



مکان یابی و بهینه سازی نیروگاه تجدیدپذیر ترکیبی در اقلیم خشک و نیمه خشک، مطالعه موردی: خراسان جنوبی

سید مصطفی میرطبابی¹، علیرضا مستمندی^{2*}

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

2- کارشناسی ارشد، مهندسی معماری، مؤسسه آموزش عالی حافظ شیراز، شیراز، ایران.

* شیراز، 7155936956، Alimos805@gmail.com

چکیده

تولید برق در خارج از شبکه سراسری برق، روشی برای تأمین انرژی در مناطق مسکونی، تجاری و مناطق دور افتاده و یا روستایی می باشد. در رویکرد جدید دیزل ژنراتور همراه با فناوری های انرژی تجدیدپذیر ترکیب می شود. در همین راستا در این پژوهش ابتدا به مکان یابی نیروگاه تجدیدپذیر ترکیبی با استفاده از تشکیل ماتریس تصمیم گیری با 14 شاخص و 15 گزینه و استفاده از روش وزن دهی شاخص ها با روش شتون آنترپی و روش تصمیم گیری چند معیاره تاپسیس پرداخته خواهد شد. پس از مکان یابی به طراحی نیروگاه تجدیدپذیر ترکیبی با استفاده از نرم افزار هومر متشکل از پنل خورشیدی، توربین بادی، باتری، دیزل ژنراتور و اینورتر پرداخته خواهد شد. نتایج نشان می دهد که بیشترین وزن شاخص ها با استفاده از روش شتون آنترپی به ترتیب مربوط به شاخص فاصله تا جاده، فاصله تا شبکه سراسری برق و جمعیت قرار دارد. سپس در میان گزینه ها اسدیبه با امتیاز 0.8932 و عشق اباد با 0.8853 بیشترین امتیاز را با استفاده از روش تاپسیس دریافت می کند. با انتخاب اسدیبه به عنوان بهترین مکان جهت احداث نیروگاه هیبریدی به طراحی یک نیروگاه متشکل از دیزل ژنراتور، توربین بادی، پنل خورشیدی و باتری برای تأمین بار مصرفی یک روستا پرداخته شده است. میزان بار مصرفی این روستا 213.6 کیلووات ساعت در روز و میزان اوج بار مصرفی 25.45 کیلووات است. برای تأمین این بار به 9.29 کیلووات پنل خورشیدی، 2 عدد توربین بادی 10 کیلووات، 29 کیلووات دیزل ژنراتور، 18 عدد باتری 5 کیلووات و 10.4 کیلووات اینورتر مورد نیاز است. هزینه سرمایه گذاری سیستم پیشنهاد شده 31314 یورو و هزینه تولید هر کیلووات انرژی 0.0784 یورو است. همچنین هزینه عملکرد این سیستم 3689 یورو و میزان سوخت مصرفی دیزل ژنراتور در طول سال 4654 لیتر است.

کلیدواژگان: مکان یابی، بهینه سازی، روش های تصمیم گیری چند معیاره تاپسیس، روش وزن دهی شتون آنترپی

Locating and optimizing the hybrid renewable power plant in arid and semi-arid climates, Case Study: South Khorasan

Seyyed Mostafa Mirtabaei¹, Alireza Mostamandi^{2*}

1-Asistant Professor, Mechanical Engineering, Shahrood Industrial University, Shahrood, Iran

2- Master Architecture Engineering, Hafez Shiraz Institute of Higher Education, Shiraz, Iran

* P.O.B. 7155936956 Shiraz, Iran, Alimos805@gmail.com

Received: 18 February 2024 : Accepted: 15 November 2024

Abstract

Electricity generation outside the national electricity network is a method of providing energy in residential, commercial, industrial and remote or rural areas. In the new approach, the diesel generator is combined with renewable energy technologies. For this purpose, in this research, firstly, the suitable location for the construction of a hybrid power plant in South Khorasan province in Iran has been investigated according to 14 indicators and 15 different options using Shannon entropy weighting method and TOPSIS decision making method. The results show that the best weight of the indices using Shannon entropy method is related to the index of distance to the road, distance to the national electricity network and population respectively. Then, among the options, Asadiyeh with a score of 0.8932 and Eshghabad with

0.8853 receives the highest score using the TOPSIS method. By choosing Asadiyeh as the best place to build a hybrid power plant, a power plant consisting of diesel generator, wind turbine, solar panel and battery has been designed to supply the consumption load of a village. The consumption of this village is 213.6 kilowatt hours per day and the peak consumption is 25.45 kilowatts. To supply this load, 9.29 kW solar panels, 2 10 kW wind turbines, 29 kW diesel generators, 18 5 kW batteries and 10.4 kW inverters are needed. The investment cost of the proposed system is 31314 euros and the production cost per kilowatt of energy is 0.0784 euros. Also, the operating cost of this system is 3689 euros and the fuel consumption of the diesel generator during the year is 4654 liters.

Keywords: Location, optimization, TOPSIS multi-criteria decision making methods, Shannon entropy weighting method

1- مقدمه

منابع فسیلی منبع اصلی انرژی برای انسان امروزی است. همچنین تقاضای انرژی در سال‌های اخیر به دلیل رشد جمعیت و توسعه اقتصادی کشورها افزایش چشمگیری داشته است [1]. از سوی دیگر، باتوجه به کاهش منابع انرژی فسیلی و آلودگی محیط‌زیست، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید انرژی روزبه‌روز در حال افزایش است [2]. منابع انرژی تجدیدپذیر با تنوع زمان و مکان، مشکلات مربوط به انرژی فسیلی و هسته‌ای مانند آلودگی، آسیب‌های زیست‌محیطی و گرمایش جهانی را از بین می‌برند. از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توان به‌عنوان منابع جایگزین نیز استفاده کرد و به دلیل عدم دسترسی دائمی به انرژی‌های تجدیدپذیر، ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر با سیستم‌های ذخیره انرژی می‌تواند قابلیت اطمینان بیشتری را در سیستم ایجاد کند و برای کاربردهای مستقل از شبکه مورداستفاده قرار می‌گیرد [4]. در سال‌های اخیر، سیستم‌های ترکیبی به گزینه‌های مناسبی برای استفاده در مناطق دورافتاده و پاسخگویی به تقاضای انرژی تبدیل شده‌اند. از سوی دیگر، ایران دارای پتانسیل بالایی در زمینه انرژی خورشیدی و انرژی بادی است که باعث می‌شود از انرژی‌های تجدیدپذیر بیشتر در این کشور استفاده شود [6]. تحقیقات زیادی در زمینه سیستم‌های هیبریدی تجدیدپذیر و تأمین تقاضای انرژی انجام شده است که در چند نمونه در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

