پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال ٤٥، شمارهٔ ٤، زمستان ١٣٩٢
صص. ٦٠-٤٥

تناسب‌سنجی اراضی به‌منظور احداث مزارع فتوولتائیک به‌کمک تلفیق سیستم‌های جمع سادهٔ وزنی و استنتاج فازی در ایران

حسنعلی فرجی سبکبار ـ دانشیار جغرافیا و برنامه‌ریزی روستایی، دانشگاه تهران
هادی پاک طینت مهدی آبادی ـ کارشناس ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تهران
اشکان رحیمی‌کیان ـ دانشیار مهندسی برق، دانشگاه تهران
غدیر عشورنژاد* ـ کارشناس ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ١٣٩٢/٠١/١٧ تأیید نهایی: ١٣٩٢/٠٧/١٣

چکیده

انرژی خورشیدی یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر است که با توجه به موقعیت جغرافیایی ایران، می‌تواند به خوبی مورد استفاده قرار گیرد. این پژوهش مطالعهٔ جامعی را در رابطه با شناسایی مناطق مستعد و با پتانسیل بالا برای احداث نیروگاه‌های فتوولتائیک در ایران ارائه داده است. برای انجام پژوهش، در گام نخست پس از تعیین محدودهٔ مورد بررسی، معیارهای مؤثر در پتانسیل‌سنجی به‌کمک مطالعات پیشین و روش دلفی استخراج شد. در گام بعد، از روش دیمتل برای پیاده‌سازی ساختار شبکه و از مدل فرایند تحلیل شبکه‌ای نیز، برای وزن‌دهی معیارها استفاده شد. در ادامه، روش فراابتکاری SAW-FIS برای تلفیق نتایج به‌کار گرفته شد و با دقت حدود ٨٤ درصد، پتانسیل کلیهٔ خشکی‌های ایران برای احداث مزارع فتوولتائیک مورد شناسایی قرار گرفت. نتایج حاصل از مطالعه نشان داد، ایران دارای پتانسیل فوق‌العاده بالایی برای بهره‌گیری از تکنولوژی فتوولتائیک است؛ به‌گونه‌ای که ٣١ درصد از خشکی‌های ایران در سه کلاس عالی، بسیار خوب و خوب قرار گرفتند و مناطق استقرار یافته در کلاس یک یا کلاس خیلی ضعیف، کمتر از یک درصد خشکی‌های ایران را شامل می‌شوند. نتایج همچنین نشان داد سه استان یزد، کرمان، خراسان جنوبی، به‌ترتیب دارای بهترین پتانسیل برای احداث نیروگاه‌های فتوولتائیک هستند.

کلیدواژه‌ها: روش جمع سادهٔ وزنی، سیستم استنتاج فازی، سیستم اطلاعات جغرافیایی، مزارع فتوولتائیک.

---

* نویسنده مسئول: ٠٩١١٢٩٢٢٤٧٧
E-mail: ashournejad@ut.ac.ir

مقدمه

انرژی یکی از مؤلفه‌های ضروری برای فعالیت‌های صنعتی و نیاز همهٔ مردم است، بنابراین عرضه و تقاضای آن در جوامع بشری، به‌طور مستمر رو به افزایش است. افزایش جمعیت، گسترش و پراکندگی آن، همگام با نیاز روزافزون بشر به انرژی‌های جدید و کاراتر با بازدهی بیشتر، سبب رویکرد بشر به انرژی‌های تجدیدپذیر طبیعی شده است. سوخت‌های فسیلی که در ابتدا تنها منبع انرژی مورد استفادهٔ بشر بودند، به‌سرعت رو به اتمام هستند و نه‌تنها نمی‌توانند منبع قابل اطمینانی برای آینده باشند، بلکه با توجه به تغییرات جهانی اقلیم و گرم‌شدن زمین، مصرف سوخت‌های فسیلی باید به‌سرعت کاسته شود (منیر، اسیف و کوبای، ۲۰۰۱: ۳۶)، به همین دلیل برای مقابله با این چالش‌ها، انرژی‌های تجدیدپذیر پیشنهاد شده است. انرژی خورشیدی یکی از بهترین و اقتصادی‌ترین انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران به‌شمار می‌رود که نه‌تنها سبب کاهش بسیاری از دغدغه‌های بشری، مانند آلودگی‌های زیست‌محیطی و به‌دنبال آن بیماری‌های نوپدید، پایان‌پذیری انرژی، تبدیل انرژی و مانند اینها می‌شود، بلکه با توجه به آب‌وهوای ایران، می‌تواند به خوبی در ایران گسترش یابد. در این میان سیستم فتوولتائیک[1] یکی از پربازده‌ترین سیستم‌های تولید الکتریسیته خورشیدی است که می‌تواند در اکثر مناطق ایران برای تولید انرژی الکتریسیته مورد استفاده قرار گیرد و با گسترش آن در سطح ایران، می‌توان بخش کلانی از نیازهای فزایندهٔ این جمعیت روزافزون را فراهم آورد. سلول‌های فتوولتائیک به‌طور مستقیم نور خورشید را به انرژی الکتریسیته تبدیل می‌کنند. در این فرایند مواد نیمه‌هادی، مانند سیلیکون[2]، گالیوم آرسنید[3] یا کادمیوم تلوراید[4] استفاده می‌شود. در حال حاضر حدود ۹۵ درصد از سلول‌های خورشیدی سطح جهان، از سیلیکون ساخته شده‌اند. با توجه به اینکه هزینهٔ اولیهٔ احداث مزارع فتوولتائیک نسبتاً بالاست، بهینه‌سازی مکان نصب این سیستم‌ها، در افزایش بازدهی سیستم و مقرون به‌صرفه‌شدن استفاده از آنها، نقش شایانی دارد. هدف از این مطالعه، ارائهٔ روشی نوین برای بهینه‌سازی فضایی مکان مزارع فتوولتائیک در کشور ایران است.

مقصودی (۱۳۸۵) در پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد خود با عنوان «مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از روش‌های تحلیل چندگانه»، از روش تحلیل پوششی داده‌ها استفاده کرد. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، نشانگر پتانسیل بالای شهرهای یزد، شیراز و بیرجند، برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی بوده است.

کاریون، استرلا، دولس و ریدائو (۲۰۰۸) با استفاده از سیستم‌های حمایت تصمیم‌گیری محیطی[5]، مکان‌های بهینه‌ای را برای احداث نیروگاه‌های فتوولتائیک متصل به شبکه انتخاب کردند. آنها برای تهیهٔ لایهٔ تناسب اراضی احداث نیروگاه‌های فتوولتائیک متصل به شبکه، از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)[7] استفاده کردند.

چرابی و گاستلی (۲۰۱۱) از ارزیابی چندمعیارهٔ مکانی در تلفیق با روش فازی، برای ارزیابی تناسب اراضی[8] مزارع

1. Photo Voltaic (PV)
2. Silicon
3. Gallium arsenide
4. Cadmium telluride
6. Environmental Decision Suport Systems (EDSS)
7. Analytic Hierarchy Process (AHP)
8. Land suitability

بزرگ فتوولتائیک در عمان استفاده کردند. نتایج نشان داد که ۰/۵ درصد مجموع اراضی عمان، سطح تناسب بالایی برای نصب تجهیزات فتوولتائیک دارند.

ژانک (۲۰۱۰) زمین‌هایی را شناسایی کرد که پتانسیل بالایی برای مزارع خورشیدی و بادی در کلرادو[1] داشتند و نواحی مناسب برای ایجاد مزارع خورشیدی و بادی را با استفاده از روش‌های مدل‌سازی چندمعیاره در سیستم اطلاعات جغرافیایی به‌دست آورد.

