

مکان‌یابی بهینه توربین‌های بادی با استفاده از یادگیری ماشین (منطقه مورد مطالعه: شهرستان رودبار)

حسین برکتی^۱، محمدرضا جلوخانی نیارکی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی - دانشکده جغرافیا - دانشگاه تهران
hossein.barekati@ut.ac.ir

^۲ دانشیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی - دانشکده جغرافیا - دانشگاه تهران
mrjelokhani@ut.ac.ir

(دریافت: شهریور ۱۴۰۳، تصویب: دی ۱۴۰۳)

چکیده

با توجه به توزیع ناهمگون انرژی باد در سطح زمین، انتخاب مکان مناسب برای نیروگاه بادی یکی از حیاتی‌ترین مراحل در طراحی نیروگاه‌های بادی به‌شمار می‌آید. این فرآیند پیچیده نیازمند در نظر گرفتن عوامل متعددی از جمله ملاحظات محیطی، اقتصادی و اجتماعی است. رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره در این زمینه با چالش‌های متعددی روبه‌رو هستند. به‌منظور رفع این چالش‌ها، یکپارچه‌سازی تکنیک‌های یادگیری ماشین به‌عنوان یکی از رویکردهای نوین در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مطرح شده است. این مطالعه یک چارچوب مبتنی بر یادگیری ماشین (ML) و سیستم اطلاعات جغرافیایی، برای انتخاب خودکار مکان مزارع بادی را ارائه می‌دهد. در این چارچوب، سه الگوریتم یادگیری ماشین به کار گرفته شده‌اند. منطقه مورد مطالعه، شهرستان رودبار، به دلیل دارا بودن سایت منجیل که بخشی از ظرفیت نصب انرژی بادی ایران را تشکیل می‌دهد، انتخاب شده است. بر اساس عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین، مدل یادگیری گرادیان با دقت ۹۷ درصد بهترین نتیجه را نشان داد، در حالی که مدل‌های افزایش گرادیان بی‌نهایت و جنگل تصادفی در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. تحلیل‌های مبتنی بر روش SHAP نشان داد که سرعت باد، فاصله تا خطوط انتقال، فاصله تا مناطق حفاظت‌شده، و ارتفاع، به‌عنوان مؤثرترین معیارها در انتخاب مکان مزارع بادی در این منطقه مطرح هستند. در شهر رودبار، مناطقی با پتانسیل بالا شناسایی شده‌اند که هنوز به توربین‌های بادی مجهز نشده‌اند. این یافته‌ها اهمیت این مکان‌ها را برای سرمایه‌گذاری‌های آینده در توسعه مزارع بادی برجسته می‌کند. چارچوب پیشنهادی می‌تواند به‌طور مؤثری در مطالعات انتخاب مکان مزارع بادی در استان‌هایی با شرایط مشابه به کار گرفته شود.

واژگان کلیدی: نیروگاه بادی، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، یادگیری ماشین (ML)، روش SHAP

۱- مقدمه

در دنیای امروز، نقش انرژی در توسعه اقتصادی و اجتماعی کشورها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به افزایش مصرف انرژی و کاهش منابع فسیلی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان راهکاری پایدار و کارآمد بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است [۱]. به‌طور خاص، انرژی بادی یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر است که به دلیل دسترسی گسترده و بهره‌وری بالا در تولید برق، به عنوان جایگزینی مؤثر برای سوخت‌های فسیلی شناخته می‌شود [۲]. با این حال، بهره‌وری از این منبع انرژی وابسته به مکان‌یابی مناسب توربین‌های بادی است، زیرا مکان نصب تأثیر مستقیمی بر بازده انرژی تولیدی و هزینه‌های مرتبط با احداث و نگهداری توربین‌ها دارد [۳]. بنابراین، انتخاب دقیق مکان‌های مناسب برای نصب توربین‌های بادی با در نظر گرفتن جنبه‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی، حیاتی است.

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^۱ (MCDM)، اگرچه می‌توانند به شناسایی مکان‌های مناسب برای نصب توربین‌های بادی کمک کنند، اما با چالش‌هایی نیز مواجه هستند. مهم‌ترین چالش‌ها شامل وابستگی به وزن‌دهی دستی معیارها، عدم توانایی در شبیه‌سازی روابط غیرخطی پیچیده و محدودیت در تحلیل حجم بالای داده‌های مکانی است. این محدودیت‌ها موجب شده است که یادگیری ماشین به عنوان جایگزینی مؤثر در مکان‌یابی توربین‌های بادی مطرح شود.

الگوریتم‌های یادگیری ماشین^۲ امروزی با قابلیت‌های پیشرفته‌تر، توانسته‌اند بسیاری از این چالش‌ها را برطرف کنند. یادگیری ماشین به‌طور خودکار اوزان معیارها را بر اساس الگوهای موجود در داده‌ها تعیین می‌کند و نیاز به وزن‌دهی دستی را حذف می‌کند. همچنین، این الگوریتم‌ها با توانایی شناسایی و مدل‌سازی روابط غیرخطی پیچیده، دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش می‌دهند. علاوه بر این، الگوریتم‌های یادگیری ماشین قادرند داده‌های حجیم و متنوع مکانی را با سرعت و کارایی بالا پردازش کنند و الگوهای پنهان در داده‌ها را شناسایی کنند.

در این مطالعه، سه مدل یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی^۳، افزایش گرادین بی‌نهایت^۴ و ماشین یادگیری گرادین^۵ برای ارزیابی و پیش‌بینی مکان‌های مناسب نصب توربین‌های بادی به کار گرفته شده‌اند. این الگوریتم‌ها به دلیل قابلیت‌های پیشرفته در تحلیل داده‌های پیچیده و خودکارسازی فرایندهای انتخاب ویژگی‌ها، قادرند نتایج بهینه را ارائه دهند و به تصمیم‌گیری دقیق‌تر در مکان‌یابی توربین‌های بادی کمک کنند.

هدف اصلی این مطالعه، بهبود دقت و کارایی در مکان‌یابی توربین‌های بادی با بهره‌گیری از داده‌های جامع و تکنیک‌های یادگیری ماشین است. نتایج این تحقیق می‌تواند به توسعه پایدار انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش وابستگی به منابع فسیلی کمک کند و از این رو، رویکردی نوین و کارآمد در زمینه مطالعات مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی محسوب می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

مطالعات بسیاری در زمینه مکان‌یابی بهینه توربین‌های بادی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره انجام شده است. این روش‌ها شامل تکنیک‌هایی مانند فرآیند تحلیل سلسله مراتبی^۶ و فرآیند تحلیل شبکه‌ای^۷ هستند که برای ارزیابی چندمعیار و انتخاب بهترین گزینه در مسائل مکان‌یابی استفاده می‌شوند. با این حال، این روش‌ها با محدودیت‌هایی مواجه‌اند. به عنوان مثال، پژوهش‌هایی از جمله شفیع (۲۰۲۲) و اروغلو (۲۰۲۱) بیان کرده‌اند که روش‌های MCDM در شبیه‌سازی روابط پیچیده میان معیارها دچار مشکل هستند و اغلب به وزن‌دهی دستی معیارها وابسته‌اند، که این موضوع می‌تواند به نتایج ناپایدار و سلیقه‌ای منجر شود [۲، ۳].

با پیشرفت الگوریتم‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی، این تکنیک‌ها به عنوان مکمل‌هایی مؤثر برای بهبود و ارتقای روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مورد توجه قرار گرفته‌اند. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند با خودکارسازی

۳ Random forest

۴ Extreme Gradient Boosting (XGBoost)

۵ Gradient Boosting Machine (GBM)

۶ Analysis Hierarchy Process (AHP)

۷ Analytical Network Process (ANP)

۱ Multi-Criteria Decision Making (MCDM)

۲ Machine learning algorithms

فرآیند وزن‌دهی و شبیه‌سازی روابط غیرخطی، دقت و کارایی بهتری در مسائل مکان‌یابی ارائه دهند. به عنوان مثال، لی و همکاران (۲۰۲۰) نشان داده است که الگوریتم جنگل تصادفی و افزایش گرادین بی‌نهایت می‌تواند با تحلیل حجم بالای داده‌ها و شناسایی الگوهای پیچیده، به دقت بالاتری نسبت به روش‌های سنتی دست یابد [۱۸].

همچنین، استفاده از ابزارهای تفسیرپذیری مانند تحلیل SHAP به درک بهتر تأثیر ویژگی‌های مختلف بر نتایج مدل‌ها کمک می‌کند و می‌تواند تصمیم‌گیرندگان را در شناسایی معیارهای مهم‌تر یاری کند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که این ابزارهای یادگیری ماشین می‌توانند نتایج قابل اعتمادی برای مکان‌یابی توربین‌های بادی ارائه دهند و به عنوان ابزاری قدرتمند در مطالعات آینده مورد استفاده قرار گیرند [۴].

