پتانسیل سنجی انرژی باد برق منطقه ای باختر با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)

یونس نوراللهی[1]، سید محمد علی اشرف[2]، محسن زمانی[3]

تاریخ دریافت مقاله:
1389/12/15
تاریخ پذیرش مقاله:
1390/3/1

چکیده:

با توجه به آنکه انرژی از موارد ضروری برای توسعهٔ اقتصادی- اجتماعی و ارتقای کیفیت زندگی بشر می باشد، متخصصین و برنامه‌ریزان انرژی در دنیا اتفاق نظر دارند که انرژی های تجدیدپذیر باید نقشی بهتر از آنچه که امروزه در دنیا برای تامین انرژی مورد نیاز جوامع بشری دارند، ایفا نمایند. به همین منظور باید به دنبال جایگاهی برای انرژی تجدید پذیر و پاک در طول دهه های آتی بود. انرژی برق بادی بدلیل شرایط اقتصادی بهتر و همچنین عدم آلایندگی محیط زیست و نامحدود بودن منابع بادی امروزه بیشتر از منابع دیگر مورد توجه واقع شده است. این مقاله به بیان روشی کاربردی برای پتانسیل سنجی منابع بادی با قابلیت تولید برق، با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و با در نظر گرفتن معیارهای انتخاب مزارع بادی می پردازد. در روش محاسبه پتانسیل باد در این مقاله معیارهای مورد نظر با اهمیتی یکسان مورد بررسی قرار گرفته اند و این معیارها شامل معیارهای فنی، زیست محیطی، اقتصادی و جغرافیایی می باشند. نتایج حاصل از این پروژه، پتانسیل سنجی مناطق مساعد جهت تولید برق از انرژی بادی برای توربین های بزرگ با توجه به استانداردهای بین المللی، بیان استانداردها و معیارهای مورد بررسی برای پتانسیل سنجی منابع باد و و در نهایت پیاده سازی موارد ذکر شده در برق منطقه ای باختر با هدف پتانسیل سنجی منابع باد منطقه می باشد. این مطالعات نشان داده است که با فرض استفاده از توربین Gamesa G۵۸ می توان حداکثر 1897مگاوات برق بادی در منطقه‌ی مورد مطالعه تولید کرد، که این مقدار تامین کننده ی 26% برق منطقه در افق 1404 می باشد.

کلمات کلیدی:
انرژی تجدیدپذیر، باد، پتانسیل سنجی، سیستم اطلاعات جغرافیایی، برق منطقه ای باختر

1) دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران
2) کارشناس ارشد مهندسی سیستم های انرژی
3) کارشناس مهندسی برق – قدرت
* نویسنده مسئول،

مقدمه

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-10]

با پیشرفت علوم و تکنولوژیهای مربوط به استفاده از منابع انرژی های تجدید پذیر در جهان، نیاز به تحقیق و بررسی های فراوان در این زمینه و افزایش سقف منابع انرژی تجدیدشونده در سبد انرژی کشور وجود دارد. این بررسی ها با توجه به دلایل مختلف لزوم استفاده از این منابع و با توجه به بحثهای اقتصادی, شامل قیمت برق تولیدی از منابع و سوختهای مختلف صورت می گیرد. حل مشکلات زیست محیطی و محدودیت منابع انرژی های فسیلی و ضرورت تنوع در سبد انرژی موجب گردیده است، فعالیت های گسترده ای در سطح جهان بویژه در کشورهای صنعتی در جهت کاربرد انرژی های تجدیدپذیر صورت گیرد. حداقل در 73 کشور جهان اهداف راهبردی برای توسعه انرژی های تجدیدپذیر تدوین و سیاست گذاری های لازم انجام شده است[3]. انرژی باد به عنوان یکی از انواع انرژی های تجدیدپذیر از دیرباز ذهن بشر را به خود معطوف نموده و بشر همواره به فکر استفاده از این انرژی بوده است. نیروگاه های بادی با توجه به هزینه پایین تولید برق و همچنین سازگاری با محیط زیست از جمله منابع انرژی پرطرفدار بوده و در چند سال گذشته رشد بسیار خوبی داشته است.

صنعت انرژی باد منافع اقتصادی و اجتماعی مختلفی را به همراه دارد که از جمله مهم ترین آنها عبارتند از:

- قیمت تمام شده پایین
- هزینه های اجتماعی پایین
- هزینه های زیست محیطی ناچیز
- کاهش اتکاء به منابع انرژی فسیلی (پدافند غیر عامل)
- تقویت ساختار اجتماعی و اقتصادی مناطق روستایی و ....؛

با توجه به اهمیت استفاده از این منبع پایان ناپذیر و مزایای استفاده از آن باید یک برنامه ریزی دقیق برای شناخت پتاسیل های موجود در کشور جهت گسترش استفاده از این منبع انرژی صورت گیرد. به همین منظور ما در برق منطقه ای باختر با توجه به رشد مصرف برق و نیازهای منطقه در سال های آینده بر آن شدیم تا با استفاده از سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی - بعنوان یک ابزار کاربردی شبیه سازی محدویتهای اقتصادی، فیزیکی، زیست محیطی و جغرافیایی - به پتانسیل انرژی باد در این منطقه به منظور رفع نیازهای تولید برق دست یابیم. در این مقاله هدف دستیابی به فاکتورهای لازم جهت انتخاب محل های مناسب مزارع بادی در برق منطقه ای باختر به منظور ارائه ی معیارهای بر پایه سیستم اطلاعات جغرافیایی، انتخاب مکانی مزارع بادی، استفاده از این معیارها در برق منطقه ای باختر و ارزیابی تاثیر آنها می باشد.

انرژی باد در ایران

ایران به دلیل موقعیت خاص جغرافیایی و قرار گرفتن در یک منطقهٔ کم فشار و مجاورت با مناطق پرفشار شمال و شمال غرب به طور کلی در زمستان و تابستان در مسیر بادهای عمده‌ی زیر قرار دارد:

1- بادهایی که در زمستان از اقیانوس اطلس و دریای مدیترانه و نیز آسیای مرکزی می وزد.

2- بادهایی که در تابستان از طرف اقیانوس هند و همچنین شمال غرب به سمت ایران می وزد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-10]

درسال 1381 سازمان انرژی های نو ایران اقدام به اجرای پروژه ملی پتانسیل سنجی و تهیه اطلس رنگی باد کشور کرد، که این پروژه در سال 1388 خاتمه یافت. در این اطلس، 26 منطقه از کشور شامل 45 سایت مورد مطالعه قرار گرفته اند، که بر اساس اطلس مذکور پتانسیل کل استفاده از انرژی باد در 20 سایت مذکور معادل 6500MW می باشد [18] و میزان برق قابل استحصال از انرژی برق بادی در کل کشور در حدود 20000 مگاوات برآورد شده است. تا پایان سال 1388 توربین های نصب شده در سایت های (پسکولان، هرزویل و سیاهپوش) منجیل, بینالود، لوتک زابل و عون بن علی تبریز برابر 92 مگاوات بوده است که این مقادیر به تفکیک در جداول (1) بیان شده اند[2].

