

پتانسیل‌سنجی احداث نیروگاه‌های خورشیدی در ایران با روش‌های تاپسیس، فازی تاپسیس و فازی سوگنو

نوید هوشنگی^۱

علی اصغر آل‌شیخ^۲

چکیده

ایران در کمربند خورشیدی زمین و نواحی پرتابش آن واقع شده است؛ از این رو در بسیاری از نقاط کشور می‌توان انرژی مورد نیاز را از طریق خورشید تأمین نمود. عوامل متعددی از جمله میزان تابش کلی خورشیدی، زیرساخت‌های منطقه‌ای، شبکه‌های انتقال نیرو در انتخاب مکان بهینه تأثیرگذارند. این تحقیق با استفاده از سیستم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، مبانی فازی‌سازی و بهره‌گیری از ابزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به تلفیق عوامل مؤثر در احداث نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک در مقیاس کشوری می‌پردازد تا پتانسیل مناطق مختلف کشور ایران در ایجاد این نیروگاه‌ها تعیین شود. جهت تعیین مناطق مساعد روش‌های تاپسیس (TOPSIS)، فازی تاپسیس (Fuzzy TOPSIS) و فازی سوگنو (Fuzzy Sugeno) اجرا و قابلیت آن‌ها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. پس از اخذ نظرات کارشناسی، پتانسیل‌سنجی در دو مرحله اصلی اجرا شد: کسر مناطق غیرممکن (قیود) و محاسبه پتانسیل مناطق با استفاده از آنالیزهای مکانی در قالب سه روش مذکور. نتایج نشان داد که روش فازی تاپسیس از منظر پیوستگی نقشه و دخالت دادن داده‌ها حالت میانه بین دو روش تاپسیس و فازی سوگنو دارد و در قیاس با دو روش دیگر حساسیت معقولی به

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی GIS، دانشکده ژئودزی-ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران (نویسنده مسئول).
Email:navid.hooshangi@yahoo.com

۲- استاد گروه مهندسی GIS، دانشکده ژئودزی-ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.

دقت وزن‌های ورودی نشان می‌دهد. روش تاپسیس $14/71\%$ و فازی تاپسیس $18/33\%$ و روش سوگنو $20/52\%$ از کل کشور را برای احداث نیروگاه خورشیدی مناسب دانسته‌اند. در راستای اولویت‌دهی به مناطق مختلف کشور، هر سه روش با ضریب همبستگی متوسط $0/85$ نتایجی مشابه داشتند. اولویت‌های اصلی کشور برای نیروگاه‌های خورشیدی با اختلافی ناچیز بخش‌های نرمانشیر، نوبندگان، فرجهی، بمپور، شیب‌کوه و گاوبندی معرفی شدند.

واژگان کلیدی: پتانسیل سنجی، نیروگاه‌های خورشیدی، تاپسیس، فازی تاپسیس، فازی سوگنو.

مقدمه

امروزه با افزایش مصرف انرژی، گرایش به بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر و به‌ویژه انرژی خورشیدی در حال افزایش است. مطالعات نشان می‌دهد که در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ سرانه‌ی تولید انرژی جهانی $10/3$ درصد افزایش یافته است (Zohoori, 2012: 850). این در حالی است که معایب انرژی‌های فسیلی، جامعه‌ی جهانی را ترغیب به استفاده از انواع جدید و تجدیدپذیر انرژی نموده است (Janke, 2010: 2228). در میان انرژی‌های تجدیدپذیر و با توجه به پتانسیل مکان مورد استفاده، انرژی‌های خورشیدی به دلیل این‌که O_2 یا مواد زائد دیگری تولید نمی‌کنند (Bahrami et al, 2013: 202; Yun-na et al, 2013: 2150) و موجب احیای اراضی و حفظ منابع طبیعی، کاهش خطوط انتقال و افزایش سرعت برق‌دهی به مناطق روستایی می‌شود، به‌صرفه‌تر می‌باشند (Solangi, 2011: 2150). کشور ایران نیز با توجه به پتانسیل بالایی که در استفاده از انرژی خورشیدی دارا می‌باشد؛ به افزایش استفاده از انرژی‌های خورشیدی روی آورده است (سازمان انرژی‌های نو ایران، ۱۳۹۲). بهره‌گیری هرچه بیشتر از انرژی‌های نو و به‌ویژه انرژی خورشیدی نیازمند تعیین مکان بهینه‌ی تولید و مصرف این انرژی می‌باشد.

استفاده از پتانسیل‌های مناطق مختلف کشور جهت مدیریت و برنامه‌ریزی چندین ساله انرژی یکی از ضروریات بهره‌برداری صحیح از انرژی می‌باشد. محل نیروگاه خورشیدی یکی

از فاکتورهای تأثیرگذار در استفاده بهینه از انرژی تولیدی است. بررسی اولویت مناطق از نظر محیطی، صنعتی، هواشناسی و اجتماعی به دلیل پرهزینه بودن عملیات نصب، بهره‌برداری و نگهداری (Bahrami et al, 2013: 202; Gastli, 2010: 279) از ضروریات تأمین انرژی پاک است (Yun-na et al, 2013: 76). اهمیت مکانی نیروگاه‌ها در برنامه‌ریزی‌های انرژی از یک سو و عوامل متعدد در تعیین مکان مناسب برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی پژوهشگران زیادی را بر آن داشته است که به دنبال بررسی پتانسیل مناطق مختلف جهت احداث نیروگاه‌های خورشیدی باشند. یکی از دغدغه‌های اصلی در طراحی نیروگاه‌های خورشیدی تعیین روش مناسب بر اساس عوامل مؤثر متعدد و رویکردهای نوین توسعه داده شده (فازی‌سازی) می‌باشد. بررسی تأثیر فازی‌سازی بر روی روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره و رابطه آن با میزان حساسیت این روش‌ها به دقت وزن لایه‌ها ورودی به عنوان چالشی در زمینه مکان‌یابی مطرح می‌گردد.

پتانسیل‌سنجی مناطق مختلف جهت بهره‌برداری از منابع انرژی در طبقه‌بندی‌ها و مقیاس‌های متفاوتی ارائه شده است (Yun-na et al, 2013: 77; Sun et al, 2013: 249). در مقیاس کشوری مکان‌یابی برای پتانسیل‌سنجی کلی و در مناطق مستعد حاصل از این نقشه کشوری و در مقیاس استانی یا شهری، مکان‌یابی جهت تعیین مکان دقیق نیروگاه انجام می‌شود. در انتخاب مکان مناسب برای نیروگاه‌های خورشیدی در مقیاس‌های کشوری و منطقه‌ای عموماً از تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره (MCDM) استفاده می‌شود (Charabi et al, 2011: 2554)، زیرا در بررسی چندمعیاره، عوامل متعددی در نظر گرفته شده و دید جامعی به موضوع حاصل می‌شود. در این روش‌ها در صورتی که هر کدام از معیارها به تنهایی مد نظر باشد ممکن است انتخاب را با مشکل روبرو کند.