۳- محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شهرستان رودبار است، که جنوبی‌ترین شهرستان استان گیلان در ایران به شمار می‌رود. مرکز این شهرستان، شهر رودبار است. انتخاب این منطقه به دلیل وجود توربین‌های بادی فعال در منجیل و رودبار صورت گرفته است. ساخت این نیروگاه‌های بادی در دهه ۱۳۷۰ خورشیدی آغاز شد. در منجیل، باد در ۸۷ درصد روزهای سال وجود دارد و هر توربین می‌تواند حدود ۸۷ مگاوات ساعت انرژی تولید کند. این نیروگاه شامل ۱۷۱ توربین است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

توربین‌های بادی موجود در منطقه، داده‌های واقعی و اساسی را برای مدل‌های یادگیری ماشین فراهم می‌کنند و

به‌عنوان ابزارهای کلیدی برای برنامه‌ریزی نصب‌های آینده نیروگاه‌های بادی عمل می‌کنند. علاوه بر این، توربین‌های بادی موجود بینش‌های ارزشمندی درباره مناطق خاص ارائه می‌دهند، زیرا این نواحی قبلاً ارزیابی شده و توسط متخصصان به‌عنوان مناطق مناسب برای نصب توربین‌های بادی شناخته شده‌اند. عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین به‌طور گسترده به کیفیت و مقدار داده‌های ورودی وابسته است، که برای کشف روابط بین معیارها و بهینه‌سازی عملکرد مدل ضروری است

۴- روش تحقیق

این مطالعه با هدف مکان‌یابی بهینه توربین‌های بادی در شهرستان رودبار، ایران، با استفاده از یادگیری ماشین و سیستم اطلاعات جغرافیایی^۱ طراحی شده است. دلیل استفاده از یادگیری ماشین در این تحقیق، توانایی آن در مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی بین معیارهای مکانی و بهره‌گیری از حجم بالای داده‌ها برای پیش‌بینی‌های دقیق است. روش‌های سنتی تصمیم‌گیری چندمعیاره، اگرچه می‌توانند به شناسایی مکان‌های مناسب کمک کنند، اما غالباً در تنظیم وزن‌دهی معیارها و شبیه‌سازی روابط پیچیده دچار محدودیت هستند. یادگیری ماشین، با امکان استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته و خودکارسازی فرایند انتخاب ویژگی‌ها، به ارائه نتایج بهینه برای مکان‌یابی می‌انجامد.

روش یادگیری ماشین همچنین به دلیل تفسیرپذیری بالاتر و توانایی به‌روزرسانی بر اساس داده‌های جدید انتخاب شده است، که این مزایا به تصمیم‌گیری دقیق‌تر برای تعیین مکان‌های مناسب برای نصب توربین‌های بادی منجر می‌شوند. از این رو، یادگیری ماشین در این تحقیق به عنوان ابزاری مؤثر برای تحلیل داده‌های مکانی و بهینه‌سازی مکان‌یابی به کار گرفته شده است.

در مرحله اول، داده‌های مورد استفاده از منابع معتبر و به‌روز تهیه شدند که شامل ده معیار کلیدی برای مکان‌یابی توربین‌های بادی است. معیارهای انتخابی عبارتند از: سرعت باد، ارتفاع، شیب، فاصله از گسل، فاصله از مناطق لغزش، فاصله از مناطق حفاظت‌شده، فاصله از منابع آبی، فاصله از

^۱ Geographic Information System (GIS)

سکونتگاه‌ها، فاصله از شبکه برق، و فاصله از جاده‌ها. هر یک از این معیارها، نقشی حیاتی در مکان‌یابی ایفا می‌کنند و به طور خاص به گونه‌ای طراحی شده‌اند که جامعیت و کفایت آن‌ها در مدل‌سازی بهینه‌سازی مکان‌یابی تضمین شود. برای مثال، داده‌های سرعت باد که یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر بهره‌وری توربین‌های بادی است، در ارتفاع ۵۰ متری و طی سه سال اخیر (۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳) جمع‌آوری شده است [۸]. همچنین، داده‌های مربوط به ارتفاع و شیب زمین از مدل‌های ارتفاعی دیجیتال استخراج شده و هر معیار بر اساس ویژگی‌های خاص آن به پنج طبقه‌ی امتیازی دسته‌بندی شده است [۹]. این طبقه‌بندی به منظور تسهیل فرایند آموزش مدل‌ها و افزایش دقت پیش‌بینی‌ها صورت گرفته است.

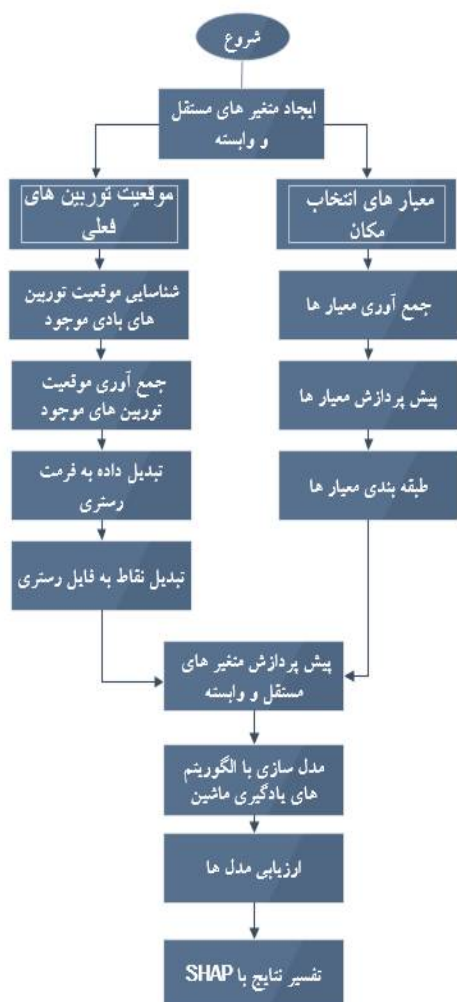
برای این تحقیق، سه مدل یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی، افزایش گرادیان بی‌نهایت و ماشین یادگیری گرادیان برای پیش‌بینی مکان‌های مناسب نصب توربین‌های بادی انتخاب شدند. هر یک از این مدل‌ها به دلیل توانایی خاص خود در تحلیل داده‌های مکانی و شناسایی روابط پیچیده میان معیارها انتخاب شده‌اند.

پس از تنظیم پارامترهای اولیه، داده‌ها به دو مجموعه آموزشی و آزمایشی تقسیم شدند؛ به طوری که ۷۰ درصد از داده‌ها برای آموزش مدل‌ها و ۳۰ درصد باقی‌مانده برای اعتبارسنجی نتایج اختصاص یافتند. هر مدل با ترکیب‌های مختلفی از پارامترها اجرا شد و بهترین ترکیب‌ها برای دستیابی به دقت بیشتر انتخاب گردید.

در نهایت، برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها، از معیارهایی همچون دقت کلی و نرخ حساسیت (شناسایی نمونه‌های مناسب) استفاده شد تا کارایی مدل‌ها در شناسایی مکان‌های مستعد سنجیده شود. همچنین، برای تفسیر تأثیر هر معیار بر پیش‌بینی‌های مدل‌ها، از روش SHAP بهره گرفته شد. تحلیل‌های SHAP نشان داد که ویژگی‌هایی نظیر سرعت باد و ارتفاع تأثیر بیشتری بر تصمیم‌گیری مدل‌ها دارند و اهمیت این ویژگی‌ها در انتخاب مکان بهینه توربین‌های بادی تأیید شد [۲۱].

کلاسه‌بندی معیارهای مکانی در این تحقیق، بر اساس ترکیبی از مطالعات پیشین و نظرات کارشناسی انجام شده است. برای هر معیار، از جمله سرعت باد، ارتفاع، و شیب زمین، ابتدا مقالات مرتبط و مطالعات گذشته بررسی شدند تا محدوده‌های بهینه و قابل قبول برای هر معیار تعیین

شوند. به عنوان مثال، محدوده‌های مختلف سرعت باد که برای نصب توربین بادی مناسب هستند، با توجه به تحقیقات گذشته و معیارهای استاندارد تعیین شده‌اند [۸].



شکل ۲- روندنمای مراحل پژوهش

در مواردی که اطلاعات کافی در مقالات پیشین وجود نداشت یا شرایط خاص منطقه مورد مطالعه (شهرستان رودبار) نیاز به بررسی بیشتر داشت، از نظرات کارشناسان حوزه انرژی بادی و مکانیابی توربین‌ها استفاده شده است. این نظرات به کلاسه‌بندی معیارها بر اساس شرایط محلی و بهینه‌سازی دقیق‌تر کمک کرده است. بنابراین، کلاسه‌بندی معیارها به شکلی انجام شده که همسو با استانداردهای معتبر و قابل استناد باشد و در عین حال، تطابق بالایی با ویژگی‌های خاص منطقه داشته باشد.

در این تحقیق، روش اجرا به صورت گسسته پیاده‌سازی شده است، به این معنی که داده‌های ورودی به مدل‌ها به صورت گسسته بوده و بر اساس معیارهای

مکانی و شرایط محیطی دسته‌بندی شده‌اند. با این حال، خروجی مدل‌ها به صورت پیوسته تولید شده است و نتایج برای هر پیکسل به صورت یک مقدار بین ۰ تا ۱ ارائه می‌شود که نشان‌دهنده میزان مطلوبیت هر نقطه برای نصب توربین بادی است. این خروجی پیوسته از طریق مدل‌سازی و پیش‌بینی پیوسته توسط الگوریتم‌های یادگیری ماشین حاصل شده است. در واقع، هر مدل یادگیری ماشین با تحلیل ویژگی‌های گسسته و اعمال تکنیک‌های رگرسیون پیوسته، یک خروجی پیوسته را برای هر پیکسل در منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهد. به این ترتیب، اگرچه داده‌های ورودی به صورت گسسته هستند، اما الگوریتم‌های یادگیری ماشین قادرند خروجی پیوسته و قابل تفسیر برای هر نقطه از منطقه تولید کنند.

۴-۱- معیارهای انتخاب مکان

برجسته‌کردن مناطق پتانسیل‌دار برای نصب نیروگاه‌های بادی یک شرط اساسی برای مدل‌سازی است. این فرآیند نیازمند تعیین انواع مختلف عوامل ارزیابی و محدودیت‌هاست که می‌توانند مناسب بودن یک مکان کاندید را افزایش، کاهش یا محدود کنند. در ادامه، هر یک از این معیارها و نحوه طبقه‌بندی پیکسل‌ها بر اساس این معیارها به‌طور خلاصه توضیح داده شده است.