جدول1: ظرفیت مزارع بادی نصب شده در نیروگاه های بادی ایران

محل نصب	ردیف	ظرفیت توربین بادی (کیلووات)	تعداد	مجموع ظرفیت نصب شده (مگاوات)	تاریخ نصب
منجیل	1	550 & 300	28	12	1382
	2	300	10	3	1384
	3	550	10	5/5	1385
	4	660	22	14/52	1385
	5	660	17	11/22	1386
	6	660	15	9/9	1387
	7	660	9	5/94	1388
بینالود	1	660	20	13/2	1385
	2	660	23	15/18	1386
زابل	1	660	1	0/66	1388
تبریز	1	660	1	0/66	1388
مجموع ظرفیت نصب شده (مگاوات)				91/78	

از دیگر اقدامات مهم صورت گرفته در زمینه ی انرژی باد، ساخت توربین های بادی در داخل کشور و سعی در بومی سازی این صنعت بوده است. اولین کارخانه ساخت توربین های بادی در کشور در سال 1379 به بهره‌برداری رسیده است. در ابتدا این کارخانه قادر به ساخت 70 درصد از قطعات توربین‌های بادی بود. اما در راستای سیاست بومی سازی صنعت توربین باد و رفع وابستگی خارجی به ویژه در مقابله با تحریم‌های سیاسی و اقتصادی، قطعات متعدد مورد استفاده در مونتاژ ناسل که قبلاً از شرکت های خارجی تهیه می‌شد، پس از 2 سال تلاش خستگی‌ناپذیر با موفقیت در شهریور ماه 1389 در داخل کشور تولید گردید[2].

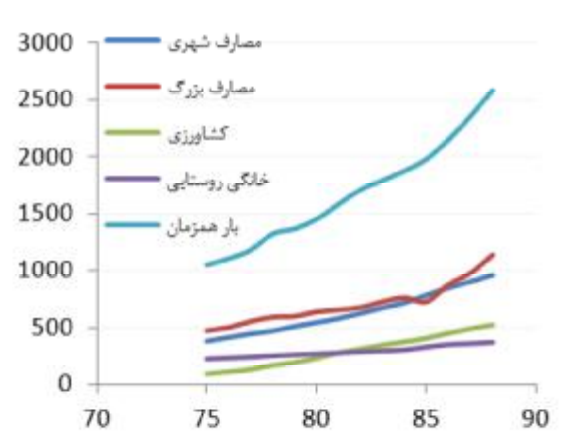
منطقه ی مورد مطالعه

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-10]

برق منطقه ای باختر متشکل از سه استان مرکزی، لرستان و همدان به مرکزیت اراک با وسعت 76522 کیلومتر مربع شامل 25 شهرستان، 65 شهر، 212 دهستان و جمعیتی بالغ بر 4500000 نفر می باشد. این شرکت از شمال به برق منطقه‌ای زنجان، از غرب به برق منطقه‌ای غرب، از جنوب به سازمان آب و برق خوزستان، از جنوب شرقی به برق منطقه‌ای اصفهان و از شرق و شمال شرقی به برق منطقه‌ای تهران محدود می‌شود. شکل 1 محدوده ی برق منطقه ای باختر را نشان می دهد. میزان برق همزمان مصرفی در سال 1388 در این منطقه2582 مگاوات بوده است[1] و پیش بینی می شود این مقدار تا سال 1404 به حدود 7308 مگاوات افزایش یابد. این منطقه شامل دو نیروگاه حرارتی سیکل بخار شازند اراک به ظرفیت نامی 1300 مگاوات و مفتح همدان به ظرفیت نامی 1000 مگاوات و نیروگاه حرارتی سیکل گازی دورود به ظرفیت نامی 60 مگاوات می باشد. میزان انرژی تولیدی سال 1388 نیروگاه شازند برابر 8263 میلیون کیلووات ساعت، نیروگاه مفتح همدان برابر 4850 میلیون کیلووات ساعت و نیروگاه دورود برابر 67 میلیون کیلووات ساعت بوده است. مقدار انرژی ورودی به شبکه‌ی برق منطقه ای باختر در سال 1388 از شرکتهای برق منطقه ای تهران، غرب، اصفهان، زنجان و خوزستان برابر 9720 میلیون کیلووات ساعت و میزان انرژی خروجی از شبکه برق منطقه ای باختر به شرکت های برق منطقه ای همجوار 8571 میلیون کیلووات ساعت برآورد شده است. حال با توجه به مقدار انرژی مصرفی 14329 میلیون کیلووات ساعتی شبکه برق منطقه ای باختر در این سال و میزان انرژی الکتریکی تولیدی 13180 میلیون کیلووات ساعتی این منطقه، کسری تولید 1149 میلیون کیلووات ساعتی در این منطقه مشهود می باشد، که این میزان از شرکت های برق منطقه ای همسایه تامین گردیده است .حال با توجه به نیاز منطقه و پتانسیل های انرژی بادی در این سه استان، با برنامه ریزی مناسب می توان این میزان کسری را از انرژی برق بادی تامین نمود. در شکل 2 حداکثر بار مصرفی به تفکیک نوع مصرف در بین سالهای 1375تا 1388 در برق منطقه ای باختر نشان داده شده است[3].

شکل 1 : برق منطقه ای باختر

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-10]



شکل2: حداکثر بار مصرفی(مگاوات) برق منطقه ای باختر از سال75تا88

روش انجام تحقیق

برای تصمیم گیری درباره‌ی منابع طبیعی، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) می تواند یک ابزار قدرتمند برای ارزیابی مکانی گزینه های انتخابی باشد. به طور سنتی، روی هم قرار دادن لایه ها و تعیین حریم ها، برای مطالعات مکان یابی مورد استفاده قرار می گرفته است. اما هنگامی که متغیر های اساسی زیادی وجود داشته باشد روی هم قرار دادن لایه ها مشکل می شود [12]. عملکرد تحلیل کنونی و تحلیل فضایی متداول و تکنیک های مدلسازی، مبتنی بر منطق بولین می باشد که به صورت ضمنی فرض می کند که عوارض موجود در پایگاه داده های فضایی و ویژگی های آنها می توانند به صورت جداگانه تعریف گردند. در این روش، تصمیم گیری از یک ارزیابی شایستگی نتیجه می شود که این ارزیابی، درجه ای است که نشان می دهد یک مکان به مجموعه ای مناسب یا نامناسب تعلق دارد و با توجه به آن هر مکان در هر معیار می‌تواند مقداری برابر صفر یا یک را به خود اختصاص دهد و فرض بر آن است که معیارها دارای اهمیت یکسانی باشند. در حالت کلی، مجموعه‌ی نامناسب بعنوان مکمل مجموعه‌ی مناسب در نظر گرفته می شود. فصل مشترک بولین که در واقع عملیات روی نقشه های محدودیت بولین است، یک And منطقی را انجام می دهد که در نهایت تنها مکان هایی را که در تمامی نقشه ها با عنوان مناسب (مقدار یک) مشخص شده اند, انتخاب می کند. در واقع مناسب بودن پیکسل kام نقشه‌ی نهایی بصورت رابطه‌ی زیر تعیین می شود[13]:

$$S^k = \sum w_i x_i^k \qquad (1)$$

در این رابطه x_i^k ارزش معیار i در kامین پیکسل و w_i وزن معیار در آن پیکسل است که با صفر یا یک بیان می شود. بنابراین اگر معیار i برای پیکسل kام بصورت نامناسب تعریف شود، w_i برابر صفر می شود و پیکسل k حذف خواهد شد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-10]