محمد و همکاران [7] در سال 2017 به بررسی یک سیستم بهینه بر اساس انرژی خورشیدی و بادی با توجه به الگوریتم بهینه‌سازی جرم ذرات (PSO) و با استفاده از داده‌های واقعی سرعت باد، تابش خورشیدی، دما و تقاضای انرژی الکتریکی پرداختند. تابع هدف آن‌ها حداقل کردن هزینه تولید انرژی بود. نتایج آن‌ها نشان داد که الگوریتم پیشنهادی به خوبی به تغییرات پارامترهای سیستم پاسخ می‌دهد و از نظر اقتصادی و فنی بهینه ترین سیستم را به دست می‌آورد. در سال 2017 شهزاد و همکاران [8] یک طرح اقتصادی برای تولید برق با استفاده از انرژی خورشیدی و زیست توده برای یک روستای کوچک در منطقه لیه پاکستان با استفاده از نرم افزار هومر پیشنهاد کردند. آن‌ها هزینه بهینه را برای سیستم هیبریدی مورد نظر به دست آوردند. همچنین 24.6 درصد انرژی مورد نیاز با استفاده از انرژی خورشیدی و 75.4 درصد از انرژی زیست توده تولید شده است. در سال 2017، ابوبکر مسعود [10] مطالعه‌ای در مورد چشم‌انداز سیستم‌های بادی خورشیدی در سوکوتو، نیجریه انجام داد که در آن از مصرف برق روزانه، تابش خورشیدی سالانه و سرعت باد برای بهینه‌سازی سیستم‌های تجدید استفاده شد. بر این اساس هزینه راه اندازی سیستم تجدیدپذیر متشکل از باتری، توربین بادی، اینورتر و سلول خورشیدی 249910.24 دلار محاسبه شد که با بازگشت سرمایه 5 ساله، سیستمی

مناسب برای این منطقه پرجمعیت ارزیابی شد. در سال 2018، ویلاسرس و همکاران [11] به بررسی بهترین مکان ممکن برای نیروگاه های بادی در اکوادور با پیاده سازی اطلاعات جغرافیایی بر اساس روش های تصمیم‌گیری چند معیاره پرداختند. آن‌ها در تحقیقات خود پارامترهای مختلفی از جمله سرعت باد، خطوط حمل و نقل، پوشش گیاهی و ... را مورد بررسی قرار دادند که نتایج آن نشان داد که مناسب ترین مکان برای نصب نیروگاه در منطقه هند با مساحت 617,5 است. در سال 2018، ابراهیمی و همکاران [12] به طراحی یک سیستم تجدیدپذیر در جزیره کیش با استفاده از نرم افزار هومر که از ریزشیکه‌های متصل به شبکه استفاده می‌کرد، پرداختند. تحقیقات برای دستیابی به کمترین آلودگی و هزینه و همچنین بالاترین راندمان انجام شد. آن‌ها در تحقیقات خود چهار نوع سیستم را بررسی کردند که بالاترین تولید آن 1597095 کیلووات ساعت در سال است، یک سیستم متصل به شبکه متشکل از سلول‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی پیشنهاد شد. در سال 2018، جهانگیری و همکاران [13] تحقیقاتی در مورد زیست توده انجام دادند. آن‌ها در مطالعات خود از نرم افزار هومر برای بهینه سازی و تولید همزمان برق و گرما از منابع انرژی تجدیدپذیر در زمین شهر استان اصفهان استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که هزینه اتصال به شبکه مقرون به صرفه تر از زمانی است که آن‌ها می‌خواستند از انرژی زیست توده استفاده کنند. اگر شهر کمتر از 2.58 کیلومتر از شبکه فاصله داشت استفاده از سیستم ترکیبی شامل اینورتر، باتری، پنل خورشیدی و ژنراتور سوخت فسیلی مقرون به صرفه‌تر خواهد بود. در نهایت نتایج نشان داد که 1.019 دلار به ازای هر کیلووات ساعت تولید انرژی هزینه خواهد داشت که نیروگاه خورشیدی 1955 کیلووات ساعت انرژی و زیست توده 92 کیلووات ساعت انرژی تولید می‌کند. علایی و همکاران [14] مطالعه ای در سال 2019 برای بررسی پارامترهای موثر بر طراحی سیستم‌های هیبریدی تجدیدپذیر انجام داد که در آن تقاضا برای مصرف برق و همچنین باد در منطقه ای در شمال غرب ایران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که بیشترین تابش خورشیدی در منطقه 27.95 کیلووات ساعت بر متر مربع و بیشترین سرعت باد در منطقه 11.02 متر بر ثانیه به دست آمد. در جدول 1 خلاصه‌ای از بررسی پژوهش‌های گذشته ذکر شده است.

جدول 1 پیشینه پژوهش

نویسنده	سال و منبع	منطقه	روش	هدف	نتیجه
یونونا وو و همکاران	2019 [1]	چین	TODIM	سایت بهینه بادی فرا ساحلی	خلیج چینگتیان در ژوشان بهترین است

بابک‌دانشور رواینده و همکاران	2018	ترکیه	TOPSIS FUZZY & (IFS)	انتخاب سایت بادی در ترکیه	ازمیر بهترین گزینه برای احداث سایت های بادی است	لوران کاسترو سانتوس و همکاران	2020	شمال غربی اسپانیا	GIS	سایت بادی شناور دریایی برای توسعه سایت های دریایی	نقشه های یک منطقه خاص برای توسعه سایت های دریایی
پامبودی و نانانوک	2019	اندونزی	DDEA	ساخت مزرعه بادی	سوماترا جنوبی بالاترین پتانسل را داراست	آمال دورتاژ و همکاران	2020	ایران	ELECTR E	تعیین سدهای زیر سطحی	حسین آباد بهترین مکان برای احداث سدهای زیر سطحی است
آیودل و اگونجوتیگ به	2018	نیجریه	GIS & AHP	توسعه مرازم بادی	شمال نیجریه بهترین مکان است						
محمود ذوقی و همکاران	2017	ایران اصفهان	WLC	سایت بهینه PV	برخور، نائین، شاهین شهر و میمه از پتانسل بالاایدارند	کم امکسیر و باهاتین دمیرچی	2019	ترکیه	AHP	پتانسیل انرژی باد برای انتخاب	نیروگاه ها در بافرا، سینوپ و مرسین با توان 1176، 2112، 1293 می‌توانند راه اندازی شوند
علی شهید و تاپوکن	2019	سونگخلا تایلند	GIS & AHP	شناسایی سایت های خورشیدی و بادی	نتایج نشان 38 کیلومتر مکان بهینه برای بادی و کیلومتر برای خورشیدی	لیو و همکاران	2020	تایوان	ANP	رتبه بندی ساختمان های سبز ضایعات می‌شود	پنج معیار برتر در دو بعد صرفه جویی و کاهش ضایعات می‌شود
سعید محمدزاده بینا و همکاران	2018	شمال غرب ایران	ArcGIS	نیروگاه بادی در شمال غرب ایران	نیروگاه کلاس III حدود 9116 کیلومتر منطقه مناسب است						
کاسترو سانتوس و همکاران	2019	پرتغال	GIS	سیستم های تجدید پذیر دریایی	شناسایی مکان برای توسعه انرژی های تجدیدپذیر دریایی						
جی آر اس دورگا و همکاران	2019	موریس	GIS & AHP & WLC	بهترین مکان نیروگاه خورشیدی	شناسایی 3 محل مناسب در دشت های شمالی جزیره شد						
گابریل گاونا و همکاران	2017	اکوادور	GIS	بهترین مکان نیروگاه بادی	منطقه آند در اکوادور بالاترین شاخص عملکرد کلی را داراست						
مصطفی رضایی و همکاران	2018	فارس ایران	TOPSIS	نیروگاه ترکیبی خورشیدی بادی	اقلید بهترین مکان برای احداث نیروگاه خورشیدی است						
مهمت آرگین و همکاران	2019	ترکیه	WASP	بررسی پتانسیل انرژی باد	مشخص شده خطوط ساحلی Bozcaada, Bandirma, Gokceada, Inebolu, and Samandag						