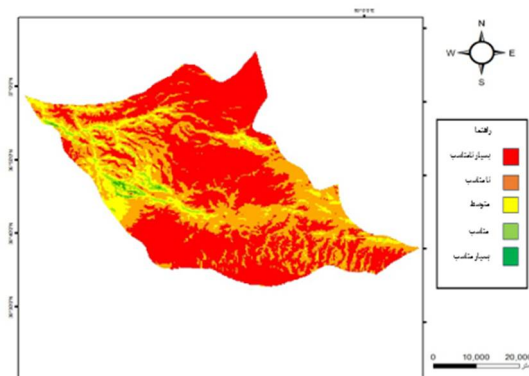
۴-۱-۱- سرعت باد

میانگین سرعت باد به‌عنوان یکی از مهم‌ترین معیارها برای نصب مزارع بادی در نظر گرفته می‌شود، زیرا سرعت باد بالاتر می‌تواند تولید انرژی بیشتری از توربین‌های بادی فراهم کند. در این مطالعه، داده‌های میانگین سرعت باد در ارتفاع ۵۰ متری برای سه سال (۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳) جمع‌آوری شد. به هر پیکسل بر اساس میانگین سرعت باد آن، امتیازی بین ۱ (کمترین مقدار سرعت باد) تا ۵ (بیشترین مقدار سرعت باد) اختصاص داده شد. تعیین حد آستانه مناسب برای سرعت باد بستگی به استانداردها و تحقیقات مختلف در زمینه انرژی بادی دارد. به‌طور کلی، حداقل سرعت بادی که برای نصب توربین‌های بادی مناسب در نظر گرفته می‌شود، معمولاً بین ۸ تا ۱۱ متر بر ثانیه در ارتفاع برج

توربین است. با این حال، این مقدار می‌تواند بسته به مدل توربین و شرایط محلی متغیر باشد [۸].

جدول ۱- طبقه‌بندی هر پیکسل داده سرعت باد

مقدار امتیاز	حد آستانه هر طبقه (متر بر ثانیه)	کلاس هر پیکسل
۱	زیر ۵	کلاس ۱
۲	۵ تا ۸	کلاس ۲
۳	۸ تا ۱۱	کلاس ۳
۴	۱۱ تا ۱۴	کلاس ۴
۵	۱۴ به بالا	کلاس ۵



شکل ۳- نقشه معیار سرعت باد

۴-۱-۲- ارتفاع

این معیار به ارتفاع زمین که توربین‌های بادی در آن نصب می‌شوند، اشاره دارد. مناطق با ارتفاعات بالاتر ممکن است سرعت باد بیشتری را تجربه کنند، به همین دلیل توربین‌های بادی غالباً در این مناطق نصب می‌شوند. با این حال، نصب و نگهداری توربین‌ها در ارتفاعات بالا می‌تواند هزینه‌های اضافی به همراه داشته باشد، بنابراین باید با دقت ارزیابی شود.

جدول ۲- طبقه‌بندی هر پیکسل داده ارتفاع

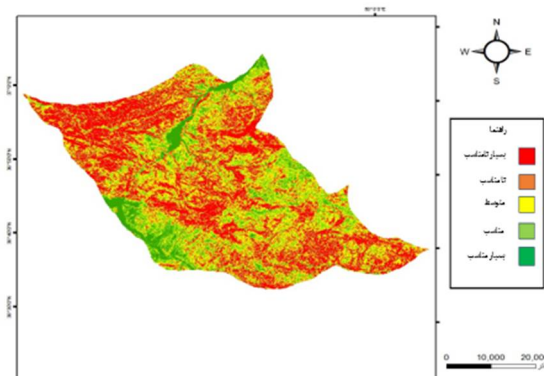
مقدار امتیاز	حد آستانه هر طبقه (متر)	کلاس هر پیکسل
۱	بالاتر از ۲۰۰۰	کلاس ۱
۲	۱۵۰۰ - ۲۰۰۰	کلاس ۲
۳	۱۰۰۰ - ۱۵۰۰	کلاس ۳
۴	۵۰۰ - ۱۰۰۰	کلاس ۴
۵	تا ۵۰۰ متر	کلاس ۵

برای ساخت نیروگاه‌های بادی مناسب نیستند. در این مطالعه، مدل ارتفاعی دیجیتال برای ایجاد نقشه شیب منطقه مورد مطالعه استفاده شد.

در منطقه رودبار، شیب به پنج طبقه‌بندی شد: شیب زیر ۱۰ درصد به‌عنوان مناسب‌ترین و با امتیاز ۵، شیب ۱۰ تا ۲۰ درصد با امتیاز ۴، شیب ۲۰ تا ۳۰ درصد با امتیاز ۳، شیب ۳۰ تا ۴۰ درصد با امتیاز ۲، و شیب بالای ۴۰ درصد که به‌عنوان نامناسب در نظر گرفته شده و امتیاز ۱ را دریافت کرد [۱۰].

جدول ۳- طبقه‌بندی هر پیکسل داده شیب

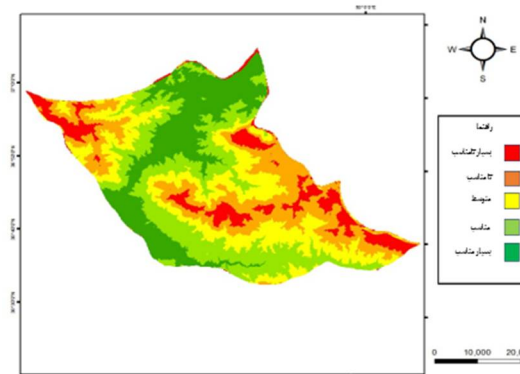
مقدار امتیاز	حد استانه هر طبقه (درجه)	کلاس هر پیکسل
۱	$40 <$	کلاس ۱
۲	$40-30$	کلاس ۲
۳	$30-20$	کلاس ۳
۴	$20-10$	کلاس ۴
۵	$10 >$	کلاس ۵



شکل ۵- نقشه معیار شیب

۴-۱-۴- فاصله از گسل

معیار فاصله از گسل در تعیین مکان‌های مناسب برای نصب توربین‌های بادی اهمیت زیادی دارد، زیرا گسل‌ها می‌توانند به دلیل فعالیت‌های زمین‌لرزه‌ای، خطرات جدی‌ای برای ساختارهای بزرگ مانند توربین‌های بادی ایجاد کنند و قرارگیری توربین‌های بادی در نزدیک گسل‌های فعال، ممکن است باعث خرابی سازه‌ها در صورت وقوع زلزله شود. بنابراین، امتیازدهی به این معیار برای کاهش ریسک‌های مرتبط با زمین‌لرزه‌ها و تضمین امنیت و طول عمر کارکرد توربین‌ها ضروری است [۱۱].



شکل ۴- نقشه معیار ارتفاع

در این مطالعه، از مدل ارتفاعی دیجیتال^۱ برای تولید نقشه ارتفاع منطقه مورد مطالعه استفاده شد و سپس این معیار، مشابه معیار سرعت باد، به پنج طبقه امتیازی تقسیم شد [۸، ۹].

به‌طور کلی، انتخاب ارتفاع مناسب برای نصب توربین‌های بادی به عوامل مختلفی بستگی دارد، از جمله شرایط باد، هزینه‌های نصب و نگهداری، و ویژگی‌های زمین. ارتفاع بیشتر معمولاً مزایای بیشتری از نظر سرعت باد و بهره‌وری توربین‌ها دارد، در حالی که ارتفاع کمتر می‌تواند هزینه‌ها و چالش‌های نصب را کاهش دهد. برای تصمیم‌گیری نهایی، لازم است که شرایط خاص منطقه و تحلیل دقیق داده‌ها مد نظر قرار گیرد. در این منطقه رودبار، به دلیل وجود موانع مانند درختان و اراضی در ارتفاعات بالاتر و همچنین دستیابی به سرعت میانگین باد مناسب در ارتفاعات کمتر، به مناطق با ارتفاع کمتر امتیاز بیشتری داده شد.

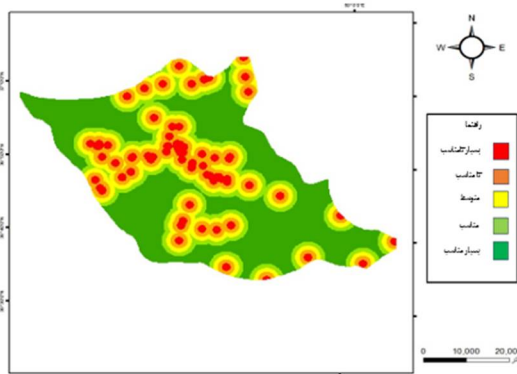
۴-۱-۳- شیب

شیب زمین تأثیر قابل‌توجهی بر جریان باد دارد و همچنین بر هزینه‌های حمل و نقل، ساخت و نگهداری نیروگاه‌های بادی تأثیر می‌گذارد. مناطق با شیب کم، که به‌عنوان مناطق صاف شناخته می‌شوند، برای نصب توربین‌های بادی مناسب‌تر در نظر گرفته می‌شوند. دلیل این امر آن است که زمین‌های با شیب تند دسترسی به تجهیزات مانند جرثقیل‌ها و کامیون‌ها را دشوارتر می‌کنند و هزینه‌های ساخت و نگهداری را افزایش می‌دهند. معمولاً توصیه می‌شود که حداکثر آستانه شیب برای نصب نیروگاه‌های بادی ۳۵ درصد باشد و مقادیر بالاتر معمولاً

^۱ Digital Elevation Model (DEM)

جدول ۴- طبقه‌بندی هر پیکسل داده فاصله تا گسل

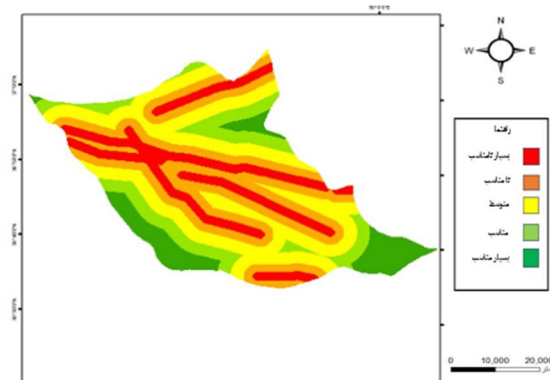
مقدار امتیاز	حد استانه هر طبقه (کیلومتر)	کلاس هر پیکسل
۱	کمتر از ۱	کلاس ۱
۲	۱-۳	کلاس ۲
۳	۳-۶	کلاس ۳
۴	۶-۹	کلاس ۴
۵	بیشتر از ۹	کلاس ۵



شکل ۷- نقشه معیار فاصله از مناطق زمین لغزش

۴-۱-۶- فاصله از مناطق محافظت شده

حفظ فاصله مناسب از مناطق خاص مانند پارک‌های ملی، مناطق حفاظت از حیات وحش، پارک‌های طبیعی و... اهمیت زیادی دارد. این اقدام به منظور جلوگیری از آسیب به محیط زیست ناشی از صدا و اختلالات بصری ضروری است. بنابراین، نیروگاه‌های بادی باید در فاصله‌ای معین از این مناطق محافظت شده نصب شوند. در منطقه مورد مطالعه، دو ناحیه محافظت شده طبیعی وجود دارد و بر اساس مختصات و مساحت این نواحی، طبقه‌بندی مناطق در فاصله‌های مختلف انجام شد [۱۳].



