

## پتانسیل سنجی مزرعه‌های خورشیدی با روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در ایران

پوریا لطفی، اکبر ملکی<sup>+</sup>، رضا شهرکی شهیدآبادی، محمد حسین احمدی

گروه حرارت و سیالات و تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

**چکیده:** یکی از راه‌های پیشرفت به سمت انرژی پایدار، استفاده از انرژی خورشیدی در جهان است. ایران نیز پتانسیل بالایی برای استفاده از انرژی خورشیدی دارد، ولی شناسایی منطقه‌های مناسب برای ساخت نیروگاه‌های خورشیدی یک موضوع مهم است. هدف از این پژوهش ارزیابی پتانسیل انرژی خورشیدی ۹ مرکز استان در ایران با ۳ روش تصمیم‌گیری چند معیاره مجموع ساده وزنی، تاپسیس و الکتراه می‌باشد. در این راستا از ۳ معیار اصلی محل نصب، شرایط آب و هوایی و ریسک استفاده شد، که شامل ۱۱ زیر معیار بوده و با روش آنتروپی شنون وزن‌دهی شدند. در این وزن‌دهی، بیش‌ترین و کم‌ترین وزن به ترتیب به معیارهای جمعیت و میزان تابش اقمی اختصاص یافت. نتیجه‌های اولویت‌بندی نیز نشان می‌دهد، که زاهدان، در هر ۳ روش به گزینه‌های دیگر اولویت دارد و امتیاز این گزینه، در روش مجموع ساده وزنی ۰/۴۸۸۹۰۴، در روش تاپسیس ۰/۸۴۸۵ و در روش الکتراه، زاهدان و تبریز هر دو با تعداد ۵ برتری، نسبت به سایر گزینه‌ها در اولویت هستند، همچنین در هر ۳ روش، تهران به عنوان بدترین گزینه برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی انتخاب شد و امتیاز این گزینه در روش مجموع ساده وزنی ۰/۱۶۷۰۱۵، در روش تاپسیس ۰/۴۴۵۲ و در روش الکتراه نیز همراه با کرمان بدون داشتن برتری به گزینه‌های دیگر در اولویت آخر قرار گرفتند. همچنین در ۶ حالت گوناگون، آنالیز حساسیت روی مدل‌های ارائه شده، صورت گرفت. نتیجه‌های آنالیز حساسیت نشان داد، که روش تاپسیس حساسیت کمتری، نسبت به ۲ روش دیگر، بر روی اوزان شاخص‌ها دارد.

**واژگان کلیدی:** انرژی خورشیدی، نیروگاه خورشیدی، تصمیم‌گیری چند معیاره، آنالیز حساسیت، تاپسیس.

**KEYWORDS:** Solar energy, Solar power plant, Multi-criteria decision making, Sensitivity analysis, Topsis.

### مقدمه

به امری مهم در قرن بیست و یکم تبدیل شده است [۴-۲]. منابع انرژی تجدیدپذیر با تنوع زمانی و مکانی که دارند، مشکل‌های موجود در استفاده از انرژی‌های فسیلی و هسته‌ای را از بین می‌برد [۵]. از میان انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی یکی از ارزان‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر است [۸-۶]، که برای تأمین گرما، آب گرم، انرژی الکتریکی

امروزه تولید انرژی و استفاده پایدار، یکی از اصلی‌ترین مشکل‌های جامعه‌ها است [۱]. رشد سریع مصرف انرژی در جهان، افزایش تقاضای انرژی را به دنبال دارد، که با توجه به محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی و نیز روبه‌رو بودن جامعه جهانی با مشکل‌های زیست محیطی به علت مصرف سوخت‌های فسیلی، استفاده از منابع انرژی پاک،

+Email: a\_maleki@shahroodut.ac.ir

\*عهده‌دار مکاتبات

وزیران و مدیران سازمان‌های مسکونی، تجاری و صنعتی استفاده می‌شود. ایران، که بین ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض جغرافیایی شمالی واقع شده است، تابش خورشیدی در حدود ۱۸۰۰ تا ۲۲۰۰ کیلووات ساعت در مترمربع در سال برای این کشور، تخمین زده شده است، که بالاتر از میانگین جهانی است. به طور متوسط سالانه بیش از ۲۸۰ روز آفتابی در ایران ثبت شده است، که پتانسیل بالای منبع انرژی خورشیدی در کشور را نشان می‌دهد [۹،۱۰]. این مشکل‌های پیچیده نیاز به ارزیابی هم‌زمان بسیاری از معیارها دارد. استفاده از روش‌های بهینه‌سازی تصمیم‌گیری چند شاخصه، راهکاری مناسب، برای ارزیابی می‌باشد و مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره<sup>۱</sup> می‌توانند برای تصمیم‌گیری در انتخاب بهترین گزینه، به تصمیم‌گیران کمک کنند [۱۱]. در مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه، هدف یافتن بهترین جایگزین، در میان مجموعه‌ای از گزینه‌های عملی است [۱۲]. برای مدل‌های تصمیم‌گیری، دسته‌بندی‌های گوناگونی ارائه شده است، که شناخت ساختار آن‌ها را ساده‌تر می‌کند. این دسته‌بندی‌ها بیش‌تر بر ماهیت و نیز ساختار کارکرد مدل‌های گوناگون تکیه دارد، که آن‌ها را در گروه‌های گوناگون، جای می‌دهد [۱۳]. در زمینه امکان‌سنجی انرژی خورشیدی با مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، پژوهش‌های بسیاری در ایران و جهان صورت گرفته است، که در جدول ۱ به بررسی برخی از این پژوهش‌های صورت گرفته در ایران، پرداخته شده است. [۱۴] محسن و همکاران، به ارزیابی سامانه گرمایش آب خورشیدی خانگی در کشور اردن با معیارهای کارایی، قابلیت اطمینان، منافع اجتماعی و ... با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی<sup>۲</sup> پرداختند و سرانجام به این نتیجه رسیدند، که سامانه گرمایش آب خورشیدی دارای کم‌ترین هزینه نسبت به سایر سامانه‌های گرمایش آب خانگی است. [۱۵] کاولارو<sup>۳</sup> و همکاران، در سال ۲۰۱۰ میلادی، ارزیابی ذخیره انرژی گرمایی در سامانه‌های متمرکز کننده خورشیدی را با چند معیار فنی، اقتصادی و زیست محیطی با روش تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس فازی<sup>۴</sup>، مورد بررسی قرار دادند، سرانجام دیدند، که استفاده از نمک مذاب برای افزایش انتقال گرما، مؤثر است. [۲] سیندهو<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۷ میلادی، برای ارزیابی استقرار

مزرعه‌های خورشیدی در هند با معیارهای اقتصادی، فنی، اجتماعی، زیست محیطی و سیاسی، از روش تحلیل سلسله مراتبی و تاپسیس<sup>۶</sup> استفاده کردند، که سرانجام سون‌پت<sup>۷</sup> به عنوان بهترین مکان استقرار مزرعه‌های خورشیدی در هند، انتخاب شد. [۱۶] ازمیر<sup>۸</sup> و همکاران، در سال ۲۰۱۸ میلادی، برای بررسی انتخاب مکان بهینه برای نیروگاه فتوولتائیک، با معیارهای پتانسیل تولید انرژی، محیط زیست، ایمنی و ... با روش تحلیل سلسله مراتبی، به این نتیجه رسیدند، که کالوک<sup>۹</sup> از میان ۳ گزینه بررسی شده، ایده‌آل‌ترین مکان برای نیروگاه‌های فتوولتائیک است. [۱۷] آکای<sup>۱۰</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۸ میلادی، برای انتخاب بهینه مکان نیروگاه خورشیدی در ترکیه، با استفاده از معیارهای اقتصادی، فنی، اجتماعی و جغرافیایی، از روش تحلیل سلسله مراتبی و تاپسیس استفاده کردند، که در پژوهش آن‌ها مرسین<sup>۱۱</sup> به عنوان بهترین گزینه برای نیروگاه‌های خورشیدی انتخاب شد. [۱۸] دیوجام<sup>۱۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۹ میلادی، انتخاب سایت بهینه برای نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک در شمال شرقی هند را با معیارهای وضوح متوسط سالانه، متوسط رطوبت سالانه، دمای متوسط سالانه و ... با استفاده از روش‌های کوپراس<sup>۱۳</sup> و تحلیل سلسله مراتبی مورد بررسی قرار دادند، سرانجام پاکینگ<sup>۱۴</sup> در بین ۴ مکان انتخاب شده در بالاترین اولویت، قرار گرفت. [۱۹] کولاک<sup>۱۵</sup> و همکاران، نیز در سال ۲۰۲۰ میلادی، به انتخاب مکان بهینه، برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک در استان مالاتیایا<sup>۱۶</sup> در کشور ترکیه، با معیارهای پتانسیل انرژی خورشیدی، خطوط انتقال انرژی، مراکز ترانسفورماتور و ... با روش تحلیل سلسله مراتبی پرداختند، آن‌ها در کل ۳۴ منطقه مناسب در استان ماتالیا را شناسایی کردند، که ۷ منطقه کم‌تر از ۲ هکتار و سایر مناطق بیش از ۲ هکتار، زمین مناسب، برای نیروگاه خورشیدی دارد. بررسی پژوهش‌های صورت گرفته در ایران نشان می‌دهد، که در بیش‌تر این پژوهش‌ها، تنها ناحیه یا اقلیم ویژه‌ای از کشور با معیارهای محدودی، مورد بررسی قرار گرفته است و در تصمیم‌گیری از روش‌های گوناگونی استفاده نشده است. در این پژوهش سعی بر این بوده است، که اولویت‌بندی برای نقطه‌های زیادی از کشور

(۱) Multi Criteria Decision Making

(۳) Cavallaro

(۵) Sindhu

(۷) Sonapat

(۹) Kulluk

(۱۱) Mersin

(۱۳) Complex Proportional Assessment

(۱۵) Colak

(۲) Analytical Hierarchy process

(۴) Fuzzy Topsis

(۶) Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

(۸) Ozdemir

(۱۰) Akçay

(۱۲) Complex Proportional Assessment

(۱۴) Pakyong

(۱۶) Malatya

جدول ۱، پیشینه پژوهش امکان‌سنجی انرژی خورشیدی، با روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، در ایران

نتیجه	معیار و زیرمعیار	روش	هدف	منطقه	سال، منبع	نویسنده
۱۸/۲۵٪ از منطقه شادیروان با راندمان ۱۰٪ به عنوان مزرعه‌های خورشیدی قابل بهره‌برداری است.	زیست محیطی: پوشش گیاهی و کاربری زمین محل نصب: فاصله از جاده و فاصله از خطوط انتقال برق پیکربندی زمین: شیب زمین و جهت قرارگیری پنل خورشیدی و زاویه آن	تحلیل سلسله مراتبی فازی	انتخاب مکان‌های مستعد انرژی خورشیدی با سامانه اطلاعات جغرافیایی <sup>۱</sup>	شادیروان	۲۰۱۴ م [۲۰]	عساکره و همکاران
یزد و ساری به ترتیب، به عنوان بهترین و بدترین منطقه برای اجرای پروژه‌های خورشیدی انتخاب شدند.	اقتصادی: هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه بهره‌برداری و نگهداری، ارزش خالص فعلی و مدت برگشت سرمایه زیست محیطی: شدت تابش خورشید، در دسترس بودن زمین و قابلیت دسترسی به شبکه انتقال اجتماعی: مقبولیت اجتماعی، میزان تقاضای برق و تأثیر بر پیشرفت منطقه اطراف ریسک: ریسک سیاسی، ریسک اقتصادی، روبه‌رو شدن با کمبود بودجه و خطرهای زیست محیطی	ارزیابی پتانسیل شهرهای گوناگون ایران برای اجرای پروژه‌های خورشیدی واسپاس <sup>۲</sup>	یزد، اهواز، زاهدان، قم، بندرعباس، کرمان، شیراز، کاشان، سمنان، اصفهان، ایلام، همدان، کرمانشاه، تهران، یاسوج، اراک، گرگان، زنجان، قزوین، ساری، آستارا، اردبیل، تبریز، رشت و مشهد	۲۰۱۴ م [۲۱]	وفایی‌پور و همکاران	
برخی مناطق شهرهای اصفهان، برخوار، نائین، شاهین شهر و میمه، از نظر انرژی خورشیدی دارای پتانسیل بالاتری نسبت به سایر مناطق هستند.	پیکربندی زمین: ارتفاع از سطح دریا، جهت قرارگیری پنل خورشیدی و زاویه آن و شیب زمین محل نصب: فاصله از شهر، فاصله از پست برق و فاصله از خطوط حمل و نقل اقلیمی: تعداد ساعت‌های آفتابی، تعداد روزهای ابری، تعداد روزهای غبارآلود، شدت تابش خورشید، تعداد روزهای بارانی و برفی و رطوبت نسبی زیست محیطی: کاربری زمین، مناطق حفاظتی، فاصله از حوضه آبریز و پوشش گیاهی	ترکیب خطی وزنی <sup>۳</sup>	بهینه‌سازی انتخاب مکان خورشیدی در منطقه خشک و نیمه خشک استان اصفهان	استان اصفهان	۲۰۱۵ م [۲۲]	ذوقی و همکاران
شهرهای حاجی‌آباد، فارغان و زیارت‌علی که در شمال و شمال شرق استان هرمزگان واقع شده‌اند، دارای پتانسیل بالایی برای احداث نیروگاه خورشیدی، می‌باشند.	اقتصادی: فاصله از شهر، کاربری زمین و فاصله از جاده زیست محیطی: پتانسیل خورشید، فاصله از آبراهه و فاصله از نقطه‌های سیل‌خیز فیزیکی: شیب زمین و فرسایش خاک	فرایند تحلیل شبکه‌ای <sup>۴</sup>	مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی با استفاده از منطق فازی و به کمک نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی <sup>۵</sup>	استان هرمزگان	۱۳۹۶ م [۲۳]	ناصیحی و همکاران
به تقریب در هر سه روش همه منطقه‌های ایران به جز منطقه شمال و شمال غربی ایران، برای احداث نیروگاه‌های فتوولتائیک مناسب هستند و استان‌های کرمان، سیستان و بلوچستان، فارس و هرمزگان از پتانسیل بالاتری برخوردار می‌باشند.	اقلیمی: جهت قرارگیری پنل خورشیدی، دما، شیب زمین و شدت تابش خورشید اقتصادی: فاصله از خط راه آهن، فاصله از جاده اصلی، فاصله از جاده فرعی و فاصله از منطقه مسکونی	تاپسیس، تاپسیس فازی و سوگنو فازی <sup>۶</sup>	پتانسیل‌سنجی مناطق گوناگون کشور ایران، برای احداث نیروگاه‌های برق خورشیدی (فتوولتائیک)	کشور ایران	۱۳۹۶ م [۲۴]	هوشنگی و همکاران

