تاریخ دریافت: ۲۹ اردیبهشت ۱۴۰۰ تاریخ پذیرش: ۲۱ تیر ۱۴۰۱ صفحات ۱ الی ۳۰

مدیریت ریسک چندهدفه برای جایابی بهینه توربین در مزرعه بادی با در نظر گرفتن عدم قطعیت: مطالعه موردی شهرستان خدابنده

محمد صیادی*

استادیار و عضو هیئت علمی دانشکده اقتصاد دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

m.sayadi@khu.ac.ir

روح‌اله بیگدلی

کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

ruhollabeygdili۱۳۶۹@yahoo.com

چکیده: هدف اصلی این تحقیق، ارائه سه مدل مدیریت ریسک انرژی مبتنی بر شبیه‌سازی برای جایابی بهینه توربین‌های بادی در شهرستان خدابنده (واقع در جنوب استان زنجان) با در نظر گرفتن اثر وِیک (سایه) و عدم قطعیت در سرعت و جهت باد است. به همین منظور داده‌های سرعت و جهت وزش باد جمع‌آوری و عدم قطعیت سرعت و جهت وزش باد با شبیه‌سازی مونت کارلو مدل‌سازی شده و مدل‌های مدیریت ریسک ارائه شده با الگوریتم‌های PESA-II، NSGA-II و MOPSO بهینه‌سازی شده است. براساس یافته‌های تحقیق در هر سه الگوریتم و جایابی بهینه توربین‌ها، حداکثر توان خروجی مزرعه بادی حدوداً ۸/۵ مگاوات بدست آمده است. همچنین با توجه به معیار ریسک صدک دهم، در ۹۰ درصد مواقع، تولید کمتر از ۱/۸ مگاوات می‌باشد که با توجه به مقدار پایین صدک دهم در هر سه الگوریتم، مشخص شد که احداث مزرعه بادی در منطقه مورد نظر از ریسک بالای تولید برخوردار است. در مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها برای هر سه مدل از نظر نزدیکی راه‌حل‌ها به راه‌حل ایده‌آل، الگوریتم PESA-II و از نظر تنوع و گستردگی راه‌حل‌ها، الگوریتم NSGA-II عملکرد مطلوب‌تری نسبت به سایر الگوریتم‌ها داشته است.

واژگان کلیدی: توربین بادی، مدیریت ریسک، بهینه‌سازی چندهدفه، اثر وِیک (سایه)، عدم قطعیت

* نویسنده مسئول

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

۱- مقدمه

با توجه به ویژگی اتمام‌پذیری منابع انرژی فسیلی و افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی درباره مصرف آن‌ها، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر طی دهه‌های اخیر افزایش چشمگیری یافته است و ضرورت توجه به جنبه‌های مختلف آن از جمله سیاست‌های توسعه سرمایه‌گذاری و مدیریت ریسک پروژه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر اهمیت دوچندانی بین سیاستگذاران انرژی، محققین و پژوهشگران پیدا کرده است. در این بین، انرژی بادی به عنوان یک منبع انرژی پاک و پایدار، توجه زیادی را بین پژوهشگران، تحلیل‌گران و سرمایه‌گذاران به خود جلب کرده است (چن و همکاران[۱]، ۲۰۱۵). بر اساس آمار انجمن جهانی انرژی بادی[۲] (۲۰۲۱)، با افزوده شدن ۹۳ گیگاوات ظرفیت تولید انرژی بادی در سال ۲۰۲۰، ظرفیت نصب شده تجمعی انرژی بادی جهان به رقم بی‌سابقه ۷۴۴ گیگاوات رسیده است. با توجه به اینکه ظرفیت نصب شده بادی جهان در سال ۲۰۱۵، حدود ۴۳۵ گیگاوات بوده است، ظرفیت نصب شده بادی جهان طی ۵ سال اخیر بیش از ۷۰ درصد رشد داشته است. هرچند بیشترین ظرفیت نصب شده بادی جهان به ترتیب به کشورهای چین، آمریکا و روسیه تعلق داشته است، اما مناطق جدید جهان مانند آمریکای لاتین و همچنین آفریقا نقش مهمی در روند آتی این توسعه پویا ایفا می‌کنند.

علاوه بر این، طی سال‌های اخیر، کشورهای دارای منابع فسیلی نیز با درک اهمیت متنوع‌سازی سبد انرژی و آمادگی برای گذار انرژی[۳]، سرمایه‌گذاری‌های گسترده‌ای برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله بادی انجام داده‌اند. همان‌گونه که در نمودار (۱) مشاهده می‌شود، تولید برق از منابع بادی خاورمیانه طی سال‌های اخیر رشد قابل توجهی یافته است و از ۰/۱۸ در سال ۲۰۱۰ به ۲/۹ تراوات ساعت در سال ۲۰۲۱ بالغ شده است. این در حالی است که تولید برق از انرژی بادی در ایران با شیب ملایمی طی سال‌های اخیر افزایش داشته است و از۰/۱۷ تراوات ساعت در سال ۲۰۱۰ به رقم ۱/۱۳ تراوات ساعت در سال ۲۰۲۱ رسیده است. لازم به ذکر

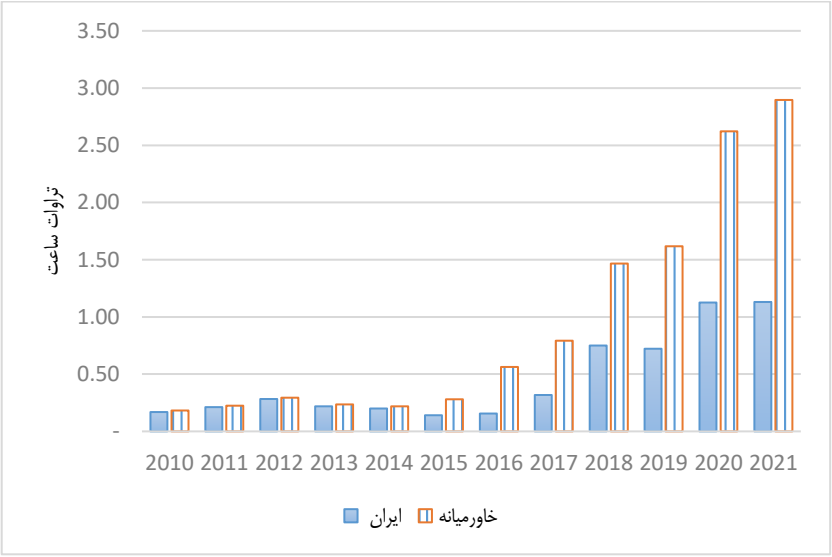
---

۱. Chen, et al.
۲ . World Wind Energy Association (WWEA)
۳ . Readiness to Energy Transition

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

است، بر اساس نظریه اوج تقاضای نفت، اتمام‌پذیری اقتصادی انرژی‌های فسیلی پیش از اتمام‌پذیری فیزیکی آن روی خواهد داد و این مسئله ضرورت توجه به توسعه استفاده از انرژی‌های پایدار را برجسته‌تر می‌کند (دیل و فتوح، ۲۰۱۸).[۱]

هرچند که کشور ایران از نظر منابع انرژی فسیلی غنی است، اما با توجه به اتمام‌پذیری منابع فسیلی و بنابراین برای تضمین انرژی کشور در آینده و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی نیازمند افزایش سرمایه‌گذاری در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر است. انرژی بادی یکی از بزرگترین و قابل دسترس‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد. بهره‌برداری از انرژی بادی مستلزم گسترش مزارع بادی است که این امر باید با بهینه‌سازی طرح‌های مزارع بادی همراه گردد تا کارایی مزارع بادی افزایش و هزینه‌ها کاهش یابد. مزرعه بادی با نصب گروهی از توربین‌های بادی، در یک محدوده بادخیز ساخته می‌شود.



نمودار ۱. تولید برق از انرژی بادی در ایران و خاورمیانه
منبع: BP, ۲۰۲۲

[۱]. Dale and Fattouh

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

پیکره‌بندی مزرعه بادی جنبه‌های اقتصادی مربوط به سرمایه‌گذاری، عملکرد نیروگاه و هزینه‌های تعمیر و نگهداری را تحت تأثیر قرار می‌دهد (اکونومو و همکاران، ۲۰۱۲).[۱] چینش توربین‌ها در مزرعه بادی به علت تأثیرات وِیک با محدودیت روبه‌رو می‌باشد؛ چیدمان موقعیت‌های خاص توربین‌های بادی، نمایانگر بازده کل استخراج انرژی بادی، در مزرعه بادی است. طراحی مزرعه بادی با هدف تولید برق از نظر فنی و وجود عدم قطعیت در بازده سرمایه‌گذاری، کاری بسیار پیچیده و دشوار است. قیمت‌ها و هزینه‌های آینده و باد، از اصلی‌ترین عوامل عدم قطعیت در بازده سرمایه‌گذاری می‌باشند. قیمت انرژی در آینده و هزینه‌های توسعه، ساخت وساز، بهره‌برداری و خسارت‌ها نامشخص هستند که درجه‌ای از عدم قطعیت را ایجاد می‌کنند. فروش برق تولیدی منبع درآمد مزرعه بادی است و به علت طبیعت تصادفی باد، عدم اطمینان در تولید سالانه انرژی رخ می‌دهد. بدین جهت موقعیت مناسب هر توربین در مزرعه بادی از عوامل مهم سودآوری می‌باشد (گونزالز و همکاران[۲]، ۲۰۱۲).