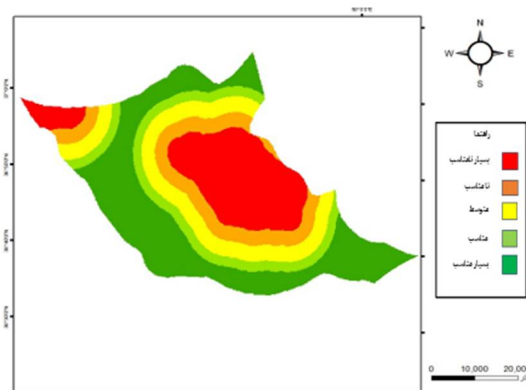
شکل ۶- نقشه معیار فاصله تا گسل

۴-۱-۵- فاصله از مناطق زمین لغزش

حفظ فاصله ایمن از مناطق زمین لغزش بسیار حیاتی است، زیرا لغزش‌های زمین در مناطقی با ثبات پایین رخ می‌دهند و می‌توانند با خطرات امنیتی قابل توجهی همراه باشند. علاوه بر این، نادیده گرفتن این عامل ممکن است منجر به خسارات مالی قابل توجهی شود [۱۲].

جدول ۶- طبقه‌بندی هر پیکسل داده فاصله تا مناطق محافظت شده

مقدار امتیاز	حد استانه هر طبقه (کیلومتر)	کلاس هر پیکسل
۱	کمتر از ۳	کلاس ۱
۲	۳-۶	کلاس ۲
۳	۶-۹	کلاس ۳
۴	۹-۱۲	کلاس ۴
۵	بیشتر از ۱۲	کلاس ۵



شکل ۸- نقشه معیار فاصله تا مناطق محافظت شده منطقه تولید شده نسبت به ارزش هر پیکسل

جدول ۵- طبقه‌بندی هر پیکسل داده فاصله تا مناطق زمین لغزش

مقدار امتیاز	حد استانه هر طبقه (کیلومتر)	کلاس هر پیکسل
۱	کمتر از ۱	کلاس ۱
۲	۱-۲	کلاس ۲
۳	۲-۳	کلاس ۳
۴	۳-۴	کلاس ۴
۵	بیشتر از ۵	کلاس ۵

۴-۱-۷-فاصله از منابع آبی

معیار فاصله از منابع آبی، از جمله رودخانه‌ها، تالاب‌ها و دیگر منابع آبی، به حفظ تعادل طبیعی و حفاظت از محیط زیست کمک می‌کند. نصب نیروگاه‌های بادی نباید بیش از حد به این منابع نزدیک باشد تا از مسدود شدن مسیرهای آبی و افزایش هزینه‌های ساخت جلوگیری شود. برای ارزیابی این معیار، استفاده از سیستمی بر مبنای فاصله مناسب است که در آن، نقاط دورتر از منابع آبی امتیاز بالاتری دریافت می‌کنند. این روش به تأمین فاصله کافی از منابع آبی کمک می‌کند و اهمیت این معیار در احداث توربین‌های بادی را روشن می‌سازد [۱۴].

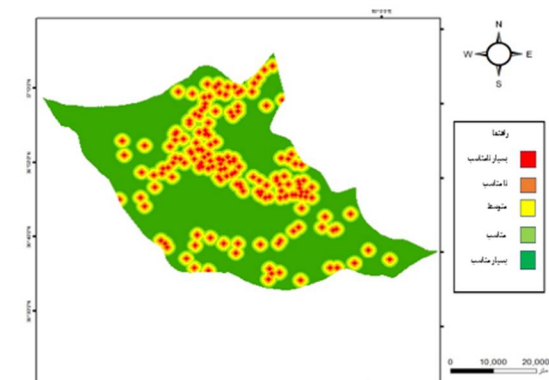
سکونتگاه‌ها می‌تواند به زیبایی شهری آسیب رسانده و ارزش املاک را کاهش دهد. همچنین، تولید صدا توسط نیروگاه‌های بادی ممکن است مزاحمت‌هایی برای جامعه محلی و حیات وحش ایجاد کند. علاوه بر این، پره‌های توربین‌های بادی می‌توانند سایه‌پراکنندگی و اختلالات نوری ایجاد کنند که منجر به مشکلات بصری می‌شود. سیستم امتیازدهی برای این معیار می‌تواند بر اساس نیازها و قوانین محلی تنظیم شود، اما به‌طور کلی، فاصله‌های بیشتر از سکونتگاه‌ها به دلیل کاهش خطرات مرتبط، امتیاز بالاتری دریافت می‌کنند [۱۴].

جدول ۸-طبقه‌بندی هر پیکسل داده فاصله از سکونتگاه‌ها

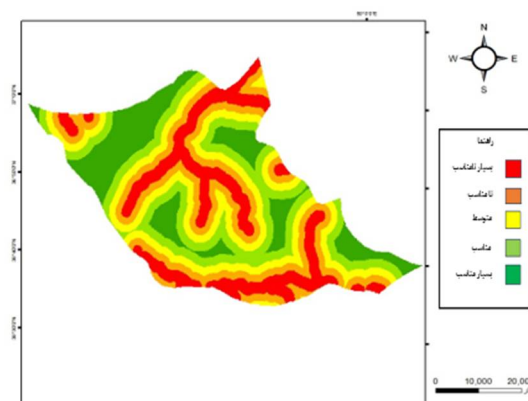
مقدار امتیاز	حد استانه هر طبقه (کیلومتر)	کلاس هر پیکسل
۱	کمتر از ۳	کلاس ۱
۲	۳-۶	کلاس ۲
۳	۶-۹	کلاس ۳
۴	۹-۱۲	کلاس ۴
۵	بیشتر از ۱۲	کلاس ۵

جدول ۷-طبقه‌بندی هر پیکسل داده فاصله از منابع آبی

مقدار امتیاز	حد استانه هر طبقه (کیلومتر)	کلاس هر پیکسل
۱	کمتر از ۳	کلاس ۱
۲	۳-۶	کلاس ۲
۳	۶-۹	کلاس ۳
۴	۹-۱۲	کلاس ۴
۵	بیشتر از ۱۲	کلاس ۵



شکل ۱۰-نقشه معیار فاصله از سکونتگاه‌ها منطقه تولید شده نسبت به ارزش هر پیکسل



شکل ۹-نقشه معیار فاصله از منابع آبی منطقه تولید شده نسبت به ارزش هر پیکسل

۴-۱-۹-فاصله از شبکه برق

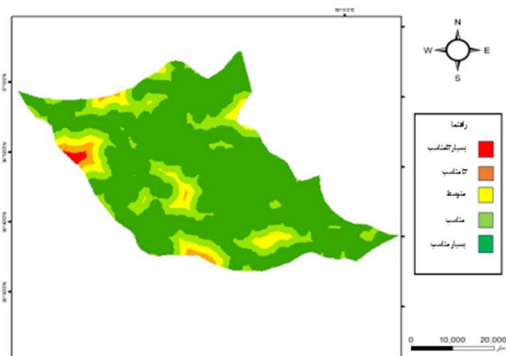
نصب نیروگاه‌های بادی در نزدیکی شبکه برق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا این امر به کاهش هزینه‌های کابل‌کشی و جلوگیری از افت انرژی برق در فواصل بلند کمک می‌کند. در بسیاری از منابع، فاصله بهینه برای خطوط انتقال برق از نیروگاه‌های بادی حدود ۱۲ کیلومتر در نظر گرفته می‌شود [۱۵].

۴-۱-۸-فاصله از سکونتگاه‌ها

معیار فاصله از سکونتگاه‌ها به فاصله بین نیروگاه‌های بادی و سازه‌های موجود در منطقه، از جمله شهرها، روستاها و زیرساخت‌های مرتبط مانند ساختمان‌ها، پارک‌ها و مناطق تفریحی، اشاره دارد [۱۱]. این معیار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا نصب نیروگاه‌های بادی نزدیک به

جدول ۹- طبقه‌بندی هر پیکسل داده فاصله از شبکه برق

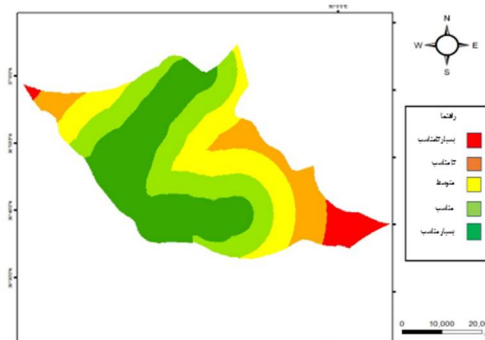
مقدار امتیاز	حد استانه هر طبقه (کیلومتر)	کلاس هر پیکسل
۱	بیشتر از ۱۲	کلاس ۱
۲	۱۲-۹	کلاس ۲
۳	۹-۶	کلاس ۳
۴	۶-۳	کلاس ۴
۵	کمتر از ۳	کلاس ۵



شکل ۱۲- نقشه معیار فاصله از شبکه راه‌ها منطقه تولید شده نسبت به ارزش هر پیکسل

۲-۴- تعیین موقعیت توربین‌ها

برای تعیین موقعیت توربین‌های بادی که در حال حاضر در منطقه مورد مطالعه قرار دارند، موقعیت پایه هر توربین ثبت گردید و اطلاعات مربوط به توربین‌های مستقر در ناحیه رودبار جمع‌آوری شد. این داده‌ها به عنوان متغیر وابسته در تحلیل‌های مدل‌های یادگیری ماشین استفاده شده‌اند.



