Jelokhani Niyaraki & Hajiloo, 2016). امتیازدهی از نظر فاصله از رودخانه و مناطق در معرض سیل در جدول ۵ نشان داده شده است.

هرچند نصب یک توربین بادی منفرد رده کوچک در زمین کشاورزی فضای زیادی را برخلاف مزارع بادی اشغال نمی‌کند و می‌توان در حاشیه آن عملیات کشاورزی را به‌طور معمول داشت، اما حفظ مناطق با کاربری کشاورزی و باغی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و حتی‌الامکان نباید مراکز نیروگاهی در این مناطق ایجاد شود. از این‌رو محدوده اراضی کشاورزی و باغات و همچنین محدوده سایر سازه‌های انسان‌ساز به‌عنوان مناطق غیرقابل‌استفاده در نظر گرفته شد.

جدول ۵- امتیاز دهی از نظر فاصله از رودخانه و مناطق سیل

Table 5- Scoring based on distance from river and flood-prone areas

امتیاز Score	فاصله از رودخانه و مناطق سیل خیز Distance from river and flood-prone areas (m)			
	0-500	500-1000	1000-2000	>2000
	0	3	6	9

نظر فاصله از خطوط برق فشار قوی در جدول ۶ نشان داده شده است. گسل‌ها و مناطق زلزله‌خیز یکی از عوامل مخرب جهت نصب تجهیزات نیروگاهی محسوب می‌شوند. در بعضی منابع حریم حداقل ۵۰۰ متر برای گسل منظور گردیده است (Jelokhani Niyaraki & Hajiloo, 2016). جدول ۷ امتیازدهی از نظر فاصله از گسل را نشان می‌دهد.

احداث نیروگاه بادی در مجاورت خطوط انتقال برق فشار قوی می‌تواند خطرات احتمالی زیادی را ایجاد کند. بر اساس مصوبه هیات وزیران در سال ۱۳۹۴ فاصله حریم قانونی از خطوط برق فشار قوی با ولتاژ ۶۳، ۱۳۲، ۲۳۰، ۴۰۰ و ۷۵۶ کیلووات به ترتیب ۱۶، ۱۸، ۲۴، ۲۸ و ۵۰ متر از دو طرف منظور شده که در این پژوهش بر اساس مطالعات گذشته، حداقل فاصله مجاز ۵۰ متر منظور گردید (Jelokhani Niyaraki & Hajiloo, 2016). امتیازدهی منطقه از

جدول ۶- امتیازدهی از نظر فاصله از خطوط برق فشار قوی

Table 6- Scoring based on distance from high voltage power lines

امتیاز Score	فاصله از خطوط انتقال برق فشار قوی Distance from high voltage power lines (m)					
	0-50	50-200	200-500	500-800	800-1000	>1000
	0	3	5	7	8	9

جدول ۷- امتیازدهی از نظر فاصله از گسل

Table 7- Scoring in terms of distance from faults

امتیاز Score	فاصله از گسل Distance from fault (m)				
	0-500	500-700	700-1000	1000-1500	>1500
	0	3	5	7	9

بیشینه شیب مناسب جهت نصب توربین بادی در پژوهش‌های مختلف ۱۰ تا ۲۰ درصد بیان شده است (Al-Yahyai et al., 2012; Arnette & Zobel, 2011). امتیازدهی نقاط از نظر شیب زمین در جدول ۸ نشان داده شده است.

با افزایش شیب منطقه عملیات نقل و انتقال تجهیزات توربین بادی و خاک‌برداری و تسطیح زمین افزایش می‌یابد. هرچه شیب زمین کمتر باشد، نصب سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر و ایجاد زیرساخت‌ها، راحت‌تر و بهتر است و هزینه‌ها را کاهش می‌دهد.

جدول ۸- امتیازدهی از نظر شیب زمین

Table 8- Scoring based on terrain slope

امتیاز Score	شیب زمین (درصد) Slope (%)					
	0-10	10-15	15-20	20-25	25-30	>30
	9	7	5	3	1	0

وزن دهی به شاخص‌ها

جهت وزن دهی به معیارها و شاخص‌ها از روش آنتروپی شانون^۱ همراه با امتیازدهی کارشناسان استفاده گردید. آنتروپی یک مفهوم عمده در رشته‌ها و زمینه‌های مختلف علمی است که نشان‌دهنده‌ی مقدار عدم اطمینان موجود از مقدار انتظار اطلاعاتی از هر پیام است. در این روش، شاخص‌هایی از اهمیت بیشتری برخوردار هستند که پراکندگی مقادیر آن‌ها بیشتر است و در مقایسات می‌تواند تمایز بیشتری بین گزینه‌ها ایجاد کند. در این روش ابتدا باید ماتریس تصمیم‌گیری ایجاد گردد که ردیف‌ها و ستون‌ها به ترتیب نشان‌دهنده‌ی گزینه‌ها و شاخص‌ها می‌باشند (Momeni, 2022). در مطالعه کنونی، شهرستان‌های استان کرمانشاه به عنوان گزینه‌ها در نظر گرفته شدند و بر اساس ۴۶ نقطه انتخاب شده و موقعیت مکانی آن‌ها از نظر شاخص‌ها، امتیازدهی شدند. مراحل به دست آوردن وزن شاخص‌ها با استفاده از روش آنتروپی شانون در منابع مختلف با جزئیات ذکر شده است (Asgharpour, 2022).

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

مدل SAW^2 یکی از قدیمی‌ترین و ساده‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه است. در این روش، نیاز به تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری و تعیین وزن شاخص‌ها وجود دارد. از مزایای این روش می‌توان به سادگی و قابل فهم بودن آن، قابلیت استفاده از داده‌های کمی و کیفی، اجتناب از تصمیم‌گیری غیرمنطقی، قابلیت مقایسه گزینه‌های مختلف و انعطاف‌پذیری اشاره کرد. با این حال، این مدل دارای معایبی نیز هست، از جمله حساسیت به وزن دهی، عدم در نظر گرفتن تعاملات بین معیارها و حساسیت به تخصیص نادرست وزن‌ها. همچنین، هنگامی که تعداد معیارها زیاد باشد، سازمان دهی و ارزیابی آن‌ها می‌تواند زمان‌بر و پیچیده شود. مراحل پیاده‌سازی روش SAW در یک مسأله تصمیم‌گیری چندمعیاره با n معیار و m گزینه شامل تشکیل ماتریس تصمیم، بی‌مقیاس‌سازی ماتریس تصمیم، ایجاد ماتریس وزن‌دار و در نهایت انتخاب گزینه برتر است. در ماتریس تصمیم، سطرها و ستون‌ها به ترتیب نمایان‌گر گزینه‌ها و معیارها هستند و مقدار هر سلول نشان‌دهنده ارزیابی هر گزینه نسبت به هر معیار است. جهت بی‌مقیاس‌سازی، از روش بی‌مقیاس‌سازی خطی استفاده می‌شود، به این صورت که اگر معیار مثبت باشد، هر یک از اعداد آن ستون بر بزرگ‌ترین عدد ستون تقسیم می‌گردد، و اگر معیار منفی باشد، کمترین مقدار آن ستون بر هر یک از اعداد آن ستون تقسیم می‌شود. ماتریس وزن‌دار از ضرب ماتریس بی‌مقیاس‌شده در

ماتریس وزن‌ها به دست می‌آید. همان‌طور که بیان شد، در این مطالعه، ماتریس وزن‌ها با استفاده از آنتروپی شانون محاسبه گردید. در نهایت، گزینه‌ای که وزن آن بیشتر باشد، به عنوان گزینه برتر انتخاب می‌شود (Asgharpour, 2022; Momeni & Sharifi Salim, 2017).