معیارهای مکان یابی

معیار های مکـان یـابی معمـولا در قالـب گـروه هـای مختلفـی ماننـد زیسـت محیطـی، جغرافیـایی، بـوم شـناختی، جمعیتـی، کاربری زمین، هیدرولوژیکی، اقتصادی، امنیتـی، فنـی و ... مـورد مطالعـه قـرار مـی گیرنـد. امـا بـدلیل هـم پوشـانی بعضـی از ایـن گـروه هـا و جامعیـت برخـی نسـبت بـه سـایرین، مـا جهـت ترسـیم و بررسـی معیارهـا در ایـن مطالعـه، آنهـا را در 4 گـروه زیـر دسته بندی می کنیم:

- فنی
- زیست محیطی
- جغرافیایی
- اقتصادی

معیارهای فنی

معیـار فنـی مـورد بررسـی مـا در پتانسـیل سـنجی انـرژی بـادی، عبـارت از انتخـاب نـوع تـوربین، سـرعت بـاد مطـابق بـا مشخصات توربین و استاندارد IEC-٦١٤٠٠-١ و حداقل فاصله از خطوط انتقال توان الکتریکی منطقه می باشد.

الف) نوع توربین

این معیار مسـتقیما در انـدازه‌ی مزرعـه‌ی بـادی و تـوان تولیـدی مـا تأثیرگـذار خواهـد بـود. انـدازه‌ی تـوربین در ارتفـاع بـرج (که باید متناسب با ارتفاع بادی کـه مـورد بررسـی قـرار مـی گیـرد باشـد) تـأثیر دارد. همچنـین قطـر پـره هـای تـوربین بـر ارتفـاع بـرج، مطـابق بـا رابطـه‌ی (2) [15] بـر تـوان تولیـدی تـوربین هـا، چیـدمان و فضـای اشـغالی توسـط تـوربین و در نتیجـه تعـداد توربین های مزرعه بادی ما مـؤثر خواهنـد بـود. اسـتفاده از تـوربین هـای متصـل بـه شـبکه و جـدا از شـبکه نیـز در رونـد انتخـاب تاثیرگذارند، در این مقاله مبنـا، اسـتفاده از تـوربین هـای متصـل بـه شـبکه مـی باشـد. میـانگین سـرعت بـاد موجـود در منطقـه ی مـورد مطالعـه بایـد مطـابق بـا کـلاس بنـدی هـای تـوربین هـای بـادی و مطـابق بـا اسـتاندارد بـین المللـی IEC٦١٤٠٠-١ باشد. این استاندارد چهار کلاس مختلف بـرای تـوربین هـای بـادی جهـت انطبـاق بـا شـرایط بـادی محـل هـای گونـاگون تعریـف نموده است. مقادیر سرعت باد برای هریک از این کلاس ها در جدول (2) آورده شده است[11].

جدول 1 : طبقه بندی کلاس های توربین بادی

IEC Wind Turbine Class	I	II	III	IV
Average wind speed at hub-height (m/s)	10	8/5	7/5	6
Characteristic turbulence Class A	%18			
Characteristic turbulence Class B	%16			

با توجـه بـه رابطـه ی شـماره ی (2) و اسـتاندارد ذکـر شـده بایـد تـوربینی مـورد اسـتفاده قـرار گیـرد کـه در سـرعتهای پـایین بـاد عملکرد بهتری داشته باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-10]

$$P = \frac{1}{2} r A v^3 C_p \quad (2)$$

در رابطه ی فوق P توان خروجی توربین، A سطح جاروب، r دانسیته هوا برابر kg/m^3 1/23، V سرعت باد و Cp ضریب توان می باشند.

به همین منظور در این مطالعه، از توربین مدل Gamesa G58-850 kW متصل به شبکه با کلاس باد IIIa و ساخت کشور اسپانیا با مشخصات زیر استفاده گردیده است.

جدول 2: مشخصات فنی توربین Gamesa G58-850 kW [8]

قطر روتور	58 متر
سطح جاروب	2642 متر مربع
ارتفاع برج	55 متر
توان نامی	850 کیلووات
ولتاژ خروجی	690 ولت
حداقل سرعت با برای تولید برق	3 متر بر ثانیه
حداکثر سرعت باد برای تولید برق	23 متر بر ثانیه

ب) سرعت باد

این معیار، مهمترین معیار در نصب نیروگاه های بادی به شمار می رود. هرچه سرعت باد بیشتر باشد، توان تولیدی توسط توربین های بادی نیز افزایش خواهد یافت. البته در این بین محدودیت هایی نیز وجود دارد که شامل حداقل و حداکثر سرعت باد جهت تبدیل انرژی باد به انرژی الکتریکی می باشد، که معمولاً توسط شرکت سازنده ی توربین مشخص می شود. این میزان در توربین های مختلف متفاوت است. معمولاً حداقل سرعت باد جهت راه اندازی توربین های بزرگ بین 3 تا 4 متر بر ثانیه بسته به نوع و طراحی توربین است[6] از دیگر نکاتی که در انتخاب حداقل سرعت باد باید مد نظر قرار گیرد، حداقل سرعتی است که در کلاس بندی های توربین های بادی مطابق با استاندارد بین المللی IEC61400-1 برای توربین های بادی در نظر گرفته شده است. این سرعت مربوط به کلاس IV بوده و برابر 6 متر بر ثانیه می باشد[11]. بنابراین با توجه مطالب ذکر شده، میزان انرژی تولیدی در این سرعت باد، هزینه های تولید این انرژی و نرخ برق تولیدی از انرژی های تجدیدپذیر، در این پروژه میزان حداقل سرعت باد 6 متر بر ثانیه در نظر گرفته می شود. برای تعیین این معیار به نقشه ی رقومی اطلس باد منطقه نیازمند می باشیم.

ج) نقشه ی اطلس سرعت باد

انتخاب مناطق با سرعت باد مناسب نیازمند داشتن اطلاعات باد منطقه ی مورد مطالعه است، به همین جهت از نقشه ی اطلس میانگین سالانه سرعت باد در ارتفاع 60 متر کشور استفاده شده است. اطلاعات اطلس باد برای تعیین شرایط باد در بلند مدت مورد استفاده قرار می گیرد. اطلس باد شامل اطلاعاتی از قبیل عوارض زمین در هر منطقه و اطلاعات سالانه ی سرعت باد ایستگاه های باد سنجی می باشد. فرایند طراحی اطلس باد از انتخاب محل مورد مطالعه

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-10]

شروع می شود و سپس با استفاده از معادلات قانون توان (3) و انحرافات سمتی باد (5)، محاسبه‌ی تاثیرات ناهمواری‌ها، ساختار باد مخالف و تغییرات ارتفاع در آن لحاظ می گردد[9و15].

$$U_z = U_{ref}(z/z_{ref})^a \qquad (3)$$

که در این رابطه U_z سرعت باد در ارتفاع z ، U_{ref} سرعت باد در ارتفاع پایه ی z_{ref} و α ضریب تغییر سمت باد می باشد. یک روش محاسبه‌ی α به شکل تابعی از سرعت باد و ارتفاع به شکل زیر می باشد[7].

