

مطالعه و تحلیل مکان‌گزینی نیروگاه‌های خورشیدی در استان آذربایجان شرقی

امیر طاحونی - دانشجوی دکتری رشته سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران
میثم ارگانی* - استادیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۰۷

چکیده

تأمین انرژی پایدار در دنیای امروزی امری ضروری است. از آنجا که معیارها و فاکتورهای مختلفی بر یافتن مکان مناسب نیروگاه خورشیدی تأثیر می‌گذارد، مقایسه مؤثر این معیارها با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) میسر است. همچنین، روش‌های هوش مصنوعی نظیر شبکه عصبی مصنوعی برای یافتن دقیق‌ترین مکان‌های مناسب می‌تواند سازنده باشد. در این پژوهش با به‌کارگیری روش بهترین-بدترین به‌عنوان یکی از تکنیک‌های MCDM و وارد کردن نتایج آن در شبکه عصبی مصنوعی (ANN) جهت تعلیم شبکه اقدام به یافتن مناسب‌ترین مکان‌ها برای استقرار صفحات خورشیدی در استان آذربایجان شرقی به‌عنوان یک استان دارای ناهمواری‌های طبیعی نسبتاً زیاد شد. پس از تولید لایه تناسب اولیه با شبکه عصبی مصنوعی، با تولید لایه‌های محدودیت و اعمال آن‌ها روی نتایج به‌دست‌آمده از شبکه عصبی، مکان‌هایی که امکان اولیه را برای استقرار این صفحات نداشتند از نتایج اولیه حذف شدند. نتایج نهایی نشان داد که ۱۸۵۴۲۰۶٫۲۵ هکتار از زمین‌های استان تناسب کمتر از ۰٫۳ و ۱۴۶۰۸۸۷٫۵ تناسبی بین ۰٫۳ تا ۰٫۵ را جهت استقرار نیروگاه خورشیدی دارند. همچنین، فقط ۶۹۷۶۲٫۵ هکتار از اراضی استان دارای تناسب بیش از ۰٫۷۵ برای استقرار صفحات خورشیدی هستند.

واژگان کلیدی: انرژی خورشیدی، انرژی‌های تجدیدپذیر، تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره (MCDM)، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN).

مقدمه

توسعه پایدار و شکوفایی یک جامعه در گرو تأمین انرژی است (آمر و دایم، ۲۰۱۰: ۴۲۰). امروزه بیش از ۸۰ درصد تقاضای انرژی اولیه جهانی را سوخت‌های فسیلی (زغال سنگ، نفت، و گاز طبیعی) تأمین می‌کنند (کایسر و همکاران، ۲۰۱۳: ۴۸۹). از آنجا که منابع سوخت‌های فسیلی محدود است و در آینده به اتمام خواهد رسید، پیش‌بینی می‌شود، با توجه به این محدودیت، قیمت آن در آینده با افزایش مواجه خواهد شد. از سویی دیگر، طبق گزارش‌های سازمان ملل و بانک جهانی بیش از ۵۵ درصد جمعیت جهان در شهرها زندگی می‌کنند و این روند رو به افزایش هاست (سازمان ملل، ۲۰۱۸: بانک جهانی، ۲۰۲۰). به موازات افزایش جمعیت شهرنشین جهان، نیاز به تأمین انرژی نیز افزایش می‌یابد (برینک و مارکس، ۲۰۱۳: ۶۷). سوخت‌های فسیلی تأثیرات منفی انکارناپذیری در محیط زیست و سلامتی انسان‌ها و دیگر جانداران روی زمین دارد. از جمله این تأثیرات منفی می‌توان به آلودگی هوا، آب، و خاک اشاره کرد (اویان، ۲۰۱۳: ۱۱). جنبه‌های منفی منابع انرژی سنتی تصمیم‌گیران و مدیران حوزه صنعت و انرژی را بر آن داشته تا به فکر استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر^۱، به‌عنوان یک جای‌گزین پاک برای سوخت‌های فسیلی، باشند (ذوقی و همکاران، ۲۰۱۷: ۹۸۶). در کنار سازگاری با محیط زیست، عدم محدودیت و اتمام‌پذیری آن‌ها و همچنین قابلیت دسترسی گسترده از مزیت‌های

اصلی این منابع به‌شمار می‌رود. از جمله منابع انرژی تجدیدپذیر می‌توان به انرژی خورشیدی، انرژی باد، و سوخت زیستی اشاره کرد (اویان، ۲۰۱۳: ۱۱؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۹: ۵۹۶). خورشید اصلی‌ترین و قدرتمندترین منبع انرژی ماست و انرژی خورشیدی یک انرژی رایگان و همیشگی محسوب می‌شود. از این انرژی می‌توان برای تولید الکتریسیته، ایجاد روشنایی، سرمایش و گرمایش ساختمان‌ها و گستره بزرگی از فرایندهای صنعتی استفاده کرد (اویان، ۲۰۱۳: ۱۱). انرژی خورشیدی از طریق استفاده از صفحات فتولتائیکی قابل بهره‌برداری است. به این صورت که با استفاده از فناوری فتولتائیک می‌توان تابش خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل کرد (یوسفی و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۶۴۸). یکی از مهم‌ترین جنبه‌ها در استفاده از انرژی خورشیدی یافتن مکان‌های بهینه برای استقرار صفحات خورشیدی است (وانگ و همکاران، ۲۰۱۹: ۵۹۶). در فرایند یافتن بهینه‌ترین مکان(های) ممکن برای نصب این صفحات باید وجوه گسترده‌ای از معیارهای تأثیرگذار محیطی، اقتصادی، اجتماعی، و فنی بررسی شود (عساکره و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۵۵). این بررسی‌ها، به‌کارگیری تحلیل‌های مکانی^۱ و چندمعیاره را ضروری می‌کند (یوسفی و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۶۴۸). تحلیل‌های مکانی در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی^۲ انجام می‌پذیرد و تحلیل‌های چندمعیاره نیز با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره^۳ میسر است. تلفیق GIS و MCDM می‌تواند در یافتن مکان‌های مناسب برای استقرار نیروگاه‌های خورشیدی بسیار مفید باشد (سانچز لوزانو و همکاران، ۲۰۱۶: ۳۸۷). فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و روش بهترین-بدترین نمونه‌ای از این تکنیک‌هاست. در کنار روش‌های مدل‌مبنا، از روش‌های داده‌مبنایی مانند روش‌های هوش مصنوعی نیز برای حل مسائل مربوط به تحلیل‌های مکانی نظیر مکان‌یابی استفاده می‌شود. مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی^۴ از سیستم عصبی بیولوژیکی الهام گرفته‌اند که قابلیت یادگیری، ذخیره‌سازی، و فراخوانی اطلاعات را بر پایه یک مجموعه داده مشخص دارند. شبکه عصبی مصنوعی یک تکنیک مدل‌سازی عددی است که برای پیش‌بینی تابش خورشیدی در مناطق مختلف جهان اعمال شده است (فاداره، ۲۰۰۸: ۱۴۱۰).

پژوهشگران بسیاری با استفاده از روش‌های مختلف MCDM در بستر GIS به امکان‌سنجی نصب پنل‌های خورشیدی در مناطق مختلف پرداخته‌اند (علی و همکاران، ۲۰۱۷؛ یوشچنکو و همکاران، ۲۰۱۸؛ ژو و همکاران، ۲۰۲۰؛ قوس و همکاران، ۲۰۲۰؛ سون و همکاران، ۲۰۲۰؛ حبیب و همکاران، ۲۰۲۰؛ ردیسکه و همکاران، ۲۰۲۰؛ زامبرانو-آسانزا و همکاران، ۲۰۲۱؛ ترجان و همکاران، ۲۰۲۱؛ سوارد و همکاران، ۲۰۲۱؛ ساراسوات و همکاران، ۲۰۲۱). وانگ و همکاران (۲۰۱۴) در طی پژوهشی به ارائه یک رویکرد برای پشتیبانی برنامه‌ریزی مکانی انرژی‌های تجدیدپذیر در یک سطح منطقه‌ای پرداختند. رویکرد پیشنهادشده آنان ترکیبی از گام‌های متوالی شامل برآورد مصرف انرژی اولیه، برآورد پتانسیل انرژی تجدیدپذیر، تحلیل خودکفایی انرژی، و آماده‌سازی نقشه‌های ترکیبی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی بود. نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند از تصمیم‌گیری در زمینه برنامه‌ریزی انرژی تجدیدپذیر منطقه‌ای با فراهم‌کردن اطلاعات در مورد پتانسیل‌های منطقه‌ای و محدودیت‌های مربوط به سهامداران مختلف انرژی پشتیبانی کند. این موضوع می‌تواند به ایجاد چشم‌انداز توسعه انرژی کمک کند و توسعه انرژی منطقه‌ای را به سمت پایداری سوق دهد. سولانجی و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از روش تلفیقی دلفی-AHP، منابع مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر در پاکستان را تجزیه و تحلیل کردند. نتایج حاصل از این مطالعه انرژی باد را مقرون‌به‌صرفه‌ترین منبع RE برای تولید برق نشان می‌دهد و به دنبال آن