دجوردجویک (۲۰۱۱) با هدف تجزیه‌وتحلیل و ارزیابی پتانسیل، وضعیت و چشم‌انداز انرژی خورشیدی فتوولتائیک در جمهوری صربستان، مطالعه‌ای را انجام داد. در این مطالعه نقشه‌های تابش خورشیدی به‌کمک نرم‌افزار PVGIS تهیه شد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که جمهوری صربستان پتانسیل بسیار زیادی برای استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک متصل و مستقل از شبکه دارد.

آراگونس بلتران، گنزالز، فراندو و رودریگوز (۲۰۱۰) در مقاله‌ای با عنوان «روشی مبتنی بر فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP)[2] برای انتخاب پروژه‌های سرمایه‌گذاری نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک» نتیجه مطالعات خود را منتشر کردند. کردند. آنها با استفاده از فرایند تحلیل شبکه‌ای، از میان چهار متغیر، بهترین متغیر را بر اساس حداقل‌سازی ریسک برای پروژه‌های نیروگاه‌های فتوولتائیک انتخاب کردند. بلتران و همکاران برای پیاده‌سازی تصمیم از دوازده معیار و پنجاه شاخص استفاده کردند.

هوفرکا و کانوک (۲۰۰۹) روشی را برای ارزیابی پتانسیل فتوولتائیک در مناطق شهری با استفاده از ابزارهای تابش خورشیدی متن باز[3] و مدل‌سازی سه‌بُعدی محیط شهری در سیستم اطلاعات جغرافیایی ارائه دادند. این ابزار تابش خورشیدی، به‌وسیلهٔ مدل تابش خورشیدی آرسان[4] ارائه و به‌کمک نرم‌افزار PVGIS برآورد شد.

ایزقدو، رودریگوز و فویو (۲۰۰۸) با استفاده از ساختار سلسله‌مراتبی و لایه‌های وکتوری، روشی را برای برآورد پراکنش جغرافیایی سطح بام‌های مناسب برای نصب تجهیزات فتوولتائیک در نواحی شهری اسپانیا ارائه کردند. آنها با به‌کارگیری این روش، میانگین مناطق مناسب برای نصب تجهیزات فتوولتائیک در پشت بام‌های اسپانیا را با ضریب اطمینان ۹۵ درصد برابر با $۱۴ \pm ۴/۵ m^۲/\mathrm{ca}$ برآورد کردند.

موقعیت جغرافیایی منطقهٔ مورد بررسی

محدودهٔ مورد مطالعهٔ این پژوهش، محدودهٔ خشکی‌های کشور ایران، هفدهمین کشور بزرگ جهان است (شکل ۱). ایران از سی‌ویک استان تشکیل شده است و از لحاظ آب‌وهوایی یکی از منحصربه‌فردترین کشورهاست. اختلاف دمای هوا در زمستان میان گرم‌ترین و سردترین نقطه، گاهی به بیش از ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد می‌رسد.[5]

1. Colorado
2. Analytic Network Process (ANP)
3. Open -source solar radiation tools
4. R. Sun
5. Wikipedia, 2012

شکل ۱. نقشهٔ محدودهٔ مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده

از آنجاکه تابش خورشیدی دارای نوسان‌های روزانه، فصلی و سالانه است، به‌طور معمول برای طراحی سیستم‌های تولید الکتریسیته خورشیدی، داده‌های تابش خورشیدی بلندمدت مورد استفاده قرار می‌گیرد و ایده‌آل‌ترین این داده‌ها از مکانی به‌دست می‌آید که تصمیم گرفته شده است در آنجا سیستم خورشیدی راه‌اندازی شود. اما در واقعیت، اغلب این‌گونه داده‌ها در دسترس نیستند و داده‌های تابش به‌دست‌آمده از نزدیک‌ترین ایستگاه محاسبهٔ تابش خورشیدی به‌کار گرفته می‌شود. از آنجایی که پیاده‌سازی و نگهداری ایستگاه‌های سنجش تابش خورشیدی هزینه‌بَر است، تراکم این‌گونه ایستگاه‌ها در کشورهای در حال توسعه‌ای چون ایران، خیلی کمتر از آن است که داده‌های مربوط به تابش خورشیدی را به‌اندازهٔ کافی فراهم آورد و حتی اگر اطلاعاتی هم موجود باشد، معمولاً تعداد سال‌های آماری این ایستگاه‌ها برای محاسبات تابش و انرژی دریافتی خورشیدی، کمتر از حد استاندارد است (جنجای، پانکیو، لاکسانابونسونگ و کیتی چانتاروب ۲۰۱۱: ۱۲۱۵). بنابراین برای به‌دست‌آوردن داده‌های تابش با دقت قابل قبول، داده‌های ماهواره‌ای گزینهٔ مناسبی هستند.

داده‌های مورد استفادهٔ این پژوهش از ناسا[1] به‌دست آمده است. این داده‌ها شامل میانگین بیست‌ودو سال آماری (۲۰۰۵-۱۹۸۳) است که از طریق سنجش از دور به‌دست‌آمده و مربوط به پروژهٔ SSE[2] ناسا است. قدرت تفکیک مکانی داده‌های مورد استفاده، یک درجه طول و عرض جغرافیایی است.

شناسایی عوامل اثرگذار در تصمیم‌سازی

به‌منظور شناسایی عوامل اثرگذار در تصمیم‌سازی، فراگیرترین و ساده‌ترین راه استفاده از مطالعات پیشین است، ولی در مواردی که موضوع مورد مطالعه سابقهٔ پژوهشی کمی داشته باشد و اطمینانی به جامع‌بودن عوامل مؤثر در تصمیم‌سازی نباشد، این روش جوابگو نخواهد بود و باید روش‌های مورد پذیرش جمعی از کارشناسان را به‌کار گرفت تا عوامل مؤثر به‌طور کامل شناسایی شوند. با توجه به اینکه مطالعات مرتبط با این پژوهش اندک بوده و اطمینانی به جامع‌بودن عوامل مؤثر در تصمیم‌سازی وجود ندارد، از روش دلفی برای شناسایی عوامل مؤثر استفاده شد.

چرابی و گاستلی (۲۰۱۱) به‌منظور تناسب‌سنجی اراضی برای احداث مزارع فتوولتائیک، از سه معیار تکنیکی (شامل شاخص‌های تابش خورشید، دسترسی به زمین و کاربری زمین)، اقتصادی (شامل مجاورت به شبکهٔ توزیع و شیب) و معیار محیطی (شامل مناطق حساس، خطوط هیدرولوژیکی و خطر تپه‌های ماسه‌ای) استفاده کردند. در مطالعهٔ دیگری که کاریون، استرلا، دولس و ریدائو (۲۰۰۸) با هدف تعیین ظرفیت تولید الکتریسیته نیروگاه‌های فتوولتائیک و انتخاب مکان انرژی خورشیدی در اندالوزیا[3] (اسپانیا) انجام دادند، از شاخص‌های پارک‌های ملی، کاربری اراضی، برنامه‌ریزی شهری، شیب، سایه، دسترسی، تابش، ساعات آفتابی و دما استفاده شده است. ژانک (۲۰۱۰) به‌منظور مدل‌سازی چندمعیارهٔ مزارع خورشیدی و بادی، شاخص‌هایی چون پتانسیل باد، پتانسیل خورشید، مسافت تا خطوط انتقال برق، مسافت تا شهر، تراکم جمعیت، فاصله از راه‌های سنگین و زمین‌های دولتی را به‌کار گرفت. مقصودی (۱۳۸۵) نیز مطالعهٔ خود را با استفاده از شاخص‌های تابش جهانی، شدت حوادث طبیعی، پهنه‌های زمین‌شناسی مناسب، دسترسی به آب و خصوصیات جغرافیایی و توپوگرافی انجام داد.