امروزه انرژی‌های تجدیدپذیر نقش مهمی در تأمین برق در جهان دارد و ایران با وجود مناطق بیابانی و بادخیز فراوان، پتانسیل بالایی برای استفاده از سیستم‌های ترکیبی دارد. اما انتخاب منطقه مناسب برای استفاده بهینه از سیستم‌های هیبریدی همیشه یک چالش بوده است. بدین منظور در این تحقیق چارچوب جدیدی ارائه شده است که ابتدا به مکان‌یابی و سپس بهینه‌سازی نیروگاه ترکیبی تجدیدپذیر در شرق و شمال شرقی ایران پرداخته خواهد شد. لذا در این تحقیق با استفاده از شاخص‌های تابش خورشیدی، سرعت باد، دما، رطوبت نسبی، فاصله تا مرکز شهر، منطقه، فاصله تا پست برق، شیب، بارندگی، فاصله تا جاده، ارتفاع از سطح دریا، جمعیت و تعداد روزهای گردوغبار، با استفاده از روش وزن‌دهی شئون آن‌تروپی و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس پرداخته شده است. پس از شناسایی مکان مناسب برای احداث نیروگاه هیبریدی، مطالعه فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی نیروگاه تجدیدپذیر ترکیبی بهینه شده جهت تأمین بار مصرفی یک روستا با استفاده از نرم‌افزار هومر انجام می‌شود. در بخش دوم این تحقیق، محدوده مورد مطالعه و شاخص‌های مورد مطالعه و ماتریس تصمیم مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش سوم این تحقیق، روش وزن‌دهی به شاخص‌ها و رتبه‌بندی گزینه‌ها با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس و سیستم ترکیبی طراحی شده با استفاده از نرم‌افزار هومر بررسی شده است. در بخش چهارم نتایج رتبه‌بندی گزینه‌ها و همچنین نیروگاه تجدیدپذیر ترکیبی طراحی شده در منطقه بهینه بررسی می‌شود. بخش پنجم به بحث و نتیجه‌گیری پرداخته خواهد شد. با مرور پژوهش‌های پیشین در زمینه مکان‌یابی و بهینه‌سازی نیروگاه‌های تجدیدپذیر، ملاحظه شد که هر یک از تحقیقات انجام شده به بررسی جنبه‌های مختلفی از این موضوع در مناطق مختلف جهان پرداخته‌اند. با این حال، پژوهش حاضر با تمرکز بر اقلیم خشک و نیمه‌خشک خراسان جنوبی، تفاوت‌های مهمی را با مطالعات قبلی ارائه می‌دهد. نوآوری‌های این تحقیق به شرح زیر است:

جدول 2 طول و عرض جغرافیایی مناطق مورد مطالعه

نام محل	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
شوسف	59.997562	31.882196
مومن آباد	59.828444	32.426618
نصرالدین	60.221989	32.920009
پدران	59.714705	32.627838
سیوجان	59.022814	32.847674
خطیبی	59.855741	33.594464
هاشمیه	58.789245	33.659709
سرد	58.331776	33.899478
بسطاق	58.584187	33.729471
دیپوک	33.350583	57.532852
اسدیه	60.009127	32.891479
رضویه	33.323063	57.52043
کریت	33.4837	56.926006
دشت قران	33.499629	56.880023
عشق آباد	34.253674	56.925272

2-1- انتخاب شاخص‌ها

در روش های تصمیم گیری چند شاخصه (MCDM) اولین قدم انتخاب شاخص‌هایی است که بر موضوع مورد مطالعه تأثیر می‌گذارد. در این تحقیق شاخص‌های موثر بر عملکرد نیروگاه تجدید پذیر ترکیبی بررسی شده است. تعداد این شاخص‌ها 14 می‌باشد با توجه به جدول 3، شاخص‌های منفی بازده نیروگاه را کاهش می‌دهد و شاخص‌های مثبت منجر به بهبود عملکرد نیروگاه می‌شود.

جدول 3 نوع شاخص‌ها

حاصل	فاصله تا خط ساحلی	تعداد ایستگاه‌ها، بخشنا	افتاء سطح دریا	طول نسبی	مساحت	میانگین	شمال	فاصله تا حاده	دما	فاصله تا شبکه سراسری برق	فاصله تا مرکز شهر	ساعت باد	تابش خورشید	تأثیر
+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+

2-2- ماتریس تصمیم‌گیری

در روش‌های تصمیم‌گیری به ویژه روش تاپسیس ضروری‌ترین قسمت تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری و رتبه‌بندی بر اساس گزینه‌ها و شاخص‌های انتخاب شده است. در این تحقیق بین 15 منطقه استان خراسان جنوبی با توجه به 14 شاخص فنی، اقتصادی، ریسک و اقلیمی تصمیم‌گیری شده است تا بهترین مکان برای احداث نیروگاه تجدیدپذیر ترکیبی شناسایی شود. جدول 4 ماتریس تصمیم مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

1- تمرکز بر شرایط اقلیمی خاص (خراسان جنوبی): برخلاف تحقیقات پیشین که بیشتر در اقلیم‌های معتدل و مرطوب انجام شده‌اند، این تحقیق به‌طور ویژه به چالش‌های مرتبط با اقلیم خشک و نیمه‌خشک پرداخته است. این شرایط نیازمند راه‌حل‌های منحصر به فرد برای ترکیب منابع انرژی تجدیدپذیر است که در پژوهش حاضر به تفصیل بررسی شده است.