مدل TOPSIS از روش‌های مهم تصمیم‌گیری چندمعیاره است که به طور گسترده استفاده می‌گردد. در این روش شاخصی به نام نزدیکی به راه حل ایده‌آل مثبت و دوری از راه حل ایده‌آل منفی تعریف می‌شود و بر اساس این فاصله‌ها، گزینه‌ها ارزیابی و اولویت‌بندی می‌شوند. از مزایای این روش می‌توان به توانایی در مدیریت معیارها، مقیاس‌پذیری، ارائه یک فرآیند یکپارچه به تصمیم‌گیرندگان در انتخاب گزینه‌های مناسب، استفاده از داده‌های کمی و کیفی، ارزیابی گزینه‌ها بدون نیاز به وزنی کردن معیارها، توانایی مدیریت تناسخ و تعلقات بین معیارها و گزینه‌ها اشاره کرد. حساسیت به وزن دهی، عدم در نظر گرفتن تعاملات بین معیارها (فرض مستقل بودن معیارها از هم)، عدم ارائه یک مدل پیش فرض در مورد وزنی کردن معیارها، محاسبات پیچیده، احتمال بازنگری مجدد در گزینه‌ها از معایب این روش می‌باشد. در این روش m گزینه به وسیله n شاخص مورد ارزیابی قرار می‌گیرند که شامل شش مرحله زیر است (Asgharpour, 2022; Momeni & Sharifi Salim, 2017).

مرحله اول: بی‌مقیاس‌سازی ماتریس تصمیم با استفاده از رابطه (۱) انجام می‌شود.

$$N_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_i a_{ij}^2}} \quad (1)$$

مرحله دوم: اگر N نشان‌دهنده ماتریس بی‌مقیاس شده و $W_{n \times n}$ نشان‌دهنده ماتریس قطری وزن‌ها باشد، ماتریس بی‌مقیاس موزون (V) با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$V = N \times W_{n \times n} \quad (2)$$

مرحله سوم: تعیین راه حل ایده‌آل مثبت و راه حل ایده‌آل منفی بدین صورت که بردار بهترین مقادیر هر شاخص ماتریس V ، راه حل ایده‌آل مثبت (V_j^+) و بردار بدترین مقادیر هر شاخص ماتریس V ، راه حل ایده‌آل منفی (V_j^-) را تشکیل می‌دهند.

مرحله چهارم: فاصله اقلیدسی هر گزینه از ایده‌آل مثبت (d_j^+) و ایده‌آل منفی (d_j^-) بر اساس رابطه (۳) و (۴) حساب می‌شود.

$$d_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$d_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

مرحله پنجم: محاسبه نزدیکی نسبی (CL_i^*) یک گزینه به راه حل ایده‌آل از رابطه (۵) تعیین می‌گردد.

$$CL_i^* = \frac{d_i^-}{d_j^- + d_j^+} \quad (5)$$

1- Shannon entropy

2- Simple Additive Weighting

اوزان شاخص‌های متعلق به مجموعه‌ی هماهنگ حاصل می‌شود (رابطه ۱۲).

$$I_{kl} = \sum W_j, \quad j \in A_{kl} \quad (12)$$

این معیار (I_{kl}) بیان‌کننده‌ی اهمیت نسبی A_k نسبت به A_l است. مقدار این معیار، عددی بین صفر و یک است و هرچه مقدار بیشتر باشد نشانگر این است که A_k ارجحیت بیشتری بر A_l دارد و برعکس.

مرحله پنجم شامل تعیین ماتریس ناهماهنگ (NI) با استفاده از رابطه (۱۲) می‌باشد.

$$NI_{kl} = \frac{\max |v_{kj} - v_{lj}|, \quad j \in D_{kl}}{\max |v_{kj} - v_{lj}|, \quad j \in \text{همه شاخصها}} \quad (12)$$

این معیار نسبت عدم مطلوبیت مجموعه ناهماهنگ k و l را به کل ناهماهنگی در شاخص‌ها اندازه‌گیری می‌کند.

در مرحله ششم ماتریس هماهنگ موثر (H) محاسبه می‌شود. برای ایجاد این ماتریس، ابتدا باید یک حد آستانه‌ای را تعیین کرد و اگر هر عنصر ماتریس I بزرگ‌تر یا مساوی آن باشد، آن مؤلفه در ماتریس H ، مقدار یک به خود می‌گیرد و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد. یک معیار عمومی برای مشخص شدن این حد، عبارت است از میانگین مقادیر ماتریس I (رابطه ۱۳). این ماتریس نشان‌دهنده‌ی ارجحیت یک گزینه بر گزینه دیگر است.

$$\bar{I} = \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^m I_{kl} / m(m-1) \quad (13)$$

در مرحله هفتم ماتریس ناهماهنگ موثر (G) مانند ماتریس هماهنگ موثر به‌دست می‌آید. حد آستانه برای این ماتریس از رابطه (۱۴) محاسبه گردید.

$$\overline{NI} = \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^m NI_{kl} / m(m-1) \quad (14)$$

$$G_{kl} = 1 \quad \leftarrow \quad NI_{kl} \leq \overline{NI}$$

$$G_{kl} = 0 \quad \leftarrow \quad NI_{kl} > \overline{NI}$$

در مرحله هشتم با ترکیب ماتریس هماهنگ موثر (H) و ماتریس ناهماهنگ موثر (G)، "ماتریس کلی موثر" (F) بر اساس رابطه (۱۵) به‌دست می‌آید.

$$F_{kl} = H_{kl} \times G_{kl} \quad (15)$$

این ماتریس، نشان‌دهنده‌ی ترتیب برتری راهکارهای مختلف، نسبت به یکدیگر می‌باشد، یعنی اگر $F_{kl}=1$ باشد، نشان‌دهنده‌ی ارجحیت و تسلط A_k بر A_l می‌باشد.