روش دلفی فرایندی ساختاریافته برای جمع‌آوری و طبقه‌بندی دانش موجود در نزد گروهی از کارشناسان و خبرگان است که از طریق توزیع پرسش‌نامه‌هایی در بین این افراد و بازخورد کنترل‌شدهٔ پاسخ‌ها و نظرات دریافتی، انجام می‌گیرد. به‌کارگیری روش دلفی، اغلب با هدف کشف ایده‌های خلاقانه و قابل اطمینان، یا تهیهٔ اطلاعاتی مناسب برای تصمیم‌گیری است. از آغاز و توسعهٔ روش دلفی از سوی هلمر و دالکی در سال ۱۹۶۳، این روش به‌طور گسترده‌ای در کاربردهای گوناگونی مورد استفاده قرار گرفت و به‌منزلهٔ یک ابزار پیش‌بینی شناخته شد.

برای اجرای روش دلفی، پرسش‌نامه‌هایی تهیه شد و در اختیار شش نفر از متخصصان مرتبط برای پاسخ‌گویی قرار گرفت. هفده شاخص با نظر متخصصان از این روش به‌دست آمد که به‌دلیل جلوگیری از پیچیده‌شدن مطالعه، سه مورد از شاخص‌ها با کمترین امتیاز حذف شدند و چهارده شاخص باقی‌مانده در سه معیار اصلی دسته‌بندی شدند (جدول ۱).

1. NASA- http://eosweb.larc.nasa.gov
2. Surface meteorology and Solar Energy
3. Andalusi

جدول ۱. شاخص‌های به‌دست‌آمده از روش دلفی و وزن‌های حاصل از فرایند تحلیل شبکه‌ای

معیار	شاخص	وزن
اقلیمی ـ محیطی	تابش مستقیم	۰/۲۰۳۴
	تابش پراکنده	۰/۰۴۲۷
	دما	۰/۱۰۹۳
	رطوبت	۰/۰۹۵۳
	روزهای ابری	۰/۰۳۶۶
	ضریب شفافیت	۰/۰۲۴۷
فنی	ارتفاع	۰/۰۳۲۷
	زمین‌شناسی	۰/۰۱۴۹
	شیب	۰/۰۶۵۵
اقتصادی	دسترسی به زمین	۰/۰۵۲۲
	هزینهٔ زمین	۰/۰۹۳۷
	کاربری زمین	۰/۰۸۵۹
	خطوط انتقال برق	۰/۱۲۵۴
	نیروی متخصص	۰/۰۱۷۷

در ادامه برای آشنایی بیشتر با شاخص‌ها، در مورد هر کدام توضیح کوتاهی داده می‌شود. منبع انرژی برای هر سیستم فتوولتائیکی، تابش در دسترس در محل نصب است، بنابراین کارایی سیستم‌های فتوولتائیک، به‌طور مستقیم به‌میزان تابش در دسترس در محل نصب وابسته است. تابش مستقیم نرمال‌شده، یعنی تابش برخوردی به یک سطح قرار داده شده به‌سمت تابش خورشید که مقدار آن از طریق روش THMT ناسا به‌دست می‌آید و میانگین آن در ایران حدود ۶/۱۷ ($Kwh/day/m^2$) است (ناسا، ۲۰۰۹). تابش پخش‌شده، تابشی است که پس از برخورد مستقیم با مولکول‌ها و ذرات اتمسفر، پراکنده‌شده و به سطح زمین می‌رسد و در ایران دارای میانگینی حدود ۱/۵۱ ($Kwh/day/m^2$) است (ناسا، ۲۰۰۹). دما نقش اساسی را در فرایند تبدیل فتوولتائیک ایفا می‌کند. بازدهی الکتریکی و همچنین قدرت خروجی سیستم‌های فتوولتائیک به‌صورت خطی با دما در ارتباط است و با افزایش آن، بازدهی کاهش می‌یابد. حداکثر میانگین سالانهٔ دمای ایران به مرز ۲۹ درجه می‌رسد (ناسا، ۲۰۰۹). رطوبت نسبی مقداری است که از نسبت بخار آب موجود در هوا به حداکثر بخار آبی که هوا در یک دمای معین می‌تواند در خود جای دهد، به‌دست می‌آید. افزایش رطوبت نسبی با توجه به اثراتی که بر کاهش تابش دارد، سبب کاهش بازدهی ماژول‌های PV می‌شود. حمل‌ونقل لوازم و تجهیزات در زمان راه‌اندازی تا محل احداث مزرعهٔ فتوولتائیک، به‌طور مسلم بحث مهمی است؛ هر چقدر دسترسی به نیروگاه آسان‌تر باشد، هزینهٔ احداث نیروگاه نیز کاهش می‌یابد. زمین یکی از زیرساخت‌های اصلی مورد نیاز برای احداث نیروگاه‌ها است و این مسئله برای نیروگاه‌های خورشیدی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ زیرا نیروگاه خورشیدی در مقایسه با روش‌های دیگر تولید انرژی، به زمین بیشتری نیاز دارد. نوع سیستم مورد مطالعه در این پژوهش متصل به شبکه است، بنابراین برای انتقال برق به شبکه، باید این سیستم به شبکه متصل شود. بنابراین اولویت احداث در مناطقی است که به خطوط انتقال

برق نزدیک‌تر باشند. از آنجایی که برای نگهداری و نظارت بر نیروگاه به نیروی متخصص نیاز است، ترجیح بر این است که مکان‌های انتخاب‌شده به مراکز عمدهٔ جمعیتی نزدیک باشند. شیب یکی از عوامل بسیار مهم در پتانسیل‌سنجی مزارع فتوولتائیک است و میانگین مقدار آن در ایران حدود ۱۱ درصد است. تمام زمین‌هایی با شیب بیشتر از ۲ درصد، به این دلیل اینکه پنل‌ها روی ردیف بعدی سایه می‌اندازند و از این طریق بر بازدهی پنل‌ها به‌شدت تأثیر می‌گذارند، محدود می‌شوند. ارتفاع اثر خود را از طریق کاهش جذب و پخش اتمسفری اعمال می‌کند. درواقع با افزایش ارتفاع از سطح دریا، نور خورشید برای رسیدن به سطح پنل‌ها مسیر کمتری را در اتمسفر طی می‌کند که این خود موجب کاهش جذب و پخش اتمسفری نور می‌شود. با توجه به اینکه نیروگاه‌های فتوولتائیک به اراضی بزرگ نیاز دارند، کاربری زمین می‌تواند در سرمایهٔ اولیه برای راه‌اندازی و همچنین، از لحاظ منابع طبیعی و زیست‌محیطی مؤثر باشد. تعیین شرایط زمین‌شناسی برای احداث نیروگاه اهمیت شایانی دارد. از این دیدگاه جنس و دانه‌بندی و شرایط زیرساخت نیروگاه از اهمیت بسیاری برخوردار است. تعداد روزهای ابری با توجه به اثری که روی تولید پنل‌ها می‌گذارد، می‌تواند بسیار مهم باشد؛ به‌طور مسلم، هر چقدر تعداد روزهای ابری در منطقه‌ای بیشتر باشد، به‌دلیل به حداقل رسیدن تابش دریافتی، مقدار تولید به‌شدت افت‌کرده و گاهی ممکن است به صفر برسد. میانگین درصد ابرناکی در ایران حدود ۴۰ درصد است (ناسا، ۲۰۰۹). ضریب شفافیت عبارت است از میزان کل تابش برخوردی به یک سطح افقی در سطح زمین، تقسیم بر تابش ورودی به سطح بالای اتمسفر(کومار و یوماناند، ۲۰۰۵: ۲۲۲۳). درواقع این شاخص میزان تأثیر اتمسفر بر تابش را نشان می‌دهد که مقدار متوسط آن در ایران، حدود ۰/۵۸ است (ناسا، ۲۰۰۹).