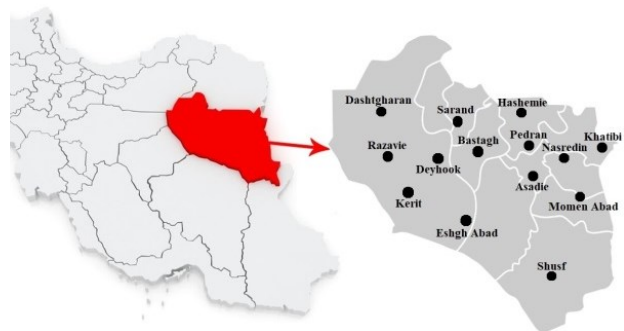
2- استفاده از شاخص‌های بومی و متنوع: در این تحقیق از 14 شاخص فنی، اقلیمی و اقتصادی برای مکان‌یابی بهینه نیروگاه‌های تجدیدپذیر استفاده شده است. این شاخص‌ها، همچون فاصله تا شبکه سراسری برق، جمعیت و تابش خورشیدی، با توجه به ویژگی‌های خاص منطقه‌ی مورد مطالعه انتخاب شده‌اند، که در مقایسه با پژوهش‌های قبلی یک رویکرد جامع‌تر و دقیق‌تر را ارائه می‌دهد.

3- ترکیب روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره: یکی از نوآوری‌های کلیدی این تحقیق، استفاده از ترکیب دو روش تصمیم‌گیری چندمعیاره آنتروپی شانون و TOPSIS است که در تحقیقات پیشین کمتر به‌طور همزمان به‌کار رفته‌اند. این ترکیب رویکرد بهینه‌تری را برای ارزیابی مکان‌های مختلف و انتخاب بهترین گزینه فراهم می‌کند.

4- طراحی و بهینه‌سازی سیستم هیبریدی: استفاده از نرم‌افزار HOMER برای طراحی و بهینه‌سازی نیروگاه ترکیبی، یکی دیگر از نوآوری‌های این پژوهش است. این سیستم شامل پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، دیزل ژنراتور و باتری است که به منظور تأمین انرژی یک منطقه بدون دسترسی به شبکه سراسری برق طراحی شده است. نتایج حاصل از این بهینه‌سازی نشان‌دهنده کارایی بالای سیستم در شرایط خاص منطقه خراسان جنوبی است. در مجموع، پژوهش حاضر با ارائه یک چارچوب جدید برای مکان‌یابی و بهینه‌سازی نیروگاه‌های تجدیدپذیر در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، گامی نوین در توسعه انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر در مناطق با محدودیت‌های زیست‌محیطی و اقتصادی برداشته است.

2- منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق مکان‌های اسدیه، عشق آباد، کریت، دیپوک، خطیبی، هاشمی، بستاق، نصرالدین، رضوی، سرد، مومن آباد، شوسف، دشت قران، پدران و سیوجان در استان خراسان جنوبی که در شکل 1 نشان داده شده است، بررسی خواهند شد. طول و عرض جغرافیایی این مناطق نیز در جدول 2 نشان داده شده است. در انتخاب نقاط مختلف برای اندازه‌گیری پتانسیل سعی شده است تا مکان‌هایی که در مناطق دور افتاده هستند و یا به شبکه سراسری برق دسترسی ندارند، در استان خراسان جنوبی انتخاب شوند.



شکل 1 موقعیت مکان‌های مورد مطالعه در استان خراسان جنوبی [17]

در نظر گرفته شده است که برابر با 213.6 کیلووات ساعت در روز است. پس از بهینه‌سازی نیروگاه هیبریدی، به تحلیل حساسیت و بررسی پارامترهای مختلف موثر بر سیستم مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.

3-1- روش وزن‌دهی شنون آنتروپی

در مسائل تصمیم‌گیری چند شاخصه یافتن وزن نسبی شاخص‌ها گامی مهم در فرآیند تصمیم‌گیری است. یکی از روش‌های تعیین وزن روش آنتروپی شنون است. معیار اصلی این روش بر اساس پراکندگی شاخص‌ها است و هر شاخصی که پراکندگی بیشتری داشته باشد امتیاز بیشتری دریافت خواهد کرد. در ادامه به بررسی مراحل روش شنون آنتروپی پرداخته شده است.

مرحله اول: محاسبه P_{ij} (که در آن a_{ij} ورودی‌های ماتریس تصمیم‌گیری هستند)

$$P_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}; \forall i, j \quad (1)$$

گام دوم: محاسبه E_j

$$E_j = -K \sum_{i=1}^m [P_{ij} \ln P_{ij}]; \forall j \quad (2)$$

$$K = \frac{1}{\ln(m)} \quad (3)$$

گام سوم: محاسبه عدم قطعیت d_j

$$d_j = 1 - E_j \quad (4)$$

گام چهارم: محاسبه وزن هر شاخص

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}; \forall j \quad (5)$$

پس از به دست آوردن وزن شاخص‌ها با استفاده از روش شنون آنتروپی، تصمیم‌گیری و انتخاب بهینه‌ترین مکان با استفاده از روش تاپسیس انجام خواهد شد. در ادامه مراحل روش تصمیم‌گیری تاپسیس آمده است.

3-2- روش تصمیم‌گیری تاپسیس

یکی از کاربردی‌ترین و بهترین روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، روش تاپسیس است. این روش به روش راه حل ایده‌آل مشهور است و کمک می‌کند تا در میان معیارهای مختلف بهترین گزینه را انتخاب کنید. اصل روش تاپسیس بر مبنای نزدیکترین فاصله اقلیدسی و دورترین فاصله اقلیدسی استوار است. در روش تاپسیس هر چقدر گزینه به گزینه ایده‌آل نزدیکتر باشد امتیاز بالاتری نیز دریافت می‌کند. همچنین در پژوهش‌های گذشته به اثبات رسیده است که روش تاپسیس نسبت به وزن شاخص‌ها وابستگی کمی دارد، که یکی از مزایای مهم این روش تصمیم‌گیری علاوه بر سادگی است. در ادامه به شرح مراحل روش تاپسیس پرداخته شده است.

گام اول: محاسبه ماتریس بی‌مقیاس وزن‌دار

$$V = N * W_{n \times n} \quad (6)$$

$$N_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_{ij}^2}}; \forall \quad (7)$$

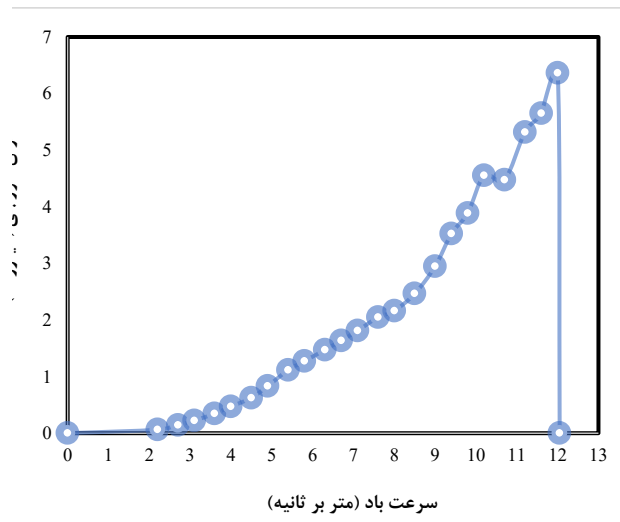
در رابطه (6)، V ماتریس بی‌مقیاس موزون، W ماتریس قطری اوزان شاخص‌ها و N ماتریس بی‌مقیاس شده است. در رابطه 7 نحوه بی‌مقیاس‌سازی ماتریس تصمیم‌گیری به روش نرم نشان داده شده است.