(۱) Geographical Information System (GIS)

(۳) Weighted Linear Combination

(۵) ARC GIS

(۲) Weighted Aggregated Sum Product Assessment

(۴) Analytic Network Process

(۶) Fuzzy Sugeno

جدول ۱، پیشینه پژوهش امکان‌سنجی انرژی خورشیدی، با روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، در ایران (ادامه)

نویسنده	سال، منبع	منطقه	هدف	روش	معیار و زیرمعیار	نتیجه
عصاکره و همکاران	۲۰۱۷، م [۲۵]	استان خوزستان	ارزیابی مزرعه-های خورشیدی فتوولتائیک	تحلیل سلسله مراتبی	ارزیابی منطقه با توجه به شاخص‌های زیست محیطی (پوشش گیاهی، شیب زمین) و فنی-اقتصادی (فاصله از مناطق مسکونی) صورت گرفت.	پتانسیل تولید برق این استان، در بدترین حالت ۱۷۵٪، بیش‌تر از تولید ناخالص ایران در سال ۲۰۱۳ میلادی است.
صادقی و همکاران	۲۰۱۷، م [۲۶]	تهران	پتانسیل‌سنجی برای استقرار مزرعه‌های خورشیدی و توربین‌های بادی با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی	تحلیل سلسله مراتبی	اقلیمی: تعداد ساعت‌های آفتابی، شدت تابش خورشید، میزان سرعت باد و رطوبت نسبی محل نصب: فاصله از شهر، فاصله از شبکه برق، فاصله تا خطوط حمل و نقل و کاربری زمین پیکربندی زمین: ارتفاع از سطح دریا، شیب زمین و برای قرارگیری پنل خورشیدی	۳۲٪ از مساحت شهر تهران، برای توربین‌های بادی و ۸/۰۲٪ از آن برای مزرعه‌های خورشیدی، دارای پتانسیل بالایی می‌باشند.
یوسفی و همکاران	۲۰۱۸، م [۲۷]	استان مرکزی	انتخاب مکان مناسب برای احداث نیروگاه خورشیدی با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی	منطق فازی بولین <sup>۱</sup>	فنی: تعداد ساعت‌های آفتابی زیست محیطی: زمین کاربری، فاصله از مناطق حفاظتی و فاصله از رودخانه اقتصادی: فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از منطقه مسکونی، شیب زمین و ارتفاع از سطح دریا	مناطق از شهرستان‌های محلات و زرندینه به منظور بهره‌برداری از انرژی خورشیدی مناسب می‌باشند.
رضایی و همکاران	۲۰۱۸، م [۲۸]	ایزدخواست، اقلید، صفاشهر، باوانات، ارسنجان، استهین و فیروزآباد	تعیین مکان بهینه نیروگاه ترکیبی خورشیدی-بادی در استان فارس	تاپسیس فازی	اقلیمی: چگالی انرژی باد و شدت تابش خورشید شرایط جغرافیایی: مساحت زمین‌های مسطح، مساحت اراضی بدون پوشش درخت، سهولت دسترسی به محل و فاصله تا شبکه توزیع برق اقتصادی: هزینه زمین، هزینه‌های زیرساختی و هزینه‌های نیروی کار ماهر بالابای طبیعی: سیل، زمین لرزه و طوفان شرایط اجتماعی: جمعیت	اقلید به عنوان بهترین شهرستان برای ساخت نیروگاه بادی-خورشیدی انتخاب شد.
نادی‌زاده شورابه و همکاران	۲۰۱۹، م [۲۹]	استان‌های مازندران، کرمانشاه، یزد و خراسان رضوی	شناسایی مکان‌های مناسب برای احداث نیروگاه خورشیدی	تحلیل سلسله مراتبی و میانگین وزنی مرتب شده <sup>۲</sup>	محل نصب: فاصله از جاده، فاصله از گسل و فاصله از شهر پیکرشناسی زمین: شیب زمین، پوشش گیاهی و دمای اقلیمی: شدت تابش خورشید، میزان بارندگی، تعداد روزهای آفتابی و تعداد روزهای غبارآلود	استان یزد با اقلیم گرم و خشک به ۳ استان دیگر برای احداث نیروگاه خورشیدی، اولویت دارد.
اسدی و همکاران	۲۰۱۹، م [۳۰]	استان آذربایجان شرقی	انتخاب مکان مزرعه‌های بادی و خورشیدی با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی	تحلیل سلسله مراتبی، ویکور <sup>۳</sup> و تاپسیس	فنی: سرعت باد، شدت تابش خورشید، مدت زمان تابش خورشید، دما و رطوبت نسبی اقتصادی: ارتفاع از سطح دریا، شیب زمین و فاصله تا جاده زیست محیطی: کاربری زمین، فاصله از شهر، فاصله از روستا، فاصله از مناطق حفاظت شده، فاصله از رودخانه، فاصله از دریا، فاصله از گسل و فاصله از معدن	در هر ۳ روش، غرب و شمال استان آذربایجان شرقی از پتانسیل مناسبی برای احداث نیروگاه ترکیبی (بادی و خورشیدی) برخوردار هستند.

(۱) Boolean-Fuzzy Logic

(۲) Ordered Weighted Averaging

(۳) Vikor

جدول ۱، پیشینه پژوهش امکان‌سنجی انرژی خورشیدی، با روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، در ایران (ادامه)

نتیجه	معیار و زیرمعیار	روش	هدف	منطقه	سال، منبع	نویسنده
شهرستان‌های فردوس، گناباد و بردسکن، جزو مستعدترین مناطق استان خراسان رضوی برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی، می‌باشند.	فنی: تعداد روزای آفتابی و شدت تابش خورشید اقتصادی: فاصله از جاده و شیب زمین اقلیمی: پوشش گیاهی، دمای سطح زمین، میزان بارندگی، فاصله از گسل و پتانسیل گرد و غبار	میانگین وزنی مرتب شده	انتخاب مناطق بهینه برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی با لحاظ کردن مفهوم ریسک	استان خراسان رضوی	۱۳۹۸ [۳۱]	نادی‌زاده شورابه و همکاران
بخشی از شهرستان عقدا با عرض جغرافیایی ۳۷° ۵۳'، به عنوان اولویت اول برای تأسیس نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک انتخاب شد.	فنی: دما، میزان ابری بودن آسمان، رطوبت نسبی، تعداد ساعت‌های آفتابی، میزان سرعت باد و میزان آلودگی هوا اقتصادی: فاصله از پست برق و فاصله از جاده اصلی	تحلیل پوششی داده‌ها <sup>۱</sup>	بهینه‌سازی مکان مزرعه‌های انرژی‌های تجدید پذیر برای تولید برق	استان یزد	۲۰۲۰ م [۳۲]	مصطفی پور و همکاران
بیرجند، سربیشه و خضری به ترتیب به عنوان بهترین مکان برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی انتخاب شدند.	اقتصادی: هزینه ساخت، هزینه تعمیر نگهداری و سرمایه گذاری اولیه فنی: فاصله از پست، در دسترس بودن زمین، شدت تابش خورشید و شدت باد زیست محیطی: مناطق حفاظت شده، تخریب اکوسامانه و فاصله از حوضه آبریز اجتماعی: اشتغال‌زایی، پذیرش اجتماعی و فاصله از زمین‌های کشاورزی ریسک: ریسک اقتصادی، روبه رو شدن با کمبود بودجه و ریسک سرمایه گذاری	تحلیل رابطه خاکستری <sup>۲</sup> و ویکور	پتانسیل‌سنجی مناطق مستعد نیروگاه‌های خورشیدی در شرق ایران	خزری، بشرویه، طبس، فردوس، اسفدن، قاین، دیهوک، بیرجند، حاجی‌آباد، آراین شهر، اسدیه، سربیشه، نهبندان و سراپان	۲۰۲۱ م [۳۳]	کانان و همکاران
در هر ۳ روش، زاهدان و تبریز به ترتیب مستعدترین مناطق و تهران نیز به عنوان بدترین گزینه، برای احداث نیروگاه خورشیدی قرار گرفتند.	محل نصب: فاصله تا جاده، فاصله تا پست برق، ارتفاع از سطح دریا، شیب زمین و میزان تابش خورشید شرایط آب و هوایی: دما، رطوبت نسبی، میزان بارندگی و سرعت باد ریسک: جمعیت و تعداد روزهای غبارآلود	مجموع ساده وزنی <sup>۳</sup> ، تاپسیس و الکتراه <sup>۴</sup>	پتانسیل‌سنجی مزرعه‌های خورشیدی با روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره	تبریز، زاهدان، همدان، کرمان، بندرعباس، مشهد، تهران، بوشهر و اصفهان		پژوهش حاضر

گوناگون، با استفاده از ۳ روش تصمیم‌گیری چند معیاره مجموع ساده وزنی، تاپسیس و الکتراه، پرداخته شده است.

#### انتخاب گزینه‌های تصمیم‌گیری

گزینه‌های انتخاب شده در این پژوهش، شهرهای اصفهان، بوشهر، بندرعباس، همدان، کرمان، مشهد، زاهدان، تهران و تبریز می‌باشد. مشخصه‌های جغرافیایی آن‌ها در جدول ۲ و نیز موقعیت جغرافیایی آن‌ها در شکل ۱، نشان داده شده است. دلیل اصلی انتخاب این شهرها متفاوت بودن اقلیم آن‌هاست، که در شکل ۲ و جدول ۳ دیده می‌شود. دلیل دیگر انتخاب این گزینه‌ها، سیاست دولت برای توسعه انرژی خورشیدی

با شرایط آب و هوایی و اقلیم متفاوت، مورد بررسی قرارگیرد، همچنین این اولویت‌بندی، با چند روش تصمیم‌گیری چند معیاره و با استفاده از معیارهای اصلی پتانسیل‌سنجی مزرعه‌های خورشیدی، شامل محل نصب، شرایط آب و هوایی و ریسک، صورت گرفته است، که اولویت‌بندی با چنین شرایطی پیش‌تر صورت نگرفته است.

#### داده‌ها و روش پژوهش

##### بازه مطالعاتی

در این پژوهش به ارزیابی تولید برق و انتخاب بهینه‌ترین مکان، برای احداث نیروگاه خورشیدی در ۹ شهر بزرگ ایران، با ۱۱ معیار

(۱) Data Envelopment Analysis  
(۳) Simple Additive Weighting

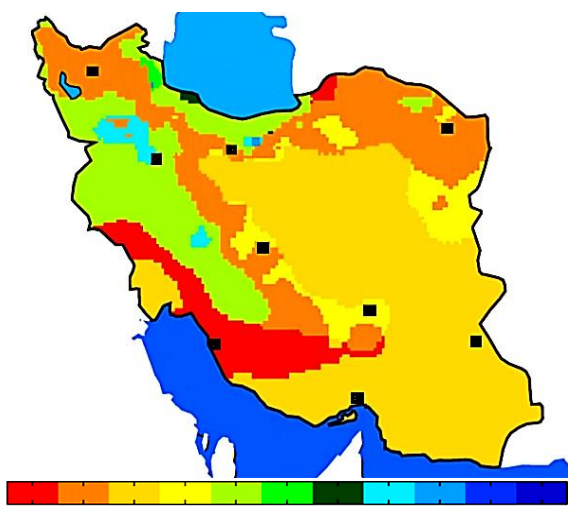
(۲) Gray Relational Analysis  
(۴) Elimination et Choice Translating Reality Shanon Entropy

جدول ۲، مشخصه‌های جغرافیایی بازه مطالعاتی [۳۴]