روش VIKOR یک روش تصمیم‌گیری چندشاخصه سازشی است که مبتنی بر ماتریس تصمیم‌گیری برای انتخاب بهترین گزینه براساس معیارها می‌باشد. این روش در مواردی که گزینه‌ها دارای تضاد بین معیارهای مختلف هستند، می‌تواند بسیار مفید باشد. تمرکز

مرحله ششم: گزینه با مقدار CL بزرگ‌تر باشد، رتبه بهتری دارد. مدل ELECTRE یک روش تصمیم‌گیری چندشاخصه برای انتخاب بهترین گزینه بر مبنای روابط غیررتبه‌ای است. از مزایای این روش می‌توان به مناسب بودن برای مسائل پیچیده تصمیم‌گیری چندمعیاره، قابلیت کار با داده‌های کیفی و کمی، انعطاف‌پذیری در انتخاب معیارها، استفاده از مفهوم برتری و عدم برتری (کمک به تشخیص دقیق‌تر گزینه‌ها)، تمرکز بیشتر بر مقایسه و رتبه‌بندی و حساسیت کمتر به مقادیر دقیق اشاره کرد. از مهم‌ترین معایب این روش می‌توان به ضروری بودن تعیین آستانه‌ها برای برتری و عدم برتری است. انتخاب این آستانه‌ها می‌تواند بر نتایج نهایی تأثیر بگذارد و ممکن است نیاز به آزمایش و تنظیم دقیق داشته باشد. از دیگر معایب این روش عدم ارائه رتبه‌بندی قطعی در همه موارد و پیچیدگی در محاسبه شاخص‌های سازگاری و ناسازگاری و وابستگی به وزن‌دهی معیارها است. تشکیل ماتریس تصمیم در این روش ضروری است. مراحل کلی این روش در ادامه بیان شده است (Momeni & Sharifi Salim, 2017).

در مرحله اول بی‌مقیاس‌سازی ماتریس تصمیم بر اساس نورم اقلیدسی با استفاده از رابطه (۶) انجام می‌گیرد.

$$N = [n_{ij}] \quad n_{ij} = \frac{a_{ij}}{(\sum_{i=1}^m a_{ij}^2)^{0.5}} \quad (6)$$

در مرحله دوم با استفاده از رابطه (۷)، ماتریس بی‌مقیاس‌شده موزون (V) تشکیل می‌گردد.

$$V = [N * W_{n \times n}] \quad (7)$$

در مرحله سوم تمامی گزینه‌ها نسبت به تمام شاخص‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و مجموعه‌ی "هماهنگ و ناهماهنگ" تشکیل می‌شود. مجموعه هماهنگ از گزینه‌های k و l که با S_{kl} نشان داده می‌شود، مشتمل بر کلیه شاخص‌هایی خواهد بود که در آن‌ها گزینه A_k بر گزینه A_l به‌ازای آن‌ها مطلوبیت بیشتری داشته باشد. اگر شاخص مورد نظر جنبه مثبت داشته باشد از رابطه (۸) و اگر شاخص جنبه منفی داشته باشد از رابطه (۹) استفاده می‌گردد.

$$S_{kl} = \{j | V_{kj} \geq V_{lj}\} \quad j = 1, \dots, m \quad (8)$$

$$S_{kl} = \{j | V_{kj} \leq V_{lj}\} \quad j = 1, \dots, m \quad (9)$$

مجموعه ناهماهنگ D_{kl} نیز شامل شاخص‌هایی است که در آن‌ها، گزینه A_k نسبت به گزینه A_l مطلوبیت کمتری داشته باشد که برای شاخص با جنبه مثبت از رابطه (۱۰) و برای شاخص با جنبه منفی از رابطه (۱۱) استفاده می‌گردد.

$$D_{kl} = \{j | V_{kj} \leq V_{lj}\} \quad j = 1, \dots, m \quad (10)$$

$$D_{kl} = \{j | V_{kj} \geq V_{lj}\} \quad j = 1, \dots, m \quad (11)$$

مرحله چهارم شامل تشکیل ماتریس هماهنگ (I) بر اساس مجموعه‌های هماهنگ است. این ماتریس یک ماتریس $m \times m$ بوده که قطر آن فاقد عنصر می‌باشد. سایر عناصر این ماتریس نیز از جمع

مطالعه از روش‌های ادغام میانگین رتبه‌ها، بردا^۱ و کپلند^۲ استفاده شده است. در روش میانگین رتبه‌ها که ساده‌ترین روش ادغام می‌باشد، میانگین رتبه‌های به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندشاخصه محاسبه می‌گردد و بر اساس آن اولویت‌بندی صورت می‌گیرد. روش بردا بر اساس قاعده اکثریت استوار است. در این روش ماتریسی مربعی به طول تعداد گزینه‌ها تشکیل می‌گردد و گزینه‌ها دو به دو بر اساس تعداد تفوق در روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه با هم مقایسه می‌شوند. اگر گزینه در سطر نسبت به گزینه در ستون در روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه بیشتری، رتبه بهتری داشته است از M و در غیر این صورت از X استفاده می‌گردد. در واقع M به منزله آن است که سطر بر ستون ارجحیت دارد و X به منزله ارجحیت ستون بر سطر یا مساوی بودن است. تعداد M ها (تعداد بردها) برای هر سطر محاسبه می‌شود و گزینه‌هایی که تعداد M بیشتری دارند در اولویت قرار می‌گیرند. روش کپلند با پایان روش بردا شروع می‌شود. امتیازی که کپلند به هر گزینه می‌دهد با کم کردن تعداد باخت‌ها از تعداد بردها محاسبه می‌شود (Momeni, 2022).

نتایج و بحث

وزن شهرستان‌ها از نظر معیارها

جدول ۹ وضعیت شهرستان‌ها از نظر ترافیک بر اساس داده‌های ۷۹ نقطه از راه‌های استان کرمانشاه را نشان می‌دهد که شهرستان کرمانشاه با ۱۶ نقطه بیشترین نقاط مورد بررسی را به خود اختصاص داد. اکثر راه‌های مورد بررسی در شهرستان‌های مختلف دارای ترافیک نیمه‌سنگین یا سنگین می‌باشند. شهرستان پاوه، سرپل ذهاب و صحنه کمترین امتیاز ترافیک را کسب کردند. این نقاط مورد بررسی، ترافیک راه‌هایی هستند که نقلیه‌شمار در آن‌ها نصب شده است. طبیعی است که نقلیه‌شمار در راه‌هایی قرار داده می‌شود که معمولاً تردد در آن‌ها از سایر راه‌ها بیشتر است و نشان‌دهنده‌ی ترافیک کل راه‌های استان یا شهرستان‌ها نیست، ولی به دلیل این که در هر شهرستان راه‌های پرت تردد برای این منظور در نظر گرفته می‌شوند، می‌توانند دید کلی مناسبی از حجم ترافیک شهرستان نسبت به هم را نشان دهد. از نظر این معیار، بیشترین امتیاز به ترتیب شهرستان‌های کرمانشاه، هرسین و اسلام‌آباد غرب تعلق گرفت.