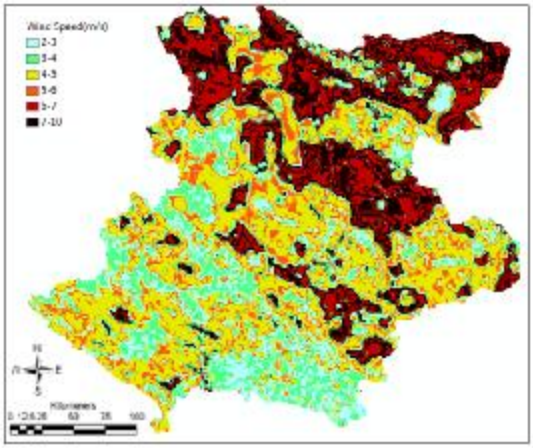
$$a = \frac{0.37 - 0.088 \times Ln(U_z)}{1 - 0.088 \times Ln(Z/10)} \qquad (4)$$

انحرافات سمتی باد با استفاده از معادله‌ی 5 محاسبه می گردد.

$$U_z = U_{ref} \times [(LnZ/Z_0 / Ln(Z_{ref}/Z_0))] \qquad (5)$$

در این معادله U_z سرعت باد در ارتفاع Z از سطح زمین، U_{ref} سرعت باد در ارتفاع مرجع، Z ارتفاع از سطح زمین، Z_{ref} ارتفاع مرجع و Z_0 طول ناهمواری ها در جهت جریان باد می باشد.

این عمل توسط نرم افزار WAsP (Wind atlas analysis and application program) انجام می پذیرد. نرم افزار WAsP از اطلاعات خام باد همراه با نقشه‌ی ناهمواری های منطقه‌ی مورد مطالعه استفاده نموده و میزان سرعت باد را در ارتفاع مورد نظر در آن منطقه محاسبه می نماید. و در نهایت این اطلس مطابق شکل(3) به نقشه ای رقومی در محیط GIS تبدیل می شود.



شکل 3: نقشه ی رقومی سرعت باد برق منطقه ای باختر

د) حداقل فاصله از خطوط انتقال توان الکتریکی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-10]

خطوط انتقال توان الکتریکی به طورکلی از نظر ایمنی، امنیت شبکه و همچنین امکان دسترسی سریع جهت نصب تجهیزات و تعمیرات احتمالی، در مکان یابی مزارع بادی تاثیر گذار می باشند. مطالعات نشان داده است که بهترین فاصله از شبکه برق برای ایمنی مزارع بادی و شبکه 250 متر می باشد که این فاصله به عنوان فاصله معیار در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است[6].

معیارهای زیست محیطی

معیار های زیست محیطی در نظر گرفته شده در این تحقیق شامل حداقل فاصله از شهرها و مراکز جمعیتی، حداقل فاصله از راه های اعم از جاده های فرعی، بزرگراهها و آزادراه ها، حداقل فاصله از خطوط راه آهن، حداقل فاصله از فرودگاه ها اعم از محلی و نظامی و حداقل فاصله از مناطق حفاظت شده سازمان حفاظت محیط زیست کشور، سواحل، تالاب ها و رودخانه ها می باشند.

الف) حداقل فاصله از مناطق شهری و جمعیتی

شهرها و مراکز جمعیتی با جمعیت زیاد، ممکن است به جهات ایمنی، سروصدا و منظره، تحت تأثیر مزارع بادی قرار گیرند.از نظر بین المللی، سیاست کاهش تأثیرات دیداری توربین های بادی بر مناطق، بدلیل تأثیر بر جمعیت بیشتر، در شهرها نسبت به مناطق روستایی ارجحیت دارد، لذا مطالعات مختلف نشان داده است که مزارع بادی حداقل باید 2000 متر از شهرها و 500 متر از مراکز جمعیتی فاصله داشته باشد[16،17].

ب) حداقل فاصله مسیرهای حمل و نقل

مسیرهای جابجایی افراد از منطقه ای به منطقه دیگر تقسیم بندی هایی دارد که شامل جاده ها، راه آهن و سایر راه ها مانند راه های دسترسی محلی می باشد. طبیعت مسیرها (مخصوصا اگر ارزش توریستی و منظره ای داشته باشند)، اهمیت نسبی آنها (ملی، استانی، منطقه ای و محلی)، ظرفیت حمل و نقل و توپوگرافی مسیرها نقش بسزایی در اهمیت تأثیر مزارع بادی بر چشم انداز جاده دارد. مطالعات در کشورهای پیشرو در صنعت برق بادی نشان می دهد که توربین های بادی باید حداقل 250 متر از خطوط راه آهن، 3000 متر از بزرگراه ها و 500 متر از جاده های محلی فاصله داشته باشد [5،7،17].

ج) حداقل فاصله از فرودگاه ها اعم از محلی و نظامی

مزارع بادی بصورت مستقیم و غیرمستقیم بر این معیار تأثیرگذار هستند. عملکرد رادارها و ارتفاع هواپیماهای عبوری از روی توربین های بادی مجاور آنها، بر محل احداث مزارع بادی تأثیر گذارند. در مورد رادارهای اصلی، توربین های بادی پارازیت به آنها ارسال می کنند؛ در مورد فرودگاه های نظامی، این مناطق علاوه بر مسائل ذکر شده در مورد فرودگاه های غیر نظامی از نظر امنیتی دارای اهمیت خاصی می باشند. مناطق پدافندی پراهمیت ملی، به جهت برقراری امنیت با درجه ی بالا و اطمینان از اقامت جمعیت کم در آن، نیازمند محدوده مناطق توسعه نیافته هستند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-10]

بنابراین محدوده حریم قابل توجهی برای معیارهای فوق موردنیاز است، مطالعات بیانگر آن هستند که باید حداقل فاصله از فرودگاه های نظامی 15000 متر و از فرودگاه های محلی 2500 متر باشد[16،7و19].

د) مناطق حفاظت شده

منطقه حفاظت شده به منطقه ای اطلاق میشود که شامل اراضی طبیعی و دارای منابع طبیعی اعم از جنگل، مرتع، حیات وحش و... بوده که از لحاظ ظرفیت تکثیر یا تولید مثل (گیاهی و جانوری) و همچنین حفظ و احیاء رستنی ها و جانوران دارای اهمیت ویژه ای است و به 4 بخش تقسیم می شوند:

- اثر طبیعی ملی
- پناهگاه حیات وحش
- منطقه حفاظت شده
- پارک ملی

این مناطق به دلیل دارا بودن جنگل ها و یا مراتع پرارزش و مناظر زیبا و برای جلوگیری از تخریب پوشش گیاهی و جانوری موجود در آنها مورد حفاظت قرار گرفته اند. مزارع بادی بدلیل اضافه کردن یک عامل تکنولوژیکی به منظره طبیعی، بر خاصیت ذاتی طبیعت این مناطق تأثیر منفی می گذارند، بنابراین حداقل فاصله جهت نصب توربین بادی از این مناطق2000متر در نظر گرفته می شود[7].

ه) ساحل و رودخانه

سواحل و رودخانه ها، به عنوان اقامتگاه ها و تفرجگاه های خاص بوده و از عوامل طبیعی بر روی زمین به شمار می روند. توربین های بادی واقع در سواحل و نزدیک به آنها و در مجاورت رودخانه ها، تاثیرات نامطلوبی بر جلوه ی این مناطق خواهند گذاشت. این مناطق همچنین از نظر زیست محیطی، زیستگاه بسیاری از پرندگان خاص هستند، که همواره مراقبت از آنها دارای اهمیت بوده است. میزان فاصله ی توربین بادی از این مناطق 500 متر در نظر گرفته می شود [7].