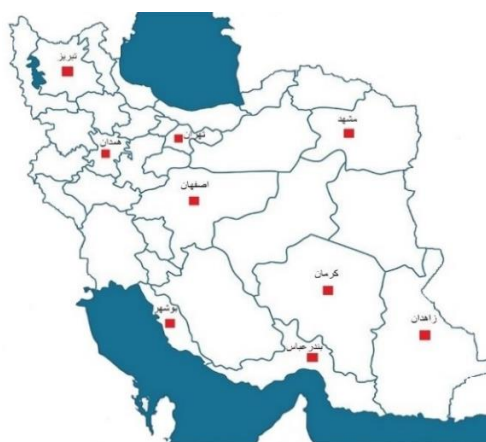
شماره گزینه‌ها	گزینه‌ها	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
۱	اصفهان	۳۲° ۴۰'	۵۱° ۴۰'
۲	بوشهر	۲۸° ۵۷'	۵۰° ۵۰'
۳	بندرعباس	۲۷° ۱۱'	۵۶° ۱۸'
۴	همدان	۳۴° ۴۷'	۴۸° ۳۰'
۵	کرمان	۳۰° ۱۷'	۵۷° ۴۲'
۶	مشهد	۳۶° ۱۹'	۵۹° ۳۲'
۷	زاهدان	۲۹° ۳۰'	۶۰° ۵۱'
۸	تهران	۳۵° ۴۲'	۵۱° ۲۲'
۹	تبریز	۳۸° ۴۲'	۴۶° ۱۸'

جدول ۳، ویژگی‌های گروه‌های اقلیمی کوپن گاریگر موجود در ایران [۳۵]

شماره	نام اقلیم	ویژگی
۱	BWh <sup>۱</sup>	بیابان خشک و بسیار گرم
۲	BWk <sup>۲</sup>	بیابان خشک و سرد
۳	BSh <sup>۳</sup>	نیمه بیابانی (استپ) خشک و بسیار گرم
۴	BSk <sup>۴</sup>	نیمه بیابانی (استپ) خشک و سرد
۵	Csa <sup>۵</sup>	معتدل با تابستان‌های خشک و بسیار گرم
۶	Csb <sup>۶</sup>	معتدل با تابستان‌های خشک و گرم
۷	Cfa <sup>۷</sup>	معتدل پر باران با تابستان‌های گرم
۸	Dsa <sup>۸</sup>	اقلیم برفی با تابستان خشک و بسیار گرم
۹	Dsb <sup>۹</sup>	اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و گرم



شکل ۲، منطقه‌بندی اقلیمی ایران به روش کوپن گاریگر [۳۵]



شکل ۱، موقعیت جغرافیایی بازه مطالعاتی

در موضوع پژوهش می‌باشد. استفاده از انرژی خورشیدی تابع شرایطی است، که می‌تواند در میزان بازدهی و هزینه‌های آن برای مصرف کننده مؤثر باشد، در نتیجه اقدام به شناسایی معیارها و زیرمعیارهای مؤثر بر قابلیت بهره‌برداری از انرژی خورشیدی شده است، در این راستا معیارهای مؤثر بر ظرفیت سلول‌های خورشیدی و هزینه نیروگاه خورشیدی مورد بررسی قرار گرفت. مؤثرترین پارامتر در ظرفیت سلول‌های خورشیدی، میزان تابش دریافتی است و این پارامتر خود تحت تأثیر عامل‌های هندسی (زاویه سمت الراس خورشید، زاویه ارتفاع خورشید و...)، نجومی (ثابت خورشیدی، زمین

با توزیع مناسب نیروگاه‌های خورشیدی در منطقه‌ها و اقلیم‌های گوناگون کشور می‌باشد، که دلیل اصلی این امر، کاهش هزینه انتقال انرژی از نیروگاه خورشیدی به مصرف کنندگان در سراسر کشور است [۲۹]. در شکل ۳، میزان تابش خورشید در کشور ایران، نشان داده شده است، دیده می‌شود در جنوب کشور، که به خط استوا نزدیک‌تر است، میزان تابش خورشید نیز بیش‌تر است، ولی در ناحیه شمالی کشور به علت بارش باران و بیش‌تر بودن تعداد روزهای ابری، میزان تابش خورشیدی بسیار کم‌تر از دیگر نقطه‌های کشور است.

**انتخاب معیار**

اولین گام در تصمیم‌گیری چند شاخصه، تعیین شاخص‌های مؤثر

(۱) Arid Desert Hot

(۳) Arid Steppe Hot

(۵) Temperate Dry Summer Hot Summer

(۷) Temperate Without dry season Hot Summer

(۹) Cold Dry Summer Warm Summer

(۲) Arid Desert Cold

(۴) Arid Steppe Cold

(۶) Temperate Dry Summer Warm Summer

(۸) Cold Dry Summer Hot Summer

از فشار زیاد به فشار کم، به دلیل تغییر دما ایجاد می‌شود. وزش باد باعث خنک شدن صفحه‌های خورشیدی می‌شود و با توجه به این که سلول‌های خورشیدی در دماهای پایین‌تر عملکرد بهتری دارند، از این رو افزایش سرعت باد موجب افزایش راندمان پنل‌های خورشیدی می‌شود [۱۸].

● میزان تابش افقی: این پارامتر یکی از مهم‌ترین پارامترها برای احداث نیروگاه خورشیدی است، که به معنای میزان انرژی دریافتی در یک نقطه از سطح زمین است و به عامل‌های گوناگونی از جمله طول و عرض جغرافیایی و ... بستگی دارد. هر چقدر میزان تابش افقی بیش‌تر باشد، انرژی دریافتی توسط سلول خورشیدی نیز، بیش‌تر می‌شود [۲۲].

● جمعیت: افزایش جمعیت، افزایش حمل و نقل، افزایش کارخانه‌ها و ... را در پی دارد، که موجب افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی و افزایش آلودگی هوا می‌شود و آلودگی هوا مانع از جذب هرچه بیش‌تر انرژی خورشیدی، توسط سلول خورشیدی می‌شود [۴۰].

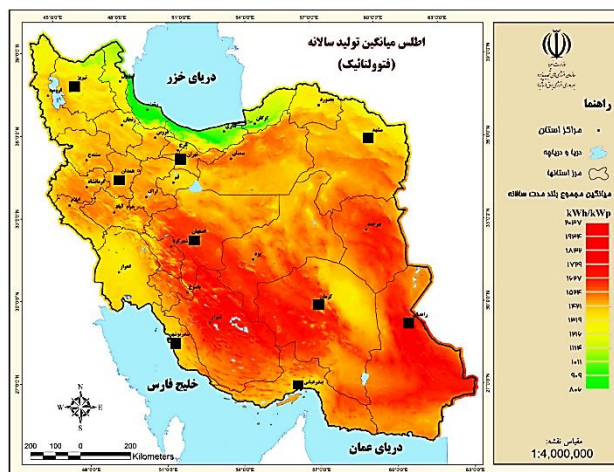
● میزان بارندگی: در منطقه‌هایی که میزان بارندگی سالانه بالایی دارند، رطوبت و غلظت ذره‌های معلق در این منطقه‌ها زیاد است که مهم‌ترین عامل در جذب یا بازتاب اشعه موج کوتاه می‌باشد و پتانسیل منطقه به منظور تأسیس نیروگاه خورشیدی را کاهش می‌دهد [۴۱، ۲۲].

● تعداد روزهای غبارآلود: ذره‌های گرد و غبار که تابعی از شرایط محیطی هستند، از اجزای اصلی تشکیل دهنده جو به ویژه در نزدیکی سطح زمین می‌باشند. این ذره‌ها ۱۵٪ از انرژی موج کوتاه خورشید را جذب می‌کنند. بنابراین مناطقی که کم‌ترین تعداد روز گرد و غبار در سال را دارند، برای احداث نیروگاه خورشیدی مناسب‌ترند [۴۱، ۲۲].

● ارتفاع از سطح دریا: ارتفاع یکی از تأثیرگذارترین معیارها در انتخاب کاربری‌های صنعتی است. ارتفاع از سطح دریا با ضخامت اتمسفر رابطه وارون دارد. جو ضخیم‌تر، اجزای ضخیم‌تری دارد، در نتیجه انرژی بیش‌تری را جذب یا بازتاب می‌کنند. بنابراین ارتفاعات به دلیل دریافت انرژی بالا، پتانسیل بیش‌تری دارند [۲۲].

● شیب: پتانسیل زمین برای مصرف‌های صنعتی، با افزایش شیب کاهش می‌یابد و معیاری تأثیرگذار در انتخاب محل مناسب برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی است. درصد شیب دلخواه باید پایین‌تر از ۳٪ باشد، تا موجب سایه‌اندازی صفحه‌های سلول خورشیدی روی هم نشود. از این جهت شیب برای نیروگاه خورشیدی، یک شاخص منفی است [۳۹، ۱۹].

● فاصله از پست برق: ساخت تجهیزات صنعتی در نزدیکی خطوط برق، افزون بر این که از افت ولتاژ جلوگیری می‌کند، باعث افزایش راندمان کلی، کاهش اتلاف انرژی و در نتیجه کاهش آلودگی زیست محیطی می‌شود. در نتیجه هر چقدر فاصله تا پست برق کم‌تر باشد، برای احداث نیروگاه مناسب‌تر است [۲۲].



فاصله شکل ۳، میزان تابش در نقطه‌های گوناگون ایران [۳۶]

تا خورشید و ...، آب و هوایی (ابری بودن، دما هوا و ...)، جغرافیایی (ارتفاع از سطح دریا و ...) و فیزیکی (ضریب کدری جو، میزان بخار آب موجود در جو و ...) است [۳۷]، که هر عامل خود دارای زیر معیارهای گوناگونی می‌باشد. از سویی با بررسی پژوهش‌های گذشته و کارهای انجام شده در پروژه‌های مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی در سطح کشور، ۱۱ معیار گوناگون برای احداث نیروگاه خورشیدی انتخاب شد، که شامل معیارهای مؤثر بر کارایی پنل خورشیدی و معیارهای اقتصادی می‌باشد [۳۸، ۲۹، ۲۲، ۱۸]. نمودار کلی پتانسیل سنجی احداث نیروگاه خورشیدی برای این پژوهش، در شکل ۴ نشان داده شده است. و جدول ۴ نیز نوع معیارهای بررسی شده را بیان می‌کند، که افزایش مقدار معیارهای مثبت، تأثیر مثبتی روی نیروگاه خورشیدی دارد و افزایش مقدار معیارهای منفی، تأثیر منفی در نیروگاه خورشیدی دارد.

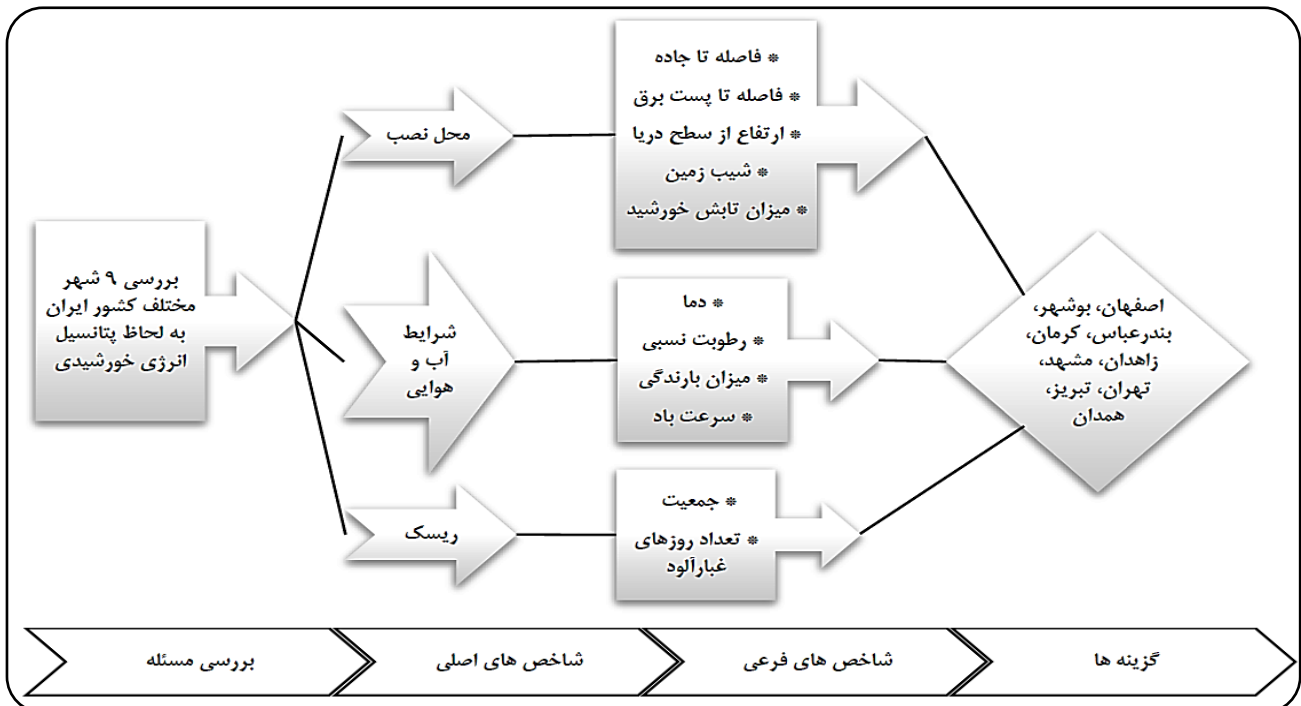
● دما: به نظر می‌رسد، دما معیار مثبت برای نیروگاه‌های خورشیدی باشد، ولی افزایش دما، بازده پنل خورشیدی را کاهش می‌دهد. بسته به مکانی که سلول خورشیدی در آن نصب شده است، گرما می‌تواند بازده خروجی را بین ۱۰ تا ۲۵٪ کاهش دهد. با افزایش دمای صفحه خورشیدی، دیده می‌شود که جریان خروجی به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد، در حالی که ولتاژ خروجی به صورت خطی کاهش می‌یابد، در نتیجه گرما می‌تواند به شدت از قدرت پنل خورشیدی بکاهد [۳۹، ۱۸].