1. Spatial Analysis

2. Geographical Information System (GIS)

3. Multi Criteria Decision Making (MCDM)

4. Artificial Neural Network (ANN)

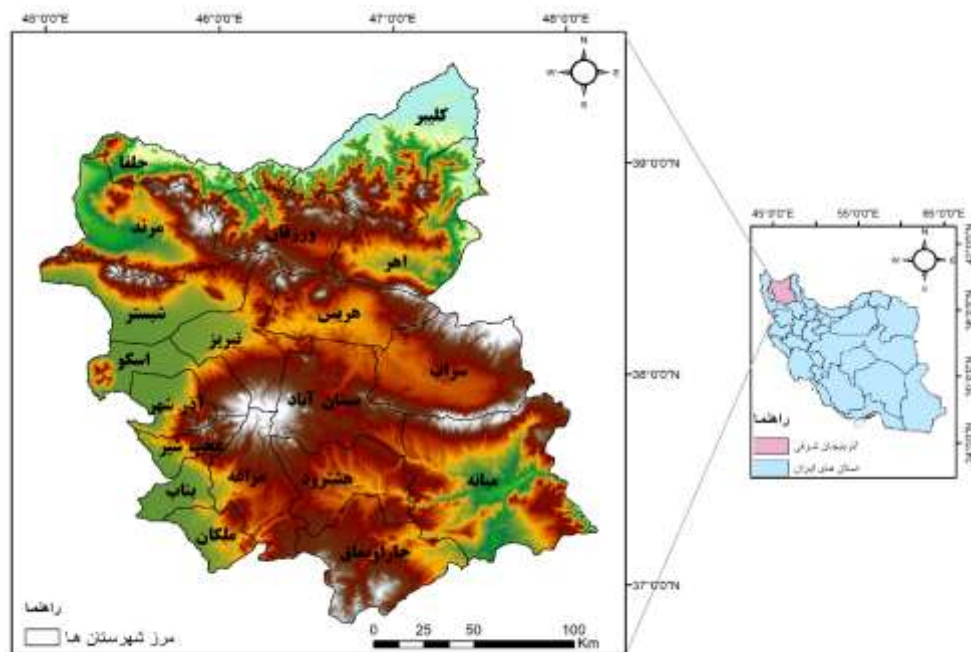
انرژی آبی، خورشیدی، زیست‌توده، و انرژی زمین گرمایی. آنالیز حساسیت نتایج مدل تصمیم‌گیری نشان می‌دهد که نتایج این مطالعه معنی‌دار، قابل اعتماد، و قوی است و بینش‌های مهمی در رابطه با اولویت‌بندی منابع RE برای تولید برق ارائه می‌دهد و می‌تواند برای اتخاذ تصمیمات سیاستی نسبت به برنامه‌ریزی انرژی پایدار در پاکستان استفاده شود. یئو و یی (۲۰۱۴) با استفاده از جی آی اس محیط زیستی (E-GIS)، پایگاه داده، و شبکه عصبی مصنوعی مدلی برای نیروگاه‌های تأمین انرژی و انرژی‌های تجدیدپذیر ارائه دادند. این مدل به روش فنی بررسی پتانسیل مناسب بودن کارخانه‌های تأمین انرژی شهری و انرژی تجدیدپذیر در منطقه می‌پردازد. کاربردپذیری این مدل با اعمال آن برای یک شهر برنامه‌ریزی شده در کره جنوبی، جایی که برنامه‌ریزی شهری در حال اجراست، بررسی می‌شود. یوسفی و همکاران (۲۰۱۸) یک مدل منطق فازی را برای مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی در استان مرکزی به کار گرفتند. در این پژوهش از قابلیت‌های GIS برای تحلیل‌های مکانی و بصری‌سازی نتایج تحقیق استفاده شد. با استفاده از منطق بولین و تعیین طیف وسیعی از معیارهای انتخاب، مناطق مناسب برای نصب نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از توابع فازی مشخص شد. لایه‌های رستر ایجادشده با منطق بولین و فازی برای شناسایی مناطق مستعد جهت استقرار نیروگاه خورشیدی ادغام شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، برخی مناطق در مجاورت شهرهای محلات و زرندینه برای استفاده از انرژی خورشیدی مناسب است. این تحقیق همچنین روش ترکیبی به‌کاررفته را به‌عنوان یک روش انتخاب سایت مناسب برای نیروگاه‌های خورشیدی تأیید می‌کند. فاداره (۲۰۰۸) در یک مطالعه مدلی بر اساس شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی پتانسیل انرژی خورشیدی در نیجریه توسعه داد. در این پژوهش شبکه عصبی پیش‌خور پس‌انتشار چندلایه با استفاده از جعبه ابزار تعبیه‌شده در نرم‌افزار متلب طراحی شد. داده‌های جغرافیایی و هواشناسی به‌عنوان داده ورودی و شدت تابش خورشیدی به‌عنوان تارگت به شبکه داده شد. نتایج نشان می‌دهد ضریب همبستگی بین پیش‌بینی‌های ANN و میانگین شدت ماهانه تابش خورشیدی جهانی برای داده‌های تمرینی و تست بالاتر از ۹۰ درصد است. بنابراین، می‌توان با قابلیت اطمینان بالایی از مدل برای ارزیابی تابش خورشیدی در مکان‌هایی که داده‌های تابش خورشیدی در دسترس نیست استفاده کرد. نگارندگان در مطالعه حاضر با استفاده از داده‌های اقلیمی، اوروگرافی و اقتصادی، و تلفیق تکنیک‌های MCDM و ANN قصد دارند مکان‌های مناسب برای استقرار نیروگاه خورشیدی در استان آذربایجان شرقی را شناسایی کنند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش استان آذربایجان شرقی در شمال غرب کشور ایران است. این استان در عرض جغرافیایی $36^{\circ}45'$ شمالی تا $39^{\circ}26'$ شمالی و طول جغرافیایی $45^{\circ}05'$ شرقی تا $48^{\circ}22'$ شرقی قرار گرفته است. مساحت این استان معادل ۴۵،۶۵۰ کیلومتر مربع و جمعیت آن در حدود ۳،۹۰۹،۰۰۰ نفر (سال ۱۳۹۵) است (مرکز آمار ایران). استان آذربایجان شرقی دارای آب و هوایی سرد و خشک در زمستان است و در حالت کلی منطقه‌ای کوهستانی محسوب می‌شود که حدود ۴۰ درصد از سطح آن را کوهستان، ۲۸،۲ درصد را تپه‌ماهورها، و ۳۱،۸ درصد را زمین‌های هموار (دشت‌ها و جلگه‌های میان‌کوهی) فراگرفته‌اند. میانگین بارش سالانه آن بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر متغیر است و میانگین دمای روزانه نیز در بین ایستگاه‌های استان ۶/۵ تا ۱۵ درجه سلیسیوس است. بر اساس داده‌های این ایستگاه‌ها، نواحی پست دره رود ارس گرم‌ترین و ارتفاعات دامنه شرقی سهند و دامنه‌های غربی بزقوش سردترین مناطق استان

محسوب می‌شوند. میزان نزولات جوی در استان به‌طور متوسط از ۲۵۰ الی ۶۰۰ میلی‌متر در نوسان است. فصول زمستان و بهار فصول بارندگی منطقه محسوب می‌شوند و بیشترین شدت بارندگی در بهار مشاهده می‌شود (مرکز آمار ایران، سالنامه آماری سال ۱۳۹۶: ۳۷).



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

روش بهترین - بدترین

روش بهترین - بدترین یکی از به‌روزترین روش‌هایی است که در زمینه تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره برای تخصیص اهمیت به معیارهای تصمیم‌گیری به‌کار می‌رود (محمودی و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۰۲۶۱). این روش را رضایی (۲۰۱۵) توسعه داده است. در این روش اولویت‌بندی، متخصص نخست بهترین و بدترین معیار را بسته به هدف خود انتخاب می‌کند و بقیه معیارها را نسبت به این دو معیار امتیاز می‌دهد. در مسائلی که با تعداد معیارهای بالا سروکار دارند روش بهترین - بدترین می‌تواند به‌عنوان جای‌گزینی مناسب برای روش AHP به‌کار رود.