و) تالابها

دامنه‌ی این مناطق از تالاب های وسیع و با اهمیت بین المللی تا مرداب های محلی کوچک است. این مناطق از نظر زیبایی منطقه و حفظ منابع طبیعی و نیز به عنوان زیستگاه پرندگان آبی و سایر گونه ها دارای اهمیت می باشد. به همین منظور از مجاورت مزارع بادی با این تالابها به دلیل تصادف پرندگان با توربین ها و از بین رفتن آنها خودداری می گردد. به دلیل اینکه تالاب ها زیستگاه و محل مهاجرت پرندگان در فصول مختلف می باشد و افرایش تعداد پرندگان مهاجر باعث افزایش تصادفات آنها با توربین های بادی خواهد بود، لذا باید سعی شود توربین ها از این تالابها حداقل میزان 500 متر فاصله داشته و حتی المقدور در مسیر عبور پرندگان قرار نگیرند[7و20].

معیارهای جغرافیایی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-10]

معیار های جغرافیایی مورد بررسی، حداکثر شیب زمین در این منطقه و حداکثر ارتفاع از سطح دریا می باشند.

الف) ارتفاع

این معیار شامل میزان ارتفاع از سطح دریا می باشد. میزان ارتفاع باید به مقداری باشد که انتقال تجهیزات را با مشکل همراه نسازد. همچنین، افزایش ارتفاع با توجه به رابطه ی 3 در میزان سرعت باد تاثیر گذار است و با افزایش ارتفاع، سرعت باد نیز افزایش می یابد. اما افزایش ارتفاع، منجر به کاهش فشار و دمای هوا نیز می شود که این کاهش فشار و دمای هوا همانطور که در رابطه ی شماره‌ی 6 مشاهده می شود در میزان توان قابل استحصال از توربین تاثیرگذار خواهد بود و بنابراین نباید میزان ارتفاع به قدری باشد که در میزان این توان تغییرات محسوسی ایجاد نماید[10].

$$\frac{\overline{V}}{\overline{V_0}} = (\frac{H}{H_0})^a \qquad (3)$$

که در این رابطه V سرعت باد در ارتفاع H ، V_0 سرعت باد در ارتفاع پایه ی H_0 و α ضریب تغییر سمت باد می باشد.

$$E_G = E_U c_H c_T \qquad (6)$$

E_G انرژی خالص تولید شده، E_U انرژی ناخالص تولیدی و c_H , c_T به ترتیب ضرایب دما و فشار هستند که برابرند با:

$$c_H = \frac{P}{P_0} \qquad (7)$$

$$c_T = \frac{T}{T_0} \qquad (8)$$

در این روابط P و T فشار و دما در ارتفاع H ، P_0 و T_0 فشار و دمای استاندارد و برابر101/3 kPa و 288/1K تعریف شده اند.

با توجه به محدودیت های انتقال تجهیزات و میزان هزینه‌ی لازم برای انتقال تجهیزات در ارتفاع بالای 2000 متر از سطح دریا و با توجه به رابطه‌ی (6)، میزان حداکثر ارتفاع مجاز فرض شده در این پروژه توسط نویسنده 2000 متر از سطح دریا در نظر گرفته شده است.

ب) شیب

شیب منطقه نیز از عوامل مهم در عملکرد مناسب توربین ها و نصب آنها می باشد. گاهی اتفاق می افتد که تمام یا بخشی از توربین بادی توسط تپه ها و کوه ها پنهان می‌شود که ممکن است مانع دستیابی به توان مؤثر و مورد نیاز شود. رعایت معیار توپوگرافی می تواند این مشکلات را مرتفع سازد. شکل شماره (4) تاثیر تغییرات زیاد شیب بر مزرعه بادی را نشان می دهد. همچنین میزان شیب نباید به حدی باشد که مانع از نصب توربین گردد بنابراین حداکثر میزان شیب 10% در نظر گرفته می گردد[17].

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-10]

شکل 4: تاثیر تغییرات زیاد شیب بر مزرعه بادی

ج) معیارهای اقتصادی

یکی از مهم ترین معیارهای مورد بررسی در پتانسیل سنجی و مکانیابی نیروگاه های بادی، معیارهای اقتصادی هستند که شامل حداکثر فاصله از جاده ها و حداکثر استفاده خطوط انتقال توان الکتریکی که استفاده از انرژی برق- بادی را توجیه پذیر می سازد می باشند.

احداث جاده های ارتباطی و خطوط انتقال انرژی الکتریکی جدید بسیار هزینه بر بوده و همچنین از عوامل اجتناب ناپذیر در احداث مزرعه ی بادی و انتقال انرژی تولیدی از مزارع بادی به شبکه‌ی برق می باشند. به همین منظور در این مقاله میزان حداکثر فاصله از این دو عامل در مکان یابی مزارع بادی به عنوان معیارهای اقتصادی مد نظر قرار گرفته اند و حداکثر فاصله مجاز از این دو معیار 10000 متر می باشد[15].

تجزیه، تحلیل و تلفیق داده ها

در این بخش اطلاعات مختلف و معیارهای بررسی شده با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی به عنوان سیستم کمک به تصمیم گیری (DSS)[1] با هم ترکیب و تلفیق شده و مکان مناسب برای احداث توربین های بادی انتخاب می شود. هدف، تعیین مناسب ترین محل برای احداث توربین های بادی است به طوریکه محدودیت ها و مشکلات احداث توربین بادی را نداشته باشد.جهت تجزیه و تحلیل و تلفیق داده ها، با توجه به مدل مفهومی ارائه شده در شکل شماره (11) بصورت زیر انجام گردید.

جمع آوری اطلاعات در چارچوب GIS

ابتدا اطلاعات مورد نیاز و نقشه های راه ها، آبراهه ها، شهرهای بزرگ و مراکز جمعیتی، راه آهن، فرودگاه های محلی و نظامی، خطوط انتقال توان الکتریکی، مناطق حفاظت شده و اطلس باد این 3 استان تهیه شدند و سپس به همراه نقشه ی شیب و ارتفاع، در محیط GIS مدل شده و به نقشه ی رقومی تبدیل گردیدند.

انتخاب و ارزیابی حریم معیارها

[1] Decision Support System

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-10]

میزان حداقل و حداکثر فاصله از هر یک از معیارها در جداول شماره (3،4و5) آورده شده است. این مقادیر با در نظر گرفتن اصول فنی، اقتصادی و عملیاتی و با استفاده از برآوردها و استانداردهای ملی و بین المللی و با بیشترین توجهات به معیارهای بیان شده در این مقاله، تعیین گردیده اند.