موزون‌سازی شاخص‌ها

در مواردی که یک پارامتر در تصمیم‌گیری دخالت دارد، به‌طور معمول این تصمیم‌گیری آسان است. هرچه بر تعداد پارامترهای تصمیم‌گیری افزوده شود، فرایند تصمیم‌گیری دشوارتر می‌شود؛ به‌گونه‌ای که با افزایش تعداد عوامل مؤثر در تصمیم‌گیری، بشر دیگر قادر نیست با اتکا به ذهن خود مسئله را به‌سادگی پردازش کند. در این‌گونه موارد که شمار پارامترهای تصمیم‌گیری زیاد است و تصمیم‌گیری بسیار پیچیده می‌شود، سیستم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌کار گرفته می‌شود. در مورد تصمیم‌گیری‌های مکانی با توجه به اضافه‌شدن بحث مکان به سایر عوامل، این فرایند پیچیده‌تر می‌شود، بنابراین استفاده از سیستم‌های تصمیم‌گیری چندمعیارهٔ مکانی، الزامی است (مالزسک، ۱۹۹۹: ۶).

سیستم تصمیم‌گیری چندمعیاره، زیررشته‌ای از پژوهش در عملیات است که به‌صراحت معیارهای چندگانه را در محیط‌های تصمیم‌گیری بررسی می‌کند. به‌طور معمول، راه حل بهینهٔ منحصربه‌فردی برای حل چنین مشکلاتی وجود ندارد و استفاده از ترجیحات تصمیم‌گیرندگان برای تمایز بین راه حل‌ها لازم است(تریان تافیلو، ۲۰۰۰: ۲۶۱). در این پژوهش به‌منظور تصمیم‌گیری چندمعیارهٔ مکانی، از فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) استفاده شده است.

مطالعات اولیه، روش تصمیم‌گیری چند معیاره‌ای را با عنوان فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی به‌منزلهٔ راه حلی مناسب برای حل مسائل پیچیده پیشنهاد کردند. درواقع فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی یک ساختار جامع طراحی‌شده برای مقابله با احساسات، گرایش‌های عقلانی و غیر عقلانی در مواقعی است که با تصمیم‌گیری‌های چندهدفه، چندمعیاره و چندنفره، با

یا بدون یقین در مورد متغیرها، سروکار داریم (وی و وو، ۲۰۰۷: ۹۸۶). فرض اساسی در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی این است که تمام اجزا در سطح بالا، مستقل از بخش‌های پایینی هستند. تمام مسائل تصمیم‌گیری نمی‌توانند با استفاده از ساختار سلسله‌مراتبی مدل‌سازی شوند؛ زیرا در بسیاری از تصمیم‌گیری‌ها، معیارها در تقابل و ارتباط با یکدیگر هستند (ساعتی، ۱۹۹۶: ۲). برای حل این مشکل، ساعتی فرایند تحلیل شبکه‌ای را ارائه داد. فرایند تحلیل شبکه‌ای، یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است و در مجموعه مدل‌های جبرانی قرار می‌گیرد. این مدل بر مبنای فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی طراحی‌شده و در آن، شبکه جایگزین سلسله‌مراتب شده است. روش تحلیل شبکه‌ای می‌تواند به‌مانند ابزاری مؤثر، در مواردی مورد استفاده قرار گیرد که ارتباط داخلی عناصر یک سیستم به‌صورت ساختار شبکه‌ای شکل می‌گیرند.

فرایند مدل‌سازی در روش ANP به‌اجمال شامل مراحل زیر است:

۱. **ماتریس مقایسه‌های زوجی و برآورد وزنی نسبی:** پس از تدوین مدل شبکه‌ای، با استفاده از مقیاس اهمیت نسبی، میان معیارها و زیرمعیارهای وابسته یا دارای اثر متقابل، مقایسه‌های زوجی انجام می‌گیرد.

۲. **تشکیل سوپر ماتریس اولیه:** عناصر ANP با یکدیگر در تعامل قرار دارند. این عناصر می‌توانند واحد تصمیم‌گیرنده، معیارها، زیرمعیارها، نتایج حاصل، گزینه‌ها و هر چیز دیگری باشند. وزن نسبی هر ماتریس براساس مقایسهٔ زوجی محاسبه می‌شود، وزن‌های حاصل وارد سوپر ماتریس می‌شوند و رابطهٔ متقابل بین عناصر سیستم را نشان می‌دهند.

۳. **تشکیل سوپرماتریس وزنی:** درواقع ستون‌های سوپرماتریس از چند بُردار ویژه تشکیل می‌شوند که جمع هر کدام از بردارها برابر یک است. پس این امکان وجود دارد که جمع هر ستون سوپرماتریس اولیه بیش از یک باشد (متناسب با بردار ویژه‌هایی که در هر ستون وجود دارند). برای آنکه از عناصر ستون متناسب با وزن نسبی آنها فاکتور گرفته شود و جمع ستون برابر یک شود، هر ستون ماتریس استاندارد می‌شود. درنتیجه، ماتریس جدیدی به‌دست می‌آید که جمع هر یک از ستون‌های آن برابر یک خواهد بود. ماتریس جدید، ماتریس وزنی نام دارد.

۴. **محاسبهٔ بُردار وزن عمومی:** در مرحلهٔ بعد، سوپرماتریس وزنی به توان حدی می‌رسد تا عناصر ماتریس همگرا شده و مقادیر سطری آن با هم برابر شوند. بر اساس ماتریس به‌دست‌آمده، بردار وزن عمومی مشخص می‌شود.

رابطهٔ ۱) $\lim_{k\to\infty} W^k$

ماتریسی که درنتیجهٔ به توان رسیدن و ماتریس وزنی به‌دست می‌آید، ماتریس حدی است که مقادیر هر سطر آن با هم برابر است (ولف اسلنر، واسیک و لکسر، ۲۰۰۵: ۱۶۳).

رابطهٔ ۲) $\lim_{k\to\infty} \left(\frac{1}{N}\right) \sum W_i^k$

در پژوهش پیش رو، به‌منظور پیاده‌سازی فرایند تحلیل شبکه‌ای از نرم‌افزار Super Decision استفاده شد. برای

این کار، نخست پرسش‌نامهٔ مقایسه‌های زوجی تهیه و در اختیار شش نفر از متخصصان مربوطه قرار گرفت و سپس با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل پرسش‌نامه‌ها، مقایسه‌های زوجی در نرم‌افزار Super Decision انجام شد و وزن هر یک از شاخص‌ها به‌دست آمد که در جدول ۱ آورده شده است.

تلفیق شاخص‌ها

مجموعه‌های فازی را نخستین‌بار پروفسور لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵، برای شرایط عدم اطمینان ارائه کرد. در مجموعه‌های قطعی، یک عنصر فقط می‌تواند عضو مجموعه‌ای باشد یا نباشد. بنابراین مقدار عضویتی که هر عنصر می‌گیرد از دو حالت یک و صفر خارج نیست؛ ولی در مجموعه‌های فازی هر عنصر می‌تواند مقدار عضویتی بین صفر تا یک بگیرد. منطق فازی می‌تواند از عملگرهای کیفی و / یا برای جنبه‌های غیر قطعی متغیرها با اختلاط مجموعه‌های فازی استفاده کند. در سیستم‌های استنتاج فازی از قوانین «اگر ـ سپس» برای ترکیب‌کردن پایگاه دانش و ایجاد ارتباط بین متغیرهای فازی ورودی با متغیرهای خروجی استفاده می‌شود (رز، ۲۰۱۰: ۲۸).