روش‌های MCDM متنوعی از جمله تحلیل سلسله مراتبی، تاپسیس و فازی‌تاپسیس در مکان‌یابی تأسیسات مختلف و مباحث متنوع انرژی، به‌ویژه مکان‌یابی مزرعه‌های خورشیدی استفاده شده است (Kaya et al, 2011: 6577). صفری و طالبی (۱۳۹۰: ۵۹) از

فازی تاپسیس در مکان‌یابی تسهیلات صنعتی خودروسازی، Ashrafzadeh و همکاران (2012: 655) در انتخاب مکان مناسب برای انبار استفاده کردند و قابلیت این روش در تعیین مکان مناسب را بیان نمود. Zohoori (2012: 852) روش تحلیل سلسله مراتبی فازی به‌عنوان مناسب‌ترین روش جهت اولویت‌دهی منابع انرژی تجدیدپذیر در ایران بیان نمود و بعد از انرژی آبی و بادی، انرژی خورشیدی را در رتبه سوم مناسب‌ترین انرژی تجدیدپذیر نتیجه‌گیری کرد. فازی تاپسیس جهت بررسی انواع روش‌های ذخیره‌سازی و تبدیل انرژی گرمایی مایع‌های مختلف در سیستم‌های CSP³ استفاده شده است (Cavallaro, 2010: 496). Sánchez-Lozano و همکاران (۲۰۱۳:۵۴۴) از تاپسیس در مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک در مقیاس استانی در جنوب‌شرقی اسپانیا استفاده کرد و کارایی این روش در تعیین مکان مناسب را اعلام نمودند. یوسفی و همکاران (۱۳۹۱) ابتدا با استفاده از منطق فازی، مناطق مختلف استان تهران را ارزش‌دهی و ۹ منطقه به‌عنوان بهترین مکان برای احداث نیروگاه خورشیدی انتخاب کردند، سپس گزینه‌های پیشنهادی را با روش فازی تاپسیس اولویت‌بندی نمودند.

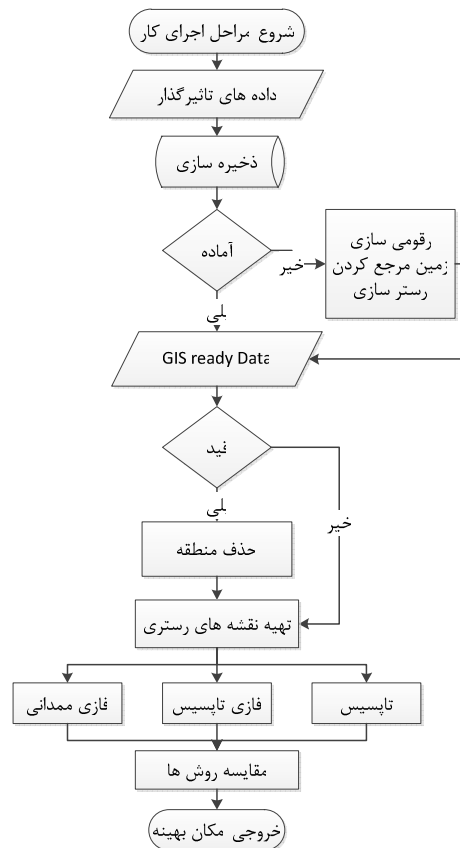
امروزه از مفاهیم فازی‌سازی در پتانسیل‌سنجی و مکان‌یابی تاسیسات مختلف استفاده می‌شود. عموماً برای بهره‌گیری صحیح از نظرات کارشناسی، ابتدا از متغیرهای زبانی استفاده می‌کنند؛ زیرا عموماً انسان‌ها و به ویژه کارشناسان اتفاقات و مقایسات محیطی را با استفاده از متغیرهای کیفی یا زبانی بیان می‌کنند. پردازش متغیرهای کیفی از طریق محاسبات معمول مناسب نیست، زیرا همیشه در بیان آن‌ها به گونه‌ای عدم اطمینان وجود دارد (Kaya et al, 2011: 6577). از این رو برای انتقال از فضای کیفی به فضای کمی از اعداد فازی مثلثی یا دوزنقه‌ای استفاده می‌شود (Tian et al, 2013: 515). در اکثر تحقیقات تنها بخشی از مراحل روش تاپسیس، فازی می‌شود و به صورت مقطعی به نظرات کارشناسان به صورت

فازی نگاه می‌شود (Dymova et al, 2013: 153). با استفاده از متغیرهای زبانی، در این تحقیق نیز تلاش شده مفهوم فازی‌سازی در تصمیم‌گیری‌های چند معیاره اعمال گردد.

عمده تحقیقات پیشین صورت گرفته در پتانسیل‌سنجی کشور ایران جهت احداث نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک براساس پارامترهای محدودی همچون میزان تابش خورشیدی صورت پذیرفته است و پارامترهای مؤثر دیگر مانند شبکه انتقال نیرو، زیرساخت‌های منطقه مدنظر قرار نگرفته است. از طرفی دیگر، مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی اغلب با یک روش ساده اجرا شده و قابلیت و حساسیت روش‌های مختلف بررسی نگردیده است. تحقیق حاضر با هدف تعیین پتانسیل مناطق مختلف کشور در احداث نیروگاه‌های برق خورشیدی (فتوولتائیک) با ارزیابی تاثیر فازی‌سازی بر روی روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (روش‌های تاپسیس، فازی تاپسیس و فازی سوگنو) و بررسی میزان حساسیت این روش‌ها به دقت وزن لایه‌ها ورودی صورت پذیرفت.

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر ابتدا با شناسایی و اولویت‌بندی پارامترهای مؤثر در احداث نیروگاه‌های برق خورشیدی (فتوولتائیک) شروع شد و سپس تهیه، تجمیع و آماده‌سازی داده‌های منتخب در مکان‌یابی در سطح کشور انجام گردید. در ادامه معیارهای مطلق و عواملی که به‌طور قطعی مانع از احداث نیروگاه می‌شوند (قیود) شناسایی و مناطق مربوطه حذف شد. سپس روش‌های تاپسیس، فازی تاپسیس و فازی سوگنو بر روی داده‌های رستری حاصل اعمال شده و با هم مقایسه می‌شوند. در نهایت مکان‌های مناسب و پتانسیل مناطق مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. شکل (۱) مراحل اجرای این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل (۱) مراحل اجرای تحقیق

داده‌ها و آماده‌سازی آن‌ها

معیارهای مطرح در تعیین محل بهینه نیروگاه‌های خورشیدی در تحقیقات متعدد بررسی شده است (Aydin et al, 2013: 92; Charabi et al, 2011: 2555; Janke, 2010: 2229; Sánchez-Lozano et al, 2013: 551; Sun et al, 2013: 250; Tabik et al, 2012: 367; Tiba et al, 2010: 2924; Tsoutsos et al, 2005: 293). مجموعه‌ای از این معیارها در جدول (۱) ارائه گردیده است. نحوه اثر هر کدام از معیارها با ارزیابی مقالات