● رطوبت نسبی: رطوبت مقدار آب موجود در هوا است و بخش زیادی از انرژی خورشید را جذب می‌کند. افزون بر این، قرارگیری رطوبت بر روی سلول‌های خورشیدی و نفوذ به محفظه آن‌ها، راندمان آن‌ها را تا ۴۰٪ کاهش می‌دهد [۳۷، ۲۲].

● سرعت باد: سرعت باد یک مقدار مهم جوی است، که در اثر حرکت هوا

جدول ۴، معیارها و نوع آن‌ها [۴۰]

شماره معیار	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
معیار	دما	رطوبت نسبی	سرعت باد	میزان تابش	جمعیت	میزان بارندگی	تعداد روزهای غبار آلود	ارتفاع از سطح دریا	شیب زمین	فاصله از پست برق	فاصله از جاده
نوع معیار	-	-	+	+	-	-	-	+	-	-	-



شکل ۴، نمودار کلی پتانسیل سنجی

۱۱ شاخص است و مقدارهای آن در جدول ۵، نشان داده شده است.

### روش‌شناسی

وقتی صحبت از تصمیم‌گیری به میان می‌آید، که این فرایند تصمیم‌گیری می‌تواند شامل هر چیزی باشد، یعنی هدف انتخاب کردن می‌باشد. در بسیاری از زمان‌ها تصمیم‌گیری و انتخاب دشوار می‌شود، به‌ویژه هنگامی که معیارهای کمی و کیفی گوناگون و متضادی پیش رو باشد. در چنین مواقعی تصمیم‌گیری چند معیاره گزینه مناسبی خواهد بود، که در ادامه به شرح تعدادی از این روش‌ها پرداخته می‌شود.

### آنتروپی شانون

پس از بی‌مقیاس‌سازی مقدارهای مربوط به هر شاخص، بایستی اهمیت نسبی شاخص‌ها نسبت به یکدیگر را مشخص نمود. برای انجام آن، ۴ روش وجود دارد، که در پژوهش حاضر، از روش آنتروپی

• فاصله از جاده: نزدیکی نیروگاه‌های خورشیدی به مسیرهای حمل و نقل، به عنوان یک عامل اقتصادی در نظر گرفته شده است. در حقیقت، نزدیکی به جاده هزینه‌های اضافی را که با ایجاد زیرساخت‌های حمل و نقل جدید، انتقال انرژی، رفت و آمد پرسنل، پشتیبانی واحد و آسیب‌های زیست محیطی تحمیل می‌شود، کاهش می‌دهد. در نتیجه هر چقدر فاصله از جاده کمتر باشد، برای احداث نیروگاه خورشیدی مناسب‌تر است [۲۷، ۲۹].

### ماتریس تصمیم‌گیری

نخستین گام در همه فناوری‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، که هدف انتخاب گزینه بهینه است، تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری می‌باشد. ماتریس تصمیم‌گیری یک ماتریس برای ارزیابی تعدادی گزینه، براساس تعدادی از معیارها است، یعنی ماتریسی که در آن هر گزینه براساس تعدادی معیار، امتیازدهی شده باشد. ماتریس تصمیم‌گیری در این مطالعه، یک ماتریس ۱۱\*۹، که دارای ۹ گزینه و



جدول ۵، ماتریس تصمیم‌گیری [۳۴،۳۶،۴۲،۴۳]

گزینه	معیار ۱ (درجه سلسیوس)	معیار ۲ (درصد)	معیار ۳ (متر بر ثانیه)	معیار ۴ (وات بر متر مربع)	معیار ۵ (نفر)	معیار ۶ (میلی‌متر)	معیار ۷ (روز)	معیار ۸ (متر)	معیار ۹ (درصد)	معیار ۱۰ (کیلومتر)	معیار ۱۱ (کیلومتر)
۱	۱۶/۲۵	۳۶/۴۲	۴/۱۴۶	۷۹۵/۸	۱۹۶۱۲۶۰	۱۲۵	۵۰	۱۵۷۵	۰/۴	۴۴	۰/۲
۲	۲۴/۳۵	۶۴/۹۹	۳/۳۵۶	۷۰۶/۴	۲۲۳۵۰۴	۲۶۸	۵۲	۱۱	۰/۰۵	۳/۶	۰/۹
۳	۲۷/۱۹	۶۳/۳۶	۲/۷۳۹	۷۶۳/۸	۵۲۶۶۴۸	۱۷۶/۱	۱۳۹	۱۷	۱/۷	۰/۷	۰/۳
۴	۱۰/۸۸	۵۰/۱۲	۲/۸۷	۷۲۸/۸	۵۵۴۴۰۶	۳۱۷/۷	۳۳	۱۸۱۸	۱/۹	۳	۰/۷
۵	۱۷/۱	۲۹/۹	۲/۷۶۹	۷۸۹/۹	۵۳۷۷۱۸	۱۴۸	۲۳	۱۷۶۴	۴/۴	۷۵	۰/۷
۶	۱۳/۶۲	۵۲/۸۱	۲/۸۱۳	۶۹۷/۵	۳۰۰۱۱۸۴	۲۵۱/۵	۱۱	۱۰۲۷	۰/۳	۶۲	۰/۱
۷	۱۸/۳۱	۳۳/۶۹	۳/۳۴	۷۹۳/۶	۵۸۷۷۳۰	۸۹/۳	۸۵	۱۳۸۶	۰/۵	۱۰	۰/۱۵
۸	۱۶/۹۹	۳۸/۳۸	۲/۴۵۸	۷۳۷/۳	۸۶۹۳۷۰۶	۳۲۶/۶	۲۴	۱۲۱۴	۱/۱	۱۴	۰/۴۸
۹	۱۱/۹۳	۵۱/۹۳	۳/۲۷۸	۷۲۴/۵	۱۵۵۸۶۹۳	۲۸۳/۸	۲۸	۱۴۰۲	۱/۲	۱۳	۰

ترجیح‌های تصمیم‌گیرندگان استفاده می‌شود، که توسط هوانگ<sup>۱</sup> و یون<sup>۲</sup> در سال ۱۹۸۱ میلادی، ارائه شده است. در این روش پس از بی‌مقیاس کردن ماتریس تصمیم با استفاده از ضریب‌های وزن معیارها، ماتریس تصمیم بی‌مقیاس وزن‌دار به دست آمده و با توجه به این ماتریس، امتیاز هر گزینه محاسبه می‌شود [۴۶]. پس از محاسبه‌ی اوزان شاخص‌ها و ماتریس نرمال شده به روش خطی، مرحله‌های روش مجموع ساده وزنی، به شرح زیر می‌باشد [۴۶].

گام اول: محاسبه‌ی ماتریس بی‌مقیاس موزون

$$V = N * W \quad (5)$$

گام دوم: انتخاب بهترین گزینه با استفاده از معیار زیر

$$A^* = A_i \mid \text{Max} \sum_{j=1}^n n_{ij} w_j \quad (6)$$

که در این معادله‌ها،  $V$  ماتریس بی‌مقیاس موزون،  $W$  ماتریس ستونی اوزان شاخص‌ها و  $N$  ماتریس بی‌مقیاس شده، به روش خطی است، در روش خطی، هر درایه بی‌مقیاس شده ( $n_{ij}$ ) برای شاخص‌های که جنبه مثبت داشته باشند، از معادله  $\frac{a_{ij}}{\text{Max} a_{ij}}$  و برای شاخص‌های که جنبه منفی داشته باشند، از معادله  $1 - \frac{a_{ij}}{\text{Max} a_{ij}}$  به دست می‌آید، که در هر دو معادله،  $a_{ij}$  درایه‌های ماتریس تصمیم‌گیری می‌باشد.

در شکل ۵، فلوجارت روش مجموع ساده وزنی، نشان داده شده است. در این شکل که مرحله‌های تصمیم‌گیری با روش مجموع ساده وزنی به صورت خلاصه نشان داده شده است، دیده می‌شود، که این روش، تنها دارای ۳ مرحله است و نسبت به بقیه روش‌های تصمیم‌گیری ساده‌تر و به نسبت سادگی روشی کارآمد نیز می‌باشد.

شنون برای محاسبه‌ی اوزان شاخص‌ها استفاده شده است. ایده اصلی روش آنتروپی شنون، بر پایه پراکندگی هرچه بیشتر در مقدارهای یک شاخص، استوار است، بدین صورت که هرچه پراکندگی در مقدارهای یک شاخص بیشتر باشد، آن شاخص از اهمیت بیش‌تری برخوردار است. بنابراین برای محاسبه اوزان شاخص‌ها به ترتیب زیر عمل می‌شود (m تعداد گزینه‌ها می‌باشد) [۴۴، ۴۵].

گام اول: محاسبه  $P_{ij}$

$$P_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}}; \quad \square_{IJ} \quad (1)$$

گام دوم: محاسبه مقدار آنتروپی  $E_j$

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

گام سوم: محاسبه مقدار عدم اطمینان  $d_j$

$$d_j = 1 - E_j \quad (3)$$

گام چهارم: محاسبه‌ی اوزان  $w_j$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}; \quad \square \quad (4)$$

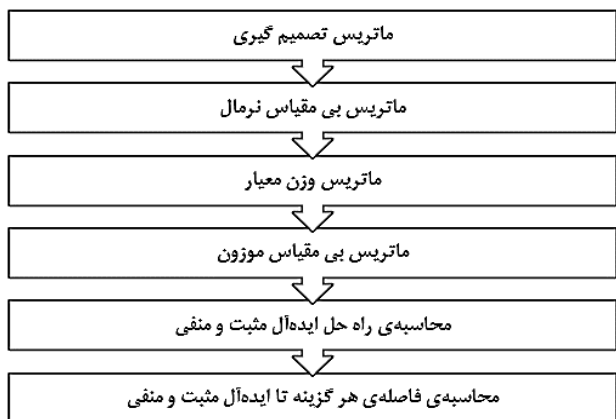
که در این معادله‌ها  $a_{ij}$  درایه‌های ماتریس تصمیم‌گیری و  $P_{ij}$ ، هر درایه نرمال شده می‌باشد و  $K$ ، یک مقدار ثابت است، تا  $E_j$  را بین ۰ و ۱ نگه دارد.

#### روش مجموع وزنی ساده

این روش، از ساده‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه است، چرا که در این روش از یک تابع افزایش خطی، برای نمایش

(۱) Hwang

(۲) Yoon



شکل ۶، فلوجارت روش تاپسیس

مقدار آن معیار، ایده‌آل مثبت است و برای معیارهای مثبت، بزرگ‌ترین مقدار آن معیار، ایده‌آل مثبت است. راه‌حل ایده‌آل منفی ( $V_j^-$ )، که بردار بدترین مقدارهای هر شاخص ماتریس بی‌مقیاس موزون است، برای معیارهای منفی، بزرگ‌ترین مقدار آن معیار، ایده‌آل منفی است. برای معیارهای مثبت، کوچک‌ترین مقدار آن معیار، ایده‌آل منفی است. گام سوم: محاسبه‌ی فاصله‌ی هر گزینه تا ایده‌آل مثبت و منفی

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

که،  $d_i^+$ ، فاصله تا ایده‌آل مثبت و در معادله ۹،  $d_i^-$ ، فاصله تا ایده‌آل منفی است.

گام چهارم: محاسبه نزدیکی نسبی

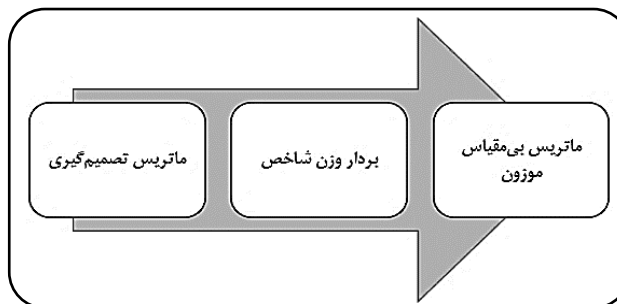
$$CL_i^* = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (10)$$

در معادله ۱۰، نیز  $CL_i^*$  نزدیکی نسبی گزینه  $i$  ام است.

در شکل ۶، فلوجارت روش تاپسیس، نشان داده شده است. در این شکل که مرحله‌های تصمیم‌گیری با روش تاپسیس به صورت خلاصه نشان داده شده است، دیده می‌شود که این روش دارای ۶ مرحله است و یک روش به نسبت کوتاه و دقیق است که بسیار مورد توجه همگان بوده است.