در ادامه نحوه تعیین اهمیت نسبی معیارها با یکدیگر و محاسبه شاخص سازگاری^۱ معیارها توضیح داده می‌شود (رضایی، ۲۰۱۶: ۱۲۶).

پس از تعیین بهترین و بدترین معیار از بین مجموعه معیارهای در نظر گرفته شده، ارجحیت بهترین معیارها به معیارهای دیگر با استفاده از اعدادی ما بین ۱ تا ۹ تعیین می‌شود. سپس، ارجحیت معیارهای دیگر نسبت به بدترین معیار نیز به همان طریق با استفاده از اعدادی ما بین ۱ تا ۹ تعیین می‌شود. در قدم آخر وزن بهینه برای هر معیار تعیین می‌شود. برای این منظور باید یک مدل کمترین بیشترین تشکیل شود (رابطه ۱).

1. Consistency index

$$\min \max_j \left\{ \left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \right\} \quad \text{رابطه (۱)}$$

همچنین باید دو شرط زیر نیز برقرار باشد (رابطه‌های ۲ و ۳).

$$\sum_j w_j = 1 \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$w_j \geq 0 \text{ for all } j \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در این رابطه‌ها w_B وزن بهترین معیار، w_W وزن بدترین معیار، a_{Bj} اولویت بهترین معیار نسبت به سایر معیارها، و a_{jW} اولویت سایر معیارها نسبت به بدترین معیار را نشان می‌دهد. رابطه فوق را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi \text{ for all } j \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \leq \xi \text{ for all } j \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\sum_j w_j = 1 ; w_j \geq 0 \text{ for all } j \quad \text{رابطه (۶)}$$

همچنین، نرخ سازگاری^۱ (رابطه ۷) برای مدل بهترین-بدترین با استفاده از شاخص سازگاری که در جدول ۱ آمده است تعیین می‌شود. بدیهی است هر چقدر نرخ سازگاری به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده پایداری و سازگاری بالای وزن‌های به‌دست‌آمده است و مقادیر بالای نرخ سازگاری نشان از این دارد که وزن‌های به‌دست‌آمده سازگاری پایینی دارند و مقایسات ناپایدار است (رضایی، ۲۰۱۶).

جدول ۱. شاخص سازگاری برای تعداد معیارهای مختلف

a_{BW}	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
شاخص سازگاری	۰,۰۰	۰,۴۴	۱,۰۰	۱,۶۳	۲,۳۰	۳,۰۰	۳,۷۳	۴,۴۷	۵,۲۳

رابطه (۷)

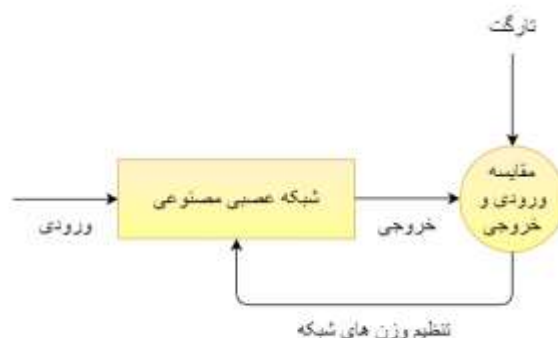
$$\text{نرخ سازگاری} = \frac{\xi^*}{\text{شاخص سازگاری}}$$

شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی مصنوعی را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد: معماری شبکه و خصوصیات عملکردی. عبارت «معماری» ساختار شبکه و تعداد نورون‌ها و ارتباط داخلی آن‌ها را مشخص می‌کند و عبارت «خصوصیات عملکردی» شامل خصوصیات نورون‌ها و ارتباط آن‌ها، به‌طور مثال نرخ یادگیری، وزن‌های اولیه، و مقدار مومنتوم می‌شود. نرخ یادگیری نشان می‌دهد که در هر تکرار مقدار وزن‌ها چقدر تغییر می‌کند. مقدار آن معمولاً بین صفر و یک است. مومنتوم نشان می‌دهد تغییر وزن قبلی چقدر بر تغییر وزن فعلی تأثیر می‌گذارد (رامبایان، ۲۰۱۲: ۱۴۳۷).

برای آموزش شبکه عصبی، همیشه تعدادی داده به‌عنوان داده‌ی تمرینی برای شبکه نیاز است. از این داده‌ها کاربر درصدی را برای آموزش شبکه، درصدی را برای تست شبکه، و درصدی را برای اعتبارسنجی شبکه تخصیص می‌دهد.

پس از این کار شبکه با استفاده از داده‌های تمرینی شبکه را آموزش می‌دهد و این آموزش شبکه تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که یا میزان خطای مجاز یا به تعداد تکراری که کاربر در ابتدا تعیین کرده برسد.



شکل ۲. فرایند کلی شبکه عصبی مصنوعی

تعریف معیارها

تعیین مکان مناسب برای مزرعه نیروگاه خورشیدی به فهم کامل و صحیح از عوامل و چگونگی انتخاب آن‌ها دارد (ذوقی و همکاران، ۲۰۱۷: ۹۸۶). معیارهای مورد استفاده در این مطالعه با توجه به منطقه مورد مطالعه، مطالعات پیشین، و در دسترس بودن داده‌های مورد نیاز انتخاب شده است. معیارهای انتخابی و علت انتخاب آن‌ها در زیر شرح داده شده است:

(C1) تابش افقی گلوبال^۱ (GHI): در مبحث تابش خورشیدی، GHI برآیند تابش نرمال مستقیم (DNI)، تابش پراکنده افقی (DHI)، و تابش بازتاب‌شده از زمین است. DNI میزان نور خورشید مستقیم است؛ در حالی که DHI مؤلفه تابش پراکنش شده توسط ابرها و دیگر اشیا در اتمسفر است. ضمناً، می‌توان میزان تابش بازتاب‌شده از سطح زمین را در مقایسه با دیگر مؤلفه‌ها ناچیز در نظر گرفت (القرنی و آتشی، ۲۰۱۷: ۱۲۲۵).

(C2) فاصله از شهرها: با توجه به اینکه یکی از اهداف استقرار مزارع خورشیدی تأمین برق مورد نیاز ساکنان شهرهاست، این مزارع باید در نزدیکی نواحی شهری احداث شوند. از آنجا که عامل اقتصادی عاملی مهم و تأثیرگذار در کشورهای در حال توسعه است، باید به این نکته توجه داشت که هر چه فاصله از مزرعه خورشیدی به نواحی شهری کمتر باشد هزینه‌های اقتصادی برای انتقال انرژی و همچنین اتلاف انرژی کاهش می‌یابد.

(C3) فاصله از راه‌های اصلی: فاصله از راه‌های اصلی باید کاملاً بهینه باشد. هر چقدر فاصله از راه‌های اصلی کم باشد هزینه‌هایی مانند هزینه انتقال مواد مورد نیاز جهت ساخت نیروگاه خورشیدی و همچنین هزینه انتقال نیروی کار کاهش می‌یابد (سبزی‌پرور و شتایی، ۲۰۰۷: ۶۴۹). اگرچه بنا به مقررات این نزدیکی نمی‌تواند از حد مشخصی کمتر باشد.

(C4) ارتفاع: ارتفاع برای مکان‌های صنعتی عاملی مؤثر به‌شمار می‌رود. ارتفاع منطقه از سطح دریا با ضخامت اتمسفر نسبت عکس دارد. هرچه اتمسفر ضخیم‌تر باشد غلظت عوامل جذب یا بازتاب افزایش می‌یابد. از آنجا که مواد درشت‌تر در طبقات پایینی جای گرفته‌اند، اتمسفر در بالای کوه‌ها رقیق‌تر است. بنابراین، نواحی مرتفع به‌علت دریافت انرژی بیشتر پتانسیل بیشتری دارند (ذوقی و همکاران، ۲۰۱۷: ۹۸۶). اما باید به این نکته نیز توجه داشت که هر چه ارتفاع منطقه افزایش یابد به موازات آن هزینه و سختی انتقال زیرساخت‌ها و نیروی کار افزایش می‌یابد.

1. Global Horizontal Irradiance (GHI)

(C5) شیب: شیب منطقه نیز از عوامل مهم در انتخاب مکان بهینه برای مزارع خورشیدی است. با افزایش شیب پتانسیل زمین برای استفاده صنعتی کاهش می‌یابد (کمالی و همکاران، ۲۰۱۰؛ بونروماکائف و مورایاما، ۲۰۱۱: ۲۶۹). مناطق مسطح یا دامنه‌های دارای شیب کم در مقایسه با مناطق دارای شیب‌های بالا هزینه‌های ساخت‌وساز کمتری را طلب می‌کنند. بنابراین، وجود زمین‌هایی با درجات شیب پایین‌تر برای مزارع خورشیدی بزرگ مقیاس ضروری است.