جدول 4 ماتریس تصمیم‌گیری

جمعیت	فاصله تا پست برق	تعداد روزهای پخش‌انداز	ارتفاع از سطح دریا	طولیت نسبی	مساحت	میزان بارندگی	شیب زمین	فاصله تا جاده	دما	فاصله تا شبکه سراسری برق	فاصله تا مرکز شهر	فاصله تا آب	تابش خورشید	نوع خاک
3105	2	61	1462	30	300	125	0.6	0.5	18.3	48	17	7.5	1800	شوسف
562	0.8	35	1615	34	200	132	1.2	0.2	17.5	20	16	8	1850	مومن آباد
642	0.6	34	1373	36	150	139	3.3	0.2	16.5	1.7	90	5.5	1850	نصرت‌الدین
426	1	33	1335	37	300	147	2.8	2	16.3	9.5	27	6	1850	پدران
787	2	36	1452	36	300	130	2.1	2	18	7	21	6.5	1800	سوجان
90	0.2	34	1330	37	300	153	0.6	0.2	14.7	9	73	5.5	1800	خطیبی
1211	0.01	32	1432	38	300	146	2.3	0.2	15.8	50	58	5.5	1800	هاشیم
506	0.8	40	1500	30	250	139	1.4	0.13	16.3	15	23	4.5	1800	سرنده
852	0.01	39	1480	36	300	137	0.7	0.05	16.5	55	57	5.5	1800	بسطاق
2959	0.01	45	1362	33	300	108	0.8	0.5	17.8	63	89	5	1750	دیپوک
5460	0.3	37	1486	40	230	145	1.1	0.3	16.2	1.5	71	8	1850	اسدیه
106	0.1	44	701	36	240	103	0.8	0.1	18.3	60	86	5	1800	رضویه
1657	0.01	46	711	39	150	97	0.9	0.01	19.2	14	16	4	1500	کریت
2290	0.3	45	690	35	300	87	0.8	3	20.7	8	18	4.5	1450	دشت قران
3965	0.2	47	768	37	250	85	0.6	0.15	21	8.3	95	5	1550	عشق آباد

3-3- روش پژوهش

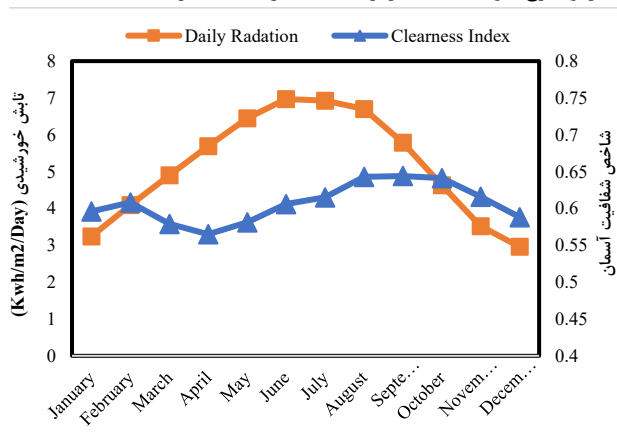
در این تحقیق ابتدا شناسایی بهینه‌ترین مکان با توجه به شاخص‌های بیان شده در جدول 2 پرداخته می‌شود که شاخص‌های بررسی شده در این جدول ابتدا با استفاده از روش شنون آنتروپی وزن‌دهی شده و سپس با استفاده از روش تاپسیس یکی از بهترین روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه است، بهینه‌ترین مکان انتخاب می‌شود. پس از شناسایی بهترین مکان برای ساخت نیروگاه ترکیبی، طراحی و احداث نیروگاه تجدیدپذیر با استفاده از نرم افزار هومر پرو انجام شده است. نیروگاه هیبریدی شامل پنل خورشیدی، توربین بادی، دیزل ژنراتور و باتری است. میزان بار مصرفی یک روستا جهت تامین انرژی الکتریکی



شکل 5 نمودار توان خروجی از توربین بادی در سرعت های مختلف باد

در شکل 6 نمودار میزان تابش خورشیدی و شفافیت آسمان در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین میزان تابش خورشیدی در ماه جوئن رخ می‌دهد که برابر با $6.97 \text{ Kwh/m}^2/\text{day}$ است. کمترین میزان تابش خورشیدی نیز در ماه دسامبر رخ می‌دهد که برابر با $2.96 \text{ Kwh/m}^2/\text{day}$ است. همچنین میزان شفافیت آسمان نیز در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در ماه آپریل شاخص شفافیت آسمان کمترین مقدار را دارد و در ماه های سپتامبر و آگوست و اکتبر بیشترین مقدار را دارد.

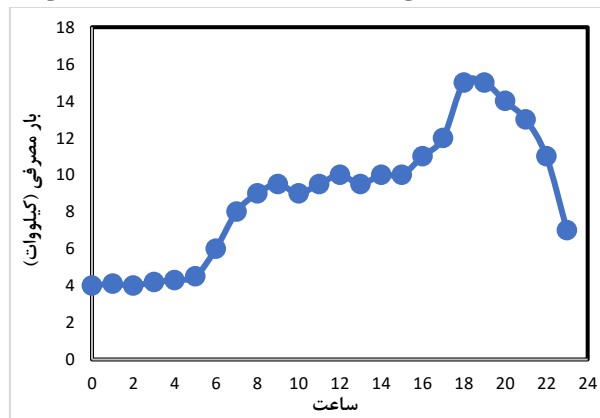
در شکل 7 دما منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که دما در ماه جولای در حدود 30 درجه سانتیگراد است که بر روی توان خروجی پنل‌های خورشیدی تاثیر گذار خواهد بود. همچنین کمترین دما در ماه ژانویه رخ خواهد داد که برابر با 3.45 درجه سانتیگراد است.