#### روش الکترون

این روش اولین بار توسط بنایون<sup>۲</sup> در سال ۱۹۶۶ میلادی، معرفی شد و پس از آن توسط روی<sup>۳</sup> و ون دلف<sup>۴</sup> توسعه داده شد. در این روش همه



شکل ۵، نمودار روش مجموع ساده وزنی

#### روش تاپسیس

روش تاپسیس، یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه است، که به رتبه‌بندی گزینه‌ها می‌پردازد. در این روش از ۲ مفهوم حل ایده‌آل و شباهت به حل ایده‌آل، استفاده شده است. حل ایده‌آل حلی است، که از هر نظر بهترین باشد، که در عمل وجود ندارد، پس سعی بر آن است که جواب به حل ایده‌آل نزدیک باشد. در این روش هرچه گزینه به گزینه ایده‌آل شباهت بیشتری داشته باشد، رتبه بهتری کسب می‌کند. این روش از روش‌های جبرانی نیز محسوب می‌شود، یعنی وزن تمامی گزینه‌ها و معیارها در تصمیم‌گیری دخالت داده می‌شود و هیچ وزنی نادیده گرفته نمی‌شود. همچنین این روش دارای پایه ریاضی مناسب است، که با فاصله‌ها سر و کار دارد. روش تاپسیس بیشترین فاصله از بدترین گزینه و کمترین فاصله از بهترین گزینه را به عنوان گزینه بهینه انتخاب می‌کند، این دلایل، روش تاپسیس را جزو برترین روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره قرار داده است [۴۷]. در این روش، نخست وزن شاخص‌ها به روش آنتروپی شنون محاسبه می‌شود، سپس در ماتریس نرمال شده به روش نرم، ضرب می‌شود و ماتریس بی‌مقیاس شده موزون، به دست می‌آید، ادامه مرحله‌های روش تاپسیس به شرح زیر است [۴۵، ۴۷].

گام اول: محاسبه ماتریس بی‌مقیاس موزون

$$V = N * W_{n*m} \quad (7)$$

در معادله (۷)،  $V$  ماتریس بی‌مقیاس موزون،  $W$  ماتریس قطری اوزان شاخص‌ها و  $N$  ماتریس بی‌مقیاس شده به روش نرم است، که در روش نرم، هر درایه بی‌مقیاس شده ( $N_{ij}$ ) از معادله  $\frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_{ij}^2}}$  به دست می‌آید.

گام دوم: محاسبه راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی

راه‌حل ایده‌آل مثبت ( $V_j^+$ )، که بردار بهترین مقدارهای هر شاخص ماتریس بی‌مقیاس موزون است، برای معیارهای منفی، کوچک‌ترین

(۱) Norm

(۳) Roy

(۲) Benayun

(۴) Van delf

معیار، عددی بین ۰ و ۱ است و هرچه این مقدار بیش‌تر باشد، بیانگر آن است که  $A_{ik}$  برتری بیش‌تری بر  $A_i$  دارد و برعکس [۴۰]. همچنین نسبت عدم مطلوبیت مجموعه‌ی ناهماهنگ  $k$  و  $l$  به کل ناهماهنگی در شاخص‌ها، توسط معیار  $NI_{kl}$  اندازه‌گیری می‌شود. گام چهارم: محاسبه حد آستانه، با استفاده از معادله‌های (۵) و (۶) به ترتیب برای ماتریس هم‌هنگ و ماتریس ناهماهنگ و استفاده از روش متعارف متوسط‌گیری و تشکیل ماتریس‌های هم‌هنگ مؤثر (H) و ماتریس ناهماهنگ مؤثر (G)، انجام می‌شود. اگر هر عنصر ماتریس  $I$  کوچک‌تر از مقدار  $\bar{I}$  (حد آستانه) باشد، عنصر نظیر آن در ماتریس هم‌هنگ مؤثر (H) مقدار ۰ و در صورتی که هر عنصر ماتریس  $I$  بزرگ‌تر یا مساوی مقدار  $\bar{I}$  (حد آستانه) باشد، عنصر نظیر آن در ماتریس هم‌هنگ مؤثر (H) مقدار ۱ اختیار می‌کند. این عمل در ماتریس ناهماهنگ مؤثر (G)، برعکس ماتریس هم‌هنگ مؤثر (H) می‌باشد.

$$\bar{I} = \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^m \frac{I_{kl}}{m(m-1)} \quad \text{if: } I_{kl} \geq \bar{I} \rightarrow H_{kl} = 1, I_{kl} < \bar{I} \rightarrow H_{kl} = 0 \quad (17)$$

$$\bar{NI} = \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^m \frac{NI_{kl}}{m(m-1)} \quad \text{if: } NI_{kl} \geq \bar{NI} \rightarrow G_{kl} = 0, NI_{kl} < \bar{NI} \rightarrow G_{kl} = 1 \quad (18)$$

گام پنجم: محاسبه ماتریس کلی مؤثر با ترکیب ماتریس هم‌هنگ مؤثر (H) و ماتریس ناهماهنگ مؤثر (G)، با استفاده از معادله (۱۹) به‌دست می‌آید. این ماتریس، ترتیب برتری راهکارهای گوناگون نسبت به یکدیگر را نشان می‌دهد و می‌توان گفت  $A_k$  بر  $A_l$  برتری دارد، هرگاه  $F_{lk} = 1$  باشد. بنابراین اگر برای حداقل یک  $l$ ،  $F_{lk} = 1$  و برای سایر  $l$  ها،  $F_{lk} = 0$  باشد، گزینه‌ی برتر نسبت به دیگر گزینه‌ها،  $A_k$  می‌باشد.

$$F_{kl} = H_{kl} * G_{kl} \quad (19)$$

در شکل ۷، فلوچارت روش الگوریتم نشان داده شده است. در این شکل مرحله‌های تصمیم‌گیری با روش الگوریتم به صورت خلاصه نشان داده شده است. دیده می‌شود که این روش دارای ۹ مرحله است. همچنین این روش تصمیم‌گیری بر خلاف روش‌های دیگر، گزینه‌ها را به صورت تک تک با هم مقایسه کرده و برتری آن‌ها را نسبت به هم نشان می‌دهد.

### اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی و اطمینان از درستی نتیجه‌های به‌دست آمده در این پژوهش از پژوهش دیگری بهره گرفته شده است. یکی از

گزینه‌ها با استفاده از مقایسه‌های غیر رتبه‌ای مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، که بدین ترتیب گزینه‌های غیر مؤثر، حذف می‌شوند. در اصل هدف روش الگوریتم، جداکردن گزینه‌هایی است که در ارزیابی بر اساس بیش‌تر معیارها ترجیح داده می‌شوند. کلیه مرحله‌های فناوری الگوریتم، بر مبنای یک مجموعه هم‌هنگ و یک مجموعه ناهماهنگ پایه‌ریزی می‌شود، که به همین خاطر به آنالیز هم‌هنگی معروف است. الگوریتم این روش در شکل ۷، نشان داده شده است [۴۸].

گام اول: تشکیل ماتریس بی‌مقیاس (M)

$$N_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} \quad (11)$$

که در معادله (۱۱)،  $N_{ij}$ ، درایه‌های ماتریس بی‌مقیاس شده به روش نرم و  $a_{ij}$ ، درایه‌های ماتریس تصمیم‌گیری است.

گام دوم: تشکیل ماتریس بی‌مقیاس موزون (V)، با ضرب ماتریس بی‌مقیاس (M) در ماتریس قطری (W) (وزن شاخص‌های به‌دست آمده از روش آنتروپی شانون)

$$V = N * W_{n*n} \quad (12)$$

در این مرحله کلیه گزینه‌ها به صورت زوجی برای همه شاخص‌ها ارزیابی می‌شوند و مجموعه‌های هم‌هنگ و ناهماهنگ تشکیل می‌شود. ماتریس هم‌هنگ از گزینه‌ها، شامل کلیه شاخص‌هایی خواهد بود، که گزینه  $A_k$  بر گزینه  $A_l$  به ازای آن شاخص‌ها، مطلوبیت بیش‌تری داشته باشد. مجموعه ناهماهنگ شاخص‌هایی را شامل می‌شود که در آن‌ها گزینه  $A_k$  نسبت به گزینه  $A_l$ ، مطلوبیت کم‌تری داشته باشد. مجموعه هم‌هنگ با  $S_{k,l}$  و مجموعه ناهماهنگ با  $D_{k,l}$  نشان داده می‌شود. اگر شاخص موردنظر، ماهیت مثبت داشته باشد، خواهیم داشت:

$$S_{k,l} = \{j | V_{kj} \geq V_{lj}\}, D_{k,l} = \{j | V_{kj} < V_{lj}\}; \quad j = 1, \dots, m \quad (13)$$

و اگر شاخص موردنظر ماهیتش منفی باشد، خواهیم داشت:

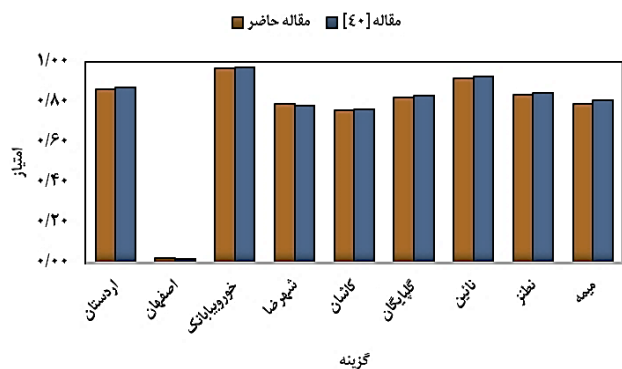
$$S_{k,l} = \{j | V_{kj} \leq V_{lj}\}, D_{k,l} = \{j | V_{kj} > V_{lj}\}; \quad j = 1, \dots, m \quad (14)$$

گام سوم: محاسبه ماتریس هم‌هنگ ( $I_{kl}$ ) و ماتریس ناهماهنگ ( $NI_{kl}$ ) با استفاده از معادله‌های (۳) و (۴)

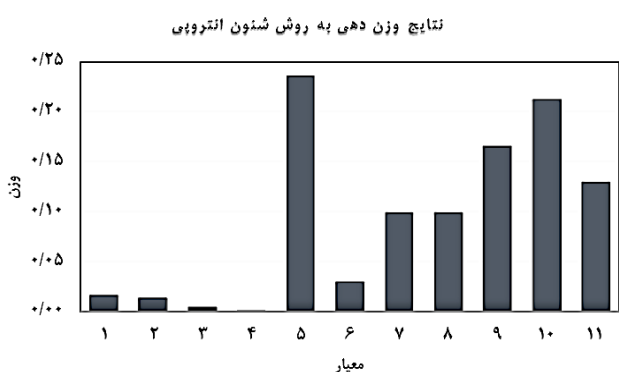
$$I_{kl} = \sum W_j, j \in A_{kl} \quad (15)$$

$$NI_{kl} = \frac{\max |V_{kj} - V_{lj}|, j \in D_{kl}}{\max |V_{kj} - V_{lj}|, j \in S_{kl}} \quad (16)$$

معیار  $I_{kl}$ ، اهمیت نسبی  $A_k$  نسبت به  $A_l$  را بیان می‌کند. مقدار این



شکل ۸، اولویت‌بندی صورت گرفته با روش تاپسیس در مقاله [۴۰] و مقاله حاضر

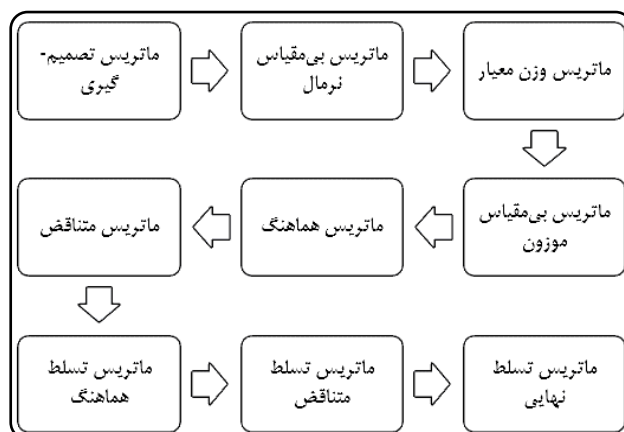


شکل ۹، وزن‌های شاخص‌ها

شیب و فاصله از جاده به ترتیب با مقدار  $0/1645$  و  $0/1285$ ، که اختلاف  $28/01\%$  از هم دارند، از وزن بیش‌تری نسبت به سایر شاخص‌ها برخوردار هستند و شاخص‌های ارتفاع از سطح دریا و تعداد روزهای غبارآلود در اولویت پنجم و ششم قرار دارند، که اختلاف ناچیز  $0/2\%$  از هم دارند. معیار تعداد روز بارانی نیز با اختلاف  $234/2\%$  پس از معیار تعداد روزهای غبارآلود در اولویت هفتم و پس از آن، معیارهای دما، رطوبت نسبی و سرعت باد قرار دارد. کم‌ترین وزن نیز مربوط به معیار میزان تابش افقی با مقدار  $0/0005$  است.

#### مدل تصمیم‌گیری مجموع ساده وزنی

این روش با نام روش ترکیب خطی وزن‌دار نیز شناخته می‌شود، چرا که در این روش از یک تابع افزایش خطی برای نمایش ترجیح‌های تصمیم‌گیرندگان استفاده می‌شود. با این حال این فناوری زمانی کاربرد پیدا می‌کند، که فرض شود برتری‌های مستقل یا مجزا از هم هستند. در شکل ۱۰، که نتیجه‌های اولویت‌بندی با این روش را نشان می‌دهد، زاهدان با مقدار  $0/488904$  و با اختلاف  $37/5\%$  نسبت به تبریز در اولویت اول قرار دارد. دلیل اصلی اولویت زاهدان به گزینه‌های



شکل ۷، فلوچارت روش الکترون

روش‌های مورد استفاده در هر دو پژوهش، که برای اولویت‌بندی نیروگاه خورشیدی استفاده شده است، روش تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس است، همچنین شهر اصفهان در هر دو پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش [۴۰]، اولویت‌بندی برق خورشیدی برای ۹ شهر استان اصفهان، با ۴ روش تصمیم‌گیری انجام شده است، اولویت‌بندی با همان معیارها و گزینه‌های با روش تاپسیس در این پژوهش نیز انجام شد و نتیجه‌های به‌دست آمده از هر دو پژوهش در شکل ۸، نشان داده شده است، که دیده می‌شود نتیجه‌های برآمده در پژوهش [۴۰] با نتیجه‌های به دست آمده از روش تاپسیس در این پژوهش، به تقریب یکی است و اولویت‌بندی نیز در هر دو پژوهش یکسان می‌باشد. پس می‌توان از صحت نتیجه‌هایی که در این پژوهش به‌دست آمده، اطمینان به دست آورد.