جدول 3: حداقل و حداکثر فاصله از معیارهای مورد بررسی

معیار مورد مطالعه	حداقل فاصله (m)	حداکثر فاصله (m)	منابع
شهرها	2000	-	[16،17]
مراکز جمعیتی	500	-	[17]
راه های محلی	500	10000	[7،17]
راه های ملی	3000	10000	[5،17]
راه آهن	250	-	[7]
فرودگاه ها	2500	-	[7 ،16 ،20]
فرودگاه نظامی	15000	-	[7]
خطوط انتقال برق	250	10000	[7،17]
آبراهه ها، سواحل و تالابها	500	-	[7،20]
مناطق حفاظت شده	2000	-	[7]

جدول 4: حداقل سرعت باد از نظر فنی و اقتصادی

حداقل سرعت باد از نظر فنی توربین باد	3 (m/s)	[6]
حداقل سرعت باد فنی از مطابق با استاندارد IEC	6(m/s)	[9]

جدول 5: حداکثر ارتفاع و شیب مجاز

شیب	%10	[13]
ارتفاع از سطح دریا	2000 متر	[1]

تعیین حریم هر یک از معیار ها در محیط GIS

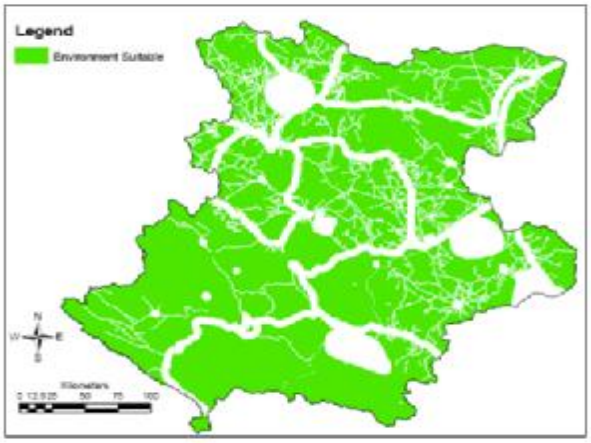
در این مرحله، مقادیر بدست آمده در مرحله ی دوم در نرم افزار لحاظ شده تا بر روی نقشه های بدست آمده در قسمت نخست این بخش، اعمال شود و نقشه ی حریم مناسب هر یک از معیارها تهیه می گردد، بطوریکه مناطقی که در موقعیتی نزدیکتر از حداقل فاصله -ی تعیین شده به معیارهای شهرها و مراکز جمعیتی، راه ها و راه آهن، فرودگاه های محلی و نظامی، خطوط انتقال برق، آبراهه ها و مناطق حفاظت شده و یا دورتر از حداکثر میزان فاصله ی تعیین شده از

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-10]

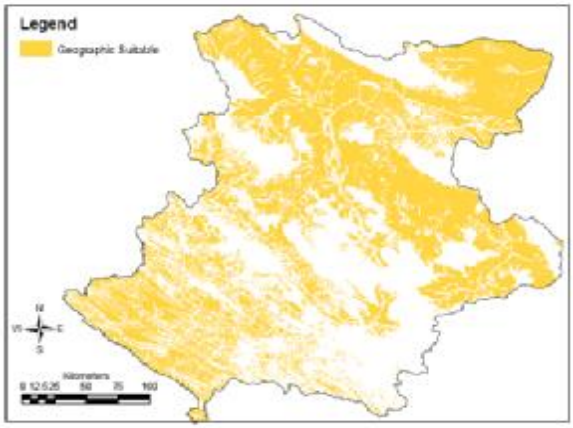
معیارهای راه ها و خطوط انتقال برق قرار گرفته اند، حذف می شوند. همچنین مناطق با شیب بالای 10% از نقشه ی شیب، ارتفاع بیش از 2000 متر از نقشه ی ارتفاع و مناطق با سرعت باد کمتر از 6 متر بر از نقشه ی رقومی اطلس باد نیز حذف خواهند شد.

روی هم قرار دادن لایه ها

در این مرحله، لایه های رقومی مرحله سوم در قالب 4 گروه معیار اصلی دسته بندی شده و لایه های هر دسته با یکدیگر AND منطقی می شوند، که این عمل به انتخاب فصل مشترک هندسی لایه ها (نقاطی که در همه‌ی لایه ها مشترک می باشند و امکان نصب توربین و استفاده از انرژی باد در آنها امکان پذیر است) منجر گردیده و حاصل آن برای معیارهای زیست محیطی در شکل 5، معیارهای جغرافیایی در شکل (6)، معیارهای فنی در شکل (7) و معیارهای اقتصادی در شکل (8) نشان داده شده است.

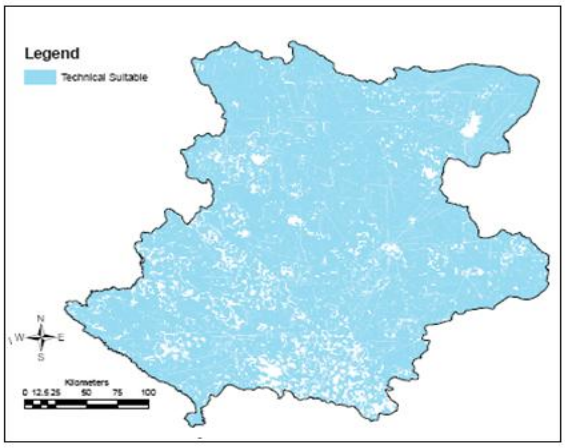


شکل 5: نقشه ی مناطق مناسب از نظر معیارهای زیست محیطی

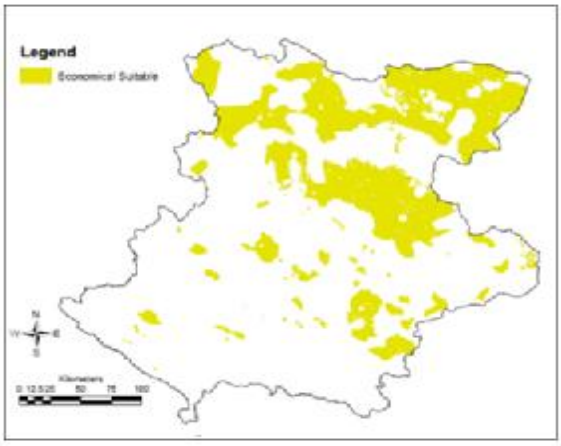


[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-10]

شکل 6: نقشه ی مناطق مناسب از نظر معیارهای جغرافیایی



شکل 7 : نقشه ی مناطق مناسب از نظر معیارهای فنی

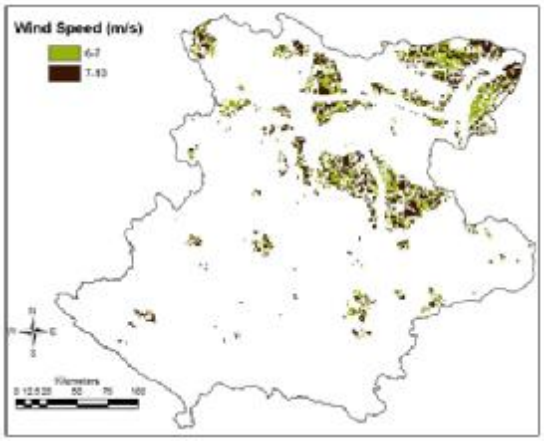


شکل 8 : نقشه ی مناطق مناسب از نظر معیارهای اقتصادی

ارزیابی پتانسیل باد قابل دسترس برق منطقه ای باختر

پس از تشکیل لایه های ذکر شده در بند4، با روی هم قرار دادن این لایه ها و انتخاب قسمت های مشترک در هر چهار لایه، پتانسیل باد قابل استفاده جهت تولید انرژی برق بادی که در شکل (9) نشان داده شده است، بدست می آید. با توجه به نقشه ی فوق می توان حداکثر انرژی الکتریکی قابل استحصال از باد را در برق منطقه ای باختر محاسبه نمود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-10]



شکل 9: نقشه پتانسیل سنجی باد برق منطقه ای باختر

حال با استفاده از نرم افزار GIS مساحتی را که باد در هر یک از سرعت های یاد شده در آن می وزد، بدست می آوریم وسپس با توجه به یکی از الگوهای موجود جهت چیدمان توربین بادی و مشخصات توربین در نظر گرفته شده در این تحقیق، میزان انرژی الکتریکی قابل استحصال از باد محاسبه می گردد.