بر راه‌حل سازش و امکان وزن‌دهی به معیارها از مهم‌ترین مزایای این روش می‌باشند. مراحل انجام این روش به شرح زیر است (Kumar & Samuel, 2017; San Cristóbal, 2011).

مرحله اول: تشکیل ماتریس تصمیم با m گزینه و n معیار تشکیل می‌گردد.

مرحله دوم: بی‌مقیاس‌سازی ماتریس تصمیم بر اساس رابطه (۶) انجام می‌شود.

مرحله سوم: تعیین ایده‌آل مثبت و منفی همانند روش TOPSIS انجام می‌گیرد.

مرحله چهارم: محاسبه مقادیر سودمندی (S)، تاسف (R) به ترتیب بر اساس رابطه‌های (۱۶) و (۱۷) انجام می‌شود.

$$S_j = \sum_{i=1}^n W_j \cdot \frac{V_i^+ - V_{ij}}{V_i^+ - V_i^-} \quad (16)$$

$$R_j = \max(W_j \cdot \frac{V_i^+ - V_{ij}}{V_i^+ - V_i^-}) \quad (17)$$

مرحله پنجم: در این مرحله شاخص ویکور بر اساس رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود.

$$Q_i = v \left[\frac{S_i - S^-}{S^+ - S^-} \right] + (1 + v) \left[\frac{R_i - R^-}{R^+ - R^-} \right] \quad (18)$$

$$S^- = \min S_i, \quad S^+ = \max S_i,$$

$$R^- = \min R_i, \quad R^+ = \max R_i,$$

پارامتر v بر اساس تصمیم گروه تصمیم‌گیرندگان تعیین می‌شود که در این مطالعه برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شد.

مرحله ششم: گزینه‌ها بر اساس مقادیر Q, R, S در سه گروه از کوچک به بزرگ مرتب می‌شوند. گزینه‌ای که در هر سه مقدار رتبه برتر باشد، بهترین گزینه است، در غیر این صورت گزینه برتر گزینه‌ای است که کوچک‌ترین Q را داشته باشد و دو شرط زیر برقرار باشند. شرط اول: اگر گزینه A1 و A2 در میان m گزینه رتبه اول و دوم را داشته باشند، باید رابطه (۱۹) برقرار باشد.

$$Q(A_2) - Q(A_1) \geq \frac{1}{m-1} \quad (19)$$

شرط دوم: گزینه A1 باید حداقل در یکی از گروه‌های R و S به‌عنوان رتبه برتر شناخته شود. اگر یکی از شرط‌ها برقرار نباشد هر دو گزینه بهترین گزینه خواهند بود.

روش‌های ادغام

نتایج روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندشاخصه ممکن است به نتایج متفاوتی ختم شود. برای تفوق بر این وضعیت، روش‌های مختلفی مطرح شده است که به روش‌های ادغام معروفند. در این

1- Borda

2- Copeland

جدول ۹- وزن شهرستان‌ها از نظر معیار ترافیک

Table 9- Weight of counties in terms of traffic criteria

شهرستان County	تعداد نقاط نقلیه شمار The number of automatic vehicle counting devices	حجم عبور وسایل نقلیه (وزن) Traffic (Weight)			مجموع وزنی Weighted sum
		سبک Low (3)	متوسط Medium (6)	زیاد High (9)	
کرمانشاه Kermanshah	16	0	4	12	132
اسلام‌آباد غرب Eslamabad-e-Gharb	10	0	2	8	84
دالاهو Dalahu	2	0	0	2	18
سرپل ذهاب Sarpol Zahab	2	0	2	0	12
گیلانغرب Gilanharb	8	2	6	0	42
قصر شیرین Qasre Shirin	6	1	5	0	33
هرسین Harsin	10	0	2	8	84
صحنه Sahneh	2	0	2	0	12
کنگاور Kangavar	6	0	2	4	48
سنقر Sonqor	4	1	3	0	21
روانسر Ravansar	3	1	1	1	18
پاوه Paveh	2	0	2	0	12
جوانرود Javanrud	4	0	2	2	30
ثلاث Salas	4	2	2	1	27

امتیاز شهرستان‌ها از نظر سایر شاخص‌های در نظر گرفته شده براساس تعداد و وضعیت نقاط برداشت شده محاسبه و در جدول ۱۱ نشان داده شده است. شهرستان کرمانشاه در همه شاخص‌ها وضعیت مطلوبی دارد و به جز فاصله از غسل و مناطق حفاظت شده، بیشترین امتیاز را به دست آورد. وجود نقاط با پتانسیل مناسب باد بیشتر در شهرستان کرمانشاه که حداکثر ۳ کیلومتر از جاده‌ها فاصله دارند، در بیشتر شدن امتیاز این شهرستان اثر مستقیم دارد.

در جدول ۱۰ وضعیت فاصله و امتیاز نقاط با پتانسیل بالای انرژی باد از جاده و امتیاز شهرستان‌ها از نظر فاصله تا جاده نشان داده شده است. اکثر نقاط در فاصله بیش از ۱ کیلومتر از جاده قرار دارند، به همین دلیل امتیاز آن‌ها پایین است. بر اساس نقاط مورد بررسی فاصله از جاده‌ها، شهرستان‌های سنقر، صحنه و کرمانشاه به ترتیب در اولویت اول تا سوم قرار دارند و بیشترین وزن به آن‌ها تعلق گرفت. برای جاده‌ها بستگی به نوع جاده محدوده بافر مختلفی در نظر گرفته شد.