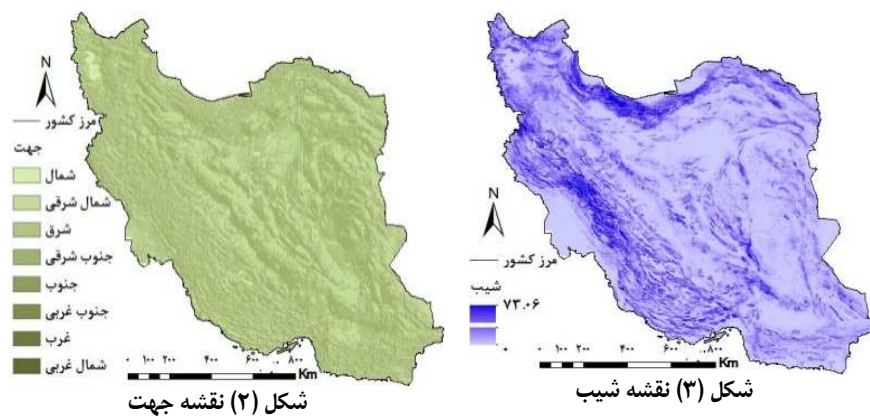
مطرح و با اعمال نظرات کارشناسی تصحیح شدند. لازم به ذکر است که معیارهای ذکر شده در جدول (۱) تنها بخشی از عواملی هستند که در مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی در سطح کشور دخالت دارند. در بررسی‌های منطقه‌ای و سطح میکرو برای تعیین دقیق محل بهینه مثلاً در سطح یک استان، داده‌های تأثیرگذار و دقت مورد نیاز متفاوت می‌باشد.

جدول (۱) عوامل موثر در مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی و مقادیر مرزی آن‌ها

کلاس	المان‌ها	بولین	فازی
محیطی	پارک ملی مناطق پرورش حیوانات حوالی رودخانه‌ها حفاظتی رودخانه‌ها دریاچه تیراندازی ممنوع (مرزی)	خارج از ۵۰۰ متر مناسب خارج از ۶۰۰ متر مناسب خارج از ۴۰۰ متر مناسب خارج از ۲۵۰ متر مناسب خارج از ۲۵۰۰ متر مناسب خارج از ۳۰۰ متر مناسب	
ژئوگرافیکی و اقلیم	شیب جهت پتانسیل تابشی خورشیدی متوسط دما	بیش از ۲۵ درجه نامناسب ۹۰ تا ۲۷۰ مناسب حداقل سالانه kw h/m^2 ۴،۵	صاف‌تر مناسب‌تر جنوبی‌تر مناسب‌تر بیش‌تر مناسب‌تر بیش‌تر مناسب‌تر
تأسیسات	جاده اصلی (آزادراه) جاده فرعی فاصله از خطوط راه‌آهن خطوط انتقال نیرو		نزدیک‌تر مناسب‌تر نزدیک‌تر مناسب‌تر نزدیک‌تر مناسب‌تر نزدیک‌تر مناسب‌تر
دموگرافیک	توزیع جمعیت		نزدیک‌تر مناسب‌تر

پارامترهای مطرح در جدول (۱) به دو صورت بولین و فازی تأثیرگذار خواهند بود. مواردی که تحت عنوان بولین بیان شده‌اند به‌عنوان قیود محدودکننده مانع از احداث نیروگاه شده و از کل فضای موجود کسر خواهند شد و موارد بیان شده تحت عنوان فازی در روش‌های تاپسیس، فازی تاپسیس و سوگنو با هم تلفیق خواهند شد.

با توجه به پوشش کشوری داده‌ها در این تحقیق از سیستم مختصات مخروطی لامبرت هم شکل^۴ (LCC) استفاده شد. برخی از داده‌های مورد نیاز مانند پارک ملی، رودخانه‌های حفاظتی آماده‌ی ورود به محیط و محاسبات نبودند؛ این محدودیت تا حد امکان با استفاده از زمین مرجع کردن تصاویر موجود و رقومی‌سازی لایه‌های حفاظتی، موزاییک کردن مدل رقومی زمین (DEM) و رستری کردن نقشه مربوط به پتانسیل تابشی برطرف شد. شیب، جهت شیب و نقشه‌های فاصله با استفاده از تحلیل‌های مکانی موجود و از روی DEM و خود فایل‌های عوارض موجود تهیه شدند. نمونه‌هایی از این نقشه‌ها در شکل‌های (۲) و (۳) ارائه شده است. در نهایت تجمیع لایه‌های داده‌ای در پایگاه داده مکانی صورت پذیرفت تا تحلیل‌های برداری و رستری روی آن‌ها اعمال شوند.



مکان‌یابی پس از آماده‌سازی داده‌ها^۵ و با توجه به نحوه اثر بیان شده در جدول (۱)، در دو مرحله اعمال قیود و تهیه نقشه‌های رستری با روش‌های تاپسیس، فازی تاپسیس و فازی سوگنو انجام می‌شود. در ادامه مبانی نظری این روش‌ها بیان می‌گردد.

4- Lambert Conformal Conic

5- GIS Ready

اعمال قیود

برخی شرایط به علل مختلف مانع از احداث نیروگاه‌های خورشیدی و حذف کامل مناطق می‌شوند؛ از جمله این شرایط می‌توان به مسائل فنی (مانند رعایت حداقل پتانسیل تابشی) و مشکلات زیست‌محیطی (مناطق حفاظتی) اشاره داشت. با توجه به این که مرحله اعمال قیود در هر سه روش یکسان است ابتدا لایه‌های مربوط به داده‌های پارک ملی، مناطق پرورش حیوانات، مرزها، رودخانه‌های حفاظتی، مناطق شکار ممنوع (حفاظتی) و حریم دریاچه‌ها از کل مساحت کشور کسر می‌شوند.

روش تاپسیس

روش تاپسیس^۶ یکی از روش‌های کلاسیک در حل مسائل مربوط به تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره می‌باشد که توسط هاونگ و یون گسترش داده شده است (Ashrafzadeh et al, 2012: 660). در روش تاپسیس، فاصله یک گزینه از نقطه ایده‌آل مثبت و از نقطه ایده‌آل منفی محاسبه می‌شود. در این روش m گزینه به وسیله n شاخص ارزیابی می‌شوند که در آن گزینه انتخابی باید در کمترین فاصله از راه‌حل ایده‌آل و درعین حال دورترین فاصله از ایده‌آل منفی قرار داشته باشد. مزایای این روش در مقایسه با روش‌های مشابه مانند AHP آن است که اگر بعضی معیارهای تصمیم از نوع هزینه و هدف، کاهش آن باشد و بعضی دیگر از نوع سود و هدف، افزایش آن باشد این روش به آسانی جواب ایده‌آل را که ترکیبی از بهترین مقادیر دستیابی به همه معیارها است پیدا می‌کند (صفری و طالبی، ۱۳۹۰: ۶۳). مراحل کاری در این روش در تحقیقات مختلفی بیان شده است (بیورانی و غفران، ۱۳۸۹: ۱۳۸; Jiang et al, 2011: 9401).