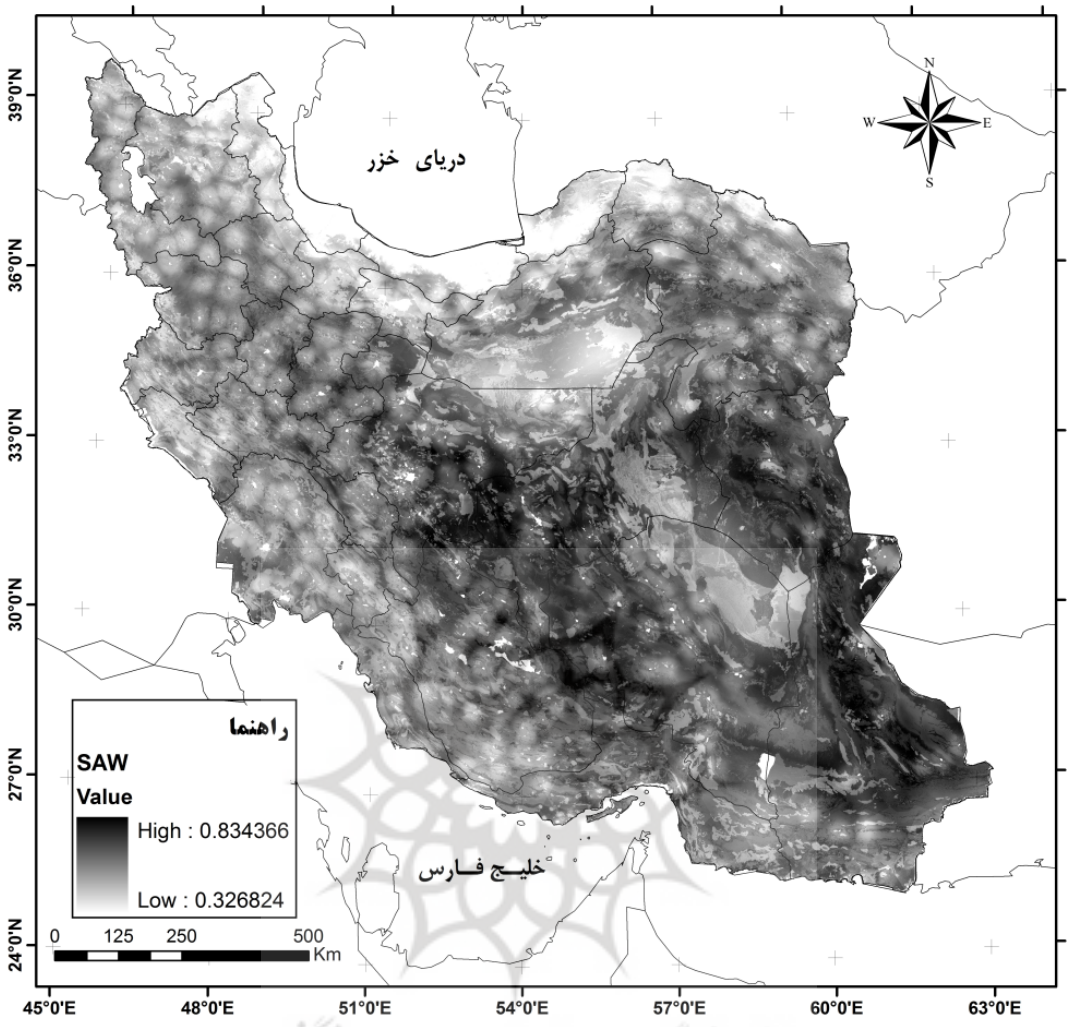
روش استنتاج ممدانی گسترده‌ترین روش استنتاج فازی است. در روش ممدانی برای هر قانون فازی، حداقل درجه عضویتی که مربوط به شرایط ارائه‌شده در عبارت قانون است، برای مشخص‌کردن نواحی‌ای استفاده می‌شود که تحت پوشش قانون هستند. در پژوهش پیش رو، از این روش استنتاج فازی استفاده شده است.

مراحل روش استنتاج فازی به‌ترتیب زیر است:

۱. مشخص‌کردن مجموعه‌ای از قوانین فازی؛
۲. فازی‌کردن ورودی‌ها با استفاده از توابع عضویت فازی؛
۳. ترکیب ورودی‌های فازی با توجه به قوانین؛
۴. ترکیب خروجی‌های به‌دست‌آمده از هر قانون و تشکیل توزیع خروجی؛
۵. غیرفازی‌سازی توزیع خروجی (در صورت نیاز به مقادیر قطعی).

با توجه به اینکه شاخص‌های ورودی زیادی در این مطالعه وجود دارد (چهارده شاخص)، برای استفاده از استنتاج فازی، باید تعداد بسیار زیادی قانون تعریف کرد. این امر سبب سردرگمی متخصصان و پیچیدگی بیش از حد مسئله می‌شود و درنهایت موجب افزایش احتمال خطا در تعریف قانون‌ها و درنتیجه خروجی نهایی می‌شود. به همین سبب در این پژوهش، یک مدل نوین از ترکیب روش جمع سادهٔ وزنی[1] و سیستم استنتاج فازی[2] ارائه شده است که مشکل یاد شده را برطرف می‌کند و گذشته از این، دقت خروجی را به مقدار زیادی افزایش می‌دهد.

1. Simple Additive Weighting (SAW)
2. Fuzzy Inference System (FIS)



شکل ۲. نتایج حاصل از روش وزنی ساده

در روش ابتکاری ارائه‌شده، ورودی اصلی، لایهٔ نهایی حاصل از روش جمع سادهٔ وزنی است (شکل ۱). مشکل اساسی این روش خاصیت جبرانی آن است. برای مثال، منطقه‌ای با شیب بالای ۵ درصد را در نظر بگیرید، این منطقه شرایط حداقل احداث مزرعه فتوولتائیک را ندارد، در حالی‌که در روش جمع سادهٔ وزنی، این شیب بالا ممکن است با شاخص‌های دیگر جبران شود و منطقهٔ خوبی برای احداث مزرعهٔ فتوولتائیک شناخته شود. به همین سبب، از ترکیب روش استنتاج فازی با روش جمع سادهٔ وزنی استفاده شده است تا این مشکل از میان برداشته شود. برای پیاده‌سازی روش استنتاج فازی و روش جمع سادهٔ وزنی، به‌ترتیب گام‌های زیر انجام گرفت:

۱. فازی‌سازی لایهٔ حاصل از روش جمع سادهٔ وزنی: در گام اول، لایهٔ به‌دست‌آمده از روش جمع سادهٔ وزنی با استفاده از توابع عضویت ذوزنقه‌ای، به شش دستهٔ بسیار ضعیف، ضعیف، متوسط، خوب، بسیار خوب و عالی، به‌ترتیب جدول ۲ تقسیم‌بندی شد.

جدول ۲. توابع عضویت مربوط به طبقه‌بندی لایهٔ به‌دست‌آمده از روش جمع سادهٔ وزنی

$\mu(x)_{saw_Vlow} = \begin{cases} 1, x \le 0.426 \\ 1 - \left[\frac{x - 0.426}{0.479 - 0.426}\right], 0.426 < x \le 0.479 \\ 0, x > 0.479 \end{cases}$
$\mu(x)_{saw_{low}} = \begin{cases} 0, x \le 0.426 \; or \; x \ge 0.554 \\ \left[\frac{x - 0.443}{0.503 - 0.443}\right], 0.426 < x \le 0.479 \\ 1, 0.479 < x \le 0.523 \\ 1 - \left[\frac{x - 0.523}{0.554 - 0.523}\right]; \; 0.523 < x < 0.554 \end{cases}$
$\mu(x)_{saw_moderate} = \begin{cases} 0, x \le 0.523 \; or \; x \ge 0.614 \\ \left[\frac{x - 0.548}{0.584 - 0.548}\right], 0.523 < x \le 0.554 \\ 1, 0.554 < x \le 0.584 \\ 1 - \left[\frac{x - 0.584}{0.614 - 0.584}\right], 0.584 < x < 0.614 \end{cases}$
$\mu(x)_{saw_good} = \begin{cases} 0, x \le 0.584 \; or \; x \ge 0.670 \\ \left[\frac{x - 0.618}{0.652 - 0.618}\right], 0.584 < x \le 0.614 \\ 1, 0.614 < x \le 0.642 \\ 1 - \left[\frac{x - 0.642}{0.670 - 0.642}\right], 0.642 < x < 0.670 \end{cases}$
$\mu(x)_{saw_Vgood} = \begin{cases} 0, x \le 0.642 \; or \; x \ge 0.735 \\ \left[\frac{x - 0.642}{0.670 - 0.642}\right], 0.642 < x \le 0.670 \\ 1, 0.670 < x \le 0.700 \\ 1 - \left[\frac{x - 0.700}{0.735 - 0.700}\right], 0.700 < x < 0.735 \end{cases}$
$\mu(x)_{saw_excellent} = \begin{cases} 0, x \le 0.700 \\ \left[\frac{x - 0.700}{0.735 - 0.700}\right], 0.700 < x \le 0.735 \\ 1, x > 0.735 \end{cases}$