(C6) جهت شیب: در نیمکره شمال شیب‌های جنوبی در مقایسه با شیب‌های شمالی انرژی خورشیدی بیشتری دریافت می‌کنند. بنابراین، در کشورهایی مانند ایران شیب جنوبی جهتی ایده‌آل برای مکان‌های مزرعه خورشیدی است (طهری و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۳۵۴؛ القرنی و آتشی، ۲۰۱۷: ۱۲۲۵).

(C7) میانگین بارش: بارش باران می‌تواند در عملکرد پنل‌های خورشیدی اختلال ایجاد کند و بازدهی عملکرد آن را کاهش دهد. همچنین، بارش بالا در یک منطقه مؤید ابرناکی منطقه نیز هست که این موضوع بر میزان تابش آفتاب و ساعات آفتابی منطقه تأثیر مستقیم می‌گذارد.

(C8) ساعات آفتابی: این معیار به‌طور مستقیم با ساعت کارکرد پنل‌های خورشیدی در ارتباط است و هر چه میزان آن بیشتر باشد نشان‌دهنده این است که پنل‌های خورشیدی نصب‌شده بیشتر در مقابل نور خورشید قرار گرفته‌اند. همچنین، هر چه ساعات آفتابی یک منطقه بیشتر باشد مؤید آن است که منطقه روزهای ابری کمتری را تجربه کرده و از تناسب بیشتری برای نصب نیروگاه خورشیدی برخوردار است.

تولید لایه‌های معیار

لایه مربوط به معیار GHI از سایت www.solargis.com برای کل کشور ایران دانلود شد. سپس، در نرم‌افزار ArcGIS 10.3 استان آذربایجان شرقی به‌عنوان منطقه مورد مطالعه در این پژوهش از آن استخراج شد. لایه ارتفاع استان با استفاده از داده‌های مدل ارتفاعی رقومی^۱ (DEM) سنجنده ASTER ایجاد شد. همچنین، لایه‌های مربوط به شیب و جهت شیب منطقه نیز با استفاده از DEM منطقه و در نرم‌افزار ArcGIS 10.3 تولید شد. مقادیر مربوط به معیارهای اقلیمی یعنی ساعات آفتابی سالانه و میانگین بارش سالانه برای ۱۴ ایستگاه سینوپتیک از سایت اداره سازمان هواشناسی ایران دانلود شد و سپس برای کل پهنه مورد مطالعه با استفاده از درون‌یابی به روش وزن‌دهی با معکوس فاصله^۲ (IDW) مقداردهی شد. لایه‌های فاصله از شهر و فاصله از جاده‌های اصلی نیز با استفاده از ابزار Euclidean distance در نرم‌افزار ArcGIS 10.3 تولید شد. ضمناً، با توجه به اینکه این پژوهش یک مطالعه در سطح منطقه‌ای است، اندازه پیکسل همه لایه‌ها به مقدار ۲۵۰ متر ریسپل شد.

نرمال‌سازی لایه‌ها

از آنجا که معیارهای مورد استفاده در این پژوهش دارای واحدهای متفاوتی است و همچنین هر یک از آن‌ها برد متفاوتی از اعداد دارند، لازم است پیش از مقایسه آن‌ها در قالب تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره، نرمال‌سازی انجام بگیرد. به عبارت دیگر، رسترهای ورودی باید به مقیاس ۰ تا ۱ استاندارد شوند. در این پژوهش نرمال‌سازی^۳ داده‌ها با توجه به ماهیت هر یک از آن‌ها با معادلات متفاوتی (رابطه‌های ۸ تا ۱۰) انجام پذیرفت. مقادیر معیارهای GHI و ساعات آفتابی هر چه بالاتر

1. tal ElevatioDEM: Digin Model
2. inverse distance weighting
3. normalization

باشد مطلوب‌تر است. بنابراین، برای نرمال کردن معیارهای GHI و ساعات آفتابی از رابطه ۸ استفاده شد. برای معیار ارتفاع و شیب از تابع small (رابطه ۹) موجود در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. ذکر این نکته لازم است که در نرمال کردن معیار ارتفاع مقادیر بالای ۲۰۰۰ متر و در معیار شیب شیبهای بیشتر از ۱۰ درجه مقدار ۰ گرفتند. برای معیار میانگین بارش، فاصله از شهر و فاصله از جاده‌های اصلی از رابطه ۱۰ استفاده شد. در معیار فاصله از شهر فواصل بیش از ۲۰ کیلومتر و در معیار فاصله از جاده مقادیر بیش از ۱۰ کیلومتر و کمتر از ۱۰۰ متر به مقدار ۰ نرمال شدند.

رابطه (۸)

$$\mu(x) = \frac{x - \min}{\max - \min}$$

رابطه (۹)

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{m}\right)^s}$$

رابطه (۱۰)

$$\mu(x) = \frac{\max - x}{\max - \min}$$

در معادلات بالا x مقدار معیار، m نقطه میانی، و s گستره است.

محدودیت‌های موجود در انتخاب مکان مناسب

در برخی مناطق به دلیل محدودیت‌های قانونی یا جنبه‌های مهندسی و زیست‌محیطی امکان استقرار مزارع خورشیدی وجود ندارد. در این پژوهش، با توجه به منطقه مورد مطالعه و همچنین مطالعات پیشین بعضی از مناطق به‌عنوان لایه محدودیت در نظر گرفته شده که در زیر به توضیح آن‌ها پرداخته شده است:

رودخانه‌ها: رودخانه‌ها و راه‌آبه‌ها یکی از عوارض طبیعی‌اند که استقرار نیروگاه خورشیدی در بستر و حاشیه آن‌ها از لحاظ ایمنی صحیح نیست. بنابراین، در تعیین مکان‌های مناسب باید به‌عنوان یک محدودیت در نظر گرفته شوند. مناطق شهری: به دلیل برخی قوانین شهرداری‌ها و همچنین پیش‌بینی گسترش افقی شهرها در آینده، احداث مزارع خورشیدی در فاصله خیلی نزدیک به شهرها امکان‌پذیر نیست.

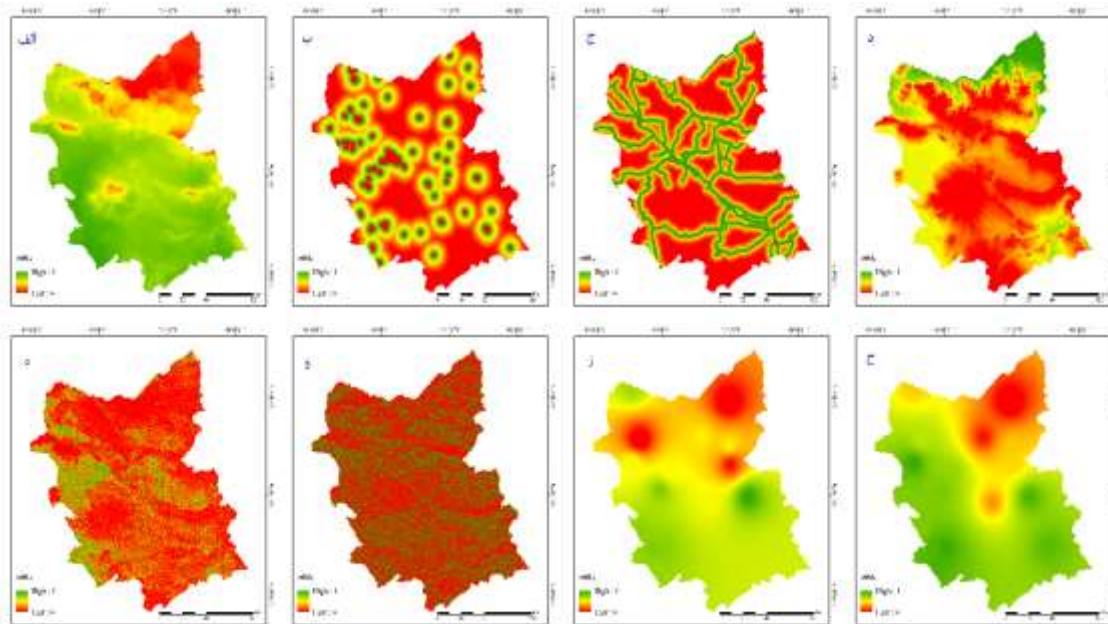
مناطق حفاظت‌شده: مناطق حفاظت‌شده یا پارک‌های ملی و همچنین مناطق شکار ممنوع جزو مواردی است که معمولاً قانون اجازه دخل و تصرف در آن‌ها را نمی‌دهد. بنابراین، در این پژوهش جزو موارد محدودیت در نظر گرفته شده‌اند.