روش فازی تاپسیس

روش فازی تاپسیس برای حل مسائل تصمیم‌گیری گروهی در محیط فازی بسیار مناسب است. در این حالت اهمیت معیارهای مختلف و امتیازدهی معیارهای کیفی به صورت متغیرهای

زبانی انجام می‌شوند (صفری و طالبی، ۱۳۹۰:۶۳). در روش تاپسیس کلاسیک وزن هر معیار به صورت قطعی مشخص می‌شود، در حالی که کارشناسان عمدتاً در بیان قطعی وزن هر معیار با مشکل روبرو هستند، لذا برای حل این ابهام از مفاهیم فازی استفاده می‌شود (Ashrafzadeh et al, 2012: 660). فازی تاپسیس حاصل از اعمال مفاهیم فازی در روش تاپسیس می‌باشد، از این رو مراحل اجرا بسیار شبیه به روش تاپسیس است که توسط علوی و همکاران (۱۳۹۰:۴۹)، رجایی و حضرتی (۱۳۹۰) و Chu (2002:860) با جزئیات بیان شده است.

روش فازی سوگنو

پیچیدگی دنیای واقعی مانع از توصیف و تعریف دقیق آن می‌شود، لذا توصیف تقریبی یا همان فازی که برای تجزیه و تحلیل قابل قبول باشد اهمیت پیدا می‌کند. یکی از دسته‌های اصلی سیستم‌های فازی، سیستم استنتاج فازی تاکاگی-سوگنو می‌باشد. سیستم‌های فازی سیستمی مبتنی بر دانش یا قواعد می‌باشد. قلب یک سیستم فازی یک پایگاه دانش بوده که از قواعد اگر-آنگاه فازی تشکیل شده است. یک قاعده اگر-آنگاه فازی یک عبارت اگر-آنگاه بوده که بعضی کلمات آن به وسیله توابع تعلق پیوسته مشخص شده‌اند. از مزایای این روش می‌توان به در نظر گرفتن جواب‌های خوب و بد به صورت همزمان و اجرای ساده آن بر روی فایل‌های رستری اشاره کرد. این روش از متوسط وزنی نتایج جهت غیرفازی‌سازی^۷ استفاده می‌کند (Kaur, 2012:323). مراحل کاری در مدل فازی سوگنو توسط Mehran (2008: 5) بیان شده است.

نحوه مقایسه نتایج

تحلیل حساسیت

یکی از فاکتورها مهم در ارزیابی روش‌های مکان‌یابی، بررسی میزان تأثیرپذیری روش‌ها از داده‌های ورودی و وزن هر پارامتر است. در این مرحله برای مشاهده تأثیر وزن معیارها،

ضرایب وزنی لایه‌ها تغییر و نتایج خروجی‌ها با نتیجه اصلی مقایسه می‌شود. نتایج این بررسی می‌تواند قابلیت استناد به نتایج حاصل را نشان دهد. هر چه با تغییر ضرایب وزنی لایه‌ها نتایج حاصل بیش‌تر تغییر کند، نشان‌دهنده آن است که روش به وزن داده‌های ورودی حساس بوده و نظرات کارشناسان بیش‌تر اهمیت دارد.

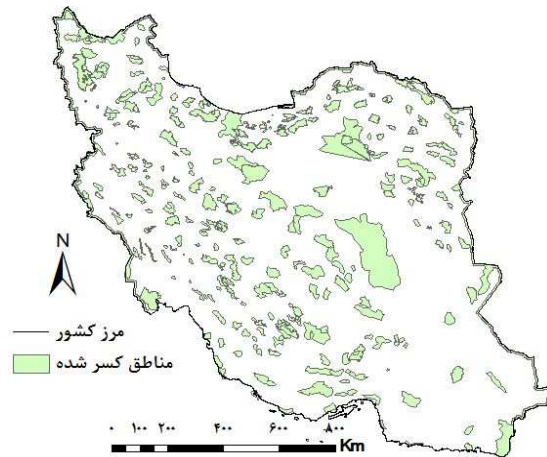
استفاده از ضریب همبستگی

تعیین همبستگی و ارتباط بین نتایج کمک شایان توجهی به تحلیل صحیح شرایط موجود می‌کند. ضریب همبستگی میزان ارتباط بین دو متغیر را بیان می‌کند و بین دو عدد $+1$ و -1 در نوسان است. عدد $+1$ بیان‌کننده ارتباط و همبستگی قوی و مستقیم بین دو عنصر است و عدد -1 همبستگی قوی و معکوس را نشان می‌دهد. از این پارامتر می‌توان در مقایسه بین نتایج استفاده کرد. هر چه مقدار همبستگی نتایج دو روش نزدیک به $+1$ باشد، نشان‌دهنده نزدیکی پاسخ نتایج روش‌های پتانسیل‌سنجی است.

یافته‌ها و بحث

این تحقیق در محیط ArcGIS9.3 اجرا شد. در این محیط برای لحاظ کردن معیارهای مطلق (قیود^۱) از عملگرهای بولین (اجتماع و اشتراک) روی مدل داده‌های برداری و جهت اعمال معیارهای فازی از آنالیزهای رستری استفاده گردید.

در ابتدا با اعمال قیود مربوطه، $0/35$ از مساحت کشور کسر شدند (شکل ۴). در ارتباط با داده‌های شیب، جهت و پتانسیل تابش خورشیدی نیز در هنگام اعمال آنالیزهای رستری مقدار خارج از محدوده صفر انتخاب می‌شود تا قیود مربوط به داده‌های شیب، جهت و تابش خورشیدی نیز اعمال گردد.



شکل (۴) مناطق سفید رنگ، مناطق باقی‌مانده پس از اعمال قیود

بعد از اعمال قیود نوبت به تعیین پتانسیل هر پیکسل از نظر معیارهای قیدشده در جدول (۱) می‌رسد، در ادامه از بین مناطق باقی‌مانده مکان بهینه با آنالیزهای رستری و روش‌ها تاپسیس، فازی تاپسیس و سوگنو محاسبه شود.

روش تاپسیس

در روش تاپسیس بعد از تهیه نقشه‌های رستری (شیب، جهت و نقشه‌های فاصله‌ای)، مقادیر لایه‌های مختلف (X_{ij}) با فرمول ۱ جهت وارد کردن به فضای کاری یکسان بی‌واحد شدند (Jiang et al, 2011: 9401)، (n تعداد ستون‌ها و m تعداد سطرهای رستر می‌باشد).

$$v_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}, i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (۱) \text{ رابطه}$$

وزن نرمال‌شده معیارهای موجود همان اعداد به‌دست‌آمده در جدول (۳) که در محاسبات فازی تاپسیس به‌دست آمد استفاده شد، علت این امر دخالت دادن یکسان تأثیر وزن معیارها در روش‌های مورد بررسی بود. با ضرب هر لایه در وزن مربوطه، جواب ایده‌آل مثبت v^+ و ایده‌آل منفی v^- به گونه‌ای که در v^+ بهترین جواب‌ها و در v^- بدترین جواب در بین المان‌های