اثر وِیک (اثر سایه) [۳]و عدم قطعیت[۴] باد از جمله عوامل کلیدی هستند که کارایی تولید انرژی باد را تحت تأثیر قرار می‌دهند (ین و همکاران[۵]، ۲۰۱۷). در اغلب پژوهش‌های انجام شده در زمینه بهینه‌سازی مزارع بادی، اثر وِیک (اثر سایه) در نظر گرفته شده است، اما مطالعات اندکی این عامل را همراه با عدم قطعیت مد نظر قرار داده‌اند. ضمن اینکه در این تحقیق از الگوریتم‌های متنوعی برای بهینه‌سازی استفاده شده است. این مطالعه به هر دو عامل "اثر وِیک (اثر سایه) و عدم اطمینان باد" پرداخته و مدلی بهینه از یک مزرعه بادی را برای یک نمونه واقعی در شهرستان خدابنده استان زنجان ارائه می‌دهد. در واقع هدف، آرایشی از توربین‌ها

---

۱ . Ekonomou and at., al, ۲۰۱۲

۲ . Gonz´alez et al

۳. Wake Effect: هوایی که توربین را ترک می‌کند دارای محتوای انرژی کمتری نسبت به جریانی است که به توربین می‌رسد (اصل پایستاری انرژی). به عبارت دیگر توربین خود مانند یک سایبان در مقابل باد عمل می‌کند که دنباله‌ای از باد متلاطم و با سرعت کم در پشت توربین تشکیل می‌دهد.

٤ Uncertainty

٥ Peng-Yeng Yin et al.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

است که اولاً اثر وِیک (اثر سایه) در آن حداقل باشد یعنی توربین‌ها به گونه‌ایی جاگذاری شوند که بر توان تولیدی توربین‌های دیگر کمترین اثر منفی را داشته باشند، ثانیاً عدم اطمینان باد در نظر گرفته شده و آثار مرتبط با آن حداقل باشد، زیرا عدم اطمینان باد باعث می‌شود تولید برق مورد انتظار مزرعه بادی از مقدار تولید واقعی متفاوت باشد. با شبیه‌سازی مونت کارلو عدم اطمینان باد مدل‌سازی شده، سپس سه مدل مدیریت ریسک بکار برده شده و با سه الگوریتم PESA-II [۱]، NSGA-II [۲] و MOPSO [۳] بهینه‌سازی انجام شده و در انتها به مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها پرداخته می‌شود. مدل‌های مدیریت ریسک بکار رفته در پژوهش اطلاعات تفصیلی درباره توان مورد انتظار، هزینه و ریسک را ارائه می‌دهد.

سازمان‌دهی مقاله بدین صورت است که پس از مقدمه، در بخش دوم به بررسی پیشینه تحقیق پرداخته می‌شود. بخش سوم به تبیین روش تحقیق اختصاص دارد. بخش چهارم به تجزیه و تحلیل تجربی می‌پردازد و بخش پنجم به بحث و نتیجه‌گیری از یافته‌های تحقیق اختصاص دارد.

۲- پیشینه تحقیق

پیشینه داخلی و خارجی مطالعات ادبیات موضوعی تحقیق در جدول ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱- پیشینه مطالعات داخلی و خارجی

نویسنده (سال)	هدف تحقیق	خلاصه نتایج
قادری شمیم و حقی‌فام (۱۳۹۰)	روش‌های مدل‌سازی نیروگاه در مطالعات قابلیت اطمینان را بررسی شده و سپس با روش‌های فازی سرعت باد و در نتیجه توان خروجی توربین بادی را به صورت یک فرایند مارکوف مدل سازی شده است.	یافته‌های تحقیق برای مدل‌سازی تولید برق از مزرعه‌های بادی که اطلاعات سرعت باد در آن‌ها در بازه زمانی کوتاه موجود است، پیشنهاد شده است.
صادقی و همکاران (۱۳۹۲)	بررسی عوامل مؤثر بر مکان‌یابی انرژی	در این تحقیق شهرستان سیرجان به عنوان

۱ .Pareto Envelope-based Selection Algorithm (PESA-II)
۲ . Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)
۳ .Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

	خورشیدی و بادی در استان کرمان با استفاده از نرم افزار GIS و تکنیک های تصمیم‌گیری چندمعیاره MADM.	مناسب‌ترین مکان جهت احداث نیروگاه خورشیدی و شهرستان رفسنجان به عنوان مناسب ترین مکان جهت احداث نیروگاه بادی شناسایی شد.
ملکی و سرهنگ زاده (۱۳۹۵)	حداکثرسازی تولید برق سالانه و حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری و با در نظر گرفتن اثر وِیک (اثر سایه) و محدودیت‌های توپولوژیکی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات.	راندمان مزرعه بادی نسبت به روش‌های موجود بهبود یافته است که این افزایش در اثر انتخاب چیدمانی است که باعث کاهش هر چه بیشتر اثر وِیک (اثر سایه) شده است.
محمدزاده و همکاران (۱۳۹۵)	ارزیابی اقتصادی تولید انرژی الکتریسیته از توربین‌های بادی (مطالعه موردی توربین‌های بادی عون ابن علی)	نتایج حاصل از تکنیک‌های ارزیابی اقتصادی طرح‌ها نشان داد که تولید برق از توربین‌های بادی در شهرستان تبریز صرفه اقتصادی دارد.
سایه‌بانی و همکاران (۱۳۹۷)	اولویت‌بندی ریسک‌ها و ارائه مدل مدیریت ریسک در توسعه نیروگاه‌های بادی	براساس نظرات گروهی و روش اولویت ریسک‌های شناسایی شده، برنامه‌های واکنش با پاسخ به ریسکهای بحرانی و مهم و نتایج اقدامات واکنشی و بازنگری در برنامه مدیریت ریسک ارائه شده است.
فرجی‌پور و همکاران (۱۳۹۷)	بهینه‌سازی آرایش بهینه توربین‌های بادی با الگوریتم ژنتیک با استفاده از توربین‌های با قطر روتور[۱] و ارتفاع هاب[۲] متفاوت با دو سناریو از سرعت باد و جهت توزیع آن	استفاده از توربین‌های بادی با ارتفاع هاب توربین و قطر روتور توربین متفاوت در یک مزرعه بادی با کاهش اثر وِیک (اثر سایه) و جذب حداکثر انرژی باد همراه است.
ساکی و پورفر (۱۳۹۸)	بررسی تأثیر سرعت‌های باد ورودی توربین ها بر توان خروجی مؤثر و فضای خوشه‌بندی فازی	نتایج معادل‌سازی بسیار نزدیک به مدل دقیق برای بادها و ژنراتورهای معادل بدست آمده است.

۱. Rotor
۲. Hub

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

موستی و همکارانش[۱] (۱۹۹۴)	حداکثرسازی انرژی تولیدی در مقابل حداقل هزینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک	مزرعه بادی بهینه‌سازی شده از مزرعه بادی با چینش توربین‌های تصادفی کارایی بالاتری دارد.
مارمیدس و همکاران[۲] (۲۰۰۸)	حداکثرسازی میانگین انرژی تولید شده و حداقل‌سازی هزینه نصب توربین‌های بادی بر اساس شبیه‌سازی مونت کارلو[۳] و الگوریتم ژنتیک	شبیه‌سازی مونت کارلو نتایج بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک ارائه می‌دهد، ولی خاطر نشان شده است که بهتر بودن آن می‌تواند به دلیل ضعف توانایی پردازش در کارهای قبلی بوده باشد.
گونزالز و همکاران[۴] (۲۰۱۱)	طراحی بهینه مزارع بادی (انتخاب محل توربین، نوع توربین و ارتفاع محور) را با در نظر گرفتن عدم اطمینان در خصوصیات آماری باد	زمانی که تجزیه و تحلیل ریسک در محاسبات گنجانده شود، فرایند بهینه‌سازی مزارع بادی به سمت راه‌حل‌هایی که به عدم اطمینان نسبت به راه‌حل‌های قطعی، حساسیت کمتری دارند سوق داده می‌شود.
میتال و همکاران[۵] (۲۰۱۶)	بهینه‌سازی تعداد مطلوب و موقعیت توربین‌ها را به منظور تولید حداکثری انرژی سالانه با استفاده از روش هیبریدی، ترکیبی از الگوریتم ژنتیک احتمالی و روش بهینه‌سازی مبتنی بر گرادیان	نتایج حاصله از روش هیبریدی بهتر از دو الگوریتم دیگر بود. همچنین نتیجه پژوهش آن‌ها نشانگر این بود که روش هیبریدی توانایی ارائه راه‌حل بهینه برای مکان توربین‌های بادی و حداکثر تعداد توربین در یک مزرعه بادی را دارد.
بیسواس و همکاران[۶] (۲۰۱۸)	حداکثرسازی برق خروجی و بازده مزرعه بادی رویکردی متفاوت از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه	روشی که در آن انتخاب ارتفاع هاب توربین، نوع توربین و انعطاف‌پذیری برای نصب و تعمیر و نگهداری توربین‌ها در آینده نیز در نظر گرفته می‌شود.