جدول ۱۰ - نقاط مناسب هر شهرستان و وزن شهرستان‌ها از نظر فاصله از جاده

Table 10- Weight of counties in terms of distance from roads

شهرستان County	تعداد نقاط مناسب The number of suitable places	فاصله از جاده بر حسب متر (امتیاز) Distance from the road in meters (score)						مجموع امتیاز وزنی Sum of weighted points
		Road buffer to 100 m (9)	100-200 (8)	200-500 (7)	500-1000 (6)	1000-2000 (4)	2000-3000 (2)	
کرمانشاه Kermanshah	7	0	7	0	0	0	7	14
اسلام‌آباد غرب Eslamabad-e- Gharb	2	0	2	0	0	0	2	4
دالاهو Dalahu	4	0	2	0	0	2	2	12
سرپل ذهاب Sarpol Zahab	1	0	0	0	0	1	0	4
گیلانغرب Gilanharb	4	0	4	0	0	0	4	8
قصر شیرین Qasre Shirin	1	0	1	0	0	0	1	2
هرسین Harsin	2	0	1	0	0	1	1	6
صحنه Sahneh	4	0	1	1	2	0	1	21
کنگاور Kangavar	3	1	1	0	0	1	1	6
سنقر Sonqor	6	0	0	2	1	2	0	28
روانسر Ravansar	4	1	4	0	0	0	4	8
پاوه Paveh	4	1	3	0	1	0	3	12
جوانرود Javanrud	2	1	2	0	0	0	2	4
ثلاث Salas	2	1	0	0	0	2	0	8

جدول ۱۱ - وزن شهرستان‌ها از نظر معیارهای مختلف

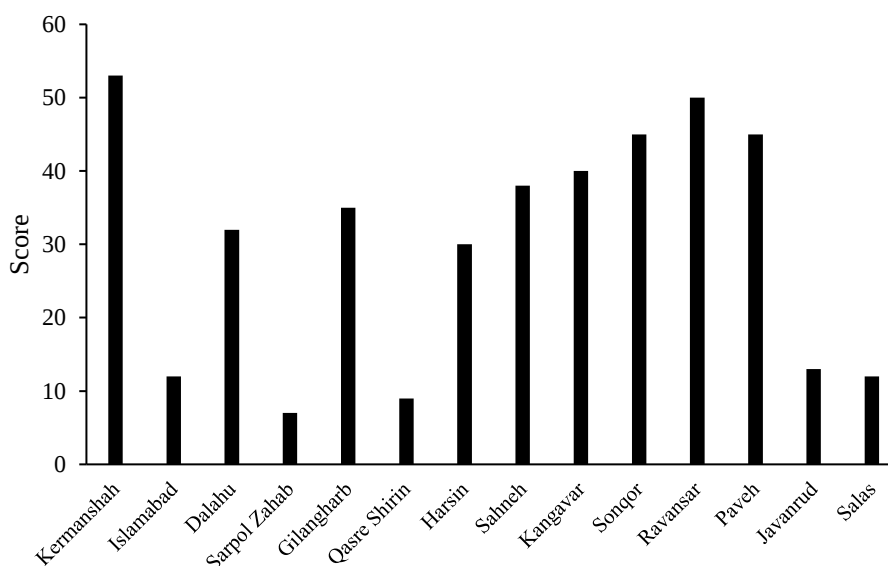
Table 11- Weight of counties in terms of different criteria

شهرستان County	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
کرمانشاه Kermanshah	63	45	53	63	32	15
اسلام‌آباد غرب Eslamabad- e-Gharb	18	19	16	18	15	9
دالاهو Dalahu	10	36	36	34	35	14
سرپل ذهاب Sarpol Zahab	5	9	9	9	6	5
گیلانغرب Gilanharb	34	36	35	36	27	14

Gilangharb						
قصر شیرین	7	9	9	9	9	7
Qasre Shirin						
هرسین	18	9	16	17	4	2
Harsin						
صحنه	22	36	30	36	26	11
Sahneh						
کنگاور	23	27	27	27	27	9
Kangavar						
سنقر	36	54	38	49	45	12
Sonqor						
روانسر	34	36	36	36	10	9
Ravansar						
پاوه	28	27	34	36	27	6
Paveh						
جوانرود	14	9	16	18	18	7
Javanrud						
ثلاث	9	18	12	9	18	7
Salas						

احداث سامانه روشنایی راه‌ها با استفاده توربین بادی دارا می‌باشند. کمترین امتیاز به سرپل ذهاب و قصر شیرین با امتیاز ۷ و ۹ تعلق گرفت. همان‌طور که بیان شد همه نقاط انتخابی دارای پتانسیل باد مناسب می‌باشند ولی اختلاف سرعت باد در آن‌ها و تعداد نقاط موجود در هر شهرستان باعث گردید امتیازات شهرستان‌ها از نظر پتانسیل انرژی باد متفاوت باشد.

در شکل ۱ امتیاز شهرستان‌ها از نظر پتانسیل انرژی باد نشان داده شده است که بر اساس تعداد نقاط برداشت‌شده در هر شهرستان و سرعت باد می‌باشد. بیشترین نقاط دارای پتانسیل باد بالا با ۷ مکان مربوط به شهرستان کرمانشاه و کمترین نقاط با یک مکان در قصر شیرین و سرپل ذهاب بود. از دیدگاه این شاخص، شهرستان‌های کرمانشاه و روانسر به ترتیب با امتیاز ۵۳ و ۵۰ بیشترین امتیاز را از نظر



شکل ۱- امتیاز شهرستان‌ها از نظر پتانسیل انرژی باد

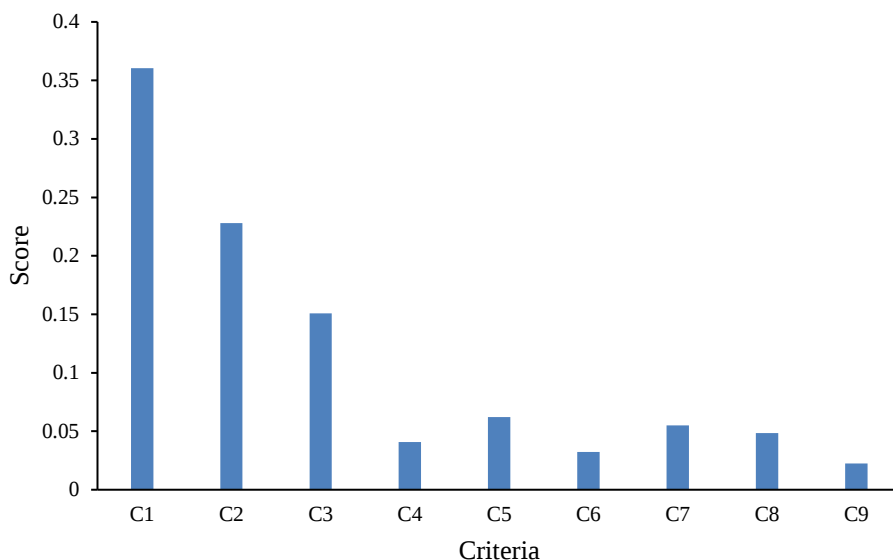
Fig.1. Score of counties in terms of wind energy potential

بر اساس امتیازات شهرستان‌ها از نظر هر شاخص، ماتریس

وزن شاخص‌ها

روشنایی در جاده‌ها با حجم بالاتر تردد وسایل نقلیه در اولویت قرار دارد. فاصله از جاده یک معیار مهم در نصب توربین و سیستم روشنایی است که هر قدر کمتر باشد باعث کاهش هزینه شبکه انتقال برق و نگهداری تاسیسات برق می‌شود. همچنین کمتر بودن فاصله از جاده موجب تخریب کمتر اراضی و آسیب کمتر به محیط‌زیست می‌شود.