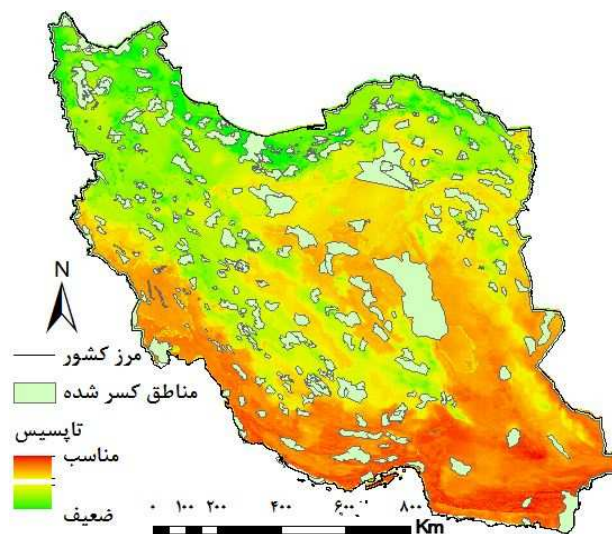
موجود انتخاب شدند. فاصله از جواب ایده‌آل مثبت و جواب ایده‌آل منفی با روابط ۲ و ۳ محاسبه گردید. (d_i^+) فاصله از ایده‌آل مثبت، (d_i^-) فاصله از ایده‌آل منفی و v_j درایه‌های هر لایه

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_j - v_j^+)^2} \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_j - v_j^-)^2} \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad \text{رابطه (۳)}$$

با محاسبه نزدیکی نسبی تا جواب ایده‌آل با رابطه (۴) و مرتب کردن آلترناتیوها به ترتیب بزرگی C_i^* که نشانه اولویت در انتخاب گزینه‌های مستعد است (هرچه C_i^* بیش‌تر، پاسخ بهتر می‌شود)، نقشه خروجی شکل (۵) حاصل شد.

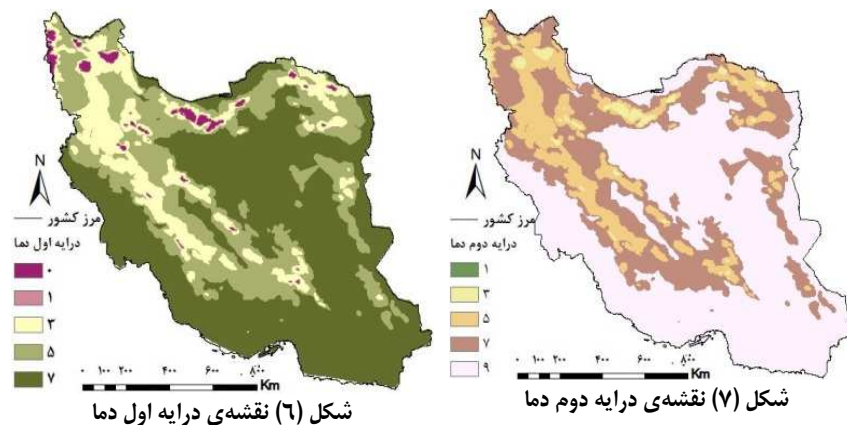
$$C_i^* = \frac{d^-}{d^- + d^+} \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad 0 \leq C_i^* \leq 1 \quad \text{رابطه (۴)}$$



شکل (۵) نقشه خروجی از روش تاپسیس

روش فازی تاپسیس

روش فازی تاپسیس شبیه به روش تاپسیس است. در این روش شرایط و بازه مربوط به هر معیار، با اعمال نظرات کارشناسان انرژی‌های نو ایران، ابتدا با متغیرهای کیفی بسیار ضعیف، ضعیف، متوسط، خوب و بسیار خوب بیان و با استفاده از اعداد فازی مثلثی بر لایه‌های داده‌ها اعمال گردیدند. نمونه‌هایی از خروجی هر لایه بعد از اعمال اعداد فازی مثلثی در شکل‌های (۶ و ۷) مشاهده می‌شود.



سه تایی‌های ایجاد شده برای هر لایه که به تعداد تصمیم‌گیرنده‌ها (کارشناسان) بود میانگین‌گیری شد تا نتایج فازی نهایی برای هر لایه حاصل شود. در ادامه وزن معیارها با استفاده از متغیرهای زبانی و اعداد فازی (جدول ۲) و AHP به دست آمد. وزن حاصل برای هر معیار در جدول (۳) نشان داده شده است. با تبدیل اعداد فازی به اعداد قطعی با رابطه (۵) (آلفا کات $\alpha = 0.5$) نرخ سازگاری برابر $0.1 < 0.36$ که قابل قبول می‌باشد، حساب شد.

$$I = \frac{1}{2} * [\alpha * c + b + (1 - \alpha) *] \quad \text{رابطه (۵)}$$

جدول (۲) متغیرهای کمی و کیفی

کیفی	کمی
بسیار ضعیف	(۰, ۱, ۳)
ضعیف	(۱, ۳, ۵)
متوسط	(۳, ۵, ۷)
خوب	(۵, ۷, ۹)
بسیار مهم	(۷, ۹, ۱۰)

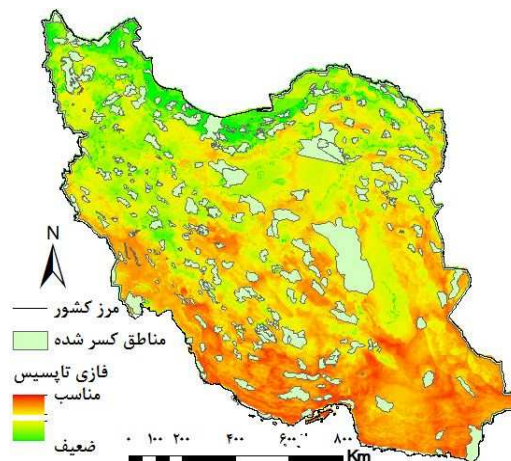
جدول (۳) وزن‌های فازی و مطلق به دست آمده از پرسش‌نامه

وزن‌های عددی	وزن‌های فازی	معیارها
۵/۵۵۵	(۰/۰۳۹۷۹, ۰/۰۵۴۸۲, ۰/۰۶۷۸۸)	فاصله از جاده اصلی
۲/۹۱۶	(۰/۰۱۵۲۷, ۰/۰۲۸۲۶, ۰/۰۴۳۲۸)	فاصله از جاده فرعی
۴/۴۰۹	(۰/۰۲۹۵۲, ۰/۰۴۲۶۲, ۰/۰۵۷۷۲)	فاصله از نقاط جمعیتی
۲۴/۳۴۹	(۰/۲۳۴۵۲, ۰/۲۴۷۶۲, ۰/۲۶۲۷۵)	فاصله از خطوط انتقال
۱/۵۴۰	(۰/۰۰۱۶۸, ۰/۰۱۴۵۱, ۰/۰۲۹۵۳)	فاصله از خطوط راه‌آهن
۹/۸۴۹	(۰/۰۸۲۸۲, ۰/۰۹۵۸۲, ۰/۱۱۰۸۲)	دما
۱۴/۸۴۰	(۰/۱۳۳۲۰, ۰/۱۴۲۶۰, ۰/۱۶۲۱۰)	شیب
۹/۰۱۵	(۰/۰۷۴۶۵, ۰/۰۸۷۷۶, ۰/۱۰۲۶۵)	جهت
۲۷/۵۲۶	(۰/۲۵۴۵۲, ۰/۲۷۷۵۲, ۰/۳۰۶۸۰)	پتانسیل تابش خورشیدی