۱. G. Mosetti et al
۲. Marmidis et al
۳. Monte Carlo simulation
٤. Gonz´alez et al.
٥. Mittal et al.
٦. Biswas and et al.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

فاموسو و همکاران (۲۰۲۰)[۱]	برآورد تبدیل انرژی در یک مزرعه بادی ۲۵/۵ مگاواتی واقع در جنوب ایتالیا با لحاظ اثرات سایه‌ای و قابلیت وابستگی تصادفی	نتایج حاصل از مدل منحنی برق، مدل اثر سایه نتایج نشان از دقت بالای مدل ترکیبی در شبیه‌سازی داده‌های واقعی دارد.
یتر و همکاران (۲۰۲۰)[۲]	ارائه یک برنامه‌ریزی مبتنی بر ریسک را در مزارع توربین بادی فراساحلی با روش کرانه دیتولسون[۳]	چارچوب ارائه شده شبکه کاملی را برای ارزیابی ریسک ساختاری و نیز ارزیابی هزینه طول عمر پروژه در مزارع توربین بادی فراهم می‌آورد.
داس ریس (۲۰۲۱)[۴]	تحلیل اقتصادی احداث مزرعه بادی در فراساحل برزیل پرداخته‌اند. با بکارگیری روش هزینه همتراز شده یا LCOE[۵]	مناطق مرجح برای احداث مزرعه بادی از منظر اقتصادی و انرژی از لحاظ حداقل هزینه همتراز شده اولویت‌بندی پیشنهاد شده و تحلیل اقتصادی بر روی آن صورت گرفته است.
راوسون و بریتو (۲۰۲۲)[۶]	تحلیل اعتبار و دقت ارزیابی ریسک مزارع خورشیدی فراساحلی در بریتانیا	محاسبه داده‌های تاریخی و شبیه‌سازی‌های صورت گرفته نشان دهنده برآورد بیش از حد ریسک در فرایندهای ارزیابی ریسک به دلیل محدودیت‌های مترتب بر شبیه‌سازی‌ها است.

با بررسی مطالعات پیشینه تحقیق، تقریباً می‌توان چنین عنوان کرد که رویکرد مدیریت ریسک مبتنی بر شبیه‌سازی در طراحی مزارع بادی با ویژگی‌هایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد، تاکنون در مطالعات داخلی استفاده نشده است. علاوه بر این، در نمونه مطالعات خارجی نیز مطالعه‌ای که دو عامل اثر سایه (ویک) و عدم قطعیت را همزمان وارد مدل نموده

۱. Famoso and et., al
۲. Yeter and at., al
۳. Ditlevsen Bounding Technique
۴. dos Reis and et al
۵. Levelized Cost of Energy
۶. Rawson and Brito

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

باشد و با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو عدم اطمینان باد را مدل‌سازی و با سه الگوریتم PESA-II، NSGA-II و MOPSO اقدام به مکان‌یابی توربین‌های بادی نموده باشد، مطالعه‌ای یافت نشد. در واقع مطالعه ین و همکاران (۲۰۱۷) نزدیک‌ترین مطالعه به تحقیق حاضر است که الگوریتم‌های مورد استفاده در آن تحقیق با الگوریتم‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر کاملاً تفاوت دارد. لذا این مطالعه از جهات فوق دارای نوآوری پژوهشی است. در این مطالعه، علاوه بر دو عامل مقدار تولید و هزینه، ریسک نیز مد نظر قرار گرفته است، که می‌تواند برآورد مناسبی از ریسک تولید، که در تصمیم‌گیری‌های سرمایه‌گذاری پروژه‌های مزرعه بادی مؤثر است، داشته باشد. ارائه همزمان اطلاعات درباره ریسک، هزینه نصب توربین و میزان تولید به سرمایه‌گذار جهت تصمیم‌گیری درباره سرمایه‌گذاری یا عدم سرمایه‌گذاری بسیار سودمند است. در انتها به مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها پرداخته شده است که این نیز می‌تواند به کاربر در انتخاب الگوریتم مناسب (متناسب با معیار مد نظر کاربر اینکه تنوع راه‌حل مورد نظر کاربر است یا نزدیکی به جواب‌های ایده‌آل) یاری رساند.

۳- روش‌شناسی تحقیق

۳-۱. محاسبه سرعت باد در ارتفاع مختلف

بنا بر استانداردهای جهانی ایستگاه‌های هواشناسی سرعت باد را در ارتفاع ۱۰ متر از سطح زمین ثبت می‌کنند و معمولاً توربین‌های بادی در ارتفاع بالاتر بکار گرفته می‌شوند. بنابراین نیاز است تا سرعت باد را در ارتفاعات بالاتر از ۱۰ متر محاسبه کرد. مطابق (جنسن، ۲۰۰۶) برای محاسبه سرعت باد در ارتفاعات بالاتر از رابطه زیر استفاده می‌شود:

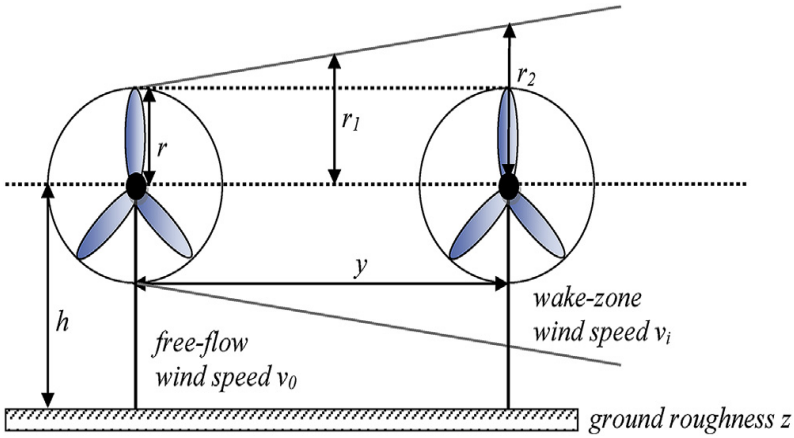
$$\frac{v}{v_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^{\gamma} \quad (۱)$$

در معادله بالا v سرعت در ارتفاع z (ارتفاع مورد نظر) و v_{ref} سرعت در ارتفاع z_{ref} از زمین است و γ تابع زبری یا ناهمواری زمین است و به‌صورت تجربی محاسبه می‌شود.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

۳-۲. مدل وِیک (سایه)[۱]

سرعت باد پس از گذر از توربین‌های بالادست دچار افت می‌شود و عملکرد مزرعه بادی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. برای محاسبه سرعت باد در توربین‌های پایین‌دست می‌توان از مدل وِیک استفاده کرد. در این پژوهش مدل وِیک جنسن (۲۰۰۶) مورد استفاده در پژوهش ین و همکاران (۲۰۱۷)، بکار گرفته شده است (شکل (۱)).



شکل شماره ۱. اثر ویک (سایه)

سرعت باد در توربین i–ام به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\bar{v}_i = v_0 \left(1 - \left(\sum_{j=1}^{n} \left(\frac{2a}{(1+\alpha(y/r_1))^2}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}\right) \qquad (۲)$$

که r شعاع روتور، y فاصله بین توربین بالادست و پایین‌دست، a عامل القایی محوری[۲] و r_1 شعاع وِیک هستند و به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند (ین و همکاران (۲۰۱۷) و سینگ و همکاران، (۲۰۱۶)):

$$a = \frac{1-(1-TC)^{\frac{1}{2}}}{2} \qquad (۳)$$

---

[۱] .Wake Effect
[۲] .Axial Induction Factor

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

$$r_1 = r\left(\frac{1-a}{1-2a}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (۴)$$

$$\alpha = \frac{0.5}{\ln(h/\gamma)} \quad (۵)$$

که در آن α به ارتفاع هاب[1] h و زبری سطح مزرعه γ وابسته و TC[2] ضریب رانش توربین است.

۳-۳. شبیه‌سازی مونت کارلو[3]

برای تجزیه تحلیل داده‌های باد و بدست آوردن نمونه‌های سناریوهای مرتبط با باد به شیوه زیر عمل می‌کنیم:

مرحله ۱: تقسیم سال به فاصله‌های زمانی غیر همپوشانی (ماهانه) π_j ، $j=1, 2, ..., \psi$.

مرحله ۲: برای هر ترکیبی از سرعت S و جهت باد D، در محدوده زمانی π_j با استفاده از داده‌های چند ساله، تابع چگالی احتمال[4] (احتمال وقوع هر ترکیبی از سرعت وجهت) را محاسبه می‌کنیم.

مرحله ۳: با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو و تابع چگالی احتمال محاسبه شده در مرحله قبل، نمونه‌های سناریوی باد $w_k(\pi_j)$ برای $k=1,...,Ns$ در هر فاصله زمانی π_j تولید می‌شود، که هر نمونه شامل ترکیبی از سرعت و جهت باد می‌باشد.

مرحله ۴: برای هر سناریو باد $w_k(\pi_j)$ و راه‌حل X (مزرعه بادی که توربین‌ها در آن با راه‌حل x چیده شده‌اند) برق تولیدی، از توزیع زیر بدست می‌آید:

$$PE(X) = Dist_{w_k(\pi_j)}\left\{\sum_{i=1}^{d\times d}\sum_{j=1}^{\psi}\sum_{T\epsilon\pi_j} x_i k \bar{v}_i^{3}\right\} \quad (۶)$$

مزرعه بادی یک ماتریس دو بعدی $d \times d$ (۱۰×۱۰) در نظر گرفته شده است، X بردار متغیر تصمیم محل قرارگیری توربین می‌باشد و $X=\{x_i\}_{i=1,...,d\times d}$ در جایی که توربین قرار دارد

۱. Hub
۲. Thrust coefficient
۳. Monte Carlo Simulation
۴. Probability Density Function

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

$x_i = ۱$ و قرار ندارد $x_i = ۰$ است، k ضریب بازده تولید، $\bar{v}_i$ سرعت باد در مکان i–ام (سرعت باد برای توربین i–ام با در نظرگیری اثر وِیک می‌باشد) و $Dist$ عملگر ریاضی برای تولید توزیع احتمال با استفاده از نمونه‌های سناریو باد $w_k(\pi_j)$ است (ین و همکاران، ۲۰۱۷).