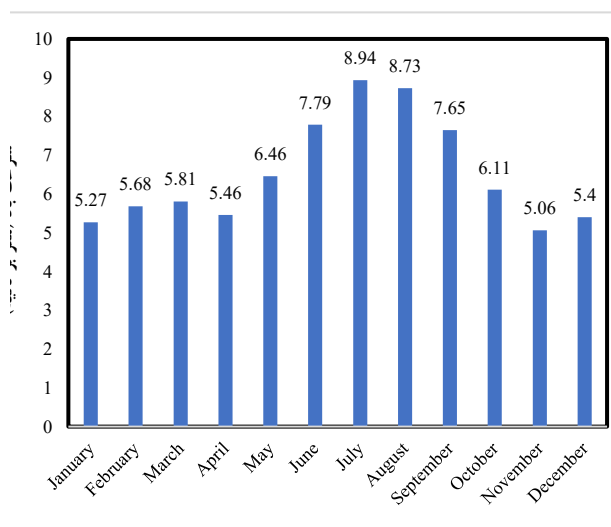
شکل 6 میزان شفافیت و تابش خورشید در منطقه مورد مطالعه

5.06 متر ثانیه است. شکل 3 نشان از پتانسیل بادی بالای منطقه مورد نظر برای استفاده از توربین بادی است.

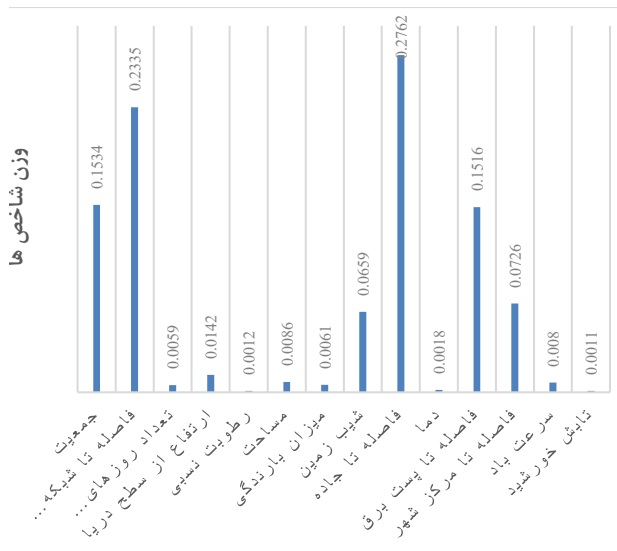
در شکل 5 نمودار میزان توان خروجی از توربین بادی در سرعت‌های باد مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که توربین بادی در نظر گرفته شده در سرعت 2.2 متر بر ثانیه شروع به تولید توان کرده و تا سرعت 12 متر بر ثانیه به بیشترین مقدار خود که حدودا 6 کیلووات است خواهد رسید. در سرعت های بیشتر از 12 متر ثانیه این توربین بادی به علت جلوگیری از آسیب به پره‌ها و خطرات احتمالی از چرخش پره ها و تولید توان جلوگیری می‌شود.



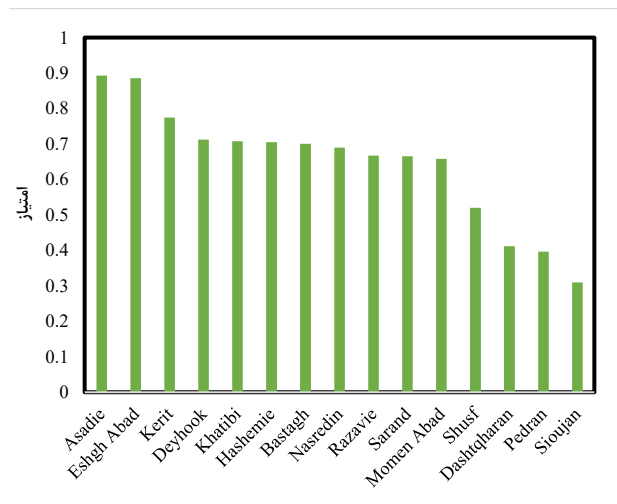
شکل 3 میانگین بار مصرفی ساعتی در طول سال



شکل 4 میزان سرعت باد در منطقه مورد مطالعه

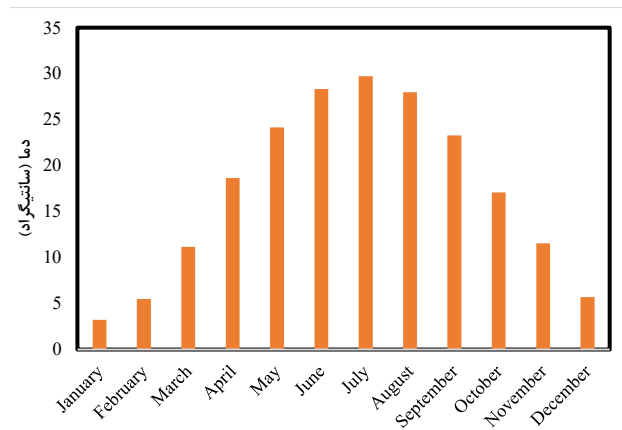


شکل 8 وزن شاخص‌ها بر اساس روش شنون آنتروپی



شکل 9 رتبه بندی گزینه‌ها به روش تاپسیس

در جدول 6 نتایج بهینه سازی‌های مختلف صورت گرفته توسط نرم افزار هومر نشان داده شده است. بهترین سیستم طراحی شده سیستم شماره 1 می‌باشد که در آن سلول خورشیدی، دیزل ژنراتور، اینورتر، تعداد باتری و تعداد توربین بادی به ترتیب Kw 9.29، Kw 29، Kw 10.4، 18 عدد و 2 عدد توربین بادی انتخاب شده است. در این سیستم هزینه تولید هر کیلووات انرژی €0.0784 است. همچنین مقدار هزینه خالص سیستم برابر €79006 است. هزینه عملکرد سالانه این سیستم €3689 است و مقدار سوخت مصرفی در سال 4654 لیتر است که توسط ژنراتور مصرف می‌شود. در دیگر سیستم‌ها مشاهده می‌شود که مقدار ژنراتور دیزلی به صورت ثابت 29 کیلووات است اما دیگر اجزا مثل سلول خورشیدی و توربین بادی و باتری می‌تواند در حالت‌های مختلف که در جدول 6 ذکر شده است، حذف گردد. همچنین در این جدول برای حالت‌های مختلف سیستم‌های بررسی شده میزان سرمایه اولیه، هزینه



شکل 7 دما منطقه مورد مطالعه

4- نتایج

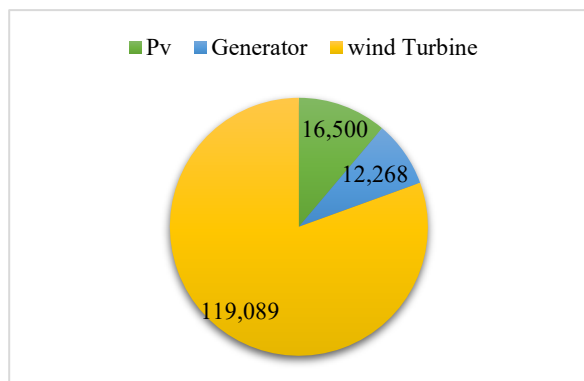
در شکل 8 نمودار وزن شاخص‌ها با استفاده از روش شنون آنتروپی نشان داده شده است. معیار روش شنون آنتروپی برای تعیین وزن شاخص‌ها پراکندگی هر شاخص است. مشاهده می‌شود که شاخص فاصله تا جاده با امتیاز 0.2762 بیشترین وزن را در میان شاخص‌ها دارد که نشان از پراکندگی بیشتر این شاخص است. پس از شاخص فاصله تا جاده، شاخص‌های فاصله تا شبکه سراسری برق، جمعیت و فاصله تا پست برق به ترتیب با امتیاز 0.2335، 0.1534 و 0.1516 قرار دارند. از طرفی کمترین وزن را شاخص‌های تشعشع و رطوبت نسبی دارند که به ترتیب امتیاز 0.0011 و 0.0012 را با استفاده از روش شنون آنتروپی دریافت می‌کنند که نشان از پراکندگی کم این شاخص‌هاست.