بعد از این مرحله، حد ایده‌آل مثبت فازی و ایده‌آل منفی فازی تعیین و فاصله از مقادیر با استفاده از رابطه (۶) محاسبه شد.

$$d(\rho, \tau) = \sqrt{\frac{1}{3}[(\rho_1 - \tau_1)^2 + (\rho_2 - \tau_2)^2 + (\rho_3 - \tau_3)^2]} \quad \text{رابطه (۶)}$$

با محاسبه نزدیکی نسبی تا جواب ایده‌آل و مرتب کردن آلترناتیوها به ترتیب بزرگی C_i^* شکل ۸ حاصل شد.



شکل (۸) نقشه خروجی روش فازی تاپسیس

روش فازی سوگنو

در این تحقیق هر لایه به دو حالت مطلوب و نامطلوب تقسیم و هر حالت با یک تابع سه جمله‌ای بیان شد. به عنوان مثال فازی‌سازی برای حال مطلوب شیب با رابطه (۷) انجام شد.

$$Slope_{flat} = \begin{cases} 1 & Slope \leq 5 \\ -0.015 \times Slope + 1.25 & 5 < Slope \leq 25 \\ 0 & Slope > 25 \end{cases} \quad \text{رابطه (۷)}$$

با توجه به این که تعداد حالات ممکن در این روش بسیار زیاد می‌باشد، جهت وزن‌دهی از جدول (۴) استفاده شد. در تدوین این ماتریس وزن المان‌ها نسبت به هم در تناسب با وزن‌های اعمال شده در دو روش قبلی انتخاب شد. وزن حالت‌های مختلف در جدول (۵) آمده است.

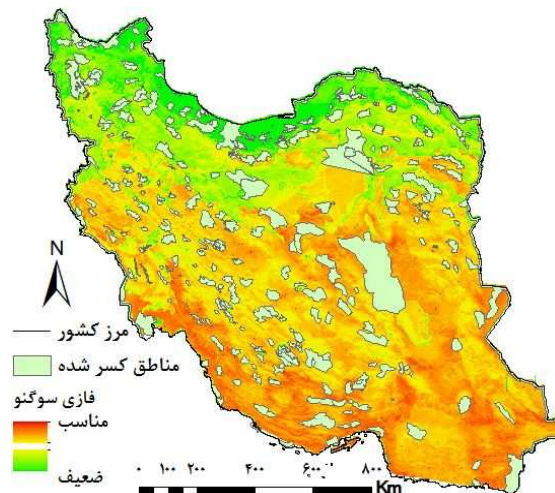
جدول (۴) وزن‌های استفاده شده برای معیارهای مختلف در روش فازی سوگنو

فاصله از خطوط نیرو	جهت شیب دما	فاصله از فاصله از خط راه‌آهن	فاصله از جاده فرعی	فاصله از جاده اصلی	فاصله از پتانسیل فاکتور خورشیدی مورد نیاز جمعیتی	فاصله از جهت شیب دما	شیب	دما	فاصله از فاصله از خط راه‌آهن
۱۲	۴.۵	۷.۴	۴.۹	۰.۷۷	۱.۴	۲.۷	۲.۲	۱۴	خوب
۱	۱	۱	۱	۰.۵	۱	۱	۱	۲	بد

وزن نهایی حالت‌های مختلف ایجاد شده به صورت جدول (۵) می‌باشد:

جدول (۵) وزن‌های ایجاد شده برای حالت‌های مختلف

وزن	پتانسیل تابشی خورشیدی	جهت	شیب	دما	فاصله از خطوط انتقال نیرو	فاصله از خط راه آهن	فاصله از نقاط جمعیتی	فاصله از جاده فرعی	فاصله از جاده اصلی	ردیف
۴۹/۸۷	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	۱
۳۹/۸۷	بد	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	۲
۴۶/۳۷	خوب	بد	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	۳
...
۹/۵	بد	بد	بد	بد	بد	بد	بد	بد	بد	۵۱۲



شکل (۹) نقشه خروجی از روش فازي سوگنو

با تلفیق نقشه‌های فازي و تهیه نقشه اولویت با رابطه (۸)، شکل (۹) حاصل شد.

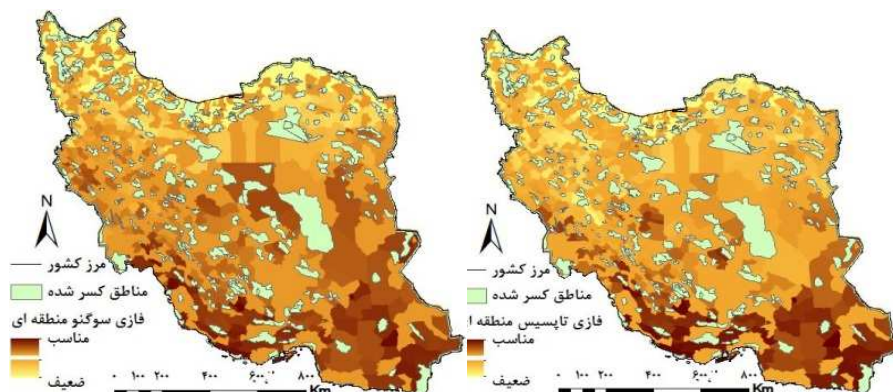
$$\frac{\sum_{i=1}^{B1} W_i * \min(Layers)}{\sum_{i=1}^{B1} \min(Layers)} \quad \text{رابطه (۸)}$$