گسل‌های فعال: گسل‌های فعال هم از مواردی است که احداث تسهیلاتی مانند نیروگاه‌های خورشیدی یا بادی از لحاظ ایمنی صحیح نیست. بنابراین، محل احداث نیروگاه‌های خورشیدی باید فاصله مناسبی با گسل‌های فعال داشته باشد.

بحث و یافته‌ها

لایه‌های نرمال‌شده

شکل ۳ حالت نرمال‌شده لایه‌های معیارها را نشان می‌دهد. پیکسل‌های مایل به قرمز نشان‌دهنده عدم مطلوبیت و پیکسل‌های مایل به سبز نشان‌دهنده مطلوبیت پیکسل است. با توجه به تفاوت ماهیت معیارهای در نظر گرفته شده، این مطلوبیت در معیارهای مختلف می‌تواند با تعارض همراه باشد، بدین صورت که یک پیکسل در دارای مطلوبیت بالا و در معیار دیگر دارای مطلوبیت ضعیف باشد. بنابراین، باید با استفاده از یک روش وزن‌دهی مناسب، اولویت معیارها را نسبت به دیگر مشخص کرد.



شکل ۳. لایه‌های معیار نرمال‌شده: الف تا ح معادل c(1) تا c(8)

وزن‌دهی معیارها

در این پژوهش، با توجه به مطالعات قبلی، معیار GHI به‌عنوان بهترین معیار و معیار بارش به‌عنوان بدترین معیار انتخاب شد. برای تعیین اهمیت نسبی بهترین معیار نسبت به معیارهای دیگر و همچنین سایر معیارها نسبت به بدترین معیار دو جدول تشکیل شد.

جدول ۲. اولویت بهترین معیار نسبت به معیارهای دیگر

بهترین نسبت به دیگر معیارها	C (1)	C (2)	C (3)	C (4)	C (5)	C (6)	C (7)	C (8)
C (1)	۱	۲	۳	۵	۴	۵	۶	۴

همان‌طور که مشخص است، پس از معیار GHI معیارهای اقتصادی از جمله فاصله از شهر و فاصله از جاده، نسبت به دیگر معیارها، معیارهای مهمی در نظر گرفته شدند. نکته مهمی که باید مد نظر قرار بگیرد این است که اهمیت نسبی معیار بهترین به بدترین در هر دو جدول باید یکسان باشد. همچنین، اهمیت یک معیار نسبت به خودش یک در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۳. اولویت معیارهای دیگر نسبت به بدترین معیار

معیارهای دیگر نسبت به بدترین	C (7)
C (1)	۶
C (2)	۴
C (3)	۳
C (4)	۲
C (5)	۳
C (6)	۲
C (7)	۱
C (8)	۲

پس از اولویت‌بندی این معیارها و با استفاده از اپلیکیشنی که توسط توسعه‌دهنده روش بهترین-بدترین در نرم‌افزار اکسل تعبیه شده، به محاسبه وزن نسبی معیارها اقدام شد. جدول ۴ وزن‌های به‌دست‌آمده برای معیارها را نشان می‌دهد.

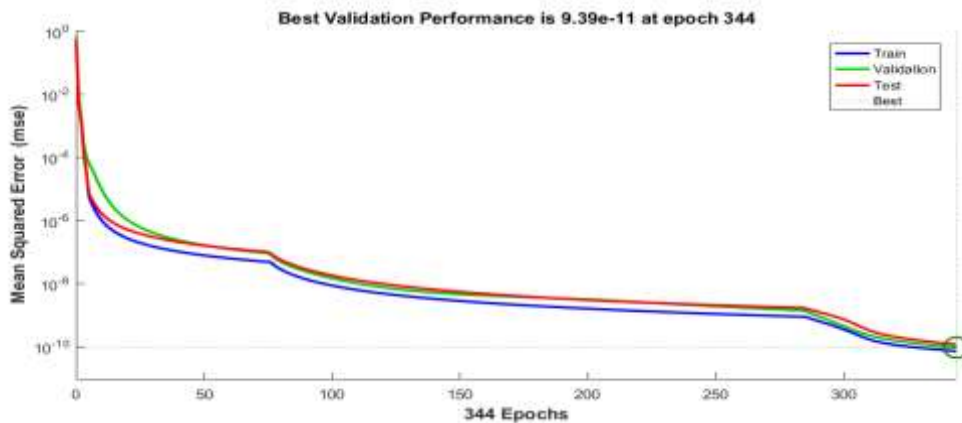
جدول ۴. وزن نسبی معیارها نسبت به یکدیگر

وزن معیارها	GHI	فاصله از شهر	فاصله از جاده	ارتفاع	شیب	جهت شیب	میانگین بارش	ساعت آفتابی
	۰,۳۲۰۱	۰,۱۸۲۹	۰,۱۲۱۹	۰,۰۷۳۱	۰,۰۹۱۴	۰,۰۷۳۱	۰,۰۴۵۷	۰,۰۹۱۴

همچنین، نرخ سازگاری برای وزن‌دهی‌های بالا مقدار ۰,۰۴۵۷ است که مقدار قابل‌قبولی است و نشان‌دهنده سازگاری و پایداری مقایسات انجام‌شده است.

اجرای شبکه عصبی مصنوعی

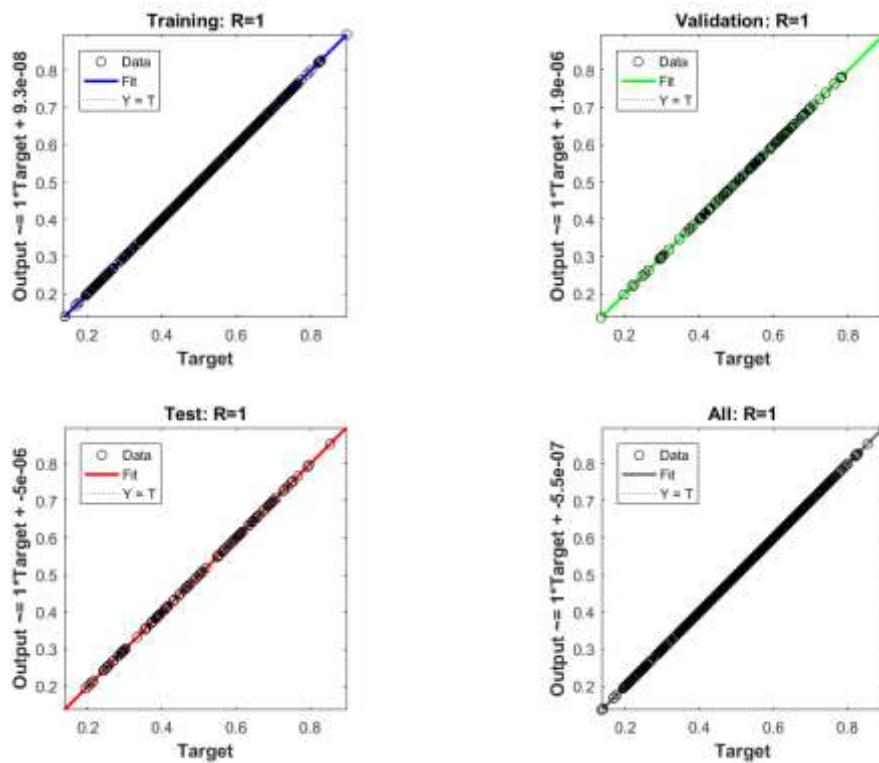
برای اجرای شبکه عصبی مصنوعی، ۷۵۱ نمونه تمرینی از کل پهنه منطقه مورد مطالعه برداشت شد. سپس، مقدار نرمال شده برای هر نمونه در هشت معیار تعریف‌شده به‌دست آمد و به‌عنوان ورودی وارد شبکه عصبی شد. سپس، با ضرب هر یک از وزن‌های به‌دست‌آمده در مقادیر نرمال‌شده میزان تناسب اولیه هر نمونه به‌دست آمد و به‌عنوان تارگت تعیین شد. در ادامه ۷۵ درصد از نمونه‌ها برای آموزش شبکه، ۱۵ درصد برای تست شبکه، و ۱۰ درصد دیگر برای اعتبارسنجی شبکه انتخاب شدند. همچنین، در این پژوهش از الگوریتم آموزشی لونبرگ-مارکوارت برای آموزش شبکه عصبی استفاده شد و تعداد لایه‌های پنهان نیز روی عدد ۱۵ تنظیم شد. برای اجرای شبکه عصبی مصنوعی از افزونه موجود در نرم‌افزار متلب استفاده شد.