شکل ۱۱- نقشه معیار فاصله از شبکه برق منطقه تولید شده نسبت به ارزش هر پیکسل

۴-۱-۱۰- فاصله از شبکه راه‌ها

نصب نیروگاه‌های بادی در نزدیکی شبکه راه‌ها اهمیت زیادی دارد. ارزیابی‌های مکان‌یابی نشان داده‌اند که نیروگاه‌های بادی که به جاده‌ها نزدیک‌تر هستند، معمولاً در موقعیت‌های مناسب‌تری قرار دارند. به طور کلی، حداکثر فاصله مجاز برای نیروگاه‌های بادی از شبکه جاده‌ها حدود ۴ کیلومتر در نظر گرفته می‌شود [۱۴، ۱۵].

در منطقه مورد مطالعه که مساحت آن حدود ۲۵۷۴ کیلومتر مربع است، معیار فاصله از جاده‌ها به پنج طبقه تقسیم شد. به فاصله کمتر از ۱۰۰۰ متر امتیاز ۵، به فاصله بین ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر امتیاز ۴، به فاصله بین ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر امتیاز ۳، به فاصله بین ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ متر امتیاز ۲ و به فاصله بیش از ۴۰۰۰ متر امتیاز ۱ اختصاص داده شد.

جدول ۱۰- طبقه‌بندی هر پیکسل داده فاصله از شبکه راه‌ها

مقدار امتیاز	حد استانه هر طبقه (کیلومتر)	کلاس هر پیکسل
۱	بیشتر از ۴	کلاس ۱
۲	۴-۳	کلاس ۲
۳	۳-۲	کلاس ۳
۴	۲-۱	کلاس ۴
۵	کمتر از ۱	کلاس ۵



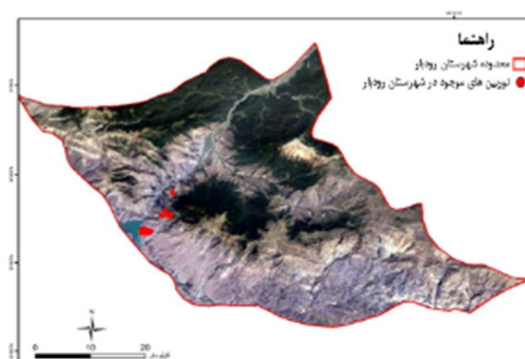
شکل ۱۳- محدوده توربین‌های شهرستان رودبار



شکل ۱۴- توربین‌های شهرستان رودبار

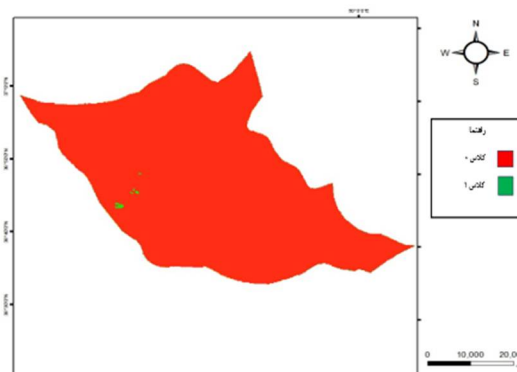
نکته‌ای که در این بخش حائز اهمیت است، این است که برخی از توربین‌های بادی که در نقشه‌های اولیه شناسایی شدند، خارج از محدوده منطقه مورد مطالعه (شهرستان

رودبار) قرار داشتند. بنابراین، تنها از توریسم های بادی واقع در ناحیه مورد نظر به عنوان متغیر وابسته استفاده شد. در مجموع، ۸۲ توریسم فعال در این ناحیه شناسایی شد.



شکل ۱۵- نقاط توریسم های منطقه مورد مطالعه

در مرحله بعد، موقعیت این توریسم ها به داده های رستری تبدیل شد. به این ترتیب، پیکسل هایی که توریسم های بادی در آن ها واقع شده بودند، ارزش ۱ دریافت کردند و پیکسل های بدون توریسم ارزش ۰ و پیکسل های با مقادیر نامشخص^۱، ارزش ۳ را به خود اختصاص دادند. این کار به منظور شناسایی و حذف مقادیر نامشخص در مرحله پیش پردازش انجام شد [۱۶].



شکل ۱۶- متغیر وابسته نهایی

برای اطمینان از کارایی نیروگاه های بادی موجود و استفاده از داده های آن ها در فرآیند یادگیری ماشین، داده های مربوط به عملکرد این نیروگاه ها از منابع معتبر و به روز استخراج شده است. این داده ها شامل اطلاعاتی درباره تولید انرژی بادی واقعی، بهره وری توریسم ها، و سازگاری با شرایط محیطی منطقه هستند. در این تحقیق، تنها داده های مربوط به نیروگاه هایی استفاده شده است که

عملکرد آن ها با معیارهای استاندارد صنعت انرژی بادی مطابقت داشته و از بازدهی قابل قبولی برخوردار بوده اند. به این ترتیب، مدل های یادگیری ماشین بر اساس داده های قابل اعتماد آموزش دیده اند و نتایج آن ها برای مکان یابی توریسم های جدید در مناطقی با شرایط مشابه اعتبار بیشتری خواهند داشت.

علاوه بر این، داده های مربوط به عوامل محیطی از جمله سرعت و جهت باد، شیب زمین، و ارتفاع به عنوان معیارهای کلیدی در انتخاب مکان های مناسب استفاده شده اند. این داده ها در چندین دوره زمانی جمع آوری و تحلیل شده اند تا اطمینان حاصل شود که معیارهای مورد استفاده در آموزش مدل ها از صحت و کارایی لازم برخوردار هستند.

۴-۳- مدل های یادگیری ماشین

در این مطالعه، سه مدل یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی، افزایش گرادیان بی نهایت و ماشین یادگیری گرادیان برای ارزیابی عملکرد پیش بینی و انتخاب خودکار مکان های مناسب برای نیروگاه های بادی به کار گرفته شدند. برای تقسیم داده ها به مجموعه های آموزش و آزمایش، از روش تقسیم دوطرفه استفاده شد. در این فرآیند، ۷۰ درصد از داده ها به صورت تصادفی برای آموزش مدل ها و ۳۰ درصد باقی مانده برای اعتبارسنجی نتایج تخصیص یافت. پیش از آموزش مدل ها، پارامترهای هر مدل تنظیم شدند. پس از این مرحله، بهترین ترکیب های پارامترها برای هر مدل انتخاب و به کار گرفته شدند تا به تولید یک طبقه بند نهایی منجر شوند.

زیربخش های زیر، اصول عملکرد هر یک از این طبقه بند های یادگیری ماشین را که در مطالعه به کار رفته اند، توضیح می دهند.

۴-۳-۱- جنگل تصادفی

جنگل تصادفی یک الگوریتم یادگیری مجموعه ای قدرتمند است که به ترکیب تعداد زیادی درخت تصمیم برای پیش بینی های خود می پردازد. این روش قادر است مشکل بیش برآزش^۲ که معمولاً در درخت های تصمیم فردی مشاهده می شود را کاهش دهد. جنگل تصادفی به دلیل

۲ Overfitting

۱ Null

توانایی‌اش در مقاومت در برابر بیش‌برازش و نویز، همچنین دقت بالای پیش‌بینی و قابلیت بررسی داده‌های گم‌شده بدون نیاز به پر کردن آنها، به طور گسترده در مسائل مکانیابی بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در الگوریتم جنگل تصادفی، داده‌ها به صورت تصادفی با جایگزینی نمونه‌برداری می‌شوند تا زیرمجموعه‌های مختلفی برای هر درخت تصمیم ایجاد شود. علاوه بر این، برای هر تقسیم در فرآیند ساخت درخت، یک زیرمجموعه تصادفی از ویژگی‌ها انتخاب می‌شود. در مرحله پیش‌بینی، داده‌های جدید از طریق تمام درخت‌های تصمیم اجرا می‌شوند و پیش‌بینی‌های فردی از طریق فرآیند رأی‌گیری اکثریت ترکیب می‌شوند. برچسب کلاسی که بیشترین تعداد آرا را دریافت می‌کند به عنوان پیش‌بینی نهایی انتخاب می‌شود.

استفاده از مدل جنگل تصادفی در مکان‌یابی بهینه توربین‌های بادی می‌تواند به شناسایی مکان‌های مناسب با حداکثر بهره‌وری و کمترین تأثیرات محیطی کمک کرده و در نتیجه به توسعه پایدار و بهره‌برداری بهینه از منابع باد منجر شود [۱۷].

۴-۳-۲- افزایش گرادیان بی‌نهایت

افزایش گرادیان بی‌نهایت یک الگوریتم یادگیری ماشین مبتنی بر بوستینگ است که به دلیل توانایی‌های فوق‌العاده خود در بهبود دقت پیش‌بینی، به شدت محبوب شده است. این الگوریتم برای وظایف مختلفی از جمله طبقه‌بندی، رگرسیون، و رتبه‌بندی قابل استفاده است و بر پایه تقویت گرادیان^۱ بنا شده است.

افزایش گرادیان بی‌نهایت به طور متوالی یک دنباله از یادگیرنده‌های ضعیف را آموزش می‌دهد، به طوری که هر یادگیرنده جدید بر اشتباهات یادگیرنده قبلی تمرکز می‌کند. یکی از مزایای کلیدی افزایش گرادیان بی‌نهایت نسبت به الگوریتم‌های تقویت گرادیان دیگر، نرمال‌سازی تابع خطا است که از تقریب دوم مشتق تابع خطا استفاده می‌کند. این ویژگی می‌تواند دقت کلی مدل را بهبود بخشد و سرعت همگرایی مدل به بهترین راه‌حل را افزایش دهد. افزون بر این، افزایش گرادیان بی‌نهایت به پردازش موازی و محاسبات توزیع‌شده نیز مجهز است که باعث افزایش سرعت و مقیاس‌پذیری مدل می‌شود [۱۸].