۳-٤. مدل‌های مدیریت ریسک چندهدفه

در این تحقیق از مدل‌های مدیریت ریسک چندهدفه[۱] (MORM) استفاده می‌شود. در این مدل‌ها از توان (برق)، هزینه و ریسک‌های ناشی از راه‌حل بدست آمده به عنوان متغیرهای هدف استفاده می‌شود. تعریف توان (برق)، هزینه و ریسک به صورت زیر است:

توان: مطابق مطالعه ین و همکاران (۲۰۱۷)، مقدار مورد انتظار تولید برق از راه‌حل X را بصورت رابطه (۷) نشان می‌دهیم.

$$Power = E_{w_k(\pi_j)} \left\{ \sum_{i=۱}^{d\times d} \sum_{j=۱}^{\psi} \sum_{T\epsilon\pi_j} x_i k \bar{v}_i^{۳} \right\} \quad (۷)$$

که E اپراتور ریاضی برای محاسبه مقدار مورد انتظار (امید ریاضی یا میانگین) تولید برق با استفاده از نمونه‌های سناریو باد $w_k(\pi_j)$ است.

هزینه: قیمت نصب توربین را هزینه در نظر می‌گیریم.

$$Cost = NWT\left(\frac{۲}{۳} + \left(\frac{۱}{۳}\right)\left(e^{-۰.۰۰۱۷۴N^{۲}WT}\right)\right) \quad (۸)$$

که پارامترهای تابع هزینه از مطالعات انتظاری و همکاران (۱۳۹۱)، امامی و نقره (۲۰۱۰)[۲]، شکور و همکاران (۲۰۱۶)[۳] و ین و همکاران (۲۰۱۶)[۴] اقتباس شده است. N_{WT} تعداد توربین‌های نصب شده است و به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$NWT = \sum_{i=۱}^{d\times d} x_i \quad (۹)$$

حداکثر کاهش در هزینه برای هر توربین اضافی ۱/۳ توربین اول است.

---

۱. Multi-Objective Risk Management (MORM)
۲. Emami and Noghreh, (۲۰۱۰)
۳. Shakoor and et al (۲۰۱٦)
٤. Yin and et,. Al (۲۰۱٦)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

ریسک: از دو معیار ریسک استفاده می‌کنیم.

۱- انحراف معیار[۱]

$$SD = SD_{w_k(\pi_j)} \left\{ \sum_{i=1}^{d \times d} \sum_{j=1}^{\psi} \sum_{T \epsilon \pi_j} x_i k \bar{v}_i^{\,3} \right\} \qquad (۱۰)$$

SD نشان دهنده اپراتور ریاضی برای محاسبه انحراف معیار توزیع تولید برق با استفاده از نمونه‌های سناریو باد $w_k(\pi_j)$ است.

۲- صدک[۲] ۱۰-ام (صدک دهم)

$$PR10 = PR_{10,\, w_k(\pi_j)} \left\{ \sum_{i=1}^{d \times d} \sum_{j=1}^{\psi} \sum_{T \epsilon \pi_j} x_i k \bar{v}_i^{\,3} \right\} \qquad (۱۱)$$

که PR_{10} عملگر ریاضی محاسبه مقدار صدک ۱۰-ام توزیع تولید برق با استفاده از نمونه‌های سناریو باد $w_k(\pi_j)$ است. حال با توجه سود هزینه و معیارهای ریسک مذکور، از سه مدل حداقل‌سازی مدیریت ریسک چندهدفه زیر استفاده می‌کنیم:

در مدل (۱) هدف حداکثر کردن مقدار متوسط توزیع تولید برق و حداقل کردن هزینه نصب توربین است و معیار ریسک در آن بکار برده نشده است. مدل (۲) همان اهداف مدل (۱) دنبال می‌کند، ولی در آن طراحی مدیریت ریسک نیز انجام گرفته است که در آن به دنبال حداقل‌سازی انحراف معیار یا به عبارتی حداقل‌سازی ریسک هستیم. مدل (۳) نیز همان اهداف مدل (۱) را دنبال می‌کند که به آن هدف حداقل‌سازی معکوس صدک ۱۰-ام تعبیه شده است. راه‌حل بهینه حاصل از مدل (۳) با اطمینان ۹۰ درصد تضمین می‌کند که تولید کمتر از مقدار صدک ۱۰-ام نیست.

۱. Standard Deviation
۲. Percentile

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

جدول شماره ۱. توابع هدف مختلف تحقیق

تابع هدف	مدل
$\text{Minimize Power}^{-1} = \left(E_{w_k(\pi_j)} \left\{\sum_{i=1}^{d\times d}\sum_{j=1}^{\psi}\sum_{T\epsilon\pi_j} x_i k\bar{v}_i^{\,3}\right\}\right)^{-1}$ $\text{Minimize Cost} = NWT\left(\frac{2}{3}+\left(\frac{1}{3}\right)\left(e^{-0.0017\text{۴}N^2 WT}\right)\right)$	مدل (۱)
$\text{Minimize Power}^{-1} = \left(E_{w_k(\pi_j)} \left\{\sum_{i=1}^{d\times d}\sum_{j=1}^{\psi}\sum_{T\epsilon\pi_j} x_i k\bar{v}_i^{\,3}\right\}\right)^{-1}$ $\text{Minimize Cost} = NWT\left(\frac{2}{3}+\left(\frac{1}{3}\right)\left(e^{-0.0017\text{۴}N^2 WT}\right)\right)$ $\text{Minimize SD} = SD_{w_k(\pi_j)}\left\{\sum_{i=1}^{d\times d}\sum_{j=1}^{\psi}\sum_{T\epsilon\pi_j} x_i k\bar{v}_i^{\,3}\right\}$	مدل (۲)
$\text{Minimize Power}^{-1} = \left(E_{w_k(\pi_j)} \left\{\sum_{i=1}^{d\times d}\sum_{j=1}^{\psi}\sum_{T\epsilon\pi_j} x_i k\bar{v}_i^{\,3}\right\}\right)^{-1}$ $\text{Minimize Cost} = NWT\left(\frac{2}{3}+\left(\frac{1}{3}\right)\left(e^{-0.0017\text{۴}N^2 WT}\right)\right)$ $\text{Minimize } PR_{10}^{-1} = PR_{10\cdot w_k(\pi_j)}\left\{\sum_{i=1}^{d\times d}\sum_{j=1}^{\psi}\sum_{T\epsilon\pi_j} x_i k\bar{v}_i^{\,3}\right\}^{-1}$	مدل (۳)

۳-۵. الگوریتم‌های بهینه‌سازی

برای بهینه‌سازی مسئله از سه الگوریتم PESA-II، MOPSO و NSGA-II استفاده می‌کنیم. الگوریتم‌های مذکور با استفاده از راه‌حل اولیه شبیه‌سازی مونت کارلو متناسب با توابع هدف و در محدوده فضای جواب به ارزیابی مسئله می‌پردازند.

- **الگوریتم PESA-II**

الگوریتم PESA-II نسخه دوم PESA است که توسط کورن و همکاران (۲۰۰۱)[1] پیشنهاد شده است. تفاوت بین PESA و PESA-II در این است که در نسخه دوم این الگوریتم، انتخاب اعضا از نوع منطقه‌ای بوده و موضوع انتخاب اعضا انفرادی نیست. شیوه کار به این صورت است که ابتدا چندین جواب را به عنوان راه‌حل اولیه یا جمعیت اولیه در نظر می‌گیرد و آن‌ها را مورد ارزیابی قرار می‌دهد و آن‌هایی را که نامغلوب‌اند (بهتر از بقیه هستند) و نسبت به هم دیگر ارجحیتی ندارند را بایگانی می‌کند، سپس با استفاده از راه‌حل‌های موجود در بایگانی، جواب‌های جدیدی را تولید کرده و با جواب‌های قبلی مورد مقایسه قرار می‌دهد و

۱ . Corne and et., al (۲۰۰۱)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

مجدداً جواب‌های نامغلوب را بایگانی می‌کند. این فرآیند را تا زمانی که به نتیجه مطلوب یا تعداد تکرار مشخص و یا معیارهای توقف مورد نظر کاربر الگوریتم برسد، تکرار می‌کند (کوئلو و همکاران، ۲۰۰۷).[۱]

- **الگوریتم MOPSO**

الگوریتم MOPSO توسط کوئلو و همکاران در سال ۲۰۰۲ مطرح شد. در MOPSO راه‌حل‌های نامغلوب شناسایی و در یک بایگانی[۲] ذخیره می‌شود و فضای جواب به ابرمکعب تقسیم می‌شود و هر ابرمعکب با یک عدد معکوس تعداد ذرات موجود خود علامت‌گذاری می‌شود (احتمال نسبت داده می‌شود) سپس با یک چرخه رولت[۳] از بین ذرات یک پیشرو انتخاب می‌شود. آنگاه با استفاده از بهترین جواب کلی و بهترین خاطره شخصی هر ذره، ذرات بروز می‌شوند و در بایگانی ذخیره می‌شوند. بایگانی دارای ظرفیت محدود است بنابراین ذرات مغلوب از بایگانی حذف می‌شوند (پارسوپولوس و وراهاتیس، ۲۰۰۸).[۴]

- **الگوریتم NSGA-II**

الگوریتم ژنتیک مبتنی بر مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) یک الگوریتم تکاملی چندهدفه و نسخه بهبود یافته NSGA است که توسط دب و همکاران (۲۰۰۲)[۵] معرفی شد. ابتدا جمعیت والد ایجاد می‌شود سپس در هر نسل الگوریتم، با استفاده از جمعیت والد و عملگرهای تقاطع و جهش، جمعیت فرزندان ایجاد می‌شود. مرتب‌سازی جمعیت والدین و فرزندان در الگوریتم NSGA-II با یک استراتژی نخبه گرایانه صورت می‌گیرد و تنوع راه‌حل‌ها را با مکانیسم مبتنی بر بهره‌برداری از فاصله ازدحامی بهبود می‌بخشد. NSGA-II به عنوان یک الگوریتم ژنتیکی قابل اطمینان و چند منظوره مناسب شناخته شده است و کاربردهای گسترده‌ای در بسیاری از زمینه‌ها پیدا کرده است (دب و همکاران، ۲۰۰۲).