شکل ۴. تعداد تکرار آموزش شبکه و خطای میانگین مربعات

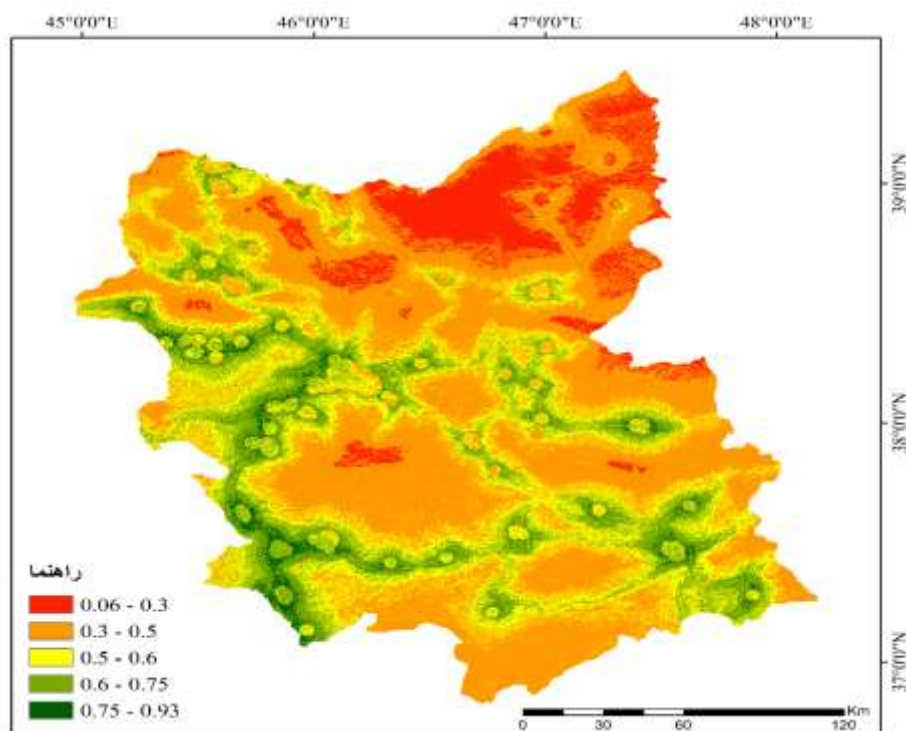
پس از ۳۴۴ تکرار مقادیر خطای میانگین مربعات برای داده‌های تمرینی شبکه به بهینه‌ترین حالت خودش رسید. همچنین، مقدار رگرسیون بین ورودی‌های شبکه و تارگت‌ها عدد ۱ به دست آمد که نشان‌دهنده این است که تعلیم شبکه به بهترین نحو انجام شده است.

پس از آموزش شبکه کل داده‌های پهنه مورد مطالعه وارد شبکه عصبی شد و با استفاده از دستور $net(y)$ مقادیر خروجی برای آن‌ها تعیین شد. سپس، این داده‌ها به نرم‌افزار arcgis منتقل شد و با استفاده از دستور point to raster لایه نهایی تولید شد.



شکل ۵. مقدار همبستگی بین خروجی شبکه عصبی و تارگت‌ها

شکل ۶ لایه نهایی تناسب اراضی برای استقرار نیروگاه خورشیدی را نشان می‌دهد. همان گونه که مشخص است، مناطق شمال شرقی استان نسبت به دیگر مناطق دارای کمترین میزان مطلوبیت‌اند. علت عمده این امر عبارت است از: کمبودن میزان GHI و همچنین ساعات آفتابی به‌عنوان دو عامل مهم و تعیین‌کننده در این مناطق. نکته حائز اهمیت این است که این مناطق همان ناحیه جنگلی ارسباران را شامل می‌شود که مدل ایجادشده بدون اینکه ورودی‌ای نظیر پوشش گیاهی و کاربری اراضی داشته باشد، با توجه به دیگر معیارها، توانسته این مناطق را به‌درستی «فاقد مطلوبیت لازم» شناسایی کند. همچنین، مناطق مرتفع و مناطقی که در آن‌ها دو عامل شیب و جهت شیب مقادیر مطلوبی را نداشتند، مانند کوه سهند و دامنه آن و دیگر رشته‌کوه‌های استان، از تناسب پایینی برای نصب نیروگاه خورشیدی برخوردارند. اغلب مناطق مناسب برای استقرار این نیروگاه‌ها در حاشیه شهرها و به‌خصوص در قسمت غربی و جنوب غربی و قسمتی از جنوب شرق منطقه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که علت این امر به مقادیر مناسب معیارهای تعیین‌کننده GHI، فاصله از شهر و جاده‌ها، و ساعات آفتابی برمی‌گردد.



شکل ۶. تناسب اولیه اراضی به‌دست‌آمده از شبکه عصبی

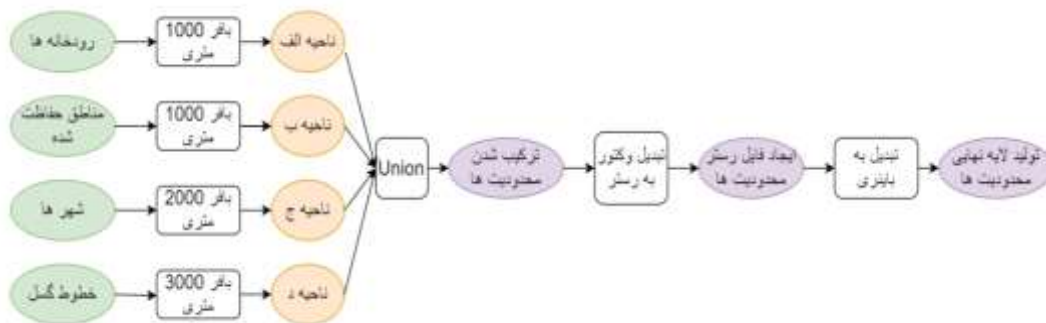
همچنین، جدول ۵ مساحت هر یک از بازه‌های تناسب اراضی به‌دست‌آمده از شبکه عصبی مصنوعی را نشان می‌دهد.

جدول ۵. مساحت هر یک از بازه‌های مطلوبیت تعریف‌شده (واحد‌ها به هکتار هاست)

بازه مطلوبیت	۰,۳-۰,۰۶	۰,۵-۰,۳	۰,۶-۰,۵	۰,۷۵-۰,۶	>۰,۷۵
مساحت	۴۳۵۶۱۸,۷۵	۲۱۸۷۳۵۶,۲۵	۱۰۹۶۲۸۱	۷۶۳۲۳۱,۲۵	۹۲۰۷۵

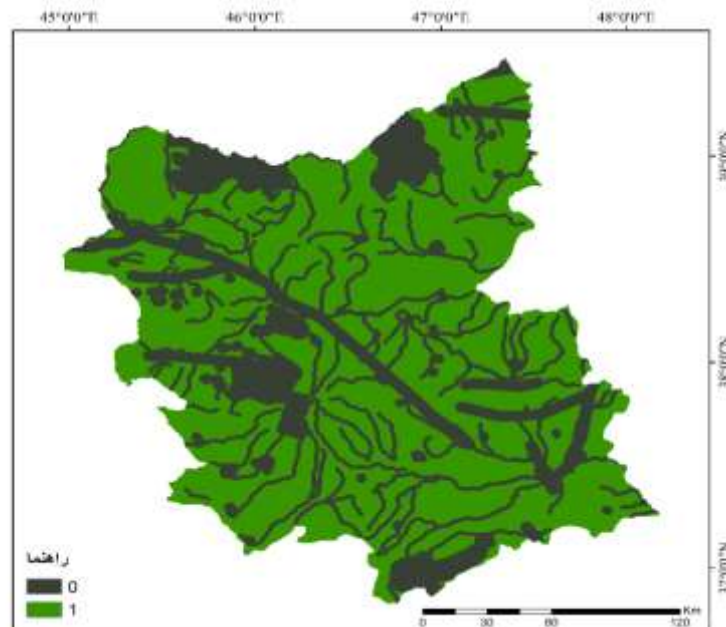
تولید لایه‌های محدودیت

همان‌طور که گفته شد، در برخی مناطق ساخت‌وسازهای صنعتی ممنوع بوده یا صرفه اقتصادی ندارد. برای شناسایی بهتر مناطق مطلوب برای استقرار نیروگاه‌های خورشیدی، لازم است که مناطق حفاظت‌شده، مناطق نزدیک به گسل‌های فعال، و مناطق نزدیک به نواحی مسکونی از نقشه تناسب اراضی به دست آمده از شبکه عصبی باید حذف شوند. این روند در شکل ۷ شرح داده شده است.