۲. فازی‌سازی لایه‌های ورودی مشابه لایهٔ به‌دست‌آمده از روش جمع سادهٔ وزنی.

۳. تعریف قوانین فازی: در این گام، قوانین فازی بر اساس نیاز و با توجه به نظر متخصصان تعریف شد. در این پژوهش از ده قانون فازی زیر استفاده شده است:

یک) اگر SAW عالی باشد، یا بسیار خوب باشد، یا خوب باشد، یا متوسط باشد، یا ضعیف باشد، یا خیلی ضعیف باشد و شیب نامناسب باشد؛ سپس منطقه نامناسب است.

اگر SAW عالی باشد، یا بسیار خوب باشد، یا خوب باشد، یا متوسط باشد، یا ضعیف باشد، یا خیلی ضعیف باشد و کاربری نامناسب باشد؛ سپس منطقه نامناسب است.

اگر SAW عالی باشد، یا بسیار خوب باشد، یا خوب باشد و کاربری کم‌تناسب باشد؛ سپس منطقه متوسط است.

اگر SAW عالی باشد، یا بسیار خوب باشد، یا خوب باشد، یا متوسط باشد و رطوبت بسیار زیاد باشد؛ سپس منطقه ضعیف است.

اگر SAW عالی باشد، یا بسیار خوب باشد و دما بسیار بالا باشد؛ سپس منطقه خوب است.

اگر SAW عالی باشد، یا بسیار خوب باشد، یا خوب باشد، یا متوسط باشد و فاصله از شبکهٔ انتقال برق بسیار زیاد باشد، یا زیاد باشد؛ سپس منطقه ضعیف است.

اگر SAW عالی باشد، یا بسیار خوب باشد، یا خوب باشد، یا متوسط باشد و دسترسی به منطقه بسیار پایین باشد؛ سپس منطقه ضعیف است.

اگر SAW عالی باشد و هزینهٔ زمین بسیار زیاد باشد؛ سپس منطقه بسیار خوب است.

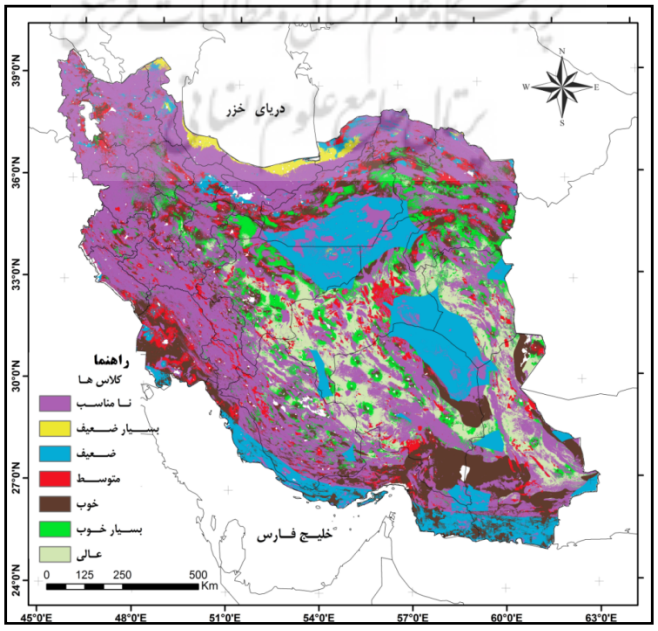
اگر SAW عالی باشد، یا بسیار خوب باشد و روزهای ابری بسیار زیاد باشد؛ سپس منطقه خوب است.

اگر SAW عالی باشد، یا بسیار خوب باشد و تابش مستقیم بسیار پایین باشد؛ سپس منطقه خوب است.

۴. ترکیب ورودی‌های فازی بر اساس قوانین.

۵. ترکیب خروجی‌های حاصل از هر قانون و تشکیل نقشهٔ توزیع خروجی.

پس از تشکیل نقشهٔ توزیع خروجی برای هر قانون، خروجی‌های حاصل از هر قانون با هم جمع شد و کل منطقهٔ مورد مطالعه به هفت ناحیهٔ نامناسب، بسیار ضعیف، ضعیف، متوسط، خوب، بسیار خوب و عالی تقسیم شد که نتایج در شکل ۳ نشان داده شده است. در گام آخر برای هر استان با توجه به نتایجی که از روش وزنی ساده و SAW-FIS به‌دست آمد (به جز سه استان شمالی گلستان، مازندران و گیلان که به‌دلیل شرایط اقلیمی و محیطی در حال حاضر امکان احداث نیروگاه فتوولتائیک توجیه اقتصادی ندارد)، سه مکان پیشنهاد شد.



شکل ۳. نتایج حاصل از اعمال روش SAW-FIS روی شاخص‌ها

برآورد دقت

یکی از فراگیرترین روش‌های ارزیابی صحت نتایج، استفاده از داده‌های واقعی است. متأسفانه نیروگاه‌های خورشیدی موجود در ایران انگشت‌شمار هستند و بر همین اساس، از روش یادشده نمی‌توان صحت نتایج را بررسی کرد. راه‌کار دوم برای ارزیابی صحت نتایج، استفاده از نتایج محققان دیگری است که پژوهش‌های مشابهی انجام داده‌اند. در پژوهش پیش رو برای این کار، نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات مقصودی (۱۳۸۵) مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس یافته‌های پژوهش مقصودی، شهرهای یزد، شیراز و بیرجند، به‌ترتیب دارای بیشترین پتانسیل برای استفاده از انرژی خورشیدی هستند. نتایج این مطالعه نیز نشان داد، سه استانی که رتبهٔ اول را کسب کرده‌اند، به‌ترتیب استان‌های یزد، سیستان و بلوچستان و خراسان جنوبی هستند. مقایسهٔ نتایج نشان می‌دهد از سه شهری که در هر دو مطالعه شهرهای برتر معرفی شده‌اند، دو شهر کاملاً با هم همخوانی دارند و شهر شیراز که در مطالعهٔ مقصودی رتبهٔ سوم را به‌دست آورده، در این مطالعه در رتبهٔ ششم قرار گرفته است. رتبهٔ اول در هر دو مطالعه نیز شهر یزد بوده است.