محاسبه‌ی حداکثر انرژی برق بادی قابل دسترس

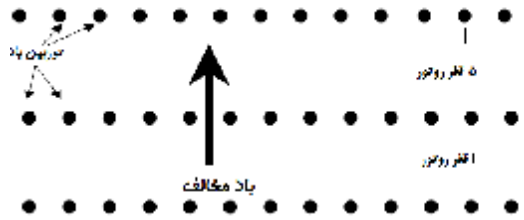
برای محاسبه ی انرژی برق بادی قابل دسترس به عواملی از قبیل پتانسیل باد قابل دسترسی که در قسمت های قبلی محاسبه گردید، مساحت زمین قابل دسترس، نحوه ی چیدمان توربین ها و مشخصات فنی توربین جهت مشخص شدن حداکثر تعداد توربینها نیازمند می باشیم.

چیدمان توربین ها

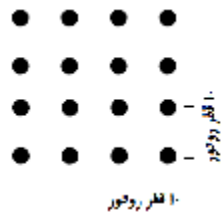
روش های مختلفی برای چیدمان توربین ها در کنار هم در مزارع بادی جهت کاهش اثرات توربین ها بر روی یکدیگر مورد استفاده قرار می گیرد. در این مقاله از روش به کار گرفته شده توسط (Lissaman, et al) با تلفات چیدمان کمتر از 10% استفاده گردید[14]. شکل شماره (10) نحوه ی چیدمان توربین ها را با این روش نشان می دهد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-10]

اما با توجه به اینکه اطلاعات مربوط به جهت باد نقطه ای در اطلس باد کشور وجود ندارد و نمی توان با استفاده از این اطلس، جهت باد در هر نقطه را تعیین نمود، لذا فاصله ی توربین ها را مطابق شکل شماره (11) در هر دوجهت (هم موافق و هم مخالف جریان باد) به یک اندازه و برابر بیشترین فاصله مورد نیاز در این مدل در نظر گرفته شده است.



شکل شماره (10) نحوه ی چیدمان توربین ها با روش Lissaman



شکل شماره (11) نحوه ی چیدمان در نظر گرفته شده در این مقاله

حذف بخش هایی با سرعت باد مطابق با کلاس IV استاندارد IEC توربین های باد

همانطورکه پیشتر نیز بیان شد و با توجه به میانگین سرعت های باد موجود در منطقه‌ی مورد مطالعه، توربین بادی با 2 کلاس III و IV در این منطقه می تواند مورد استفاده قرار گیرد. اما نظر به آنکه شرکت های سازنده‌ی توربین های بزرگ تا کنون تنها به تولید توربین های بادی با کلاس I,II,III پرداخته اند و توربین های بزرگ با کلاس IV هنوز به مرحله‌ی تولید صنعتی نرسیده اند، بنابراین مناطق با سرعت های بادی بین 6 تا 7 متر بر ثانیه که در حدود 3134 کیلومتر مربع از سطح منطقه را اشغال می نمایند، در این قسمت که به محاسبه‌ی تعداد توربین های بادی قابل نصب می پردازد، از محاسبات حذف می گردند.

محاسبه ی حداکثر توان الکتریکی قابل دسترس

با توجه به قطر توربین انتخاب شده که برابر 58 متر می باشد، هر توربین مساحتی برابر 580*580 متر مربع را به خود اختصاص می دهد. یعنی حداکثر 7267 توربین در مناطق با سرعت باد 7 تا8متر بر ثانیه قابل نصب خواهد بود. با

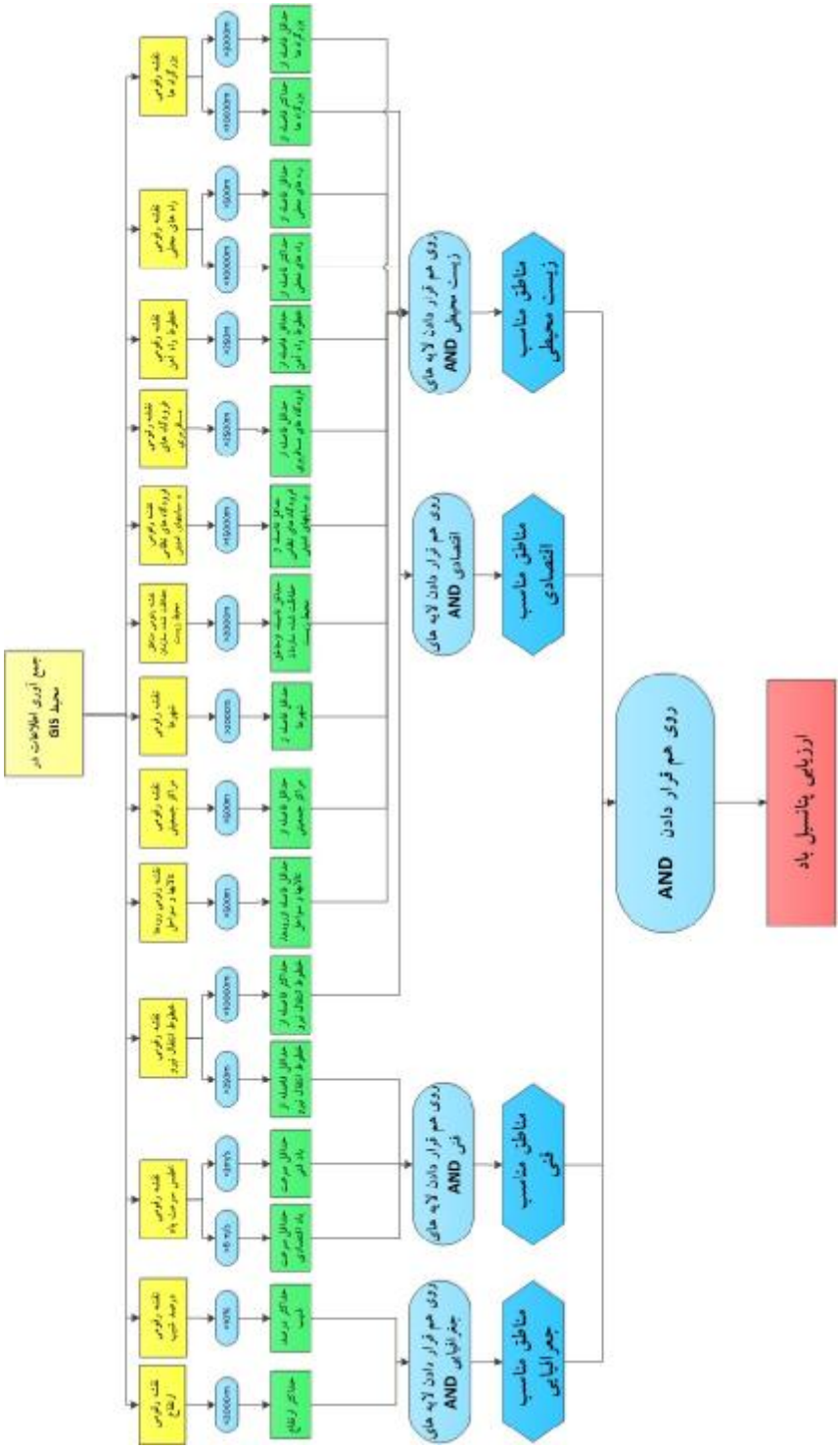
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-10]