در شکل 9 نمودار رتبه بندی گزینه‌ها با استفاده از روش تاپسیس نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که اسدیه در میان گزینه‌ها با توجه به شاخص‌های بیان شده، با امتیاز 0.8932 بیشترین امتیاز را دریافت می‌کند و بهینه ترین مکان برای احداث نیروگاه هیبریدی می‌باشد. پس از مکان اسدیه، عشق آباد با امتیاز 0.8853 در رتبه دوم قرار دارد. بدترین مکان برای احداث نیروگاه هیبریدی با توجه به روش تاپسیس، سیوجان با امتیاز 0.31 است. با توجه به اینکه بهترین مکان برای احداث نیروگاه اسدیه است، در ادامه نتایج به طراحی نیروگاه هیبریدی در این مکان پرداخته خواهد شد.

عملکرد سالیانه، میزان سوخت مصرفی و هزینه هر کیلووات انرژی گزارش شده است.

جدول 6 نتایج بهینه‌سازی سیستم‌های مختلف

شماره سیستم	پنل خورشیدی (Kw)	توربین بادی	دیزل ژنراتور (Kw)	باتری	هزینه (€)	هزینه عملکردی سیستم (€/year)	هزینه سرمایه گذاری اولیه (€/year)	مجموع (€/year)
1*	9.2	2	29	18	10.078	7900	3689	4654
	9				4	6	4	
2	0	4	29	4	2.0092	9308	5482	9469
					6	1	3	
3	0	4	29	0	0.095	9576	5876	1079
					0	0	0	7
4	21.	3	29	0	0.122	1231	6738	1239
	4					31	0	4
5	33.	0	29	20	0.131	1320	6719	1330
	1				5	13	7	0
6	0	0	29	0	0.159	1604	1195	3217
						00	9	0



شکل 10 میزان تولید انرژی الکتریکی توسط اجزا مختلف

جدول 8 میزان آلاینده‌گی تولید شده توسط سیستم بهینه

واحد	مقدار	آلاینده
kg/year	12,182	کربن دی اکسید
kg/year	76.8	مونوکسید کربن
kg/year	3.35	هیدروکربن نسوخته
kg/year	0.465	ذرات معلق
kg/year	29.8	سولفور دی اکسید
kg/year	72.1	اکسیدهای نیتروژن

در جدول 8 میزان آلاینده‌گی تولید شده توسط ژنراتور نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در سال این ژنراتور 12182 کیلوگرم دی اکسید کربن، 76.8 کیلوگرم مونوکسید کربن، 3.35 کیلوگرم هیدروکربن نسوخته و 72.1 کیلوگرم اکسید نیتروژن تولید می‌کند.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا به پتانسیل سنجی نیروگاه ترکیبی در استان خراسان جنوبی در کشور ایران پرداخته شده است. جهت پتانسیل سنجی از 14 شاخص مختلف جمعیت، فاصله تا جاده، سرعت باد، شدت تابش و ... استفاده شده است. سپس شاخص‌ها با استفاده از روش شنون آنتروپی وزن دهی شده که به ترتیب شاخص‌های فاصله تا جاده با امتیاز 0.2762 شاخص‌های فاصله تا شبکه سراسری برق، جمعیت و فاصله تا پست برق به ترتیب با امتیاز 0.2335، 0.1534 و 0.1516 در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. در ادامه برای انتخاب مکان بهینه جهت احداث نیروگاه هیبریدی از روش تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس استفاده شده است. نتایج روش تاپسیس نشان می‌دهد که مکان اسدیه با امتیاز 0.8932 بهترین مکان برای احداث نیروگاه هیبریدی است. پس از

در جدول 7 هزینه‌های سیستم بهینه انتخاب شده نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین هزینه سرمایه‌گذاری مربوط به باتری است که برابر با 9000 یورو است. بعد از باتری، پنل خورشیدی و توربین بادی به ترتیب با 7434 و 7000 یورو بیشترین سرمایه‌گذاری را نیاز دارند. مجموع هزینه سرمایه‌گذاری اولیه این سیستم 31314 یورو است. از طرفی بیشترین هزینه جایگزینی و تعمیرات و نگهداری نیز مربوط به ژنراتور است که به ترتیب برابر با 4568 یورو و 14688 یورو است. کل هزینه سیستم بهینه در نظر گرفته شده 79005 یورو است که 33٪ آن مربوط به ژنراتور، 28.5٪ مربوط به باتری، 21.5٪ مربوط به توربین بادی، 10.6٪ مربوط به پنل خورشیدی و 6.4٪ مربوط به اینورتر است.

در شکل 10 نمودار میزان تولید انرژی الکتریکی توسط توربین بادی، ژنراتور و پنل‌های خورشیدی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که 80٪ انرژی الکتریکی که 119 مگاوات در سال است توسط توربین بادی تامین می‌شود. همچنین 11.5٪ از انرژی الکتریکی که برابر با 16.5 مگاوات است توسط پنل‌های خورشیدی تامین می‌شود و 8.5٪ از انرژی الکتریکی توسط ژنراتور تامین می‌شود که برابر با 12.268 مگاوات می‌باشد. در هر سال توسط این سیستم 147.85 مگاوات انرژی الکتریکی تولید می‌شود که تنها 78 مگاوات برای تامین بار مصرفی مورد نیاز است و 68 مگاوات انرژی الکتریکی مازاد تولید می‌شود که قابلیت فروش به شبکه و استفاده‌های دیگر را نیز دارد.