^۱ Gradient boosting

استفاده از افزایش گرادیان بی‌نهایت برای مکان‌یابی بهینه توربین‌های بادی می‌تواند بهبود دقت و کارایی تصمیم‌گیری‌ها در این زمینه را به همراه داشته باشد. با بهره‌گیری از توانایی‌های برجسته افزایش گرادیان بی‌نهایت در پردازش حجم بالای داده‌ها و پیچیدگی‌های مختلف، می‌توان مکان‌هایی با بیشترین پتانسیل برای نصب توربین‌های بادی را شناسایی کرد [۱۹].

۴-۳-۳- ماشین یادگیری گرادیان

ماشین یادگیری گرادیان یک الگوریتم یادگیری ماشین مبتنی بر بوستینگ است که از تقویت گرادیان نشأت می‌گیرد و به دلیل عملکرد و کارایی برجسته‌اش در پردازش مجموعه‌های داده بزرگ و با بعد بالا، توجه بسیاری را جلب کرده است. این الگوریتم به طور ویژه برای وظایف مختلفی از جمله طبقه‌بندی، رگرسیون، و رتبه‌بندی قابل استفاده است و مزایای خاصی را نسبت به دیگر الگوریتم‌های مشابه، مانند افزایش گرادیان بی‌نهایت، ارائه می‌دهد.

یکی از تفاوت‌های اصلی ماشین یادگیری گرادیان با افزایش گرادیان بی‌نهایت در استفاده از تکنیک‌های خاص برای بهینه‌سازی عملکرد آن است. ماشین یادگیری گرادیان از تکنیک مبتنی بر هیستوگرام برای یافتن تقسیم‌های بهینه استفاده می‌کند، که به کاهش زمان محاسبات و بهبود کارایی مدل کمک می‌کند. علاوه بر این، این الگوریتم ویژگی‌های انحصاری را بسته‌بندی می‌کند تا تعداد ویژگی‌های مورد نیاز برای آموزش کاهش یابد.

تفاوت دیگر ماشین یادگیری گرادیان در استفاده از نمونه‌برداری یک‌سویه مبتنی بر گرادیان است. به جای نمونه‌برداری تصادفی از داده‌ها، ماشین یادگیری گرادیان بر روی نمونه‌هایی با گرادیان‌های بزرگ‌تر تمرکز می‌کند و به طور تصادفی نمونه‌هایی با گرادیان‌های کوچک‌تر را نمونه‌برداری می‌کند. این رویکرد به بهبود دقت مدل و کاهش زمان آموزش کمک می‌کند [۲۰].

این الگوریتم به دلیل توانایی‌هایش در پردازش داده‌های با حجم بالا و پیچیدگی‌های مختلف، می‌تواند به شناسایی مکان‌های بهینه برای نصب توربین‌های بادی با دقت بیشتری منجر شود.

۴-۴- SHAP

در این تحقیق، از روش SHAP برای تحلیل و تفسیر خروجی‌های مدل‌های یادگیری ماشین استفاده شد. SHAP (مقادیر افزایشی Shapley) یکی از ابزارهای توضیح‌پذیری مدل‌های یادگیری ماشین است که با ارائه سهم هر ویژگی در پیش‌بینی‌ها، به تحلیل دقیق و شفاف نتایج کمک می‌کند. این روش به ما این امکان را می‌دهد که میزان تأثیر هر ویژگی را بر نتایج پیش‌بینی مدل مشخص کنیم و بفهمیم که کدام معیارها بیشترین تأثیر را بر مکان‌یابی بهینه توربین‌های بادی دارند.

با این حال، تحلیل SHAP به تنهایی برای ارزیابی جامع فرایند بهینه‌سازی کافی نیست، زیرا این تحلیل فقط تأثیر نسبی و سهم معیارها را در مدل‌های یادگیری ماشین تفسیر می‌کند. به همین دلیل، در این تحقیق از SHAP به عنوان ابزاری برای تفسیر مدل‌ها و ارزیابی وزن ویژگی‌ها استفاده شده است و نه به عنوان معیاری برای تعیین بهینه بودن نهایی. این تحلیل به درک اهمیت و وزن هر ویژگی در مدل‌های مختلف و بررسی تأثیر معیارهای مختلف بر خروجی مدل‌ها کمک می‌کند.

به طور کلی، در این مطالعه تحلیل SHAP به عنوان مکملی در کنار سایر شاخص‌های عملکرد مدل‌ها مانند دقت کلی و نرخ حساسیت مورد استفاده قرار گرفته است. ترکیب این روش‌ها به ما این امکان را می‌دهد که هم به درک دقیق‌تری از نقش معیارها در مدل‌ها برسیم و هم ارزیابی بهینه بودن فرایند مکان‌یابی را به صورت جامع‌تری انجام دهیم [۲۱].

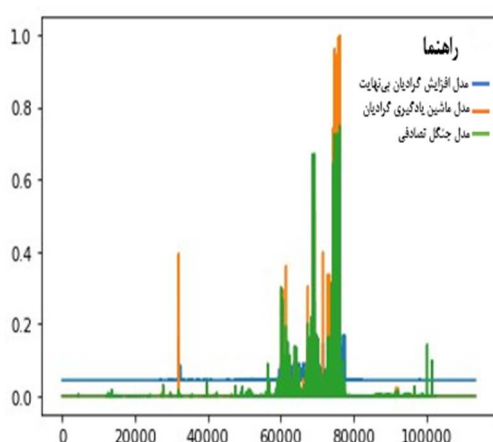
۵- نتایج

با استفاده از ۱۰ معیار مستقل و ۱ معیار وابسته، عملکرد هر سه مدل یادگیری ماشین در منطقه مورد مطالعه، یعنی شهرستان رودبار در استان گیلان، مورد ارزیابی قرار گرفت.

ابتدا، داده‌های تولید شده از مدل‌ها به مقیاس بین ۰ تا ۱ تبدیل شدند. نمودار شکل ۱۹، مقایسه‌ای از پیش‌بینی‌های هر سه مدل را نشان می‌دهد، که نتایج آن‌ها به صورت مقادیر بین ۰ تا ۱ برای هر پیکسل ارائه شده است. این مقادیر نشان‌دهنده پتانسیل هر پیکسل برای نصب توربین جدید است. داده‌های به دست آمده می‌توانند

برای تحلیل و ارزیابی عملکرد مدل‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

بطور کلی، نمودار حاکی از آن است که مدل‌های مختلف نتایج متفاوتی را ارائه داده‌اند. مدل افزایش گرادیان بی‌نهایت که نتایج بیشتری در محدوده بالا (نزدیک به ۱) تولید کرده است، در حالی که مدل ماشین یادگیری گرادیان نتایج بیشتری در محدوده پایین (نزدیک به ۰) ارائه داده است. مدل جنگل تصادفی نیز نتایجی در میانه این دو مدل تولید کرده است. این تفاوت‌ها ممکن است ناشی از اختلاف در روش‌های مدل‌سازی، پارامترهای آموزش و داده‌های آموزشی هر مدل باشد.



شکل ۱۹- مقایسه بین سه مدل پیش‌بینی نرمال شده

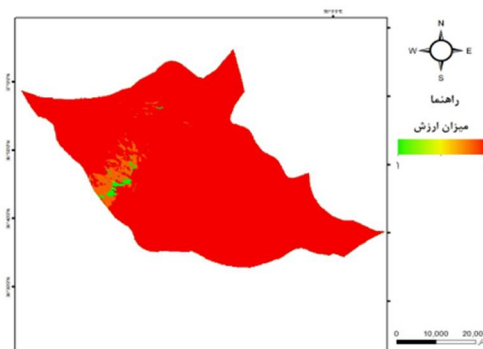
تصاویر ارائه‌شده نمایانگر نتایج مدل‌ها پس از نرمال‌سازی مقادیر به بازه ۰ تا ۱ هستند. در این تصاویر، هرچه مقدار یک پیکسل به صفر نزدیک‌تر باشد، بیانگر نامناسب بودن آن ناحیه از نظر معیارهای مستقل برای نصب توربین‌های بادی جدید است. برعکس، مقادیر نزدیک به ۱ نشان‌دهنده پتانسیل بالای آن نقطه برای نصب توربین بادی هستند. به طور کلی، نتایج هر سه مدل نشان می‌دهد که توربین‌های بادی موجود در موقعیت‌های بهینه‌ای قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، نواحی با مقادیر نزدیک به ۱ به عنوان مکان‌های مستعد برای نصب توربین‌های بادی جدید شناسایی شده و می‌توانند به افزایش بازدهی انرژی بادی در این مناطق و مناطق مشابه منجر شوند.

برای ارزیابی دقیق عملکرد مدل‌ها و بهینه بودن نتایج، از شاخص‌های دقت کلی و نرخ حساسیت استفاده شده است. دقت کلی بیانگر میزان صحت پیش‌بینی‌های مدل‌ها در مجموعه کل داده‌ها است و امکان ارزیابی جامع عملکرد

مدل‌ها را فراهم می‌کند. نرخ حساسیت نیز به عنوان شاخصی برای سنجش توانایی مدل در شناسایی مکان‌های مناسب و نمونه‌های مثبت (پیکسل‌های مناسب برای نصب توربین) به کار گرفته شده است. ترکیب این شاخص‌ها دیدگاه جامعی از عملکرد مدل‌ها ارائه می‌دهد و میزان موفقیت آن‌ها در فرایند بهینه‌سازی را به دقت بیشتری منعکس می‌کند.