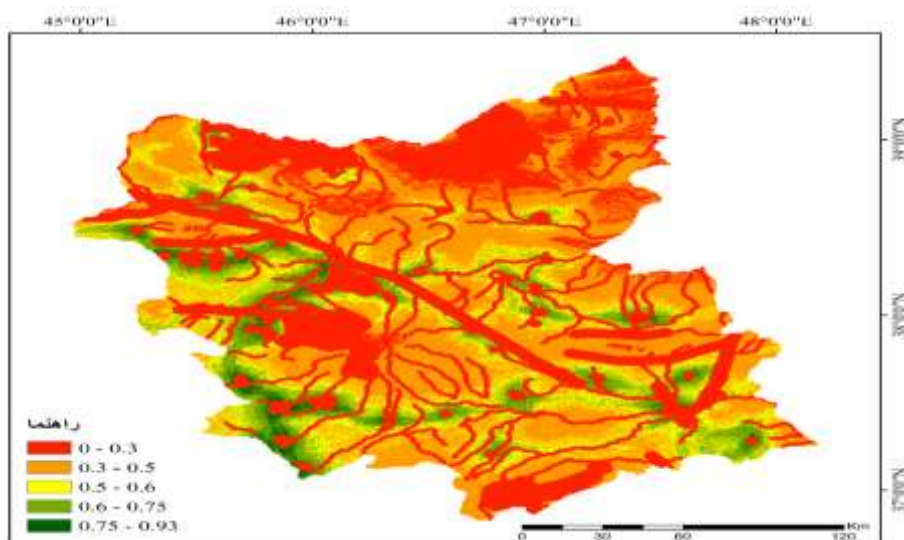
شکل ۷. فلوچارت تولید لایه محدودیت نهایی

در این مطالعه با توجه به منطقه مورد مطالعه بستر رودخانه‌ها به همراه یک بافر ۱۰۰۰ متری، مناطق حفاظت‌شده به همراه یک بافر ۱۰۰۰ متری، مناطق شهری به همراه یک بافر ۲۰۰۰ متری، و همچنین خطوط گسل‌های فعال به همراه یک بافر ۳۰۰۰ متری لایه محدودیت را تشکیل می‌دهند (شکل ۸).



شکل ۸. لایه محدودیت نهایی تولیدشده

برای به دست آوردن لایه نهایی تناسب اراضی، از عملگر بولین^۱ استفاده می‌شود. به این صورت که مقادیری که به عنوان مناطق دارای محدودیت شناخته شده‌اند مقدار ۰ و دیگر مناطق مقدار ۱ می‌گیرند. همان طور که در شکل ۹ مشخص است، مناطقی که به عنوان محدودیت شناسایی شده بودند به لایه اولیه تناسب اراضی اضافه شده‌اند. برخی از این مناطق محدودیت در مکان‌هایی قرار داشته که تناسب اولیه چندان مطلوبی ندارند؛ برخی دیگر اما مناطق دارای مطلوبیت بالا را دربر گرفته‌اند. جدول ۶ مساحت هر یک از بازه‌های مطلوبیت را پس از اعمال محدودیت‌ها بر نتایج اولیه نشان می‌دهد. بازه ۰ تا ۰,۳ بیشترین سهم از این مساحت را دارد و پس از آن بازه ۰,۳ تا ۰,۵ قرار می‌گیرد. با اعمال لایه محدودیت بر نتیجه اولیه تناسب اراضی مابقی بازه‌ها نیز دچار کاهش در مساحت شده‌اند. نکته درخورتوجه کاهش ۰,۲۵ درصدی اراضی با تناسب ۰,۷۵ به بالاست. بنابراین، در نظر گرفتن محدودیت‌ها قبل از استقرار پل‌های خورشیدی حتی در مکان‌هایی با تناسب و قابلیت بالا امری ضروری برای جلوگیری از هدر رفتن هزینه‌هاست.



شکل ۹. لایه نهایی تناسب اراضی برای استقرار نیروگاه خورشیدی

جدول ۶ مساحت هر یک از بازه‌های تعریف شده توسط کاربر را در لایه نهایی تناسب اراضی نشان می‌دهد. ذکر این نکته ضروری است که با افزوده شدن محدودیت‌ها، که تناسب صفر دارند، بازه اول از مقدار ۰,۰ شروع می‌شود.

جدول ۶. مساحت هر یک از بازه‌های تعریف شده توسط کاربر در لایه نهایی تناسب اراضی

بازه مطلوبیت	۰,۳-۰,۰	۰,۵-۰,۳	۰,۶-۰,۵	۰,۷۵-۰,۶	>۰,۷۵
مساحت	۱۸۵۴۲۰۶,۲۵	۱۴۶۰۸۸۷,۵	۶۹۴۴۶۸,۷۵	۴۹۵۲۳۷,۵	۶۹۷۶۲,۵

نتیجه گیری

انرژی از اصلی‌ترین نیازهای بشر امروزی برای پیشبرد اهداف خود است. منابع سنتی انرژی امروزه اصلی‌ترین منبع برای تأمین انرژی مورد نیاز بشر است. اما این منابع معیایی از جمله اتمام‌پذیری و آلوده‌سازی محیط زیست را دارند. بنابراین، تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان باید این منابع انرژی را با منابعی که معیاب ذکر شده را ندارند جای‌گزین کنند. منابع انرژی

1. Boolean operator

تجدیدپذیر مانند انرژی باد، خورشید، و بیومس می‌توانند جای‌گزینی بالقوه برای منابع انرژی سنتی باشند. انرژی خورشیدی یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر است. این انرژی با استفاده از صفحات خورشیدی به الکتریسیته تبدیل می‌شود. اما یکی از مهم‌ترین مواردی که باید در این مورد به آن توجه شود یافتن یک مکان بهینه برای استقرار صفحات خورشیدی است. عوامل مهم جغرافیایی و اجتماعی-اقتصادی بر کارایی این صفحات و مقرون به صرفه بودن استفاده از آن‌ها تأثیرگذارند. بنابراین، لازم است که این عوامل در کنار هم مقایسه و بررسی شوند. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره یکی از روش‌هایی است که این امکان را به پژوهشگران می‌دهد که بتوانند معیارهای مختلف مؤثر در یک تصمیم‌گیری را هم‌زمان مقایسه‌ترجیحی کنند. روش بهترین-بدترین یکی از تکنیک‌های تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره است. این روش جدید و کارآمد است و می‌تواند به‌صورت مؤثری اولویت معیارها بر یکدیگر را تعیین کند. در کنار روش یادشده، از قابلیت‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز می‌توان در حل بهینه مسائل مربوط به مکان‌یابی استفاده کرد، زیرا شبکه‌های عصبی مصنوعی قادر به حل بسیاری از مسائل تصمیم‌گیری‌اند. در این پژوهش با استفاده از معیارهای اقلیمی (تابش افقی، میانگین بارش، و ساعات آفتابی)، اوروگرافی (ارتفاع، شیب، و جهت شیب)، و اقتصادی (فاصله از شهرهای اصلی و راه‌ها) در بستر GIS و همچنین ترکیب شبکه عصبی مصنوعی و تکنیک بهترین-بدترین به‌عنوان یکی از روش‌های MCDM به شناسایی مکان‌های مناسب برای نصب صفحات خورشیدی در استان آذربایجان شرقی پرداخته شد. پس از انتخاب معیار GHI و میانگین بارش به‌ترتیب به‌عنوان بهترین و بدترین معیار و محاسبه اولویت معیارها نسبت به همدیگر، نتایج اولیه نشان داد که ۹۲۰۷۵ هکتار از اراضی استان دارای مطلوبیت بالاتر از ۰,۷۵ است و ۷۶۳۲۳۱ هکتار نیز دارای مطلوبیت بین ۰,۶ تا ۰,۷۵ برای نصب این صفحات است. اما با توجه به این نکته که بخش‌هایی از هر منطقه مانند مناطق حفاظت‌شده و پارک‌های ملی، مناطق نزدیک به گسل‌های فعال، شهرها و حاشیه بلافل آن‌ها و بستر و حاشیه رودخانه‌ها مناطقی هستند که از لحاظ قانونی استقرار صفحات خورشیدی در آن‌ها امکان‌پذیر نیست، به تولید لایه باینری محدودیت- به شرحی که در متن پژوهش آمده است- اقدام شد. سپس، با ضرب لایه محدودیت در لایه تناسب اولیه، لایه نهایی تناسب اراضی جهت استقرار نیروگاه خورشیدی به‌دست آمد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که با در نظر گرفتن محدودیت‌های اعمال‌شده، ۶۹۷۶۲ هکتار از زمین‌های استان تناسب بیش از ۰,۷۵ و ۴۹۵۲۳۷ هکتار نیز مطلوبیت بین ۰,۶ تا ۰,۷۵ را برای استقرار نیروگاه خورشیدی دارند، که به‌ترتیب کاهش ۰,۲۵ درصد و ۳۵ درصد را نسبت به نتایج اولیه نشان می‌دهد. در سمت دیگر مساحت اراضی با مطلوبیت کمتر از ۰,۳ در نتایج اولیه ۴۳۵۶۱۸ هکتار بود که پس از اعمال لایه محدودیت مساحت این اراضی به ۱۸۵۴۲۰۶ رسید که ۳۲۵ درصد افزایش را نشان می‌دهد که این میزان حدود ۴۰ درصد از مساحت کل استان را دربر می‌گیرد. در حالی که مساحت اراضی با مطلوبیت بیشتر از ۰,۷۵، فقط ۱,۵ درصد مساحت کل استان و مساحت اراضی با مطلوبیت بین ۰,۶ تا ۰,۷۵، ۱۰,۸ مساحت کل استان را شامل می‌شود. استقرار صفحات خورشیدی به‌طور گسترده در این زمین‌ها می‌تواند باعث کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی مخصوصاً در ساعات اوج مصرف شود. همچنین، با تأمین برق مناطق مسکونی شهری می‌تواند صنایع مستقر در شهر و حومه آن را از خطر قطعی برق در اوج مصرف دور کند. نتیجه دیگری که این پژوهش به همراه دارد قابلیت استفاده تلفیقی از روش‌های هوش مصنوعی و داده‌بنیایی مثل شبکه‌های عصبی مصنوعی و روش‌های مدل مینا مانند MCDM است. همچنین، از روند به‌کاررفته در این پژوهش می‌توان در دیگر مناطق کوهستانی ایران نیز استفاده کرد و نتایج قابل اطمینانی تولید کرد.