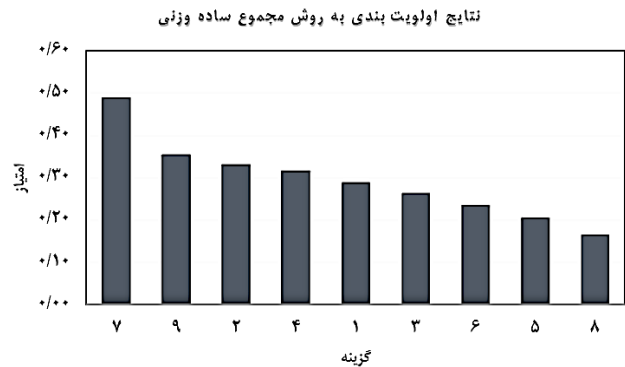
## نتیجه‌ها و بحث

### اوزان شاخص

در تصمیم‌گیری همیشه یک‌سری شاخص‌ها و گزینه‌ها دخیل هستند. اهمیت شاخص‌ها در تصمیم‌گیری به‌طور قطع برابر نیست، دانستن ضریب اهمیت یا وزن هر یک از این شاخص‌ها در تصمیم‌گیری ضروری است. وزن هر شاخص، اهمیت نسبی آن را نسبت به شاخص‌های دیگر بیان می‌کند. در این پژوهش، از روش آنتروپی شنون برای وزن‌دهی شاخص‌ها استفاده شده است. اساس روش آنتروپی شنون، پراکندگی در مقدارهای شاخص‌ها است. نتیجه‌های این روش وزن‌دهی، که در شکل ۹ دیده می‌شود، نشان می‌دهد، که معیار جمعیت، دارای وزن  $0/23347$  است و با اختلاف  $11/13\%$  نسبت به معیار فاصله از پست برق بیش‌ترین وزن را از بین معیارهای بررسی شده به خود اختصاص داده است. پس از آن‌ها معیارهای



شکل ۱۱، اولویت‌بندی با روش تاپسیس



شکل ۱۰، اولویت‌بندی با روش مجموع ساده وزنی

و مشهود نیز به دلیل داشتن اختلاف ۱۵/۵٪ پس از اصفهان در اولویت هفتم قرار گرفته است. در این روش نیز مانند روش مجموع ساده وزنی، تهران با مقدار ۰/۴۴۵۲ و اختلاف ۱۴/۶۷٪ پایین‌تر از کرمان در اولویت آخر قرار گرفت، که قرارگیری تهران در اولویت آخر به علت جمعیت زیاد این شهر است.

#### مدل تصمیم‌گیری الکترون

اساس کار این روش بر مبنای معادله‌های غیررابطه‌ای است، بنابراین جواب‌های به دست آمده به صورت مجموعه‌ای از رتبه‌ها خواهد بود. نتیجه‌های این روش که در شکل ۱۲ آمده است، نشان می‌دهد که زاهدان و تبریز با ۵ برتری نسبت به سایر گزینه‌ها در اولویت هستند. فاصله به نسبت کم از پست برق و جاده و نیز پایین بودن درصد شاخص شیب زمین، دلیل اصلی برتری زاهدان به ۷ گزینه دیگر است و دلیل اصلی برتری تبریز نیز، ارتفاع به نسبت زیاد از سطح دریا به عنوان پارامتر مثبت و نداشتن فاصله از جاده به عنوان پارامتر منفی است، پس از این ۲ شهر، همدان با ۴ برتری در رتبه سوم و بوشهر و اصفهان نیز با ۳ برتری به گزینه‌های دیگر، در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. بوشهر و اصفهان نیز با ۲ برتری بالاتر از شهرهای تهران و کرمان قرار گرفتند، که به هیچ گزینه دیگری برتری ندارند و در اولویت آخر هستند. تهران به دلیل داشتن جمعیت زیاد و کرمان نیز به دلیل زیاد بودن فاصله از پست برق و زیاد بودن درصد شیب زمین، که جزو شاخص‌های منفی می‌باشد، در این اولویت قرار گرفته‌اند. در اولویت‌بندی با این روش، شهرهای که تعداد برتری آن‌ها برابر است، هیچ اولییتی نسبت به هم ندارند.

#### آنالیز حساسیت

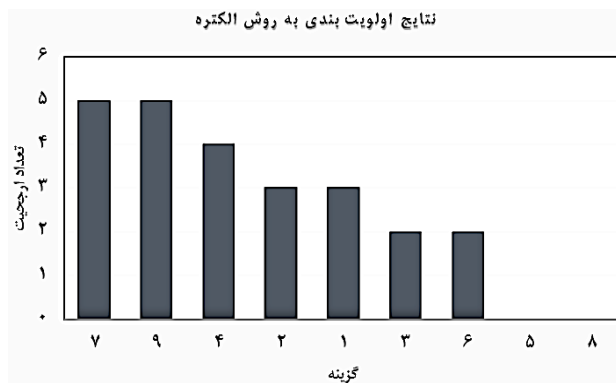
به منظور دستیابی به نتیجه‌های درست‌تر و دارای ضریب اطمینان بیشتر، اقدام به انجام آنالیز حساسیت بر روی وزن معیارها و راهبردهای

دیگر در این روش تصمیم‌گیری، کم بودن مقدار معیارهای فاصله از پست برق، شیب زمین و فاصله از جاده می‌باشد، که هر ۳ پارامترهای منفی هستند و اوزان زیادی را در بین شاخص‌ها دارند. بوشهر، همدان و اصفهان نیز با اختلاف کمتر از ۹/۸٪ نسبت به هم در اولویت‌های سوم تا پنجم قرار گرفتند. بندرعباس و مشهد که به ترتیب بیش‌ترین و کمترین تعداد روز غبارآلود را دارند، با اختلاف ۱۱/۶٪ از هم، پس از اصفهان به ترتیب در اولویت‌های ششم و هفتم قرار گرفته‌اند، همچنین تهران و کرمان پایین‌ترین رده را در این روش، به ترتیب با مقدارهای ۱۶۷۰/۱۵ و ۲۰۵۶۳۱/۲۰ به خود اختصاص داده‌اند و اختلاف ۲۳/۱۲٪ از هم دارند. جمعیت زیاد شهر تهران، اصلی‌ترین دلیل قرارگیری این شهر در اولویت آخر می‌باشد. همان‌گونه که از نمودار پیداست به غیر از زاهدان که با اولویت‌های بعدی خود اختلاف زیادی دارد، اولویت‌های دوم تا آخر اختلاف کمی باهم دارند.

#### مدل تصمیم‌گیری تاپسیس

در این روش از ۲ مفهوم حل ایده‌آل و شباهت به حل ایده‌آل استفاده شده است. حل ایده‌آل حلی است، که از هر نظر بهترین باشد، که به‌طورعموم در عمل وجود نداشته و سعی بر آن است که به آن نزدیک شویم. در شکل ۱۱، نتیجه‌های اولویت‌بندی این روش، نشان داده شده است. در این روش همانند روش اول، زاهدان با مقدار ۰/۸۴۸۵ در اولویت اول قرار گرفته است و با تبریز که در اولویت دوم قرار دارد، ۲/۴۲٪ اختلاف دارد، که دلیل اصلی اولویت زاهدان به گزینه‌های دیگر، فاصله به نسبت کم از پست برق و جاده و همچنین کم بودن درصد شیب زمین می‌باشد، که هر سه جزو شاخص‌های منفی هستند. گزینه‌های همدان، بوشهر، بندرعباس و اصفهان به ترتیب در اولویت سوم تا ششم قرار گرفتند، که اختلافشان بیش‌ترین تعداد روز غبارآلود، با نسبت به هم کم‌تر از ۳/۷٪ است

(دما) است، که نسبت به حالت اول، اصفهان از اولویت ششم به اولویت سوم رسید و مشهد نیز بالاتر از بندرعباس در اولویت ششم قرار گرفت. در حالت سوم نسبت به حالت دوم، ۲۲۹٪ وزن معیار ۱ (دما) و ۱۷۷۷/۸٪ وزن معیار ۳ (سرعت باد) افزایش داشته و وزن معیار ۵ (جمعیت) ۲۸/۶٪ و همچنین وزن معیار ۱۱ (فاصله از جاده) ۳۸/۹٪ کاهش داشته است، که همانند حالت پیش معیار ۹ (شیب زمین) بیشترین وزن را دارد، ولی در این حالت کمترین وزن مربوط به معیار ۲ (رطوبت نسبی) می‌باشد، این تغییر وزن شاخص‌ها، بوشهر را از اولویت چهارم به اولویت سوم و بالاتر از اصفهان رسانده و تهران نیز بالاتر از بندرعباس در اولویت هفتم قرار گرفته است. در حالت چهارم، به‌خاطر افزایش ۳۰۸/۶٪ وزن معیار ۲ (رطوبت نسبی) و ۵۹/۸٪ وزن معیار ۴ (تابش افقی) نسبت به حالت سوم و کاهش وزن معیارهای ۹ و ۱۰ (شیب زمین و فاصله تا پست) به ترتیب به مقدار ۳۶/۵٪ و ۵۲/۰۸٪ معیار ۴ (میزان تابش افقی) بیش‌ترین وزن و معیار ۱ (دما) کم‌ترین وزن را کسب کردند، که این تغییرها در وزن معیارها سبب شده تا نسبت به حالت پیش، بوشهر از اولویت سوم به اولویت ششم تنزل کند و همچنین زاهدان در اولویت دوم پس از تبریز قرار گیرد. در حالت پنجم نسبت به حالت چهارم، وزن معیارهای ۶ و ۷ (تعداد روزای بارانی و تعداد روزای غبارآلود) به ترتیب به مقدار ۵۵/۹٪ و ۳۰/۴٪ افزایش داشته و وزن معیارهای ۴ و ۹ (تابش افقی و شیب زمین) به ترتیب، به میزان ۳۱/۲٪ و ۵۴/۷٪ کاهش داده شد، که در نتیجه این تغییرها، بیش‌ترین وزن و کمترین وزن به ترتیب به معیارهای ۶ و ۲ (بارندگی و دما) اختصاص یافت، نتیجه این تغییرها، قرارگیری بندرعباس در اولویت آخر است و دیگر اولویت‌ها نسبت به حالت پیش تغییری نداشته است. در حالت آخر با افزایش اوزان معیارهای ۱، ۵ و ۸ (دما، جمعیت و ارتفاع از سطح دریا)، به ترتیب به مقدار ۲۲۳/۷٪، ۲۶/۸٪ و ۲۰/۲٪ و نیز کاهش اوزان معیارهای ۶، ۷ و ۹ (تعداد روزای بارانی، غبارآلود و درصد شیب) به ترتیب به میزان ۶۹/۱٪، ۱۵/۵٪ و ۲۶/۸٪ نسبت به حالت پنجم، بیش‌ترین وزن و کمترین وزن، برخلاف حالت پیش، به معیارهای ۱ و ۶ (دما و بارندگی) رسید. در وزن‌های این حالت، همدان در اولویت سوم و تهران در اولویت هشتم و تنها بالاتر از بندرعباس قرار گرفته‌اند. در هر ۶ حالت آنالیز حساسیت برای هر سه روش تصمیم‌گیری دیده می‌شود، که زاهدان و تبریز، به گزینه‌های دیگر اولویت دارند. همچنین در همه حالت‌ها، تهران و کرمان جزو اولویت‌های آخر قرار گرفتند، ولی نمی‌توان به طور قطع به بهینه‌ترین اولویت‌بندی برای سایر گزینه‌ها دست یافت. در ۳ روش استفاده شده در این پژوهش، روش تاپسیس نسبت به ۲ روش دیگر، کم‌ترین وابستگی را به وزن‌دهی معیارها دارد.