---

۱ . Coello and et.,al (۲۰۰۷)
۲ . repository
۳ . roulette wheel
۴ . Parsopoulos and Vrahatis, (۲۰۰۸)
۵ . Deb and et., al (2002)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

۳-۶. معیارهای مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها

برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها از سه معیار زیر استفاده می‌کنیم:

- **فاصله از نقطه ایده‌آل MID[۱]**

هر چه الگوریتم دارای مقدار MID کمتر باشد، الگوریتم عملکرد بهتری دارد (چون به جواب بهینه پارتو نزدیک‌تر است). MID را با فرمول زیر بدست می‌آورند.

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^{n} c_i}{n} \qquad (۱۲)$$

که n تعداد جواب‌های موجود در جبهه پارتو است و c_i فاصله اقلیدسی هر عضو از مجموعهٔ پارتو از نقطهٔ ایده‌آل است که از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$c_i = \sqrt{(f_{1i} + {f_1}^*)^2 + (f_{2i} + {f_2}^*)^2 + \cdots + (f_{mi} + {f_m}^*)^2} \qquad (۱۳)$$

و m تعداد توابع هدف است. ${f_j}^*$ - ها نقطه ایده‌آل برای هریک از توابع هدف می‌باشند (برای بدست آوردن نقطه ایده‌آل هر یک از توابع را به صورت تکی با یکی از الگوریتم‌ها بهینه‌سازی می‌کنیم) (سینگ و همکاران، ۲۰۱۶) [۲]

- **ماتریس تنوع DM[۳]**

ماتریس تنوع (DM) نشانگر تنوع راه‌حل‌های به دست آمده از یک الگوریتم معین است.

$$DM = \sqrt{(\max f_1 - \min f_1)^2 + (\max f_2 - \min f_2)^2 + \cdots + (\max f_m - \min f_m)^2} \qquad (۱۴)$$

که $\max f_j$، f_j *تابع هدف* j-ام و $j = 1,2,\ldots,m$ حداکثر مقدار توابع هدف در جبهه پارتو است و $\min f_1$ حداقل مقدار توابع هدف در جبهه پارتو است. مقادیر بزرگ‌تر DM نشانگر راه حل‌های باکیفیت بالاتر است.

---

۱. Mean ideal distance

۲. Singh et al, ۲۰۱۶

۳. Diversification matrix

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

- **وسعت راه‌حل‌های نامغلوب SNS[1]**

با هدف ارزیابی گسترش (توزیع) بردارها در کل مجموعه راه‌حل‌های غیر مغلوب است. این معیار که به عنوان شاخص تنوع شناخته می‌شود ، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$SNS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(MID - c_i)^2}{n-1}} \qquad (15)$$

که n تعداد جواب‌های موجود در جبهه پارتو است. MID و c_i به ترتیب میانگین فاصله از نقطه ایده‌آل و فاصله اقلیدسی هستند. مقدار بزرگ‌تر SNS نشانگر کیفیت بالاتر است (سینگ و همکاران، ۲۰۱۶).

٤- تجزیه و تحلیل نتایج

٤-١. داده‌های تحقیق

داده‌های سرعت باد ماه‌های مشابه شهرستان خدابنده واقع در جنوب استان زنجان طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹ از سازمان هواشناسی گردآوری شده و در ۳ سطح سرعت (۸، ۱۲ و ۱۷ متر بر ثانیه) و در ۴ جهت اصلی (شمالی، جنوبی، شرقی و غربی) دسته‌بندی شده است. سپس برای هر دسته از سرعت و جهت باد در هر ماه به صورت جداگانه احتمال وقوع محاسبه شده است تا در شبیه‌سازی مونت کارلو مورد استفاده قرار گیرد. لازم به ذکر است، مزرعه بادی به صورت شکل زیر به ۱۰۰ گرید تقسیم‌بندی شده است و در نرم‌افزار متلب برای شبیه‌سازی مزرعه بادی از یک ماتریس صفر و یک ۱۰ × ۱۰ استفاده شده است. در صورت قرار گرفتن عدد یک در هر درایه ماتریس، در گرید متناظر مزرعه بادی یک توربین قرار می‌گیرد در غیر اینصورت توربینی در آن وجود ندارد. ضرایب بکار رفته در شبیه‌سازی پژوهش در جدول شماره (۲) آورده شده است.

[1] . Spread of non-dominance solutions

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

جدول شماره ۲- ضرایب مورد استفاده در تحقیق

ضرایب	توضیحات	مقادیر ضریب
h	ارتفاع هاب	۸۰
r	شعاع روتور	۳۷/۵
k	ضریب بهره‌وری توربین	۰/۳
γ	زبری سطح زمین	۰/۳
TC	ضریب متحرک	۰/۸۸
λ	ضریب ویک (سایه)	۰/۰۷۵
a	فاکتور القایی محوری	۰/۳۲۶

مأخذ: شکور و همکاران (۲۰۱۶)، ین و همکاران، (۲۰۱۶)، (۲۰۱۷)

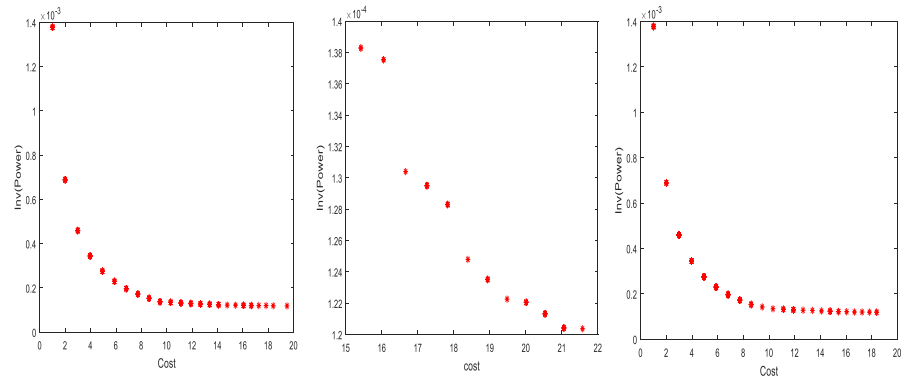
۲-٤. تحلیل نتایج تجربی

مطابق جدول (۲) در بخش قبل، با استفاده از سه الگوریتم PESA-II، MOPSO و NSGA-II مدل‌های (۱)، (۲) و (۳) بهینه‌سازی شده است. در این بخش نتایج هر یک از مدل‌های تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۲-٤. نتایج اجرای مدل ۱

برای مدل (۱) الگوریتم‌ها ترکیب‌های مختلفی از هزینه و توان تولیدی ارائه دادند، که از هزینه و توان پایین شروع و به هزینه و توان تولیدی بالاتر ختم می‌شود. هر چه هزینه کل نصب بالاتر می‌رود (تعداد توربین‌ها بیشتر می‌شود) توان تولیدی کل مزرعه بادی بالاتر می‌رود ولی توان تولیدی متوسط به دلیل فشرده شدن توربین‌ها و تشدید اثر ویک کاهش می‌یابد. همچنین هر چه تعداد توربین افزایش پیدا می‌کند هزینه متوسط هر توربین کاهش می‌یابد. در شکل (۲) جبهه پارتو مربوط به مدل۱ خروجی هر یک از الگوریتم‌ها آورده شده است. شکل (۳) دو نمونه از چینش توربین‌ها در مزرعه بادی، برای مدل۱ حاصل از الگوریتم PESA-II می‌باشد. که سمت راست نمونه‌ای از نحوه قرارگیری توربین‌ها در ناحیه پرهزینه جبهه پارتو مدل۱ و سمت چپ نمونه‌ای از قرارگیری توربین‌ها در ناحیه کم‌هزینه جبهه پارتو را نشان می‌دهد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

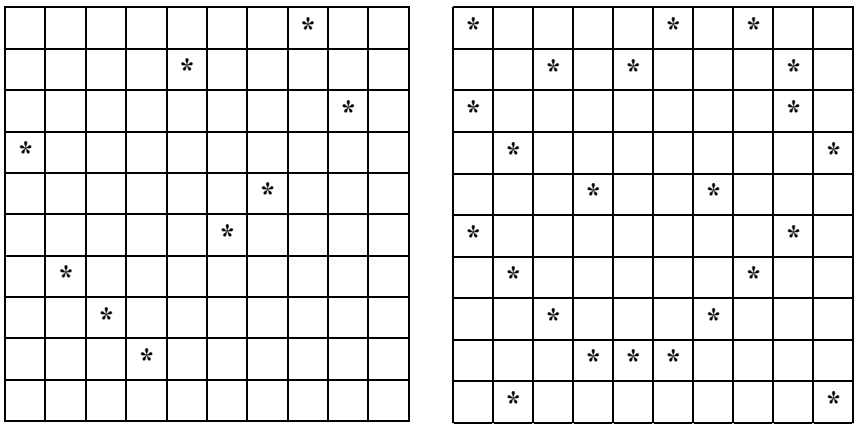


جبهه پارتو حاصل از الگوریتم

جبهه پارتو حاصل از الگوریتم

جبهه پارتو حاصل از الگوریتم

شکل (۲): جبهه پارتو در مدل۱



شکل (۳): دو نمونه چینش توربین‌ها در مزرعه بادی برای مدل۱ (مربوط به الگوریتم PESA-II)