جدول 7 هزینه‌های سیستم بهینه انتخاب شده

جمع کل (€)	سوخت (€)	تعمیرات (نگهداری) (€)	جایگزینی (€)	سرمایه گذاری (€)	نام اجزا
226,018.8	2,105.6	14,688.5	4,568.8	5,800.0	دیزل ژنراتور
22,510.2	0.00	11,634.7	3,204.3	9,000.0	باتری
5,058.41	0.00	2,688.96	663.13	2,080.03	اینورتر

- Managing the oceans: Site selection of a floating offshore wind farm based on GIS spatial analysis, *Marine Policy*, Vol. 113, p. 103803, 2020.
- [14] A. Dortaj, S. Maghsoudy, F. D. Ardejani, and Z. Eskandari, A hybrid multi-criteria decision making method for site selection of subsurface dams in semi-arid region of Iran, *Groundwater for Sustainable Development*, Vol. 10, p. 100284, 2020.
- [15] C. Emeksiz and B. Demirci, The determination of offshore wind energy potential of Turkey by using novelty hybrid site selection method, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 36, p. 100562, 2019.
- [16] P. C. Y. Liu, H.-W. Lo, and J. J. H. Liou, A combination of DEMATEL and BWM-based ANP methods for exploring the green building rating system in Taiwan, *Sustainability*, Vol. 12, No. 8, p. 3216, 2020.
- [17] S. Y. Bohlool and Y. Alijani, Determining the degree of climate comfort in Tehran, *Persian Language and Literature*, Vol. 9, No. 3, pp. 127–143, 1995. (in Persian)
- [18] Y. Alijani, S. Safav and S. Y. Bohlool, Investigating geographical factors in Tehran air pollution, *Geographical Researchs*, Vol. 38, No. 6, 2007. (in Persian)
- [19] R. S. Shahdabadi, A. Maleki, S. Haghighat, and M. Ghalandari, Using multi-criteria decision-making methods to select the best location for the construction of a biomass power plant in Iran, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, pp. 1–18, 2020.
- [20] M. A. Nazari, M. E. H. Assad, S. Haghighat, and A. Maleki, Applying TOPSIS Method for Wind Farm Site Selection in Iran, in *2020 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, pp. 1–4.
- [21] S. Vafa and K. MohammadHassan, *Performance evaluation and ranking of Iranian insurance companies using the balanced scorecard approach with Shannon entropy weighting method and the Vikor-Gray technique*, 2021. (in Persian)
- [22] H. Akbaş and B. Bilgen, An integrated fuzzy QFD and TOPSIS methodology for choosing the ideal gas fuel at WWTPs, *Energy*, Vol. 125, pp. 484–497, 2017.
- [23] Y.-J. Lai, T.-Y. Liu, and C.-L. Hwang, Topsis for MODM, *European journal of operational research*, Vol. 76, No. 3, pp. 486–500, 1994.
- [24] A.H. Abadi And N. Shahraki, Ranking of cities in Sistan and Baluchestan province based on health and medical indicators using the TOPSIS method, *Health Benefits*, Vol. 12, No. 6, pp. 433–446, 2019. (in Persian)
- شناسایی مکان مناسب جهت احداث نیروگاه به طراحی یک نیروگاه ترکیبی متشکل از دیزل ژنراتور، پنل خورشیدی، توربین بادی و باتری جهت تامین بار مصرفی یک روستا (213.6 کیلووات ساعت در هر روز و 25.45 توان پیک مورد نیاز است) پرداخته شده است. نتایج بهینه سازی نیروگاه ترکیبی با استفاده از نرم افزار هومر مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج نشان می دهد که برای تامین بار مصرفی به 9.29 کیلو وات پنل خورشیدی، 20 کیلووات توربین بادی، 29 کیلووات دیزل ژنراتور، 90 کیلووات باتری و 10.4 کیلووات اینورتر مورد نیاز است. با توجه به سیستم انتخاب شده هزینه تولید هر کیلووات انرژی الکتریکی 0.0784 یورو است و هزینه سرمایه گذاری این سیستم 31314 یورو است. همچنین این سیستم سالانه 4656 لیتر سوخت مصرف می کند و 12182 کیلوگرم کربن دی اکسید تولید می شود.
- ### 6- مراجع
- [1] Y. Wu *et al.*, Optimal location selection for offshore wind-PV-seawater pumped storage power plant using a hybrid MCDM approach: a two-stage framework, *Energy Conversion and Management*, Vol. 199, p. 112066, 2019.
- [2] B. Daneshvar Rouyendegh, A. Yildizbasi, and Ü. Z. B. Arıkan, Using intuitionistic fuzzy TOPSIS in site selection of wind power plants in Turkey, *Advances in Fuzzy Systems*, Vol. 2018, 2018.
- [3] G. Pambudi and N. Nananukul, Wind turbine site selection in Indonesia, based on a hierarchical dual data envelopment analysis model, *Energy Procedia*, Vol. 158, pp. 3290–3295, 2019.
- [4] M. Satkin, Y. Noorollahi, M. Abbaspour, and H. Yousefi, Multi criteria site selection model for wind-compressed air energy storage power plants in Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 32, pp. 579–590, 2014.
- [5] M. Zoghi, A. H. Ehsani, M. Sadat, M. javad Amiri, and S. Karimi, Optimization solar site selection by fuzzy logic model and weighted linear combination method in arid and semi-arid region: A case study Isfahan-IRAN, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 68, pp. 986–996, 2017.
- [6] S. Ali, J. Taweekun, K. Techato, J. Waewsak, and S. Gyawali, GIS based site suitability assessment for wind and solar farms in Songkhla, Thailand, *Renewable Energy*, Vol. 132, pp. 1360–1372, 2019.
- [7] S. M. Bina, S. Jalilinasrabady, H. Fujii, and H. Farabi-Asl, A comprehensive approach for wind power plant potential assessment, application to northwestern Iran, *Energy*, Vol. 164, pp. 344–358, 2018.
- [8] L. Castro-Santos, G. P. Garcia, T. Simões, and A. Estanqueiro, Planning of the installation of offshore renewable energies: A GIS approach of the Portuguese roadmap, *Renewable Energy*, Vol. 132, pp. 1251–1262, 2019.
- [9] J. R. S. Doorga, S. D. D. V. Rughooputh, and R. Boojhawon, Multi-criteria GIS-based modelling technique for identifying potential solar farm sites: A case study in Mauritius, *Renewable Energy*, Vol. 133, pp. 1201–1219, 2019.
- [10] G. Villacreses, G. Gaona, J. Martínez-Gómez, and D. J. Jijón, Wind farms suitability location using geographical information system (GIS), based on multi-criteria decision making (MCDM) methods: The case of continental Ecuador, *Renewable Energy*, Vol. 109, pp. 275–286, 2017.
- [11] M. Rezaei, A. Mostafaeipour, M. Qolipour, and R. Tavakkoli-Moghaddam, Investigation of the optimal location design of a hybrid wind-solar plant: A case study, *International journal of hydrogen energy*, Vol. 43, No. 1, pp. 100–114, 2018.
- [12] M. Argin, V. Yerci, N. Erdogan, S. Kucuksari, and U. Cali, Exploring the offshore wind energy potential of Turkey based on multi-criteria site selection, *Energy Strategy Reviews*, Vol. 23, pp. 33–46, 2019.
- [13] L. Castro-Santos, M. I. Lamas-Galdo, and A. Filgueira-Vizoso,