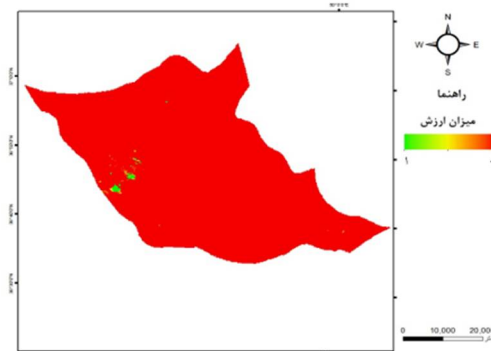
نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که هر سه مدل از دقت کلی بالایی برخوردار بوده و توانسته‌اند عملکرد مناسبی در شناسایی مکان‌های مستعد برای نصب توربین‌های بادی داشته باشند. مدل ماشین یادگیری گرادیان بهترین نتایج را از نظر نرخ حساسیت ارائه کرده و توانایی بالاتری در شناسایی نمونه‌های مثبت از خود نشان داده است. مدل جنگل تصادفی نیز عملکرد میان‌های در دقت و حساسیت داشته، در حالی که مدل افزایش گرادیان بی‌نهایت در تولید نتایجی با مقادیر بالاتر نزدیک به ۱ موفق‌تر عمل کرده است.

همچنین، برای تفسیر نتایج مدل‌ها و بررسی تأثیر هر معیار بر تصمیم‌گیری‌ها از تحلیل SHAP استفاده شد. این تحلیل نشان داد که معیارهایی نظیر سرعت باد و ارتفاع بیشترین تأثیر را بر پیش‌بینی‌های مدل‌ها داشته‌اند، در حالی که معیارهایی مانند فاصله از شبکه برق و فاصله از منابع آبی تأثیر کمتری داشتند. تحلیل SHAP نقش بسزایی در درک عمیق‌تر تأثیر هر ویژگی و تعیین اهمیت آن‌ها در فرایند مکان‌یابی ایفا کرده است.

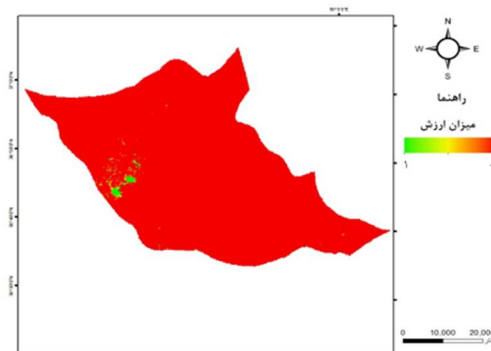


شکل ۱۸- نتیجه مدل افزایش گرادیان بی‌نهایت

ترکیب شاخص‌های دقت کلی و نرخ حساسیت همراه با تحلیل SHAP، امکان ارزیابی جامعی از بهینه بودن مدل‌ها و نتایج را فراهم نموده و نشان می‌دهد که مدل‌های مورد استفاده با دقت و اعتمادپذیری بالا قادر به شناسایی مکان‌های مناسب برای نصب توربین‌های بادی هستند.



شکل ۱۹- نتیجه مدل یادگیری گرادیان



شکل ۲۰- نتیجه مدل جنگل تصادفی

۵-۱- تحلیل نتایج مدل‌ها

به طور کلی، هر سه مدل مورد بررسی دارای دقت کلی بالایی هستند (بیش از ۹۰ درصد). با این حال، این دقت بالا عمدتاً به دلیل تعداد بسیار زیاد نمونه‌های کلاس ۰ است. مدل‌های افزایش گرادیان بی‌نهایت و جنگل تصادفی در شناسایی نمونه‌های کلاس ۱ نسبت به مدل ماشین یادگیری گرادیان عملکرد کمتری داشته‌اند. به‌طور خاص، مدل ماشین یادگیری گرادیان توانسته است تمام نمونه‌های مثبت (کلاس ۱) را شناسایی کند.

برای ارزیابی برتری مدل‌ها، باید به دقت^۱ و نرخ حساسیت^۲ توجه کرد. از نظر دقت کلی، هر سه مدل عملکرد مشابهی دارند و تفاوت آن‌ها ناچیز است. با این حال، در شناسایی نمونه‌های کلاس ۱، مدل افزایش گرادیان بی‌نهایت، دقت کمتری داشت. مدل ماشین یادگیری گرادیان بهترین عملکرد را در شناسایی نمونه‌های کلاس ۱ ارائه داده است، با دقت ۱ و نرخ حساسیت ۰/۵. مدل جنگل تصادفی نیز عملکرد نسبتاً خوبی دارد، اما به اندازه ماشین

۱ Accuracy

۲ Recall

یادگیری گرادین موفقی نبوده و دقت آن $0/83$ و نرخ حساسیت آن $0/42$ است.

بنابراین، با توجه به معیارهای ارزیابی برای شناسایی نمونه‌های کلاس ۱، مدل ماشین یادگیری گرادین بهترین عملکرد را نشان می‌دهد. این مدل علاوه بر داشتن دقت بالا، توانسته است درصد قابل توجهی از نمونه‌های کلاس ۱ را به درستی شناسایی کند.

جدول ۱۱- ارزیابی هر ۳ مدل

مدل	دقت کلی
افزایش گرادین بی‌نهایت	$0/95$
ماشین یادگیری گرادین	$0/97$
جنگل تصادفی	$0/96$

۵-۲- نتیجه SHAP

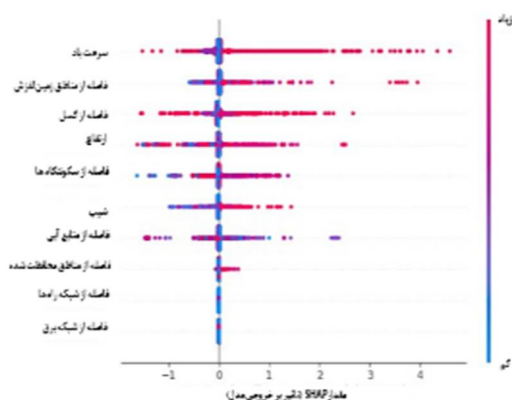
تحلیل‌های SHAP برای هر سه مدل، بینشی را درباره تأثیر ویژگی‌های مختلف بر پیش‌بینی‌های مدل فراهم می‌آورد. این تحلیل‌ها به وضوح نشان می‌دهند که ویژگی‌های مرتبط با محیط طبیعی مانند سرعت باد، ارتفاع، فاصله از گسل‌ها و زمین‌لغزش‌ها در تمامی مدل‌ها تأثیر قابل توجهی دارند. این ویژگی‌ها به دلیل ارتباط مستقیم‌شان با پارامترهای کلیدی توربین‌های بادی مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند.

از سوی دیگر، ویژگی‌هایی مانند فاصله از شبکه راه‌ها و فاصله از شبکه برق تأثیر نسبتاً کمتری در مدل‌ها دارند و این ویژگی‌ها در مقایسه با عوامل دیگر، کمتر بر پیش‌بینی‌های مربوط به نصب توربین‌های بادی تأثیرگذارند. با این حال، نباید به طور کامل از این ویژگی‌ها غفلت کرد، زیرا در شرایط خاص یا در ترکیب با سایر ویژگی‌ها، ممکن است تأثیرات قابل توجهی داشته باشند.

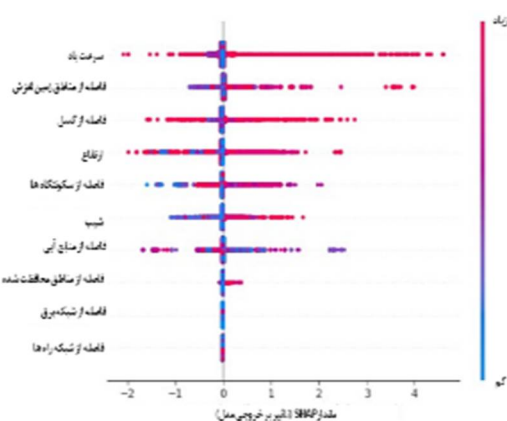
تحلیل SHAP همچنین نشان می‌دهد که ویژگی‌هایی مانند فاصله از گسل در مدل‌های مختلف به طور متفاوتی تأثیر می‌گذارند. این امر می‌تواند به تفاوت‌های موجود در معماری و رویکرد یادگیری هر یک از مدل‌ها اشاره داشته باشد.

در نهایت، برای بهبود کارایی مدل‌ها و افزایش دقت پیش‌بینی‌ها، مهم است که تحلیل‌های دقیق‌تری بر روی ویژگی‌های کم‌تأثیر انجام شود. کاهش یا حذف این

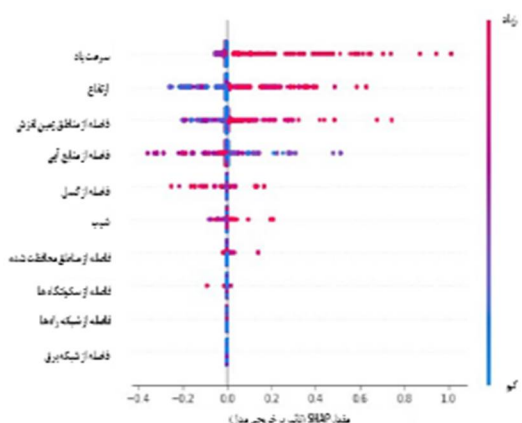
ویژگی‌ها می‌تواند به مدل‌سازی مؤثرتر و ساختار یافته‌تری منجر شود، در حالی که منابع محاسباتی کمتری مصرف کرده و مدل را ساده‌تر می‌کند.



شکل ۲۱- نتیجه SHAP مدل افزایش گرادین بی‌نهایت



شکل ۲۲- نتیجه SHAP مدل یادگیری گرادین



شکل ۲۳- نتیجه SHAP مدل جنگل تصادفی

۵-۳- تحلیل حساسیت

به منظور ارزیابی دقت و پایداری مدل‌های یادگیری ماشین در شناسایی مکان‌های بهینه، تحلیل حساسیت برای بررسی تأثیر معیارهای مختلف بر خروجی مدل‌ها انجام شد.

در این تحلیل، معیارهایی همچون سرعت باد، ارتفاع، شیب زمین، و فاصله از مناطق حساس به عنوان ورودی‌ها مورد بررسی قرار گرفتند تا مشخص شود که مدل‌ها به تغییرات هر یک از این معیارها چگونه واکنش نشان می‌دهند.