در گام آخر از بررسی صحت نتایج، از نظر متخصصان برای اطمینان از صحت نتایج و برآورد دقت استفاده شد. روش کار بدین‌گونه بود که ابتدا پنج متخصص انتخاب شدند و سپس از بین هشتادویک مکان پیشنهادی، پانزده مکان به‌طور تصادفی انتخاب شد و از کارشناسان درخواست شد تا در مورد سه مکان نظر خود را از اعداد ۱ تا ۱۰ بیان کنند، به‌گونه‌ای که عدد ۱۰ بیانگر تأیید کامل مکان و عدد یک نیز بیانگر رد کامل مکان باشد. نتایج حاصل از این نظرسنجی نشان داد پایین‌ترین رتبه از بین پانزده مکان، رقم ۶ بوده است (جدول ۳). با توجه به میانگین نتایج به‌دست‌آمده، دقت مکان‌های ارائه‌شده حدود ۸۴ درصد است که البته با توجه به کوچک‌بودن جامعهٔ آماری، این دقت بسیار خوب است. متأسفانه از نظر شمار کارشناس متخصص برای نظرسنجی، محدودیت وجود داشت و از سوی دیگر، نظرخواهی در مورد بیش از سه مکان در حوصلهٔ متخصصان نبود، بنابراین به همین تعداد نمونه بسنده شد.

جدول ۳. نظر متخصصان برای امتیازدهی به هر یک از مکان‌ها

	متخصص اول			متخصص دوم			متخصص سوم			متخصص چهارم			متخصص پنجم		
ردیف	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
امتیاز	۹	۹	۱۰	۱۰	۸	۷	۱۰	۹	۹	۱۰	۶	۹	۱۰	۱۰	۸
میانگین	۸/۳۳														

یافته‌های پژوهش

نتایج این پژوهش، چهارده شاخص را مهم‌ترین عوامل مؤثر در پتانسیل‌سنجی اراضی ایران برای احداث مزارع فتوولتائیک معرفی کرده است که در این میان، شاخص‌های تابش مستقیم، فاصله از خطوط انتقال برق و دما، به‌ترتیب دارای بیشترین اهمیت و شاخص نیروی انسانی کمترین اهمیت را دارد. با در نظر گرفتن این موضوع که منبع انرژی برای هر سیستم فتوولتائیکی، تابش در دسترس در محل نصب است و کارایی سیستم‌های فتوولتائیک به‌طور مستقیم به‌میزان تابش در دسترس در محل نصب مرتبط است، تخصیص یافتن بیشترین وزن به شاخص تابش مستقیم، کاملاً توجیه می‌شود. در مورد شاخص خطوط انتقال برق با توجه به اینکه هزینه‌های انتقال برق فوق‌العاده بالاست، دور بودن از

خطوط انتقال برق می‌تواند هزینه‌های سنگینی به نیروگاه تحمیل کند که با احتساب این هزینه‌ها حتی ممکن است احداث نیروگاه از لحاظ اقتصادی به‌صرفه نباشد، بنابراین رتبهٔ دوم فاصلهٔ از خطوط انتقال برق، کاملاً منطقی است. در مورد شاخص دما نیز، مطالعات انجام‌شده نشان داده است که دما در فرایند تبدیل فتوولتائیک نقش اساسی ایفا می‌کند. بازدهی الکتریکی و همچنین قدرت خروجی سیستم‌های فتوولتائیک، به‌صورت خطی با دما در ارتباط است و با افزایش آن کاهش پیدا می‌کنند (اسکوپلاکی و پالیوس، ۲۰۰۹: ۶۱۸). دما به‌شدت روی ولتاژ خروجی سلول‌های PV اثرگذار است؛ به‌گونه‌ای که با افزایش دما، میزان بازدهی ماژول‌ها به‌شدت افت می‌کند. به همین سبب، شاخص دما از اهمیت خاصی برخوردار است.

در این پژوهش با استفاده از روش SAW-FIS، کل ایران از لحاظ ظرفیت احداث نیروگاه‌های فتوولتائیک، به هفت کلاس اصلی نامناسب، بسیار ضعیف، ضعیف، متوسط، خوب، بسیار خوب و عالی تقسیم شد. به جز مناطقی که در کلاس نامناسب قرار می‌گیرند (اغلب به‌دلیل شیب زیاد و کاربری نامناسب)، اکثر مناطق ایران که افزون‌بر ۳۱ درصد خشکی‌های ایران را شامل می‌شوند (جدول ۴) در سه کلاس عالی، بسیار خوب و خوب قرار گرفته‌اند. نکتهٔ قابل توجه اینکه مناطق جای‌گرفته در کلاس یک یا کلاس خیلی ضعیف، مساحتی کمتر از یک درصد خشکی‌های ایران را اشغال کرده‌اند. با تأمل در آمار ذکر شده، می‌توان گفت که ایران از ظرفیت فوق‌العاده‌ای برای استفاده از فناوری فتوولتائیک برخوردار است.

جدول٤. مساحت و درصد مساحت قرار گرفته در کلاس‌های مختلف

کلاس	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد مساحت (٪)
کلاس ۶ (عالی)	۱۵۴۰۹۹	۹/۶۴
کلاس ۵ (بسیار خوب)	۱۲۲۱۲۶	۷/۶۴
کلاس ۴ (خوب)	۲۲۵۴۳۸	۱۴/۱۲
کلاس۳ (متوسط)	۱۱۵۵۰۸	۷/۲۳
کلاس ۲ (ضعیف)	۲۳۶۱۵۶	۱۴/۷۸
کلاس ۱ (بسیار ضعیف)	۱۴۲۴۳	۰/۸۹
کلاس ۰ (نا مناسب)	۷۳۰۲۰۴	۴۵/۷

حدود ۴۵ درصد از خشکی‌های ایران در کلاس نامناسب قرار گرفته‌اند (شکل ۳). گفتنی است در وهلهٔ اول، شاید درصد بالایی به نظر برسد، اما دلیل قرار گرفتن این مقدار از مساحت اراضی ایران در کلاس نامناسب، به‌طور عمده شیب بالا است. همان‌گونه که پیش از این گفته شد، شیب‌های بالاتر از ۵ درصد برای احداث مزارع فتوولتائیک محدودکننده هستند، بنابراین مناطقی که در کلاس نامناسب قرار گرفته‌اند، برای ایجاد مزارع بزرگ فتوولتائیک مناسب نیستند و ممکن است برای استفاده از این فناوری در مقیاس‌های کوچک (غیر متصل به شبکه) در کلاس عالی قرار گیرند.

استان‌های یزد، کرمان، خراسان جنوبی، سیستان و بلوچستان، اصفهان، فارس و خراسان رضوی، به‌ترتیب بیشترین مساحت از کلاس عالی و استان‌های گیلان، مازندران و گلستان، به‌ترتیب بیشترین مساحت واقع در کلاس بسیار ضعیف را در خود جای داده‌اند.

بحث و نتیجه‌گیری

استفادهٔ مناسب از انرژی خورشیدی، مستلزم شناسایی مناطق دارای پتانسیل بالا برای کاربرد این انرژی است. با وجود اینکه اکثر مناطق ایران برای بهره‌گیری از انرژی خورشیدی از پتانسیل خوبی برخوردارند، ولی شناسایی مناطقی که پتانسیل بالاتری دارند، می‌تواند در افزایش بازدهی تولید الکتریسیته و مقرون به‌صرفه‌شدن الکتریسیتهٔ تولیدی از این فناوری، بسیار مؤثر باشند. در کنار مزایای زیاد فناوری فتوولتائیک، یکی از معضلات استفاده از آن، سرمایهٔ اولیهٔ فوق‌العاده زیاد برای راه‌اندازی این نوع نیروگاه‌ها است. بنابراین شناسایی بهترین مناطق برای نصب تجهیزات فتوولتائیک، می‌تواند مهم‌ترین گام برای احداث نیروگاه‌های فتوولتائیک باشد. در این مطالعه تلاش شد، روشی کاربردی برای بهینه‌سازی مکان نصب تجهیزات فتوولتائیک ارائه شود تا بیشترین بازدهی و طول عمر مفید را داشته باشند.