تفسیر بصری نتایجی که در اشکال ۵، ۸ و ۹ نمایش داده شده، مشخص می‌کند که روش تاپسیس محیط پیوسته‌تری نسبت به دو روش دیگر ارائه داده است. در این نقشه مناطق مستعد همگی در کنار هم قرار دارند و در میان مناطق مستعد، مناطق غیر مستعد مشاهده نمی‌شود. آنالیز حساسیت روش تاپسیس نشان داد که با تغییر وزن داده‌های ورودی، خروجی‌ها ناگهانی تغییر نمی‌کند، حتی حذف داده‌ای چون فاصله از جاده فرعی، راه آهن یا نقاط جمعیتی در خروجی نقشه تأثیر چندانی در نتایج نداشت، علت این امر را می‌توان همانند Afsharzade و همکاران (2012: 659) و Charabi و Gastli (2011: 2558) در عدم توانایی روش‌های تصمیم‌گیری کلاسیک مانند تاپسیس در دخالت دادن دقیق طرز فکر کارشناسان دانست. Sánchez-Lozano و همکاران (2013) که از روش تاپسیس در مقیاس استانی برای مکان‌یابی استفاده کردند، حساسیت این روش به وزن‌های ورودی و داده‌های استفاده شده را بررسی نکرده بودند. گسستگی منطقه‌ای حاصل از روش فازی سوگنو (پراکندگی منطقه‌های مستعد) و حساسیت بالای این روش هنگام تغییر وزن‌ها نشان از امکان نمایش تأثیر جز به جز داده‌ها دارد، زیرا با تغییر اندک وزن معیارها نقشه تغییر محسوس می‌نماید. در این بین، روش فازی تاپسیس هم از نظر پیوستگی محیطی و هم از نظر حساسیت نسبت به تغییر وزن‌ها حالتی میانه بین دو روش مذکور را داشته و می‌تواند در مدیریت مناسب عدم قطعیت داده‌ها استفاده شود. این روش برای مناطق در سطح کشور بهینه به نظر می‌رسد. روش فازی تاپسیس توسط یوسفی و همکاران (۱۳۹۱) در ترکیب با منطق فازی در مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی استفاده شده بود که با توجه به قابلیت روش فازی در مقیاس استانی و روش فازی تاپسیس در مقیاس کشوری به نظر می‌رسد تلفیق این دو روش در مکان‌یابی در مقیاس استانی مناسب باشد، لذا بررسی بیش‌تر پیشنهاد می‌شود.

فرآیند اجرای روش‌های مد نظر حاکی از آن است که روش تاپسیس به سادگی و با سرعت بیش‌تری قابل اجراست، لذا زمانی که حجم داده‌ها زیاد باشد مثلاً در مقیاس‌های جهانی (Global) این روش می‌تواند کاربرد داشته باشد. در قیاس با روش فازی تاپسیس، فازی سوگنو نیاز به محاسبات بیشتر و پیچیده‌تر دارد، لذا این روش برای مناطق با حجم داده‌ی کم مثلاً در مقیاس استانی مناسب‌تر می‌باشد.

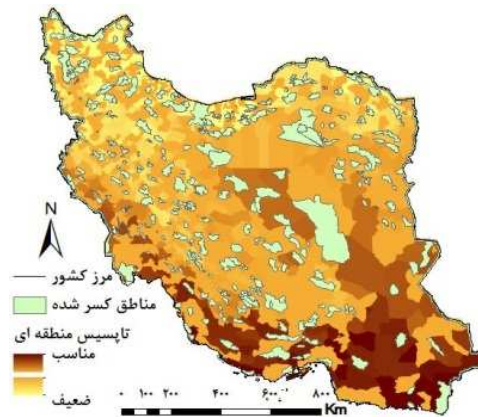
با توجه به مساحتی که هر روش به عنوان مناطق مطلوب (۱۰ درصد بالایی محاسبات) معرفی کرده‌اند، روش تاپسیس ۱۴/۷۱٪، فازی تاپسیس ۱۸/۳۳٪ و روش سوگنو ۲۰/۵۲٪ از کل منطقه قابل قبول را مناسب دانسته‌اند. مقادیر به‌دست آمده برای مناطق مناسب در روش فازی سوگنو، در هر جهت با اختلاف کمی نسبت به پیکسل‌های مجاور تغییر می‌کند. در یک دید کلی تقریباً تمام قسمت‌های ایران به‌جز مناطق شمالی و شمال غربی کشور دارای پتانسیل مناسبی جهت احداث نیروگاه‌های خورشیدی می‌باشند. براساس نتایج تحقیق حاضر استان تهران وضعیت میانه برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی دارا می‌باشد، لذا نتایج یوسفی و همکاران (۱۳۹۱) که تنها ۱۵٪ از مساحت استان را مناسب ارزیابی کرده بودند تأیید می‌شود. قابل‌ذکر است که در تمامی روش‌های بررسی شده مناطق جنوبی کشور که در عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر قرار دارند بیش‌ترین استعداد را جهت استفاده از انرژی خورشیدی نشان داده‌اند، این نتیجه توسط Alamdari و همکاران (2012: 785) نیز گزارش شده است. این بین استان‌های فارس و سیستان و بلوچستان بالاترین مقادیر پتانسیل را دارند.

استفاده از کمیت آماری میانگین برای هر بخش کشور نیز نشان می‌دهد که ترتیب‌دهی بخش‌ها به‌غیر از نواحی شمالی استان سیستان و بلوچستان تفاوت ناچیزی دارند (شکل‌های ۱۰ تا ۱۲). مقایسه نتایج مناطق مختلف نشان می‌دهد، با وجود اختلافاتی که در نتایج حاصل مشاهده می‌شود، نتایج مطلوب برای روش‌های مذکور به‌طور متوسط با ضریب همبستگی ۰/۸۵ بر هم منطبق هستند.



شکل (۱۰) نقشه پهنه‌بندی خروجی از روش فازی سوگنو

شکل (۱۱) نقشه پهنه‌بندی خروجی از روش فازی تاپسیس



شکل (۱۲) نقشه پهنه بندی خروجی از روش تاپسیس

این تحقیق در مقیاس کشوری به شناسایی مناطق مستعد برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی بر اساس المان‌های متعدد و مؤثر پرداخت. داده‌های دقیق‌تر و بزرگ مقیاس‌تر مانند نقشه‌های کاداستر، پوشش گیاهی، متوسط تعداد ساعات خورشیدی، ظرفیت و پتانسیل تولید الکتریسیته می‌تواند به انتخاب دقیق‌تر مکان نیروگاه‌های خورشیدی کمک کند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق جهت پتانسیل‌سنجی مناطق مختلف کشور برای احداث نیروگاه‌های برق خورشیدی (فتوولتائیک) از روش‌های تاپسیس، فازی تاپسیس و فازی سوگنو در سطح کشور استفاده شد. در بین روش‌های ذکر شده روش فازی تاپسیس نتایج بهتر و منطقی‌تری از نظر پیوستگی مناطق و حساسیت به دقت وزن‌های ورودی در سطح کشور ارائه داد. این در حالی است که نتایج اولویت‌بندی مناطق مختلف کشور با روش‌های اجرا شده، برای مناطق مختلف کشور تقریباً با هم یکسان هستند. در یک دید کلی تقریباً تمام قسمت‌های ایران به جز مناطق شمالی و شمال غربی کشور برای تولید انرژی خورشیدی مناسب می‌باشد. بر اساس نتایج روش فازی تاپسیس، بخش‌های نرمانشیر در استان کرمان، نوبندگان و فرجهی

در استان فارس، بخش‌های بمپور در سیستان و بلوچستان و بخش‌های همسایه شیب‌کوه و گاوبندی در استان هرمزگان بیش‌ترین استعداد را برای نصب نیروگاه خورشیدی از خود نشان می‌دهند. قابل‌ذکر است که دیگر بخش‌های جنوبی و میانی نیز پتانسیل قابل‌قبولی دارند.