تصمیم‌گیری تشکیل گردید و با استفاده روش آنالیز شانون، وزن شاخص‌ها محاسبه گردید که در شکل ۲ نشان داده شده است. پتانسیل انرژی باد با وزن $0/360$ بیشترین اهمیت را به خود اختصاص داد. ترافیک و فاصله از جاده به ترتیب با وزن $0/228$ و $0/151$ در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند. با افزایش حجم ترافیک، معمولاً خطر سوانح رانندگی افزایش می‌یابد، لذا نصب سیستم



شکل ۲- وزن شاخص‌های انتخاب مکان توربین بادی جهت سیستم روشنایی جاده‌ها

Fig. 2. Weighting of wind turbine location selection indicators for road lighting systems

در روش SAW $0/901$ و $0/709$ و در روش TOPSIS به ترتیب $0/807$ و $0/528$ به دست آمد. در این دو روش تصمیم‌گیری شهرستان کرمانشاه با اختلاف زیادی در اولویت اول قرار دارد. امتیاز شهرستان سنقر نیز با سایر شهرستان‌ها در دو روش ذکرشده اختلاف قابل توجهی دارد ولی بین شهرستان‌ها در رتبه‌های بعدی اختلاف امتیازات کم می‌باشد. شهرستان روانسر در روش SAW با وزن $0/554$ در اولویت سوم است، در حالی که در روش SAW با وزن $0/458$ در رتبه چهارم قرار گرفت. شهرستان هرسین در روش تاپسیس با وزن $0/467$ در رتبه سوم قرار دارد ولی در روش SAW با وزن $0/437$ در رتبه ۹ قرار گرفت. در هر دو روش تصمیم‌گیری شهرستان‌های ثلاث، جوانرود، قصر شیرین و سرپل ذهاب در رتبه‌های آخر قرار گرفتند. در روش ELECTRE تعداد چیرگی شهرستان کرمانشاه برابر با ۱۳ شده است که با اختلاف در رتبه اول قرار گرفته است. همانند دو روش دیگر شهرستان سنقر در رتبه دوم قرار دارد. شهرستان کنگاور در دو روش ELECTRE و VIKOR در رتبه سوم قرار دارد. در روش ELECTRE شهرستان‌های روانسر، هرسین، پاوه، صحنه و گیلانغرب با تعداد ۵ چیرگی در رتبه ۴ قرار

ماتریس بی‌مقیاس شده موزون محاسبه و در جدول ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد شهرستان کرمانشاه در همه شاخص‌ها به جز فاصله از جاده، فاصله از مناطق حفاظت‌شده و فاصله از گسل بیشترین وزن را به خود اختصاص داد. از نظر شاخص پتانسیل انرژی باد، پس از شهرستان کرمانشاه، شهرستان روانسر و پاوه به ترتیب با وزن موزون $0/142$ و $0/128$ در رتبه دوم و سوم قرار گرفتند. در شاخص ترافیک که دومین شاخص مهم مکان‌یابی در این مطالعه بود، شهرستان هرسین و اسلام‌آباد غرب با وزن موزون $0/096$ پس از شهرستان کرمانشاه در اولویت بعدی قرار گرفتند. از نظر فاصله از جاده، شهرستان‌های سنقر و صحنه به ترتیب با وزن موزون $0/094$ و $0/070$ در اولویت اول و دوم قرار دارند و شهرستان کرمانشاه با وزن موزون $0/047$ در رتبه سوم قرار گرفت.

در جدول ۱۳ وزن نهایی و اولویت شهرستان‌های استان کرمانشاه از نظر کل شاخص‌های مورد بررسی نصب توربین بادی جهت تامین برق سیستم روشنایی جاده‌های استان کرمانشاه نشان داده شده است. در همه روش‌های چندشاخصه، شهرستان کرمانشاه و سنقر به ترتیب در اولویت اول و دوم قرار دارند. وزن‌های شهرستان کرمانشاه و سنقر

می‌دهد که در کل شهرستان کرمانشاه، ستقر و روانسر در اولویت اول تا سوم قرار دارند و شهرستان کنگاور در اولویت چهارم جهت نصب سامانه‌های روشنایی جاده‌ها مبتنی بر توربین بادی می‌باشد.

گرفتند، در حالی که در روش VIKOR شهرستان‌های گیلانغرب، روانسر و هرسین به ترتیب در رتبه‌های چهارم تا ششم قرار گرفتند. در این دو روش نیز شهرستان‌های ثلاث، جوانرود، قصر شیرین و سرپل ذهاب در رتبه‌های آخر قرار گرفتند. بررسی روش‌های ادغام نشان

جدول ۱۲- ماتریس بی‌مقیاس شده موزون

Table 12- Scale-free weighted matrix

شهرستان County	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
کرمانشاه Kermanshah	0.150	0.151	0.047	0.025	0.002	0.016	0.032	0.017	0.009
اسلام‌آباد غرب Eslamabad-e-Gharb	0.034	0.096	0.013	0.007	0.009	0.005	0.009	0.008	0.006
دالاهو Dalahu	0.091	0.021	0.040	0.004	0.018	0.011	0.017	0.019	0.009
سرپل ذهاب Sarpol Zahab	0.020	0.014	0.013	0.002	0.004	0.003	0.005	0.003	0.003
گیلانغرب Gilanharb	0.099	0.048	0.027	0.014	0.018	0.010	0.018	0.014	0.009
قصر شیرین Qasre Shirin	0.026	0.038	0.007	0.003	0.004	0.003	0.005	0.005	0.004
هرسین Harsin	0.085	0.096	0.020	0.007	0.004	0.005	0.009	0.002	0.001
صحنه Sahneh	0.108	0.014	0.070	0.009	0.018	0.009	0.018	0.014	0.007
کنگاور Kangavar	0.113	0.055	0.020	0.009	0.013	0.008	0.014	0.014	0.006
ستقر Sonqor	0.128	0.024	0.094	0.014	0.026	0.011	0.025	0.024	0.007
روانسر Ravansar	0.142	0.021	0.027	0.014	0.018	0.001	0.018	0.005	0.006
پاوه Paveh	0.128	0.014	0.040	0.011	0.013	0.010	0.018	0.014	0.004
جوانرود Javanrud	0.037	0.034	0.013	0.006	0.004	0.005	0.009	0.010	0.004
ثلاث Salas	0.034	0.031	0.027	0.004	0.009	0.004	0.005	0.010	0.004