توجه به نوع توربین انتخاب شده در این مقاله (جدول شماره 2) و رابطه شماره ی 1 توان خروجی توربین در سرعت باد ذکر شده محاسبه می گردد، حال با استفاده از نمودار توان به سرعت باد توربین انتخاب شده و تعداد توربین های قابل نصب، حداکثر توان الکتریکی حاصل از نصب این نوع توربین در برق منطقه ای باختر محاسبه می گردد. که این مقدار با در نظر گرفتن 10% تلفات چیدمان برابر با 1897 مگاوات می باشد.

نتیجه گیری

کشور ایران در روند توسعه خود نیاز به افزایش انرژی دارد و ضرورتاً می بایست در برنامه ریزی توسعه خود جایگاه ویژه ای را برای تامین انرژی در نظر داشته باشد. استفاده گسترده از منابع انرژی فسیلی در بخشهای اقتصادی ضمن ایجاد مواد آلاینده، کاهش سریع این منابع را منجر گردیده است. لذا بایستی گرایش به استفاده از منابع انرژی تجدید شونده به دلایلی همچون تجدیدپذیر بودن، در دسترس بودن، آلودگی کمتر و مهمتر از همه توسعه پایدار اقتصادی مورد توجه ویژه قرار گیرد. هم اکنون برق منطقه ای باختر با وجود شهرک های صنعتی فراوان و بزرگ و آلاینده یکی از مناطق کشور می باشد که مصرف برق آن بیشتر از تولید بوده و نیازمند افزایش تولید انرژی الکتریکی می باشد که قطعاً استفاده از انرژی های تجدیدپذیر از جمله انرژی باد، می تواند این برق منطقه ای را در رسیدن به اهدافی همچون تنوع بخشی سبد انرژی، استفاده از منابع انرژی بومی، کاهش اثرات زیست محیطی و در نهایت توسعه ی پایدار بخش انرژی یاری نماید . مطالعه ی حاضر که با استفاده از اطلس انرژی باد و با در نظر گرفتن داده های فنی، زیست محیطی، جغرافیایی و اقتصادی ذکر شده در مقاله انجام شده است، نشان داد که در برق منطقه ای باختر توان تولید قریب 1900 مگاوات برق بادی وجود دارد که می تواند توسط مدیران و برنامه ریزان محلی و ملی مورد توجه واقع شود و برنامه ریزی های لازم برای استفاده از این منبع لایزال الهی صورت گیرد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-10]



شکل 11: مدل مفهومی تجزیه تحلیل و تلفیق اطلاعات

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-10]

منابع

[1] شرکت برق منطقه ای باختر، پاییز1389، کارنامه عملکرد سال 1388، گزارشات آماری، پورتال برق شرکت برق منطقه ای باختر،وزارت نیرو، Http://www.brec.ir.

[2] شرکت صبا نیرو، پاییز1389، آمار ظرفیت نصب توربین های بادی در ایران، گزارشات آماری، پورتال شرکت صبا نیرو، Http://www.sabaniroo.co.ir.

[3] عباسپور، مجید، غازی، ساناز، 1388، فرصت ها و چالش های پیشروی توسعه ی بکارگیری انرژی های نو در کشور، همایش الگوی تولید و مصرف، توسعه پایدار، منابع انرژی و محیط زیست.

[4] معطی.م، صبوری.م، حسنی.ف، شهریور1378، گزارش برآورد حداکثر بار و انرژی مورد نیاز برق منطقه ای باختر تا سال 1397، دفتر برنامه ریزی توسعه ی شرکت توانیر.

[5] Bennui1.A, Rattanamanee.P, Puetpaiboon. U,Phukpattaranont.P,Chetpattananondh.K,(2007), SITE SELECTION FOR LARGE WIND TURBINE USING GIS, PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment, Thailand.

[6] Cheng-Dar Yue, Shi-Sian Wang. (2006)," GIS-Based Evaluation of Multifarious Local Renewable Energy Sources:A Case Study of the Chigu Area of Southwestern Taiwan, Energy Policy 34 , 730–742.

[7] DEADP, (2006). Strategic Initiative to Introduce Commercial Land Based Wind Energy Development to the Western Cape: Towards a Regional Methodology for Wind Energy Site Selection, Report Series 1-7, Department of Environmental Affairs and Development Planning, Cape Town.

[8] Gamesa Corporación Tecnológica ,Nov 2010 www.gamesacorp.com.

[9] Gipe Paul. (2004), Wind power: Renewable Energy for Home, Farm and Business. NewYork: Chelsea Green.

[10] Gipe, P., (1995), Wind Energy Comes of Age, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA.

[11] IEC61400-1: Cited in Wind Energy Handbook, Tony Burton,et al,John Wiley & sons UK).2001,ISBN:0471-48997-2,p.210.

[12] Janssen, R. and Rietveld, P. (1990). Multi-Criteria Analysis and Geographical Information Systems: An Application to Agricultural Land Use in the Netherlands. In:

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-10]

Scholten, H. and Stillwell, J.C.H.: Geographical Information Systems for Urban and Regional Planning. Kluwer Academic Publishers.

[13] Jiang, H. and Eastman, J.R, (2000). Application of Fuzzy Measures in Multi-Criteria Evaluationin GIS. Int. J. Geographical Information Systems, vol. 14, pp. 173-184.

[14] Lissaman, P. B. S., Zaday, A., Gyatt, G. W. (1982) Critical Issues in the Design and Assessment of Wind Turbine Arrays. Proc. of the 4th International Symposium on Wind Energy Systems, Stockholm, Sweden.

[15] Manwell.J.F,. McGowan.J.G and Rogers. A.L;(2002), Wind Energy Explained – Theory, Design and Application . New York: John Wiley & Sons.

[16] Nguyen, K. Q. (2007). ―Wind Energy in Vietnam: Resource Assessment, Development Status and Future Implications, Energy Policy, 35, 1405–1413.

[17] Serwan M.J. Baban, Tim Parry, 2001, Developing and Applying a GIS-Assisted Approach to Locating Wind Farms in the UK, Renewable Energy 24, 59–71.

[18] Sharif Moghaddasi.M, 2009, Wind Energy in Iran, Asian Journal on Energy and Environment, ISSN 1513-4121.

[19] Voivontas, D., Assimacopoulos, D., Mourelatos, A., Corominas, J. 1998. ―Evaluation of Renewable Energy Potential Using a GIS Decision Support System, Renewable Energy, 13(3), 333-344.

[20] Yue, C. D., Wang, S. S., 2006, GIS-Based Evaluation of Multifarious Local Renewable Energy Sources: A Case Study of the Chigu Area of Southwestern Taiwan. Energy Policy, 34, 730–742.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-10]