شکل ۱۲، اولویت‌بندی با روش الکتراه

به دست آمده از ۳ روش تصمیم‌گیری مجموع ساده وزنی، تاپسیس و الکتراه شد. برای انجام تجزیه و تحلیل حساسیت، سناریوهای گوناگون برای اوزان معیارها در نظر گرفته شد و تأثیر کلی آن‌ها بر نتیجه‌های پتانسیل‌سنجی انرژی خورشیدی، برای ۳ روش تصمیم‌گیری مجموع ساده وزنی، تاپسیس و الکتراه، مورد بررسی قرار گرفت. در وزن‌دهی با روش آنتروپی شانون، بیش‌ترین وزن به معیار جمعیت تعلق گرفت، که شاخصی منفی به شمار می‌رود. همچنین میزان تابش افقی و سرعت باد که هر دو پارامتری مثبت و مهم در نیروگاه‌های خورشیدی به شمار می‌روند، دارای کم‌ترین وزن هستند. در ۶ حالت با تغییر اوزان شاخص‌ها، اولویت‌بندی نیروگاه خورشیدی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت، که مقدار اوزان و نتیجه‌های آن در هر حالت آنالیز حساسیت، برای هر سه روش تصمیم‌گیری چند معیاره در جدول ۶ آمده است و شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ نیز نتیجه‌های آنالیز حساسیت را به ترتیب در روش مجموع ساده وزنی، تاپسیس و الکتراه نشان می‌دهد. در این میان نتیجه‌های آنالیز حساسیت روش تاپسیس (شکل ۱۴)، با توجه به تغییرهای صورت گرفته در اوزان شاخص‌ها، به تفصیل مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در حالت اول که نسبت به حالت پایه، اوزان معیارهای ۲ و ۴ (رطوبت نسبی و تابش افقی) به ترتیب ۲۳/۷٪ و ۲۰۰۰٪ افزایش و اوزان معیارهای ۱ و ۵ (دما و جمعیت) به ترتیب ۱۹/۱٪ و ۴۲/۶٪ کاهش داده شده است، این تغییرهای اوزان سبب شده تا معیار ۱۰ (فاصله تا پست) بیش‌ترین وزن و معیار ۳ (سرعت باد) کم‌ترین وزن را داشته باشد. نتیجه این تغییرها، نسبت به اولویت‌بندی حالت پایه، تنها تغییر جایگاه تهران و کرمان می‌باشد، که تهران در این حالت بالاتر از کرمان قرار گرفته است. در حالت دوم نسبت به حالت اول، وزن معیار ۶ (میزان بارندگی) ۲۰۴٪ افزایش و اوزان معیارهای ۵ و ۱۰ (جمعیت و فاصله از پست) نیز به ترتیب ۲۲/۳٪ و ۲۸/۴٪ کاهش داشته شده است. در این حالت بیش‌ترین وزن و کمترین وزن به ترتیب مربوط به معیار ۹ (شیب زمین) و معیار ۱

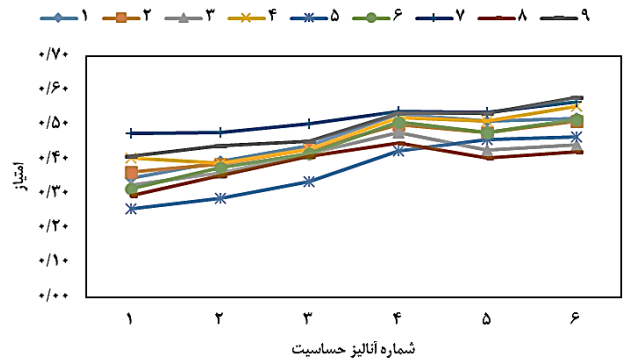
جدول ۶، آنالیز حساسیت در هر سه روش تصمیم‌گیری

اولویت‌بندی الکترون	اولویت‌بندی تاپسیس	اولویت‌بندی مجموع ساده وزنی	وزن معیار	شماره معیار	شماره آنالیز حساسیت
۸=۵<۶<۳<۱=۲=۴<۹=۷	۵<۸<۶<۱<۳<۲<۴<۹<۷	۵<۸<۶<۳<۱<۲<۴<۹<۷	۰/۰۱۳۱	۱	۱
			۰/۰۱۶۲	۲	
			۰/۰۰۴۵	۳	
			۰/۱۰۰۵	۴	
			۰/۱۳۴۷	۵	
			۰/۰۲۹۵	۶	
			۰/۰۹۸۶	۷	
			۰/۰۹۸۸	۸	
			۰/۱۶۴۵	۹	
			۰/۲۱۱۲	۱۰	
			۰/۱۲۸۵	۱۱	
۸=۵<۶=۲<۱=۳=۴<۹<۷	۵<۸<۳<۶<۴<۲<۱<۹<۷	۵<۸<۳<۶<۲<۴<۱<۹<۷	۰/۰۱۳۱	۱	۲
			۰/۰۱۶۲	۲	
			۰/۰۳۴۵	۳	
			۰/۱۰۰۴	۴	
			۰/۱۰۴۷	۵	
			۰/۰۸۹۴	۶	
			۰/۰۹۸۶	۷	
			۰/۰۹۸۸	۸	
			۰/۱۶۴۵	۹	
			۰/۱۵۱۲	۱۰	
			۰/۱۲۸۵	۱۱	
۸=۵=۳<۶=۱<۲<۴<۹=۷	۵<۳<۶<۸<۴<۱<۲<۹<۷	۵<۸<۳<۶<۴<۲<۱<۹<۷	۰/۰۴۳۱	۱	۳
			۰/۰۱۶۲	۲	
			۰/۰۸۴۵	۳	
			۰/۱۰۰۴	۴	
			۰/۰۷۴۷	۵	
			۰/۰۸۹۴	۶	
			۰/۰۹۸۶	۷	
			۰/۰۹۸۸	۸	
			۰/۱۶۴۵	۹	
			۰/۱۵۱۲	۱۰	
			۰/۰۷۸۵	۱۱	
۸=۵=۳<۶=۲<۱<۴<۷=۹	۵<۳<۸<۲<۶<۴<۱<۷<۹	۵<۸<۳<۲<۶<۴<۱<۹<۷	۰/۰۴۳۱	۱	۴
			۰/۰۶۶۲	۲	
			۰/۰۸۴۵	۳	
			۰/۱۶۰۴	۴	
			۰/۰۷۴۷	۵	
			۰/۰۸۹۴	۶	
			۰/۰۹۸۶	۷	
			۰/۰۹۸۸	۸	

جدول ۶، آنالیز حساسیت در هر سه روش تصمیم‌گیری (ادامه)

اولویت‌بندی اکثره	اولویت‌بندی تاپسیس	اولویت‌بندی مجموع ساده وزنی	وزن معیار	شماره معیار	شماره آنالیز حساسیت
۸=۵=۳<۶=۲<۱<۴<۷=۹	۵<۳<۸<۲<۶<۴<۱<۷<۹	۵<۸<۳<۲<۶<۴<۱<۹<۷	۰/۱۰۴۵	۹	۴ ادامه
			۰/۱۰۱۲	۱۰	
			۰/۰۷۸۵	۱۱	
۸=۵=۳=۲<۶<۱=۴<۷=۹	۳<۵<۸<۲<۶<۴<۱<۷<۹	۸<۳<۵<۲<۶<۴<۱<۹<۷	۰/۰۴۳۱	۱	۵
			۰/۰۶۶۲	۲	
			۰/۰۸۴۵	۳	
			۰/۱۱۰۴	۴	
			۰/۰۷۴۷	۵	
			۰/۱۳۹۴	۶	
			۰/۱۲۸۶	۷	
			۰/۰۹۸۸	۸	
			۰/۰۷۴۵	۹	
			۰/۱۰۱۲	۱۰	
			۰/۰۷۸۵	۱۱	
۸=۳=۲<۶=۵<۱<۷<۹<۴	۳<۸<۵<۲<۶<۱<۷<۴<۹	۸<۳<۵<۲<۶<۱<۴<۷<۹	۰/۱۳۹۵	۱	۶
			۰/۰۶۶۲	۲	
			۰/۰۸۴۵	۳	
			۰/۱۱۰۴	۴	
			۰/۰۹۴۷	۵	
			۰/۰۴۳	۶	
			۰/۱۰۸۶	۷	
			۰/۱۱۸۸	۸	
			۰/۰۵۴۵	۹	
			۰/۱۰۱۲	۱۰	
			۰/۰۷۸۵	۱۱	

در ۹ مرکز استان کشور با ۱۱ معیار گوناگون و ۳ مدل تصمیم‌گیری چند معیاره مجموع ساده وزنی، تاپسیس و اکثره، مورد بررسی قرار گرفت، وزن‌دهی آن‌ها با روش آنتروپی شتون انجام شد، که معیارهای جمعیت و میزان تابش افقی به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین وزن را کسب کردند. بررسی نتیجه‌های اولویت‌بندی نشان داد، که تبریز به دلیل داشتن کم‌ترین فاصله از جاده به عنوان شاخص منفی و زاهدان نیز به دلیل داشتن کمترین تعداد روز بارانی و فاصله کم از جاده به ترتیب عنوان مناسب‌ترین گزینه برای احداث نیروگاه خورشیدی انتخاب شدند. امتیاز زاهدان و میزان اختلاف آن با تبریز به ترتیب در روش مجموع ساده وزنی، ۰/۴۸۸۹۰۴ و ۰/۳۷/۵ است، در روش تاپسیس، ۰/۸۴۸۵ و ۰/۳/۴۲ و در روش اکثره، هر دو گزینه با ۵ برتری نسبت به سایر گزینه‌ها در اولویت هستند. امتیاز تهران به عنوان بدترین گزینه برای احداث نیروگاه خورشیدی و میزان

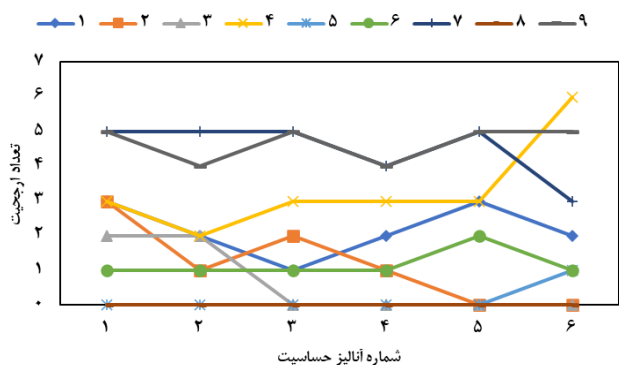


شکل ۱۳، تأثیر وزن شاخص‌ها بر روی انتخاب شهرها با استفاده از روش مجموع ساده وزنی

### نتیجه‌گیری

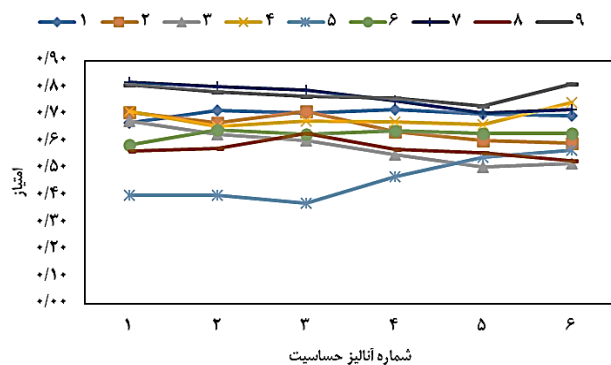
در این پژوهش بهینه‌ترین مکان برای نصب نیروگاه خورشیدی





شکل ۱۴، تأثیر وزن شاخص‌ها بر روی انتخاب شهرها با استفاده از روش الکترون

نتیجه‌های این مطالعه با پژوهش گزارش شده در [۴۰] در بخش‌های پیشین صورت گرفت، مقایسه‌ای نیز بین نتیجه‌های مطالعه حاضر با نتیجه‌های مطالعه‌های گزارش شده ((۲۱، ۲۴، ۲۶، ۳۱)) که در گزینه‌های مورد بررسی، وجه تشابه دارند، صورت گرفت. در [۲۱] و [۲۴] که در اولی ۲۵ شهر ایران و در دومی کل مناطق ایران بررسی شده است، نتیجه‌های آن‌ها به این صورت بود، که در هر دو پژوهش، سیستان و بلوچستان و هرمزگان همانند پژوهش حاضر به دیگر گزینه‌ها اولویت دارند و همچنین شهرهای شمال و شمال غرب ایران، از کم‌ترین پتانسیل برای احداث نیروگاه خورشیدی برخوردار هستند، ولی در این مطالعه، تبریز که در شمال غرب ایران واقع شده است، از اولویت بالایی برخوردار است، که متفاوت بودن معیارهای بررسی شده در این پژوهش نسبت به ۲ پژوهش ذکر شده، دلیل اصلی اختلاف در نتیجه‌ها می‌باشد. در پژوهش [۲۶]، شهر تهران و در پژوهش [۳۱] استان خراسان رضوی مورد بررسی قرار گرفته است و نتیجه‌های آن‌ها، پتانسیل پایین شهر تهران و شهر مشهد از نظر احداث نیروگاه خورشیدی را نشان می‌دهد، که نتیجه‌های آن‌ها با نتیجه‌های این مطالعه مطابقت دارد.