جدول ۱۳- وزن و اولویت نهایی شهرستان‌ها از نظر نصب سیستم روشنایی راه‌ها با استفاده از انرژی باد

Table 13- Final weight and priority of counties in terms of installing road lighting systems using wind energy

شهرستان County	SAW		VIKOR		ELECTRE		TOPSIS		رتبه در روش‌های ادغام Rank in integration methods		
	وزن Weight	رتبه Rank	وزن Weight	رتبه Rank	چیرگی Dominance	رتبه Rank	شاخص ویکور VICOR index	رتبه Rank	میانگین رتبه‌ها Mean of ranks	بردا Borda	کپلند Copeland
کرمانشاه Kermanshah	0.901	1	0.807	1	13	1	0	1	1	1	1

سنقر Sonqor	0.709	2	0.528	3	10	2	0.357	2	2	2	2
روانسر Ravansar	0.554	3	0.458	4	5	4	0.464	5	3	3	3
کنگاور Kangavar	0.515	7	0.447	5	7	3	0.389	3	4	3	4
هرسین Harsin	0.437	9	0.467	3	5	4	0.479	6	5	4	5
صحنه Sahneh	0.541	4	0.430	7	5	4	0.496	7	7	4	5
پاوه Paveh	0.531	5	0.432	6	5	4	0.501	8	6	5	6
گیلانغرب Gilanegharb	0.519	6	0.408	8	5	4	0.407	4	8	5	6
دالاهو Dalahu	0.470	8	0.349	10	4	5	0.520	9	9	6	7
اسلام‌آباد غرب Eslamabad-e-Gharb	0.336	10	0.350	9	4	5	0.798	10	10	7	8
ثلاث Salas	0.241	11	0.245	11	2	6	0.857	12	12	8	9
جوانرود Javanrud	0.237	12	0.136	12	2	6	0.847	11	11	9	10
قصر شیرین Qasreshirin	0.177	13	0.113	13	1	7	0.942	13	13	10	11
سرپل ذهاب Sarpole Zahab	0.131	14	0.032	14	0	8	1	14	14	11	12

نتیجه‌گیری

در این مطالعه شهرستان‌های استان کرمانشاه به‌منظور استفاده از انرژی باد جهت تامین سیستم روشنایی جاده‌ها با استفاده از معیارهای پتانسیل انرژی باد، فاصله از جاده‌ها، حجم تردد وسایل نقلیه، فاصله از خطوط برق فشار قوی، فاصله از مناطق حفاظت‌شده، فاصله از رودخانه و مناطق در معرض سیل، فاصله از گسل، فاصله از مناطق مسکونی و شیب زمین، مورد مطالعه قرار گرفتند. براساس نقشه اطلس باد، ۴۶ نقطه با پتانسیل مناسب باد در محدوده ۳ کیلومتری جاده‌ها شناسایی شدند که برای نصب توربین بادی جهت سیستم روشنایی جاده‌ها بر اساس معیارها تجزیه و تحلیل شدند. با استفاده از آنتروپی شانون و وزن‌دهی نسبی کارشناسان، شاخص‌های پتانسیل انرژی باد، حجم ترافیک و فاصله از جاده بیشترین وزن را به خود اختصاص دادند. برای رتبه‌بندی شهرستان‌ها از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه استفاده گردید. از نظر پتانسیل انرژی باد، شهرستان‌های کرمانشاه و روانسر به‌ترتیب در اولویت احداث سامانه روشنایی راه‌ها با استفاده از توربین بادی قرار دارند. از دیدگاه ترافیک بیشترین امتیاز به شهرستان کرمانشاه و هرسین تعلق گرفت. از نظر

فاصله از جاده‌ها، شهرستان‌های سنقر، صحنه و کرمانشاه به‌ترتیب در اولویت اول تا سوم قرار گرفتند. نتایج روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره نشان داد که شهرستان کرمانشاه، سنقر و روانسر در اولویت احداث سامانه روشنایی راه‌ها با توربین بادی می‌باشند و شهرستان‌های ثلاث، جوانرود، قصر شیرین و سرپل ذهاب به‌ترتیب در رتبه‌های آخر قرار دارند.

سپاسگزاری

از دانشگاه شهید چمران اهواز و حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز به‌خاطر حمایت مالی در قالب پژوهانه (SCU.AA98.29747) تشکر و قدردانی می‌شود.

مشارکت نویسندگان

بهرز دوستی: جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، استخراج و تهیه متن اولیه، روش‌شناسی، اعتبارسنجی، تصویرسازی نتایج، خدمات نرم‌افزاری.