بر اساس خروجی مدل (۱)، بیشترین توان و هزینه متناظر با آن توسط هر یک از الگوریتم‌ها در جدول (۳) آورده شده است. در هر سه الگوریتم، حداکثر توان خروجی مزرعه بادی حدوداً ۸/۳ مگاوات بدست آمده است. در ادامه و بخش مقایسه نتایج مدل‌های تحقیق، این نتایج با نتایج حاصل از اجرای مدل‌های (۲) و (۳) مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

جدول شماره ۳. خروجی مدل (۱) متغیرهای هدف بر اساس الگوریتم‌های تحقیق

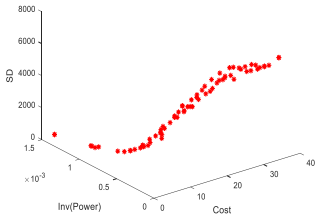
متغیر	الگوریتم		
	PESA-II	MOPSO	NSGA-II
توان (کیلووات) (Power)	۸۳۹۵/۶۰	۸۳۰۷/۵۳	۸۴۰۹/۴۴
هزینه (Cost)	۱۸/۳۸	۲۱/۵۷	۱۹/۴۷

منبع: یافته‌های تحقیق

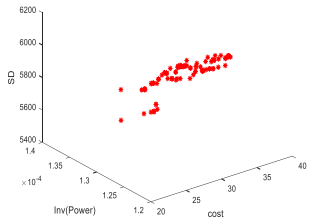
۲-۲-٤. نتایج اجرای مدل ۲

مدل (۲) تحقیق نیز توسط هر سه الگوریتم بهینه شده است و مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه در جدول (۲) که ترکیبی از سطح هزینه‌ها، توان و انحراف معیار از میانگین است، ارائه شده است. این راه‌حل‌ها از سطح هزینه، انحراف معیار و توان پایین شروع و به سطح هزینه، انحراف معیار و توان بالا ختم می‌شوند. با بالا رفتن تعداد توربین‌ها و فشردگی بیشتر اثر ویک تشدید شده، بنابراین توان خروجی متوسط کاهش می‌یابد. همچنین فشردگی توربین‌ها و تشدید اثر ویک سبب بالا رفتن انحراف معیار از میانگین و ریسک تولید نیز می‌شود. در این مدل به ازای هر سطح از تولید توان (برق)، سطح هزینه و میزان ریسکی (انحراف معیار) که باید تحمل شود مشخص شده است. در شکل (۴) جبهه پارتو مربوط به مدل (۲) خروجی هر یک از سه الگوریتم تحقیق آورده شده است. در شکل (۵) دو نمونه از نحوه قرارگیری توربین‌ها در مزرعه بادی، برای مدل (۲) حاصل از الگوریتم PESA-II آورده شده است، که سمت راست برای ناحیه پرهزینه و ریسک بالای جبهه پارتو و سمت چپ برای ناحیه کم‌هزینه و ریسک نسبتاً پایین جبهه پارتو را نشان می‌دهد.

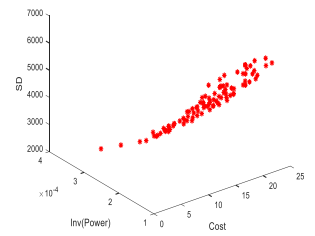
[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]



جبهه پارتو حاصل از الگوریتم

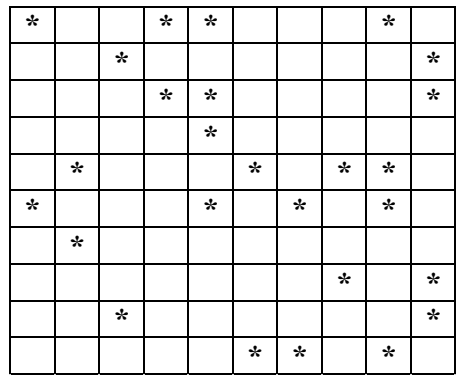


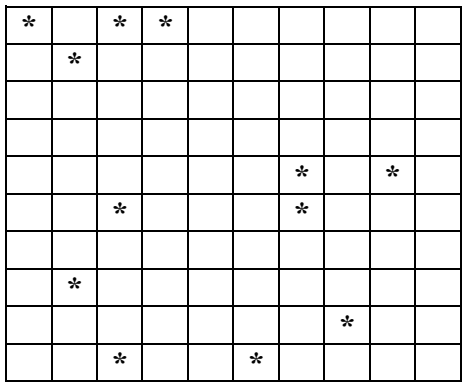
جبهه پارتو حاصل از الگوریتم



جبهه پارتو حاصل از الگوریتم

شکل (۴): جبهه پارتو مدل۲





شکل (۵): دو نمونه چینش توربین‌ها در مزرعه بادی برای مدل۲ (مربوط به الگوریتم PESA-II)

برای مدل۲ هریک از الگوریتم‌ها مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها را ارائه کردند که بیشترین توان و هزینه و انحراف معیار متناظر با آن توسط هر یک از الگوریتم‌ها در جدول (۴) آورده شده است. در هر سه الگوریتم، حداکثر توان خروجی مزرعه بادی حدوداً ۸ مگاوات بدست آمده است. با توجه به مقدار بالای انحراف معیار مشخص است که احداث مزرعه بادی در منطقه مورد نظر از ریسک بالای تولید برخوردار است و برای سرمایه‌گذاری در آن افراد و یا سازمان‌هایی با میزان ریسک‌پذیری بالا را می‌طلبد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

جدول شماره ٤. متغیرهای هدف بر اساس الگوریتم‌های تحقیق در مدل ۲

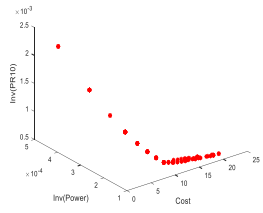
متغیر	الگوریتم		
	PESA-II	MOPSO	NSGA-II
توان (کیلووات) (Power)	۸۰۴۳/۴۵	۸۱۱۹/۳۱	۸۳۰۵/۷۵
هزینه (Cost)	۲۰/۰۰	۲۷/۴۹	۲۳/۱۳
انحراف معیار (SD)	۶۰۴۳/۶۶	۶۱۰۷/۷۰	۶۲۴۲/۰۰

منبع: یافته‌های تحقیق

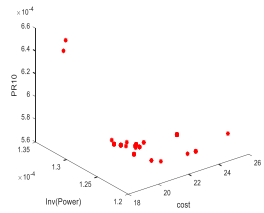
۳-۲-٤. نتایج اجرای مدل ۳

مدل (۳) نیز توسط هر سه الگوریتم بهینه شد و برای این مدل نیز مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه ارائه شد که ترکیبی از سطح هزینه‌ها، توان و صدک دهم می‌باشند. خروجی صدک دهم نشان دهنده آن است ۱۰ درصد توان تولیدی با سناریوهای مختلف کمتر از مقدار صدک دهم است به عبارتی ۹۰ درصد توان تولیدی بیشتر از مقدار صدک دهم می‌باشد. در این مدل نیز مانند مدل‌های قبلی هر چه از منطقه کم‌هزینه جبهه پارتو به سمت منطقه پرهزینه جبهه پارتو حرکت می‌کنیم توان کل، هزینه کل و ریسک تولید افزایش و توان متوسط و هزینه متوسط کاهش می‌یابد، علت کاهش توان متوسط و افزایش ریسک تولید فشرده شدن توربین‌ها و به تبع آن تشدید اثر ویک در مزرعه بادی می‌باشد. شکل (۶) جبهه پارتو خروجی مدل (۳) و شکل (۷) دو نمونه از چینش مزرعه بادی را نشان می‌دهد.

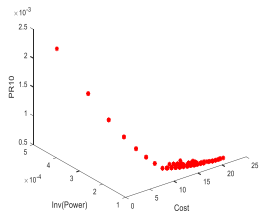
[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]



PESA-جبهه پارتو حاصل از الگوریتم

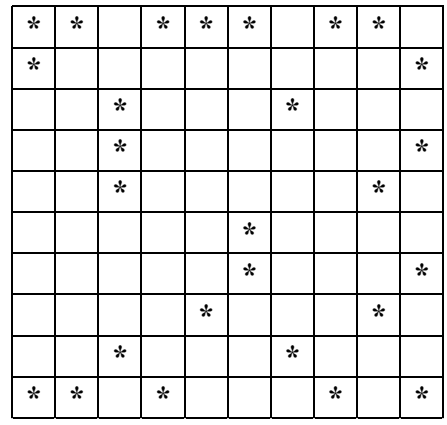


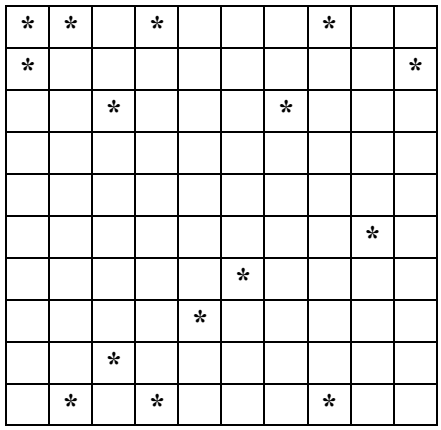
جبهه پارتو حاصل از الگوریتم



NSGA-جبهه پارتو حاصل از الگوریتم

شکل (۶): جبهه پارتو مدل۳





شکل (۷): دو نمونه چینش توربین‌ها در مزرعه بادی برای مدل۳ (مربوط به الگوریتم PESA-II)