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که معیار سرعت باد بیشترین تاثیر را بر خروجی مدل‌ها داشته و تغییرات در این معیار به صورت مستقیم بر میزان مطلوبیت مکان‌ها برای نصب توربین‌های بادی اثرگذار است. معیارهای ارتفاع و فاصله از سکونتگاه‌ها نیز به عنوان معیارهای مهم دیگر شناسایی شدند که مدل‌ها به تغییرات آن‌ها حساسیت بالایی نشان دادند. در مقابل، معیارهایی نظیر فاصله از شبکه برق و فاصله از منابع آبی تاثیر کمتری بر خروجی مدل‌ها داشتند.

این تحلیل حساسیت بیانگر آن است که مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق می‌توانند به دقت بر اساس معیارهای کلیدی عملکرد نشان دهند و تغییرات مهم را در نتایج منعکس کنند. همچنین، این یافته‌ها نشان می‌دهند که برای افزایش دقت مدل‌ها و دستیابی به نتایج پایدارتر، توجه ویژه به معیارهایی با تاثیر بالا در فرآیند مکان‌یابی ضروری است.

۵-۴- مقایسه با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

در این تحقیق، نتایج مدل‌های یادگیری ماشین با نتایج به‌دست‌آمده از برخی روش‌های سنتی تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و فرآیند تحلیل شبکه‌ای مقایسه شدند. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به دلیل نیاز به وزن‌دهی دستی و وابستگی به قضاوت‌های کارشناسی، محدودیت‌هایی دارند که می‌تواند به نتایج ناپایدار و کمتر قابل اعتماد منجر شود.

نتایج نشان دادند که مدل‌های یادگیری ماشین، از جمله جنگل تصادفی و افزایش گرادیان بی‌نهایت، عملکرد بهتری در شبیه‌سازی روابط پیچیده میان معیارهای مکانی دارند و قادرند با دقت بیشتری مکان‌های مناسب را شناسایی کنند. در مقابل، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در تحلیل حجم بالای داده‌ها و شناسایی الگوهای غیرخطی دچار چالش‌هایی هستند و دقت پایین‌تری در مقایسه با مدل‌های یادگیری ماشین نشان دادند.

علاوه بر این، استفاده از ابزارهایی مانند تحلیل SHAP در مدل‌های یادگیری ماشین، امکان درک عمیق‌تری از تاثیر معیارهای مختلف را فراهم کرده است. این قابلیت تفسیرپذیری به تصمیم‌گیری دقیق‌تر کمک می‌کند، در حالی که روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره ممکن است در این زمینه با محدودیت‌هایی روبرو باشند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که یادگیری ماشین به دلیل انعطاف‌پذیری و دقت بالای خود، نه تنها می‌تواند مکان‌یابی توربین‌های بادی را بهبود بخشد، بلکه با ارائه نتایج تفسیرپذیرتر، در تصمیم‌گیری‌های بهینه‌تر نقش مؤثری ایفا کند.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مکان‌یابی بهینه توربین‌های بادی در شهرستان رودبار با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین انجام شد. نتایج نشان داد که مدل‌های مورد استفاده توانایی مناسبی در شناسایی مناطق مستعد نصب توربین‌های بادی دارند و می‌توانند تصمیم‌گیری‌های بهینه و تفسیرپذیری بالایی ارائه دهند. از جمله یافته‌های کلیدی این پژوهش، اهمیت بالای معیارهایی نظیر سرعت باد، ارتفاع، فاصله از گسل‌ها و زمین‌لغزش‌ها بود که به‌عنوان عوامل کلیدی در فرآیند تصمیم‌گیری مشخص شدند. معیارهای دیگری نظیر فاصله از شبکه برق و منابع آبی نیز، هرچند تاثیر کمتری داشتند، اما همچنان در تحلیل‌های مکمل نقش داشتند.

یکی از چالش‌های این تحقیق، عدم توازن در داده‌ها بین مناطق مستعد و غیرمستعد بود که بر عملکرد مدل‌ها تاثیر گذاشت. این مسئله نشان می‌دهد که برای دستیابی به دقت و پایداری بالاتر، استفاده از داده‌های بیشتر و متنوع‌تر ضروری است. علاوه بر این، تحلیل نتایج با روش SHAP بینش مناسبی درباره اهمیت نسبی معیارها فراهم کرد و امکان بهینه‌سازی تصمیم‌گیری در مکان‌یابی توربین‌ها را تسهیل نمود.

این پژوهش چشم‌اندازهایی را برای آینده ارائه می‌دهد. استفاده از روش‌های پیشرفته‌تر یادگیری ماشین، نظیر یادگیری عمیق، می‌تواند به تحلیل داده‌های پیچیده‌تر و بهبود دقت پیش‌بینی‌ها منجر شود. همچنین، ترکیب تحلیل‌های زیست‌محیطی و اقتصادی-اجتماعی در کنار داده‌های مکانی می‌تواند دیدگاه جامعی برای توسعه پایدار مزارع بادی فراهم کند.

- [۱] Taweekun, J. , Techato, K. , Waewsak, J. , Gyawali, S. , and Ali, S. (2023). "GIS based site suitability assessment for wind and solar farms in Songkhla, Thailand. " *Renewable Energy*. Vol. 43, No. 3, PP. 1112-1122
- [۲] Shafiee, M. (2022). "Wind Energy Development Site Selection Using an Integrated Fuzzy ANP-TOPSIS Decision Model. " *Energies*. Vol. 15, No. 4289.
- [۳] Eroğlu, H. (2021). "Multi-criteria decision analysis for wind power plant location selection based on fuzzy AHP and geographic information systems. " *Environmental Development and Sustainability*.
- [۴] Moradi, S. , Yousefi, H. , Noorollahi, Y. , and Rosso, D. (2020). "Multi-criteria decision support system for wind farm site selection and sensitivity analysis: Case study of Alborz Province, Iran. " *Energy Strategy Review*. Vol. 29, PP. 100478.
- [۵] Tercan, E. (2021). "Land suitability assessment for wind farms through best- worst method and GIS in Balıkesir province of Turkey. " *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. Vol. 47, PP. 101491
- [۶] Zalhaf, A. S. , Elboshy, B. , Kotb, K. M. , Han, Y. , Almaliki, A. H. , Aly, R. M. , et al. (2021). "A high-resolution wind farms suitability mapping using GIS and fuzzy AHP approach: A national-level case study in Sudan. " *Sustainability*. Vol. 14, No. 1, PP. 358
- [۷] Hoang, T. N. , Ly, T. T. B. , Do, H. T. T. (2022). "A hybrid approach of wind farm site selection using Group Best-Worst Method and GIS-Based Fuzzy Logic Relations: A case study in Vietnam. " *Environmental Quality Management*. Vol. 32, No. 2, PP. 251–267
- [۸] Yildiz, S. S. (2024). "Spatial multi-criteria decision making approach for wind farm site selection: A case study in Balıkesir, Turkey. " *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 192, PP. 114158
- [۹] Asadi, M. , and Mohammadi-Ivatloo, B. (2023). "GIS-assisted modeling of wind farm site selection based on support vector regression. " *Journal of Cleaner Production*. Vol. 390, PP. 135993.
- [۱۰] Asadi, M. , Pourhossein, K. , Noorollahi, Y. , Marzband, M. , and Iglesias, G. (2023). "A New Decision Framework for Hybrid Solar and Wind Power Plant Site Selection Using Linear Regression Modeling Based on GIS-AHP. " *Sustainability*. Vol. 15, No. 10359.
- [۱۱] Asadi, M. , Ramezanzade, M. , and Pourhossein, K. (2023). "A global evaluation model applied to wind power plant site selection. " *Applied Energy*. Vol. 336, PP. 120840.
- [۱۲] Baseer, M. A. , Rehman, S. , Meyer, J. P. , and Alam, M. M. (2017). "GIS-based site suitability analysis for wind farm development in Saudi Arabia. " *Energy*, Vol. 141, PP. 1166-1176
- [۱۳] Rekik, S. , and El Alimi, S. (2023). "Optimal wind-solar site selection using a GIS-AHP based approach: A case of Tunisia. " *Energy Conversion and Management: X*. Vol. 18, 100355.
- [۱۴] Xu, Y. , Li, Y. , Zheng, L. , Cui, L. , Li, S. , Li, W. , et al. (2020). "Site selection of wind farms using GIS and multi-criteria decision making method in Wafangdian, China. " *Energy*. Vol. 207, PP. 118222.
- [۱۵] Deveci, M. , Ozcan, E. , John, R. , Pamucar, D. , Karaman, H. (2021). "Offshore wind farm site selection using interval rough numbers based Best-Worst Method and MARCOS. " *Applied Soft Computing*. Vol. 109, PP. 107532.
- [۱۶] Sari, F. , and Yalcin, M. (2024). "Investigation of the importance of criteria in potential wind farm sites via machine learning algorithms. " *Journal of Cleaner Production*. Vol. 435, PP. 140575
- [۱۷] Petrov, A. N. , and Wessling, J. M. (2015). "Utilization of machine-learning algorithms for wind turbine site suitability modeling in Iowa, USA. " *Wind Energy*. Vol. 18, PP. 713–727
- [۱۸] Lai, J-P. , Chang, Y-M. , Chen, C-H. , and Pai, P-F. (2020). "A survey of machine learning models in renewable energy predictions. " *Applied Science*. Vol. 10, No. 17, PP. 5975
- [۱۹] Cerna, P. D. , Evangelista, R. S. , and Castillo, C. M. (2023). "Wind Power Plant Site Selection using Integrated Machine Learning and Multiple-Criteria Decision Making Technique. " *E3S Web of Conferences*. Vol. 405, 02030.
- [۲۰] Demir, A. , Dinçer, A. E. , and Çiftçi, C. (2024). "Wind farm site selection using GIS-based multicriteria analysis with Life cycle assessment integration. " *Earth Science Informatics*. Vol. 17, PP. 1591–1608.
- [۲۱] Bilgili, A. , Arda, T. , and Kilic, B. (2024). "Explainability in wind farm planning: A machine learning framework for automatic site selection of wind farms. " *Energy Conversion and Management*. Vol. 309, PP. 118441.