منابع

- بیورانی، حسین و علی غفران (۱۳۸۸) «تبیین و به کارگیری مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS برای رتبه‌بندی مناطق مختلف شهری از منظر جرم و بزهکاری»، *نشریه کارگاه*، شماره ۸، صص ۱۵۰-۱۳۱.
- رجایی، حسین و ایوب حضرتی (۱۳۸۷) «ارائه مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره Fuzzy TOPSIS و Fuzzy Saw برای پیش‌صلاحیت و انتخاب پیمانکاران و مقایسه نتایج آن‌ها»، چهارمین کنفرانس بین‌المللی مدیریت پروژه، صص ۲۹-۳۰ مرداد ۱۳۸۷.
- سازمان انرژی‌های نو ایران (۱۳۹۲)، *نقشه‌های پتانسیل تابشی در ایران*، <http://www.suna.org.ir/fa/sun/potential>.
- ساعتی، صابر، عادل، حاتمی ماربینی و احمد ماکوئی (۱۳۸۶) «تصمیم‌گیری گروهی به کمک فازی TOPSIS»، *مجله ریاضیات کاربردی*، شماره ۱۳، صص ۲۱-۳۴.
- صفری، حسین و جلال طالبی (۱۳۹۰) «مکان یابی تسهیلات صنعتی خودروسازی گروه بهمن با استفاده از روش Fuzzy TOPSIS و ZOLP»، *مدیریت صنعتی*، شماره ۶، صص ۸۰-۵۹.
- علوی، ایرج؛ افشین، اکبری؛ محمد، عطایی و هادی کیادلیری (۱۳۹۰) «مقایسه روش‌های TOPSIS فازی و AHP فازی برای انتخاب و کاشت گونه‌های گیاهی بومی (مطالعه موردی: منطقه معدنی مس سرچشمه)»، *مجله تحقیقات منابع طبیعی تجدید شونده*، شماره ۳، صص ۴۵-۵۶.
- یوسفی، حسین؛ نورالهی، یونس؛ سلطان محمدی، مجید و رضا ارجمندی (۱۳۹۱) «کاربرد منطق فازی و FTOPSIS جهت مکانیابی نیروگاه خورشیدی با استفاده از GIS (مطالعه موردی استان تهران)»، *انرژی ایران*، شماره ۴.
- Alamdari, P., Nematollahi, O. & Alemrajabi, A.A. (2013). "Solar energy potentials in Iran: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No.21(0): PP. 778-788.
- Ashrafzadeh, M., F.M Rafiei., N.M. Isfahani & Z. Zare, (2012), "Application of fuzzy TOPSIS method for the selection of Warehouse

- Location: A Case Study”, *Interdisciplinary J. of Contemporary Research in Business*, No. 3(9), PP. 655-671.
- Aydin, N.Y., E. Kentel & H. Sebnem Duzgun, (2013), “GIS-based site selection methodology for hybrid renewable energy systems: A case study from western Turkey”, *Energy Conversion and Management*, No. 70(0), Pp. 90-106.
- Bahrami, M. & P. Abbaszadeh, (2013), “An overview of renewable energies in Iran”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 24, PP. 198-208.
- Cavallaro, F., (2010), “Fuzzy TOPSIS approach for assessing thermal-energy storage in concentrated solar power (CSP) systems””, *Applied Energy*, No. 87, PP. 496-503.
- Charabi, Y. & A. Gastli, (2011), “PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation”, *Renewable Energy*, No. 36(9), PP. 2554-2561.
- Chen, C.-T., (2001), “A fuzzy approach to select the location of the distribution center”, *Fuzzy Sets and Systems*, No. 118(1), PP. 65-73.
- Chu, T.-C, (2002), “Selecting plant location via a fuzzy TOPSIS approach”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, No. 20(11), PP. 859-864.
- Dymova, L., P. Sevastjanov & A. Tikhonenko, (2013), “An approach to generalization of fuzzy TOPSIS method”, *Information Sciences*, No. 238, PP. 149-162, 2013.
- Gastli, A. & Y. Charabi, (2010), “Solar electricity prospects in Oman using GIS-based solar radiation maps”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 14(2), PP. 790-797.
- Janke, J.R., (2010), “Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado”, *Renewable Energy*, No. 35(10), PP. 2228-2234.
- Jiang, J., Y.-w. Chen, W.-y. Chen & K.-w. Yang, (2011), “TOPSIS with fuzzy belief structure for group belief multiple criteria decision

- making”, *Expert Systems with Applications*, No. 38(8), PP. 9400-9406.
- Kaur, Ar. & Kaur, Am., (2012), “Comparison of Mamdani-type and Sugeno-type fuzzy interface systems for air conditioning system”, *International Journal of Soft Computing and Engineering*, No.2(2).
- Kaya, T. & C. Kahraman, (2011), “Multicriteria decision making in energy planning using a modified fuzzy TOPSIS methodology”, *Expert Systems with Applications*, No. 38(6), Pp. 6577-6585.
- Mehran, K. ,(2008), “Takagi-Sugeno Fuzzy Modeling for Process Control”, *Industrial Automation, Robotics and Artificial Intelligence (EEE8005)*,
- Sánchez-Lozano, J.M., J. Teruel-Solano, P.L. Soto-Elvira & M. Socorro García-Cascales, (2013), "Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 24, PP. 544-556.
- Solangi, K.H., M.R. Islam, R. Saidur, N.A. Rahim & H. Fayaz, (2011), “A review on global solar energy policy”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 15(4), PP. 2149-2163.
- Sun, Y.-w., A. Hof, R. Wang, J. Liu, Y.-j. Lin & D.-w. Yang, (2013), “GIS-based approach for potential analysis of solar PV generation at the regional scale: A case study of Fujian Province”, *Energy Policy*, No. 58, PP. 248-259.
- Tabik, S., A. Villegas, E.L. Zapata & L.F. Romero, (2012), “A Fast GIS-tool to Compute the Maximum Solar Energy on Very Large Terrains”, *Procedia Computer Science*, No. 9(0), PP. 364-372.
- Tian, J., D. Yu, B. Yu & S. Ma, (2013), “A fuzzy TOPSIS model via chi-square test for information source selection”, *Knowledge-Based Systems*, No. 37, PP. 515-527.
- Tiba, C., A.L.B. Candeias, N. Fraidenraich, E.M.d.S. Barbosa, P.B. de Carvalho Neto & J.B. de Melo Filho, (2010), “A GIS-based decision

- support tool for renewable energy management and planning in semi-arid rural environments of northeast of Brazil”, *Renewable Energy*, No. 35(12), PP. 2921-2932.
- Tsoutsos, T., N. Frantzeskaki & V. Gekas, (2005), “Environmental impacts from the solar energy technologie”, *Energy Policy*, No. 33(3), PP. 289-296.
- Yun-na, W., Y. Yi-sheng, F. Tian-tian, K. Li-na, L. Wei & F. Luo-jie, (2013), “Macro-site selection of wind/solar hybrid power station based on Ideal Matter-Element Model”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, No. 50, PP. 76-84.
- Zohoori, M., (2012), “Exploiting Renewable Energy Sources in Iran”, *Interdisciplinary Journal of Contemporary Research in Business*, No. 4(7), PP. 849-862.