برای مدل (۳) بیشترین توان و هزینه و صدک دهم متناظر با آن توسط هر یک از الگوریتم‌ها در جدول (۵) آورده شده است. در هر سه الگوریتم، حداکثر توان خروجی مزرعه بادی حدوداً ۸/۵ مگاوات بدست آمده است. با توجه به مقدار پایین صدک دهم در هر سه الگوریتم مشخص است که احداث مزرعه بادی در منطقه مورد نظر از ریسک بالای تولید برخوردار است، زیرا در ۹۰ درصد مواقع تولید کمتر از ۱/۸ مگاوات می‌باشد و قبول سرمایه‌گذاری در آن نیازمند ریسک‌پذیری بالا می‌باشد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

جدول شماره ۵. متغیرهای هدف بر اساس الگوریتم‌های تحقیق در مدل ۳

متغیر	الگوریتم		
	PESA-II	MOPSO	NSGA-II
توان (کیلووات) (Power)	۸۳۴۳/۹۵	۸۲۲۵/۳۴	۸۵۵۸/۰۳
هزینه (Cost)	۲۰/۰۰	۲۵/۲۶	۲۱/۰۵
صدک دهم ((PR(۱۰))	۱۸۰۹/۹۳	۱۷۳۴/۲۶	۱۸۱۰/۳۲

منبع: یافته‌های تحقیق

٤-۲-٤. مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها

در مدل (۱) (در مدل دو هدفه) با توجه به معیار فاصله از نقطه ایده‌آل MID الگوریتم PESA-II عملکرد بهتری نسبت به دو الگوریتم دیگر داشته است (مقادیر کمتر MID نشانگر عملکرد بهتر)، یعنی جواب‌های الگوریتم PESA-II به جواب‌های ایده‌آل هر یک توابع هدف نزدیک‌تر هستند (جواب‌های ایده‌آل: جواب‌های بهینه هر تابع هدف به صورت انفرادی). بعد از آن الگوریتم NSGA-II عملکرد مطلوبی داشته است. در مدل (۱) با توجه به معیار DM و SNS عملکرد الگوریتم NSGA-II بهتر از دو الگوریتم دیگر بوده است (مقدار DM و SNS بیشتر معادل عملکرد بهتر) یعنی راه‌حل‌هایی با تنوع بیشتر ارائه داده است و رده‌های بعدی به ترتیب به PESA-II و MOPSO تعلق دارد. در کل عملکرد الگوریتم MOPSO در مدل۱ ضعیف است.

در مدل۲ و ۳ عملکرد الگوریتم PESA-II با توجه به معیار MID بهتر از سایر الگوریتم‌ها می‌باشد و جواب‌ها به نقطه ایده‌آل نزدیک‌تر است. از نظر تنوع و گستردگی جواب‌ها نیز الگوریتم NSGA-II عملکرد مطلوب‌تری نسبت به سایر الگوریتم‌ها داشته است زیرا مقادیر DM و SNS نسبت به دو الگوریتم بیشتر است. در جدول زیر عملکرد هر یک از الگوریتم‌ها نسبت به معیارهای ۳ گانه آورده شده است. با توجه به نتایج جدول (۶) می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم PESA-II از نظر نزدیکی به نقطه ایده‌آل از عملکرد مطلوب‌تری برخوردار است

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

و چنانچه کاربر به دنبال راه‌حل‌های ایده‌آل است، الگوریتم PESA-II توصیه می‌شود و چنانچه تنوع و گستردگی راه‌حل‌ها برای کاربر مهم باشد، استفاده از الگوریتم NSGA-II برای بهینه‌یابی توصیه می‌شود.

جدول شماره ٦. مقایسه عملکرد الگوریتم‌های تحقیق بر اساس معیارهای سه‌گانه

الگوریتم	مدل (۱)			مدل (۲)			مدل (۳)		
	معیار MID	معیار DM	معیار SNS	معیار MID	معیار DM	معیار SNS	معیار MID	معیار DM	معیار SNS
PESA-II	۶/۹۹*	۱۷/۳۹	۴/۵۸	۶۷۶/۵۱*	۳۷۴۲/۲۶	۵۰۹/۱۴**	۱۰/۶۱**	۱۷/۰۲	۳/۹۹
MOPSO	۱۸/۹۱	۶/۱۵	۱/۸۱	۱۰۵۹/۱۳	۶۰۶/۹۶	۱۳۸/۶۶	۲۰/۴۸	۶/۸۷	۱/۴۱
NSGA-II	۸/۹۱	۱۸/۴۷**	۴/۹۸**	۱۵۲۴/۷۹	۵۶۹۵/۸۷**	۱۲۱۷/۳	۱۳/۶۸	۱۸/۰۶**	۴/۶۵**

توضیح: * مقادیر حداقل بر اساس معیار MID و ** مقادیر حداکثر بر اساس معیارهای DM و SNS جواب‌های بهینه است. منبع: یافته‌های تحقیق

۵- بحث و نتیجه‌گیری

مزارع بادی نقش حیاتی در توسعه استفاده از انرژی‌های پاک و حرکت به سوی گذار انرژی در جوامع مختلف ایفا می‌کنند. تعداد و چینش مطلوب توربین‌های بادی در کنار پرداختن به مسئله مدیریت ریسک ناشی از عدم قطعیت پیرامون پروژه از جمله مسائل مهم در طراحی و احداث یک مزرعه بادی، برای به حداکثر رساندن تولید برق و بهره‌وری آن، است. اثر وِیک یا سایه و عدم قطعیت باد دو عامل کلیدی و مهمی هستند که بهره‌وری تولید برق از مزرعه بادی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این پژوهش با لحاظ این دو عامل، هدف اصلی حداکثرسازی توان تولیدی مورد انتظار، حداقل سازی هزینه و حداقل‌سازی ریسک بوده است. بر اساس هدف اصلی تحقیق، عدم قطعیت سرعت و جهت وزش باد را با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو، مدل‌سازی کرده، سپس سناریوهای بدست آمده در مدل‌های بهینه‌سازی (۱)، (۲) و (۳) استفاده کرده و با الگوریتم‌های NSGA-II, PESA-II, MOPSO بهینه‌سازی شده است. در مدل‌های مذکور دو معیار ریسک یعنی انحراف معیار از میانگین و صدک دهم برای

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

حداقل سازی ریسک بکار برده شده است. لازم به ذکر است، هدف مدل (۱) حداکثرسازی توان و حداقل‌سازی هزینه پروژه، هدف مدل(۲) حداکثرسازی توان و حداقل‌سازی هزینه پروژه و حداقل‌سازی ریسک (بر اساس معیار انحراف معیار) و هدف مدل (۳) حداکثرسازی توان و حداقل‌سازی هزینه پروژه و حداقل‌سازی ریسک (بر اساس معیار صدک دهم) بوده است. هر الگوریتم برای هر یک از مدل‌ها مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها را ارائه داد. خلاصه نتایج حاصل از تحقیق به صورت زیر ارائه می‌شود:

- ✓ در هر سه الگوریتم مورد استفاده در این تحقیق، حداکثر توان خروجی مزرعه بادی حدوداً ۸/۵ مگاوات بدست آمده است. با توجه به مقدار پایین صدک دهم در هر سه الگوریتم مشخص است که احداث مزرعه بادی در منطقه مورد نظر از ریسک بالای تولید برخوردار است. زیرا در ۹۰ درصد مواقع، تولید کمتر از ۱/۸ مگاوات می‌باشد و سرمایه‌گذاری در منطقه مورد مطالعه نیازمند ریسک‌پذیری بالای سرمایه‌گذار است.
- ✓ جواب‌هایی که از حل الگوریتم‌ها در مدل (۱) بدست می‌آید، برای آن دسته از سرمایه‌گذارانی که صرفاً به دنبال یافتن اطلاعاتی درباره میزان بودجه سرمایه‌گذاری و بازده مورد انتظار هستند، کافی بوده و پاسخ گوی نیاز آن‌ها است. اما برای سرمایه‌گذاری در پروژه‌هایی که بازدهی آن‌ها با عدم قطعیت همراه است و سرمایه‌گذار به دنبال اطلاعاتی درباره میزان و ماهیت ریسک است، مدل‌های (۲) و (۳) پیشنهاد می‌شود.
- ✓ مدل‌های (۲) و (۳) قادر به ارائه اطلاعات تفصیلی در مورد هزینه، سود و ریسک هستند. مدل (۲) انحراف تولید از بازده مورد انتظار را ارائه می‌دهد و مدل (۳) با استفاده از مفهوم چندک‌ها (صدک) اطلاعاتی درباره اینکه بر اساس یک احتمال معین، چه میزان از تولیدات از مقدار مشخصی کمتر است، ارائه می‌دهد. چنین تحلیل‌هایی به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا بودجه سرمایه‌گذاری، بازده مورد انتظار و ریسک مرتبط با پروژه را شناسایی کرده و متناسب با آن‌ها اقدام کنند.
- ✓ در این پژوهش هر یک از الگوریتم‌ها به خوبی برای هر سه مدل جواب‌های بهینه ارائه کردند

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

و سرمایه‌گذار با توجه به معیارهای مورد قبول در پروژه‌های نیروگاه بادی و میزان ریسک‌پذیری خود می‌تواند از آن‌ها استفاده کند. در مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها از نظر نزدیکی راه‌حل‌ها به راه‌حل ایده‌آل الگوریتم PESA-II برای هر سه مدل عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها داشت و از نظر تنوع و گستردگی راه‌حل‌ها الگوریتم NSGA-II عملکرد مطلوب‌تری داشت. بنابراین اگر هدف حداکثر نزدیکی به جواب ایده‌آل باشد بهتر است از الگوریتم PESA-II استفاده شود و اگر هدف داشتن جواب‌های با تنوع و گستردگی بیشتر است، الگوریتم NSGA-II پیشنهاد می‌شود.