منابع

- Al Garni, H. and Awasthi, A. (2017). Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Applied Energy*, 206: 1225-1240.
- Aly, A.; Solvang Jensen, S. and Branth Pedersen, A. (2017). Solar power potential of Tanzania: Identifying CSP and PV hot spots through a GIS multicriteria decision making analysis, *Renewable Energy*, 113: 159-175.
- Amer, M. and Daim, TU. (2010). Selection of renewable energy technologies for a developing county: a case of Pakistan. *Energy for Sustainable Development*, 15: 420-435.
- Asakereh, A.; Soleymani, M. and SHEkhdavoodi, MJ. (2017). A GIS-based Fuzzy-AHP method for the evaluation of solar farms locations: Case study in Khuzestan province, Iran. *Solar Energy*, 155: 342-353.
- Brink, J. and Marx, S. (2013). Harvesting of Hartbeespoort Dam micro-algal biomass through sand filtration and solar drying. *Fuel*, 106: 67-71.
- Bunruamkaew, K. and Murayama, Y. (2011). Site suitability evaluation for ecotourism using GIS & AHP: a case study of Surat Thani Province, Thailand. *Procedia Soc Behav Sci*, 21: 269-278.
- Fadare, D.A. (2008). Modelling of solar energy potential in Nigeria using an artificial neural network model. *Applied Energy*, 86: 1410-1422.
- Ghose, D.; Naskar, S.; Shabbiruddin, ; Sadeghzadeh, M.; El Haj Assad, M. and Nabipour, N. (2020). Siting high solar potential areas using Q-GIS in West Bengal, India, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42: 100864
- <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS>
- <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>
- Kaiser, P.; Unde, RB.; Kern, C. and Jess, A. (2013). Production of liquid hydrocarbons with CO₂ as carbon source based on reversewater-gas shift and Fischer-Tropsch synthesis. *Chemie Ingenieur Technik*, ; 85(4): 489-499.
- Kamali, MR.; Mohajerzade, SM. and Masomi, R. (2010) Principles and spatial criteria for strategic industries. Tehran: Mabna Kherad Press.
- Magdy Habib, Sh.; Emam Suliman, A.; Al Nahry, A. and Abd El Rahman, E. (2020). Spatial modeling for the optimum site selection of solar photovoltaics power plant in the northwest coast of Egypt, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 18:100313.
- Mahmoody-Vanolya, N.; Jelokhani-Niaraki, M. and Toomanian, A. (2019). Validation of spatial multicriteria decision analysis results using public participation GIS. *Applied Geography*, 112: 102061.
- Rediske, R.; M. Siluk, J-C.; Michels, L.; D. Rigo, P.; B. Rosa, C. and Cugler, G. (2020). Multi-criteria decision-making model for assessment of large photovoltaic farms in Brazil, *Energy*, 197: 117-167.
- Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53: 49-57.
- Rezaei, J. (2016) Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. *Omega*, 64: 126-130.
- Rumbayan, M.; Abudureyimu, A. and Nagasaka, K. (2012). Mapping of solar energy potential in Indonesia using artificial neural network and geographical information system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16: 1437-1449.

- Sabziparavar, A. and Shetaee, H. (2007). Estimation of global solar radiation in arid and semi-arid climates of east and west Iran. *Energy*, 32: 649-655.
- Sanchez-Lozano, J.M.; Garcia-Cascales, M.S. and Lamata M.T. (2016). Comparative TOPSIS-ELECTRE TRI methods for optimal sites for photovoltaic solar farms. Case study in Spain *Journal of Cleaner Production*, 127: 387-398.
- Saraswat, S.K.; Digalwar, A.K.; Yadav, S.S. and Kumar, G. (2021). MCDM and GIS based modelling technique for assessment of solar and wind farm locations in India. *Renewable Energy*, 169: 865-884.
- Solangi, Y.A.; Tan, Q.; Mirjat, N.H.; Valasai, G.D.; Khan, M.W.A. and Ikram, M. (2019). An Integrated Delphi-AHP and Fuzzy TOPSIS Approach toward Ranking and Selection of Renewable Energy Resources in Pakistan. *Processes*, 7: 118.
- Statistical Centre of Iran. <https://www.amar.org.ir/>
- Sun, L.; Jiang, Y.; Guo, Q.; Ji, L.; Xie, Y.; Qiao, Q.; Huang, G. and Kun, Xiao (2020). A GIS-based multi-criteria decision making method for the potential assessment and suitable sites selection of PV and CSP plants. *Resources, Conservation and Recycling*, inpress: 105306.
- Sward, J.A.; Nilson, R.S.; Katkar, V.V.; Stedman, R.C.; Kay, D.L.; Ifft, J.E. and Zhang, K.M. (2021). Integrating social considerations in multicriteria decision analysis for utility-scale solar photovoltaic siting. *Applied Energy*, 288: 116543.
- Tahri, M.; Hakdaoui, M. and Maanan, M. (2015). The evaluation of solar farm locations applying Geographic Information System and Multi-Criteria Decision-Making methods: Case study in southern Morocco. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51: 1354-1362.
- Tercan, E.; Eymen, A.; Urfali, T. and Saracoglu, B.O. (2021). A sustainable framework for spatial planning of photovoltaic solar farms using GIS and multi-criteria assessment approach in Central Anatolia, Turkey. *Land Use Policy*, 102: 105272.
- Uyan, M. (2013). GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28: 11-17.
- Wang, C.-N.; Hsueh, M.-H. and Lin, D.-F. (2019). Hydrogen Power Plant Site Selection Under Fuzzy Multicriteria Decision-Making (FMCDM) Environment Conditions. *Symmetry*, 11: 596.
- Wang, Q.; M'Ikiugu, M.M. and Kinoshita, I. (2014). A GIS-Based Approach in Support of Spatial Planning for Renewable Energy: A Case Study of Fukushima, Japan. *Sustainability*, 6: 2087-2117.
- Yeo, IA. and Yee, JJ. (2014). A proposal for a site location planning model of environmentally friendly urban energy supply plants using an environment and energy geographical information system (E-GIS) database (DB) and an artificial neural network (ANN). *Applied Energy*, 119: 99-117.
- Yousefi, H.; Hafeznia, H. and Yousefi-Sahzabi, A. (2018). Spatial Site Selection for Solar Power Plants Using a GIS-Based Boolean-Fuzzy Logic Model: A Case Study of Markazi Province, Iran. *Energies*, 11: 1648.
- Yushchenko, A.; Bono, A.; Chatenoux, B.; Kumar Patel, M. and Ray, N. (2018). GIS-based assessment of photovoltaic (PV) and concentrated solar power (CSP) generation potential in West Africa, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(2): 2088-2103.
- Zambrano-Asanza, S.; Quiros-Tortos, J. and Franco, J.F. (2021). Optimal site selection for photovoltaic power plants using a GIS-based multi-criteria decision making and spatial overlay with electric load, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143: 110853.
- Zhou, J.; Wu, Y.; Wu, Ch.; He, F.; Zhang, B. and Liu, F. (2020). A geographical information system based multi-criteria decision-making approach for location analysis and evaluation of urban

photovoltaic charging station: A case study in Beijing, *Energy Conversion and Management*, 205: 112340.

Zoghi, M.; Ehsani, A.; Sadat, M.; Amiri M. and Karimi, S. (2017). 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.