عباس عساکره: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی، مشاوره فنی،

References

1. Abbasi, M., Monazzam Esmailpour, M. R., Akbarzadeh, A., Zakerian, S. A., & Ebrahimi, M. H. (2015). Investigation of the Effects of Wind Turbine Noise Annoyance on the Sleep Disturbance Among Workers of Manjil Wind Farm. *Journal of Health & Safety at Work*, 5(3), 51-62. (in Persian with English abstract). <http://jhs.w.tums.ac.ir/article-1-5303-fa.html>
2. Alayat, M. M., Kassem, Y., & Çamur, H. (2018). Assessment of Wind Energy Potential as a Power Generation Source: A Case Study of Eight Selected Locations in Northern Cyprus. *Energies*, 11(10), 2697. <https://doi.org/10.3390/en11102697>
3. Ali, N. M., & Ammari, H. (2022). Design of a Hybrid Wind-Solar Street Lighting System to Power LED Lights on Highway Poles. *AIMS Energy*, 10(2), 177-190. <https://doi.org/10.3934/energy.2022010>
4. Al-Yahyai, S., Charabi, Y., Gastli, A., & Al-Badi, A. (2012). Wind Farm Land Suitability Indexing Using Multi-criteria Analysis. *Renewable Energy*, 44, 80-87. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.004>
5. Arnette, A. N., & Zobel, C. W. (2011). Spatial Analysis of Renewable Energy Potential in the Greater Southern Appalachian Mountains. *Renewable Energy*, 36(11), 2785-2798. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.04.024>
6. Asakereh, A. (2014). Implementation of fuzzy multiple-criteria decision support system for prioritizing and selecting the appropriate areas for developing some of renewable energies in Shoeibieh region using GIS. PhD thesis, Tehran University. (in Persian with English abstract).
7. Asakereh, A., Omid, M., Alimardani, R., & Sarmadian, F. (2015). Investigating Potential of Wind Energy in Mahshahr, Iran. *Wind Engineering*, 39(4), 369-384. <https://doi.org/10.1260/0309-524x.39.4.369>
8. Asgharpour, M. J. (2022). *Multi-criteria decision making*. Tehran University press. Tehran. (in Persian).
9. Bafkar, A., Azari, A., & Ahmadi, M. (2012). Estimation of Wind Energy and its Application for the Site Selection of Wind Power Plant in Kermanshah Province. *Journal of Meteorological Organization*, 36, 11-24. (in Persian). https://nivar.irimo.ir/article_13190.html
10. Bennui, A., Rattanamanee, P., Puetpaiboon, U., Phukpattaranont, P., & Chetpattananondh, K. (2007). Site Selection for Large Wind Turbine Using GIS. In *PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment* (pp. 561-566).
11. Esfahani, I. J., Ifaei, P., Kim, J., & Yoo, C. (2016). Design of Hybrid Renewable Energy Systems with Battery/Hydrogen Storage Considering Practical Power Losses: a MEPoPA (Modified Extended-Power Pinch Analysis). *Energy*, 100, 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.074>
12. Ghobadian, B., Najafi, G., Rahimi, H., & Yusaf, T. F. (2009). Future of Renewable Energies in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(3), 689-695. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.11.010>
13. Gorsevski, P. V., Cathcart, S. C., Mirzaei, G., Jamali, M. M., Ye, X., & Gomezdelcampo, E. (2013). A Group-Based Spatial Decision Support System for Wind Farm Site Selection in Northwest Ohio. *Energy Policy*, 55, 374-385. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.12.013>
14. Hasnaki, N. (2018). Technical and Economic Feasibility Study of Heat and Power Production in Karoon Sugar Factory Using a Hybrid System of Biomass, Photovoltaic, and Natural Gas. MSc Thesis. Shahid Chamran university of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (in Persian with English abstract).
15. Hatefi Ardekani, M., & Rezaei Moghaddam, M. H. (2016). Application of Satellite Images and GIS in the Feasibility of the Use of Solar Energy for Providing Lighting Systems (Case Study: Zanjan-Tabriz Highway). *Arid Regions Geographic Studies*, 6(21), 105-124. (in Persian with English abstract). https://jargs.hsu.ac.ir/article_161398.html?lang=en
16. Ibrahim, Z., & Asari, A. R. (2019). The Development of Wind Power Energy for Lighting System in the Highway. *Malaysian Journal of Industrial Technology*, 2(1), 1-6. <https://mitec.unikl.edu.my/mjit/>
17. Jafari, H. R., Azizi, A., Nasiri, H., & Abedi, S. (2013). Analysis of Land Suitability to Locate Wind Power Plant in Ardabil Province Using AHP and SAW Methods in GIS Environment. *Journal of Environmental Science and Technology*, 15(2), 23-41. (in Persian with English abstract). <https://sanad.iau.ir/Journal/jest/Article/839048>
18. Jelokhani Niyaraki, M., & Hajiloo, F. (2016). Site Selection for Wind Power Plants Using ANP-OWA Model (Case Study of Zanjan Province, Iran). *Journal of Geomatics Science and Technology*, 6(1), 73-86. (in Persian with English abstract). <https://jgst.issgeac.ir/article-1-424-en.html>
19. Keyhani Nasab, F., Mesri Gundoshmian, T., & Zargar Ershadi, Sh. (2018). Potential Assessment of Wind Power as a Source of Electricity Production in the City of Parsabad, Iran. *Journal of Agricultural Machinery*, 8(2), 449-461 (in Persian). <https://doi.org/10.22067/jam.v8i2.64742>
20. Khare, V., Nema, S., & Baredar, P. (2016). Solar-Wind Hybrid Renewable Energy System: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.223>
21. Kumar, M., & Samuel, C. (2017). Selection of Best Renewable Energy Source by Using VIKOR Method. *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, 2, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s40866-017-0024-7>

22. Momeni, M. & Sharifi Salim, A. (2017). *Multi-attribute decision-making models and software*. Third edition. Moalef Press, Tehran. (in Persian).
23. Momeni, M. (2022). *New topics in operations research*, Tehran University Press, Tehran. (in Persian).
24. Morshedi, J., Borna, R., Asgharipour, A., Ahmadi, H., & Zaheri, A. (2011). Wind Power Plants Site Selection Using Analytical Hierarchy Process (AHP) in GIS Environment. *Geographic Information and Remote Sensing in Planning*, 1(2), 97-111. (in Persian with English abstract).
25. Noorollahi, Y., Yousefi, H., & Mohammadi, M. (2016). Multi-criteria Decision Support System for Wind Farm Site Selection Using GIS. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 13, 38-50. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2015.11.007>
26. Omid, A., Alimardani, R., A., & Khanali, M. (2019). Study of Potential, Characteristics and Parameters of the Wind Energy Case study: Dehloran County. *Journal of Agricultural Machinery*, 9(1), 195-208. (in Persian). <https://doi.org/10.22067/jam.v9i1.64905>
27. Oral, F. (2023). Use of Small-Scale Wind Turbines in Road Lighting. *Light & Engineering*, 31(3), 109-117. <https://doi.org/10.33383/2022-118>
28. Rafati, S., Daliri, A., & Karimi, M. (2019). Wind Energy Economic Assessment and Performance of Wind Turbines in Kermanshah Province with Climatic Considerations. *Journal of Spatial Planning*, 23(2), 195-216. (in Persian with English abstract). <http://dorl.net/dor/20.1001.1.16059689.1398.23.2.7.0>
29. Rediske, G., Burin, H. P., Rigo, P. D., Rosa, C. B., Michels, L., & Siluk, J. C. M. (2021). Wind Power Plant Site Selection: A Systematic Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148, 111293. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111293>
30. Rezaei, H., Karimi, M., & Shakeri, F. (2021). Site Selection of Wind Farms in Semnan Province by Using AHP Method. *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(12), 51-64. (in Persian with English abstract). <https://sanad.iau.ir/Journal/jest/Article/837086>
31. San Cristóbal, J. R. (2011). Multi-criteria Decision-making in the Selection of a Renewable Energy Project in Spain: The Vikor Method. *Renewable energy*, 36(2), 498-502. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.031>
32. Soleymani, M., Keyhani, A., & Omid, M. (2018). Life Cycle Assessment, Ethanol, Sugarcane, Biofuel. *Agricultural Engineering*, 40(2), 13-27. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22055/agen.2018.15602.1213>
33. Wadi, M., Shobole, A., Tur, M. R., & Baysal, M. (2018). Smart Hybrid Wind-solar Street Lighting System Fuzzy Based Approach: Case Study Istanbul-Turkey. In 2018 6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG) (pp. 71-75). IEEE. <https://doi.org/10.1109/sgcf.2018.8408945>
34. Xu, Y., Li, Y., Zheng, L., Cui, L., Li, S., Li, W., & Cai, Y. (2020). Site Selection of Wind Farms Using GIS and Multi-criteria Decision Making Method in Wafangdian, China. *Energy*, 207, 118222. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118222>