با توجه به اینکه در این تحقیق از مدل وِیک جنسن استفاده شده است، به سایر محققین برای توسعه نتایج این تحقیق پیشنهاد می‌شود، از مدل‌های وِیک دیگری مانند لارسن[۱] و انسلی[۲] نیز استفاده شود. علاوه بر این، در نظر گرفتن جهات هشت یا شانزده گانه و نیز در نظر گرفتن ریسک‌های ناشی از تغییرات قیمت برق در طراحی مزارع بادی از جمله پیشنهادات دیگر به محققین است.

منابع

- **انتظاری، علیرضا؛ امیراحمدی، ابولقاسم؛ عرفانی، عاطفه و برزویی، اکرم.** (۱۳۹۱). ارزیابی پتانسیل انرژی باد و امکان سنجی احداث نیروگاه بادی در سبزوار. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک. سال سوم، شماره نهم و دهم. صفحه ۳۳-۴۶.

- **ساکی، امین؛ پورفر، ایمان.** (۱۳۹۸). معادل سازی دینامیکی بادها و ژنراتورها در مزرعه بادی بر اساس رگرسیون عصبی و خوشه بندی. نشریه مهندسی برق (دانشکده فنی دانشگاه تبریز), ۴۹(۱ (پیاپی ۸۷)), ۲۱۳-۲۲۱.

- **سایه‌بانی، مصباح؛ حاتمی، فرزاد؛ و هروی، حمید.** (۱۳۹۷). اولویت‌بندی ریسک‌ها و ارائه مدل مدیریت ریسک در توسعه نیروگاه‌های بادی بر اساس استاندارد مدیریت پروژه، *نشریه مهندسی عمران امیرکبیر*، دوره ۵۰، شماره ۴، ۸۰۱-۸۱۲.

[۱] .Larsen
[۲]. Ainslie

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

- **صادقی، زین‌العابدین؛ دلال‌باشی اصفهانی، زهرا؛ و حری، حمیدرضا.** (۱۳۹۲). اولویت‌بندی عوامل موثر بر مکان‌یابی نیروگاه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر (انرژی خورشیدی و انرژی باد) استان کرمان با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره. فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی. ۱۳۹۲؛ ۰ (۲) :۹۳-۱۱۰.

- **فرجی پور، ایوب؛ فقیهی، فرامرز؛ و شریفی، رضا.** (۱۳۹۷). بررسی و بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر تولید توان ماکزیمم از مزارع بادی در زمین هموار. علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیستم، شماره یک، صفحه ۶۹ -۷۹.

- **قادری‌شمیم، احمد؛ حقی‌فام، محمود رضا .**(۱۳۹۰). مدل سازی نیروگاه بادی با روش فازی- مارکوف در مطالعات قابلیت اطمینان. نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، شماره ۲ ، صفحه:۱۰۱ - ۱۰۶.

- **محمدزاده، پرویز؛ زارع، کاظم؛ و رسول‌پور فرزین، زهرا.** (۱۳۹۵). ارزیابی اقتصادی تولید انرژی الکتریسیته از توربین‌های بادی (مطالعه موردی توربین‌های بادی عون ابن علی). *فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی*. ۱۲ (۴۹) :۱۸۱-۲۰۰.

- **ملکی، مهسا؛ سرهنگ زاده، میترا.** (۱۳۹۵). تعیین بهینه تعداد و مکان توربین‌های بادی در یک مزرعه بادی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO). سومین کنفرانس بین المللی فناوری و مدیریت انرژی، تهران، انجمن انرژی ایران.

- **Biswas, P. P., Suganthan, P. N., & Amaratunga, G. A.** (۲۰۱۸). Decomposition based multi-objective evolutionary algorithm for windfarm layout optimization. *Renewable Energy*, ۱۱۵, ۳۲۶-۳۳۷.

- **Chen, Y., Li, H., He, B., Wang, P., & Jin, K**. (۲۰۱۵). Multi-objective genetic algorithm based innovative wind farm layout optimization method. *Energy Conversion and Management*, ۱۰۵, ۱۳۱۸-۱۳۲۷.

- **Coello, C. A. C., Lamont, G. B., & Van Veldhuizen, D. A.** (۲۰۰۷). Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems (Vol. ۵). *New York: Springer*.

- **Dale, S., & Fattouh, B.** (۲۰۱۸). Peak oil demand and long-run oil prices. *Energy Insight*, *25*.

- **Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. A. M. T.** (۲۰۰۲). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, *6*(۲), ۱۸۲-۱۹۷.

- **dos Reis, M. M. L., Mazetto, B. M., & da Silva, E. C. M.** (۲۰۲۱). Economic

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

analysis for implantation of an offshore wind farm in the Brazilian coast. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *43*, ۱۰۰۹۵۵.

- **Ekonomou, L., Lazarou, S., Chatzarakis, G. E., & Vita, V.** (۲۰۱۲). Estimation of wind turbines optimal number and produced power in a wind farm using an artificial neural network model. *Simulation Modelling Practice and Theory,*۲۱(۱), ۲۱-۲۵.

- **Emami, A., & Noghreh, P.** (۲۰۱۰). New approach on optimization in placement of wind turbines within wind farm by genetic algorithms. *Renewable Energy*, ۳۵(۷), ۱۵۵۹-۱۵٦٤.

- **Famoso, F., Brusca, S., D'Urso, D., Galvagno, A., & Chiacchio, F.** (۲۰۲۰). A novel hybrid model for the estimation of energy conversion in a wind farm combining wake effects and stochastic dependability. *Applied Energy*, *280*, ۱۱۵۹٦۷.

- **Marmidis, G., Lazarou, S., & Pyrgioti, E.** (۲۰۰۸). Optimal placement of wind turbines in a wind park using Monte Carlo simulation. *Renewable energy,* ۳۳(۷), ۱٤۵۵-۱٤٦۰.

- **Mittal, P., Kulkarni, K., & Mitra, K. (۲۰۱٦).** A novel hybrid optimization methodology to optimize the total number and placement of wind turbines. *Renewable energy,* ۸٦, ۱۳۳-۱٤۷.

- **Mittal, P., Mitra, K., & Kulkarni, K.** (۲۰۱۷). Optimizing the number and locations of turbines in a wind farm addressing energy-noise trade-off: A hybrid approach. *Energy Conversion and Management*, ۱۳۲, ۱٤۷-۱٦۰.

- **Mosetti, G. P. C. D. B., Poloni, C., & Diviacco, B.** (۱۹۹٤*).* Optimization of wind turbine positioning in large windfarms by means of a genetic algorithm. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,* ۵۱(۱), ۱۰۵-۱۱٦.

Nooraie, V., Fathi, M., Narenji, M., Parast, M. M., Pardalos, P. M., & Stanfield, P. M. (۲۰۲۰). A multi-objective model for risk mitigating in supply chain design. *International Journal of Production Research*, ۵۸(۵), ۱۳۳۸-۱۳٦۱.

- **Narenji, M., Sepanloo, H., & Ansarzadeh, S**. (۲۰۱۷) Optimizing the Distribution Network of Service Supply Chain under Competition; Case Study: Macro-Structure of Mellat Bank. *13th International Conference on Industrial Engineering (IIEC*).

- **Parsopoulos, K. E., & Vrahatis, M. N.** (۲۰۰۸). Multi-objective particles swarm optimization approaches. In Multi-objective optimization in computational intelligence: Theory and practice (pp. ۲۰-٤۲). *IGI global.*

- **Rawson, A., & Brito, M. (۲۰۲۲)**. Assessing the validity of navigation risk assessments: A study of offshore wind farms in the UK. *Ocean & Coastal*

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

Management, *219*, ۱۰۶۰۷۸.
- **Shakoor, R., Hassan, M. Y., Raheem, A., & Rasheed, N.** (۲۰۱۶). Wind farm layout optimization using area dimensions and definite point selection techniques. *Renewable energy*, ۸۸, ۱۵٤-۱٦۳.
- **Singh, M. R., Singh, M., Mahapatra, S. S., & Jagadev, N.** (۲۰۱٦). Particle swarm optimization algorithm embedded with maximum deviation theory for solving multi-objective flexible job shop scheduling problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, ۸۵(۹-۱۲), ۲۳۵۳-۲۳٦٦.
- **Tran, R., Wu, J., Denison, C., Ackling, T., Wagner, M., & Neumann, F.** (۲۰۱۳, July). Fast and effective multi-objective optimization of wind turbine placement. *In Proceedings of the 15th annual conference on Genetic and evolutionary computation* (pp. ۱۳۸۱-۱۳۸۸). ACM.
- **Yin, P. Y., Wu, T. H., & Hsu, P. Y.** (۲۰۱٦). A power-deficiency and risk-management model for wind farm micro-siting using cyber swarm algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, ٤۰(۳), ۲۱۷۷-۲۱۸۹.
- **Yin, P. Y., Wu, T. H., & Hsu, P. Y.** (۲۰۱۷). Risk management of wind farm micro-siting using an enhanced genetic algorithm with simulation optimization. *Renewable Energy*,۱۰۷, ۵۰۸-۵۲۱.
- **Yin, P. Y., Wu, T. H., & Hsu, P. Y.** (۲۰۱۷). Simulation based risk management for multi-objective optimal wind turbine placement using MOEA/D. *Energy*, ۱٤۱, ۵۷۹-۵۹۷.
- **Yeter, B., Garbatov, Y., & Soares, C. G.** (۲۰۲۰). Risk-based maintenance planning of offshore wind turbine farms. *Reliability Engineering & System Safety*, *202*, ۱۰۷۰٦۲.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]