تا کنون مطالعات اندکی با استفاده از مدل‌ها و روش‌های مختلف برای پهنه‌بندی و شناسایی مناطق بهینهٔ نصب تجهیزات فتوولتائیک انجام گرفته است، اما این پژوهش برآن شد تا با بومی‌سازی شاخص‌ها، مجموعهٔ کاملی از عوامل مؤثر در بهینه‌سازی مکان نصب تجهیزات فتوولتائیک در برابر سایر مطالعات مشابه، ارائه کند. تابش مستقیم، تابش پراکنده، دما، رطوبت، روزهای ابری، ضریب شفافیت، ارتفاع، زمین‌شناسی، شیب، دسترسی به زمین، هزینهٔ زمین، کاربری زمین، خطوط انتقال برق و نیروی متخصص، چهارده شاخص حاصل از روش دلفی در این پژوهش بوده است. این در حالی است که در پژوهش مشابهی از شاخص‌های تابش جهانی، شدت حوادث طبیعی، پهنه‌های زمین‌شناسی مناسب، دسترسی به آب و خصوصیات جغرافیایی و توپوگرافی (مقصودی، ۲۰۰۶) استفاده شده است. همچنین کاریون، استرلا، دولس و ریدائو (۲۰۰۸) از معیارهای کاربری، چشم‌انداز، شیب، جهت، دسترسی به بزرگراه، فاصله از شهر، تابش جهانی، تابش پخش‌شده، میانگین دما، مناطق حفاظت‌شده، محل عبور حیات وحش، شبکهٔ جاده‌ها، رودخانه و مناطق ساحلی و چرابی و گاستلی (۲۰۱۱)، از سه معیار تکنیکی (شامل شاخص‌های تابش خورشید، دسترسی به زمین و کاربری زمین)، اقتصادی (شامل مجاورت به شبکهٔ توزیع و شیب) و معیار محیطی (شامل مناطق حساس، خطوط هیدرولوژیکی و خطر تپه‌های ماسه‌ای) استفاده کردند. روش مورد استفاده در این پژوهش، روش وزن‌دهی فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) بوده است که با توجه به ماهیت و روابط میان شاخص‌ها در برابر شیوهٔ متداول (فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی)، در اکثر مطالعات به‌کار گرفته می‌شود. افزون‌بر این، روش تلفیق به‌کارگرفته‌شده در این پژوهش، روش جدیدی در تلفیق شاخص‌ها است. این روش، یک مدل نوآور از ترکیب روش جمع سادهٔ وزنی و سیستم استنتاج فازی است که برای از بین بردن پیچیدگی مسئله با توجه به شاخص‌های ورودی زیاد (چهارده شاخص) در سیستم استنتاج فازی و از بین بردن خاصیت جبرانی روش جمع سادهٔ وزنی ارائه شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که این مدل ابتکاری، ضمن از بین بردن مشکلات یادشده، دقت خروجی را در شناسایی مناطق بهینهٔ نصب تجهیزات فتوولتائیک، به مقدار زیادی افزایش می‌دهد.

منابع

مقصودی، ا. (۱۳۸۵). **مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از روش‌های تحلیل چندگانه**، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد به راهنمایی دکتر سید فرید قادری، رشتهٔ مهندسی صنایع، دانشگاه تهران.

Aragones-Beltran, P., Chaparro-Gonzalez, F., Pastor-Ferrando, J. P., Rodrıguez-Pozo, F., 2010, **An ANP-Based Approach for the Selection of Photovoltaic Solar Power Plant Investment Projects**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, No. 1, PP. 249–264.

Carrion, J. A., Estrella, A. E., Dols, F. A., Ridao, A. R., 2008, **The Electricity Production Capacity of Photovoltaic Power Plants and the Selection of Solar Energy Sites in Andalusia (Spain)**, Renewable Energy, Vol. 33, No. 4, PP. 545–552.

Carrion, J. A., Estrella, A. E., Dols, F. A., Toro, Z. M., Rodrıguez, M., Ridao, R. A., 2008, **Environmental Decision-Support Systems for Evaluating the Carrying Capacity of Land Areas: Optimal Site Selection for Grid-Connected Photovoltaic Power Plants**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 12, No. 9, PP. 2358–2380.

Charabi, Y., Gastli,A., 2011, **PV Site Suitability Analysis Using GIS-Based Spatial Fuzzy Multi-Criteria Evaluation**, Renewable Energy, Vol. 36, No. 9, PP. 2554-2561.

Dalkey, N., Helmer, O., 1963, **An Experimental Application of the Delphi Method to the Use of Experts**, Management Science, Vol. 9, No. 3, P. 458-467.

Djurdjevic, D. Z., 2011, **Perspectives and Assessments of Solar PV Power Engineering in the Republic of Serbia**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, No. 5, PP. 2431–2446.

Helmer, O. H., 1966, **The Delphi Method for Systematizing Judgments about the Future**, Institute of Government and Public Affairs, University of California, USA.

Hofierka, J., Kanuk, J., 2009, **Assessment of Photovoltaic Potential in Urban Areas Using Open-Source Solar Radiation Tools**, Renewable Energy, Vol. 34, No. 10, PP. 2206–2214.

Izquierdo, S., Rodrigues, M., Fueyo, N., 2008, **A Method for Estimating the Geographical Distribution of the Available Roof Surface Area for Large-Scale Photovoltaic Energy-Potential Evaluations**, Solar Energy, Vol. 82, No. 10, PP. 929-939.

Janjai, S., Pankaew, P., Laksanaboonsong, J., Kitichantarop, S., 2011, **Estimation of Solar Radiation over Cambodia From Long-Term Satellite Data,** Renewable Energy, Vol. 36, No. 4, PP. 1214-1220.

Janke, J. R., 2010, **Multicriteria GIS Modeling of Wind and Solar Farms in Colorado**, Renewable Energy, Vol. 35, No. 10, PP. 2228-2234.

Kumar, R., Umanand, L., 2005, **Estimation of Global Radiation Using Clearness Index Model for Sizing Photovoltaic System**, Renewable Energy, Vol. 30, PP. 2221–2233.

Maghsoodi, A., 2006, **Location Optimization of Power Plants By Using Multivariate Methods**, Master's Dissertation, Department of Industrial Engineering, University of Tehran, Tehran.

Malczewsk, J., 1999, **Gisandmulticriteria Decision Analysis**, John Wiley & Sons, USA.

Muneer, T., Asif, M., Kubie, J., 2001, **Generation and Transmission Prospects for Solar Electricity: UK and Global Markets**, Energy Conversion & Management, Vol. 44, PP. 35-52.

NASA, 2009, **Surface Meteorology and Solar Energy (SSE)**, Available at http://Eosweb.Larc.Nasa.Gov, 2012/11/3.

Ross, T. J., 2010, **Fuzzy Logic With Engineering Applications**, 3ed., Wiley, Chichester, U. K.

Saaty, T. L., 1996, **The Analytic Network Process**, RWS Publications, Expert Choice, Inc.

Skoplaki, E., Palyvos, J. A., 2009, **On the Temperature Dependence of Photovoltaic Module Electrical Performance: a Review of Efficiency/Power Correlations**, Solar Energy, Vol. 83, No. 5, PP. 614-624.

Thegerman Solar Energy Society, 2005, **Planning and Installing Photovoltaic Systems, a Guid for Installer, Architects and Engineers**, James & James, USA.

Triantaphyllou, E., 2000, **Multi-Criteria Decision Making Methods: a Comparative Study**, Applied Optimization, Vol. 44, Kluwer Academic Publishers, Boston, Londan.

Wey, W. M., Wu, K. Y., 2007, **Using ANP Priorities with Goal Programming in Resource Allocation in Transportation**, Mathematical and Computer Modeling, Vol. 46, No. 7-8, PP. 985–1000.

Wolfslehner, B., Vacik, H., Lexer, M. J., 2005, **Application of the Analytic Network Process in Multi-Criteria Analysis of Sustainable Forest Management**, Forest Ecology and Management, Vol. 207, No. 1-2, PP. 157–170.