شکل ۱۳، تأثیر وزن شاخص‌ها بر روی انتخاب شهرها با استفاده از روش تاپسیس

اختلاف آن با کرمان که از نظر احداث نیروگاه خورشیدی فقط به تهران اولویت دارد، به ترتیب در روش مجموع ساده وزنی، ۰/۱۶۷۰۱۵ و ۰/۲۳/۱۲٪، در روش تاپسیس، ۰/۴۴۵۲ و ۰/۱۴/۶۷٪ و در روش الکترون، هر دو با ۰ برتری در اولویت آخر قرار گرفتند. جمعیت زیاد تهران، با توجه به این که معیار جمعیت بیش‌ترین وزن را در بین معیارهای مورد بررسی، در اختیار دارد، دلیل اصلی قرارگیری تهران در اولویت آخر است. بیشترین فاصله از جاده و پست برق و همچنین بیش‌ترین درصد شیب زمین نیز، باعث قرار گرفتن شهر کرمان در رده بدترین گزینه‌ها، برای احداث نیروگاه خورشیدی می‌باشد. در ۶ حالت گوناگون نیز، آنالیز حساسیت انجام شد، تا تأثیر تغییر اوزان معیارهای گوناگون روی نتیجه‌ها، مورد بررسی قرار گیرد. نتیجه‌های آنالیز حساسیت نشان می‌دهد، که در بیش‌تر حالت‌ها، زاهدان و تبریز به عنوان بهترین مکان‌ها برای نصب نیروگاه خورشیدی در ۳ روش تصمیم‌گیری استفاده شده در این پژوهش، انتخاب شدند و همچنین در مجموع شهر تهران و کرمان به عنوان بدترین اولویت‌ها در بین گزینه‌های مورد بررسی شناخته شدند، ولی در مورد اولویت‌بندی گزینه‌های دیگر نمی‌توان به طور قطع اظهار نظر کرد. همچنین دیده می‌شود، که اولویت‌بندی در هر سه روش، اختلاف کمی با هم دارد و روش تاپسیس، کم‌ترین حساسیت را نسبت به وزن شاخص‌ها از میان ۳ روش تصمیم‌گیری مورد استفاده در این پژوهش، دارد. در مقایسه با نتیجه‌های به دست آمده از روش تصمیم‌گیری و آنالیز حساسیت، نکته چشمگیر، قرار گرفتن تبریز بالاتر از مشهد و اصفهان با توجه به شرایط زیست محیطی این منطقه به عنوان منطقه‌ای سرد و کوهستانی همراه با بارش زیاد است. در بررسی نتیجه‌های این پژوهش با پژوهش‌های پیشین صورت گرفته برای احداث نیروگاه خورشیدی در ایران افزون بر این که صحت‌سنجی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۴

## مراجع

- [1] Belgasim B., Aldali Y., Abdunnabi M.J., Hashem G., Hossin K., *The Potential of Concentrating Solar Power (CSP) for Electricity Generation in Libya*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **90**: 1-15, (2018).
- [2] Sindhu S., Nehra V., Luthra S., *Investigation of Feasibility Study of Solar Farms Deployment using Hybrid AHP-TOPSIS Analysis: Case Study of India*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **73**: 496-511 (2017).
- [3] Wu Y., Zhang B., Wu C., Zhang T., Liu F., *Optimal Site Selection for Parabolic trough Concentrating Solar Power Plant using Extended PROMETHEE Method: A Case in China*, *Renewable Energy*, **143**: 1910-1927 (2019).
- [4] Munir S., Khan B., Abdullah A., Khan S., Naz S., *Computational Investigations of a Novel Charge Transfer Complex for Potential Application in Dye Sensitized Solar Cells*, *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, **39(6)**: 19-27 (2020).
- [5] Ayaz M., Kasi J., Kasi A., Bokhari M., Sohail M., Ullah S., Ullah S., *Natural Plant Trifolium Pratense, Mirabilis Jalapa and Bassia Scoparia Extract used as Photosensitizer in Dye Sensitized Solar Cell*, *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, **40(3)**: 872-880 (2021).
- [6] Shukla K., Sudhakar K., Baredar P., *Recent Advancement in BIPV Product Technologies: A Review*, *Energy and Buildings*, **140**: 188-195 (2017).
- [7] Shukla K., Sudhakar K., Baredar P., *Simulation and Performance Analysis of 110 kWp Grid-Connected Photovoltaic System for Residential Building in India: A Comparative Analysis of Various PV Technology*, *Energy Reports*, **2**: 82-88, (2016).
- [8] Ciriminna R., Meneguzzo F., Pecoraino M., Pagliaro M., *Rethinking Solar Energy Education on the Dawn of the Solar Economy*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **63**: 13-18, (2016).
- [9] Firouzjah K.G., *Assessment of Small-Scale Solar PV Systems in Iran: Regions Priority, Potentials and Financial Feasibility*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **94**: 267-274, (2018).
- [۱۰] ضامن م.، رضاخانی ن.، رجیبی م.، زینالی دانالو م.ع.ا.، *ارزیابی عملکرد سامانه ترکیبی آب گرم کن/ آب شیرین کن خورشیدی خانگی، شیمی و مهندسی شیمی ایران، ۳۴(۳): ۹۱ تا ۱۰۳ (۱۳۹۴)*.
- [11] Aly S., Jensen S., Pedersen A.B., *Solar Power Potential of Tanzania: Identifying CSP and PV Hot Spots through a GIS Multicriteria Decision Making Analysis*, *Renewable Energy*, **113**: 159-175, (2017).
- [12] Sadeghi N., Jamshidi A., Seyyedini M., *Detection of Mycobacterium Avium Subsp. Paratuberculosis in Pasteurized Milk Samples by Culture, Direct Nested PCR and PCR Methods in Northeast of Iran*, *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, **39(6)**: 251-25 (2020).

- [13] Yalcin M., F. Gul K., [A GIS-based Multi Criteria Decision Analysis Approach for Exploring Geothermal Resources: Akarcay basin \(Afyonkarahisar\) \*Geothermics\*, 67: 18-28, \(2017\).](#)
- [14] Mohsen M.S., Akash B.A., [Evaluation of Domestic Solar Water Heating System in Jordan using Analytic Hierarchy Process, \*Energy Conversion and Management\*, 38\(18\): 1815-1822 \(1997\).](#)
- [15] Cavallaro F., [Fuzzy TOPSIS Approach for Assessing Thermal-Energy Storage in Concentrated Solar Power \(CSP\) Systems, \*Applied Energy\*, 87\(2\): 496-503 \(2010\).](#)
- [16] Ozdemir S., Sahin G., [Multi-Criteria Decision-Making in the Location Selection for a Solar PV Power Plant using AHP, \*Measurement\*, 129: 218-226 \(2018\).](#)
- [17] Akçay M., Atak M., [Optimal Site Selection for a Solar Power Plant in Turkey Using a Hybrid AHP-TOPSIS Method, \*Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi\*, 14\(4\): 413-420 \(2018\).](#)
- [18] Deogam N., [Optimal Site Selection for Solar Photovoltaic Power Plant in North Eastern State of India using Hybrid MCDM Tools, \*International Journal of Energy Optimization and Engineering \(IJEEO\)\*, 8\(2\): 61-84 \(2019\).](#)
- [19] Colak H.E., Memisoglu T., Gerçek Y., [Optimal Site Selection for Solar Photovoltaic \(PV\) Power Plants using GIS and AHP: A Case Study of Malatya Province, Turkey, \*Renewable Energy\*, 149: 565-576, \(2020\).](#)
- [20] Asakereh M., Omid R. Alimardani, Sarmadian F., [Developing a GIS-based Fuzzy AHP Model for Selecting Solar Energy Sites in Shodirwan Region in Iran, \*International Journal of Advanced Science and Technology\*, 68: 37-48 \(2014\).](#)
- [21] Vafaeipour M., Zolfani S.H., Varzandeh M.H.M., Derakhti A., Eshkalag M.K., [Assessment of Regions Priority for Implementation of Solar Projects in Iran: New Application of a Hybrid Multi-Criteria Decision Making Approach, \*Energy Conversion and Management\*, 86: 653-663 \(2014\).](#)
- [22] Zoghi M., Ehsani A.H., Sadat M., Javad Amiri M., Karimi S., [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\*, 68: 986-996 \(2015\).](#)
- [۲۳] ناصحی س.، نوری گ.، فریادی ش.، (مطالعه موردی استان هرمزگان) ANP مکانیابی نیروگاه خورشیدی با منطق فازی و ... ، مجله فنی و مهندسی فناوری‌های نوین در سامانه‌های انرژی، (۱)۳: بهار (۱۳۹۶).
- [۲۴] هوشنگی ن.، شیخ ع.ا.ا.، پتانسیل‌سنجی احداث نیروگاه‌های خورشیدی در ایران با روش‌های تاپسیس، فازی تاپسیس و فازی سوگنو، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، (۲۱)۵۹: ۳۰۳ تا ۳۲۷، (۱۳۹۶)
- [25] Asakereh, M. Soleymani, and M. J. Sheikhdavoodi, "A GIS-based Fuzzy-AHP Method for the Evaluation of Solar Farms Locations: Case Study in Khuzestan province, Iran," *Solar Energy*, 155: 342-353, (2017).
- [26] Sadeghi M., Karimi M., [GIS-Based Solar and Wind Turbine Site Selection using Multi-Criteria Analysis: Case Study Tehran, Iran, \*Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.\*, 42: 469-476, \(2017\).](#)

- [27] Yousefi, H. Hafeznia H., Yousefi-Sahzabi A., [Spatial Site Selection for Solar Power Plants Using a GIS-based Boolean-Fuzzy Logic Model: A Case Study of Markazi Province, Iran](#), *Energies*, **11(7)**: 1648 (2018).
- [28] Rezaei M., Mostafaeipour A., Qolipour M., Tavakkoli-Moghaddam R., [Investigation of the Optimal Location Design of a Hybrid Wind-Solar Plant: A Case Study](#), *International Journal of Hydrogen Energy*, **43(1)**: 100-114 (2018).
- [29] Shorabeh S.N., Firozjaei M.K., Nematollahi O., Firozjaei H.K., Jelokhani-Niaraki M., [A Risk-based Multi-Criteria Spatial Decision Analysis for Solar Power Plant Site Selection in Different Climates: A Case Study in Iran](#), *Renewable Energy*, **143**: 958-973 (2019).
- [30] Asadi M., PourHossein K., [Wind and Solar Farms Site Selection Using Geographical Information System \(GIS\), Based on Multi Criteria Decision Making \(MCDM\) Methods: A Case-Study for East-Azerbaijan](#), In *2019 Iranian Conference on Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG) 2019 Jun 11, IEEE*, 1-6 (2019).
- [۳۱] شورابه س.ن.، سامانی ن.ن.، ابدالی ی.، تهیه نقشه پتانسیل نیروگاه های خورشیدی مبتنی بر مفهوم ریسک مطالعه موردی: استان خراسان رضوی، فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»، ۱۱۱(۲۸): ۱۲۹ تا ۱۴۷، پاییز (۱۳۹۸).
- [32] Mostafaeipour H., Arabnia R., Ghasemifar M., [Location Optimization of Renewable Energy Farms for Electricity Generation Using Multi Criteria Decision Making \(MCDM\) Methodologies](#), *IAPF '19, Oxford, United Kingdom*.
- [33] Kannan D., Moazzeni S., Mostafayi Darmian S., Afrasiabi A., [A Hybrid Approach Based on MCDM Methods and Monte Carlo Simulation for Sustainable Evaluation of Potential Solar Sites in East of Iran](#), *Journal of Cleaner Production*, **279**: 122368 (2020).
- [34] <https://www.bahesab.ir/map/geographic/>, [last accessed: January 2020].
- [۳۵] رضیئی ط.، منطقه‌بندی اقلیمی ایران به روش کوپن-گایگر و بررسی جابه جایی مناطق اقلیمی کشور در سده بیستم، فیزیک زمین و فضا، ۴۳(۲): ۴۱۹ تا ۴۳۹، تابستان (۱۳۹۶).
- [36] <http://www.satba.gov.ir/>, [last accessed: January 2020].
- [۳۷] نجفی ب.، مطالعه و بررسی سامانه‌های فتوولتائیک برای تعیین مهم‌ترین عامل‌های مؤثر در جایابی بهینه نیروگاه‌های خورشیدی در ایران، مجله نخبگان علوم و مهندسی، ۲(۵): ۷۲ تا ۵۶ (۱۳۹۶).
- [38] Ghasemi G., Noorollahi Y., Alavi H., Marzband M., Shahbazi M., [Theoretical and Technical Potential Evaluation of Solar Power Generation in Iran](#), *Renewable Energy*, **138**: 1250-1261 (2019).
- [39] Al Garni H. Z., Awasthi A., [Solar PV Power Plant Site Selection Using a GIS-AHP Based Approach with Application in Saudi Arabia](#), *Applied Energy*, **206**: 1225-1240 (2017).
- [۴۰] کاظمی ا.، مصطفایی پور ع.، «اولویت بندی شهرستان‌های استان اصفهان برای تولید برق با استفاده از انرژی خورشیدی»، کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های نوین در مدیریت و مهندسی صنایع، (۱۳۹۴).

- [41] Noorollahi E., Fadai D., Akbarpour Shirazi M., Ghodsipour S.H., [Land Suitability Analysis for Solar Farms Exploitation Using GIS and Fuzzy Analytic Hierarchy Process \(FAHP\)—A Case Study of Iran](#), *Energies*, **9(8)**: 643 (2016).
- [42] <https://www.amar.org.ir/>, [last accessed: January 2020].
- [43] <http://climat.blogfa.com/post/154>, [last accessed: January 2020].
- [44] Mostafaeipour M. Saidi-Mehrabad M. Rezaei, Qolipour M., [The Ranking of Southern Ports and Islands of Iran for Seawater Desalination Plants using ELECTRE III Method](#), *Journal of Renewable Energy and Environment*, **4(2&3)**: 10-22, (2017).
- [45] Shahdabadi R.S., Maleki A., Haghghat S., Ghalandari M., [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*, **145(4)**: 2105-2122, (2020).
- [46] Yasmin M., Tatoglu E., Kilic H.S., Zaim S., Delen D., [Big Data Analytics Capabilities and Firm Performance: An Integrated MCDM Approach](#), *Journal of Business Research*, **114**: 1-15 (2020).
- [47] Youssef E., [An Integrated MCDM Approach for Cloud Service Selection Based on TOPSIS and BWM](#), *IEEE Access*, **8**: 71851-71865 (2020).
- [48] Akmaludin F.E., Schaduw H. Purwanto Hartati T., Sumbaryadi A., [Selection of Selected Flight Attendants Using MCDM-AHP and ELECTRE Method](#), *SinkrOn*, **4(1)**: 25-31 (2019).