


کد سند: RO-S-F-27-04	معاونت پژوهشی	
تاریخ صدور: ۱۳۹۹/۴/۲۲		
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۵	فرم خلاصه فارسی طرح / پروژه	

## عنوان طرح / پروژه:

### بومی سازی کاربرد سیستم اندازه گیری بادسنجی از راه دور (لیدار) در توربین بادی

واحد مجری:	پژوهشکده انرژی و محیط زیست-گروه پژوهشی انرژی های تجدید پذیر	کارفرما:	سازمان انرژی های تجدید پذیر و بهره‌وری ایران
مدیر طرح / پروژه:	محمد باقر عسگری	مجری:	مدیر گروه پژوهشی انرژی های تجدید پذیر
کد مالی پروژه:	۸۳۰۰۲۳	کد کیفی پروژه:	PNEEV01
نوع طرح / پروژه:	مربوط به موافقتنامه با ساتبا	معاونت:	پژوهشی

همکاران: محمد باقر عسگری

## کلمات کلیدی:

لیدار، بادسنجی از راه دور، آشفستگی، سودار، سرعت باد، جابجایی داپلر، لیدار پالسی، لیدار پیوسته

## ضرورت انجام پروژه / طرح:

بادسنجی با لیدار و اصولا سنجش از راه دور دو بهبود نسبت به بادسنجی سنتی را ارائه می نماید. اولاً بادسنجی با لیدار در جایی که بادسنجی با دکل و وسایل سنجش فنجانی اقتصادی نیست و یا نصب دکل زمانبر و گاه هزینه بالاتری داشته باشد خودنمایی می کند. دوماً، در یک فضای گسترده با یک وسیله همه پارامترهای باد: سرعت، جهت، توربولانس و برش باد بدست می آید. یعنی با یک وسیله تمامی داده های لازم را خواهیم داشت و پردازش آن ساده تر است.

## اهداف پروژه / طرح:

هدف این گزارش ارائه راهکاری برای بادسنجی بدون بکارگیری دکل بادسنجی است. روش بادسنجی از راه دور یک راه ساده برای تعیین سرعت باد از راه دور با مشاهده انحراف توده ای علامت گذاری شده در فضا از زمین است. بطور واضح تر روش سنجش از راه دور برای کاربردهای امروزه انرژی باد شامل بکارگیری انتشار موج نور، صدا و آشکار سازی انعکاس این موج با ابزارهایی که با عنوان های لیدار، سودار و ماهواره هایی که بر مبنای انعکاس و پراکندگی امواج آنالیز می نمایند، میباشد. اگرچه، دقت یک امر مهم در سایت یابی و ارزیابی منابع باد فارغ از محل نصب است، چه اینکه فراساحل یا نصب خشکی باشد. بهر حال خطاهای اندازه گیری بیشتر از ۱٪ از نظر بانک و توسعه دهندگان مزارع بادی قابل قبول نیست، چنانکه خطای ۱٪ در سنجش سرعت متوسط باد، منجر به عدم قطعیت ۳٪ در متوسط توان تولیدی سالانه خواهد شد. تکنیک های سنجش از راه دور مانند سودار بر پایه کاوشگری اتمسفر بوسیله انتشار صدا بنا نهاده شده است، در حالیکه لیدار بر پایه کاوشگری اتمسفر بوسیله تشعشع امواج الکترومغناطیس (مایکروویو یا نور لیزر) است، و سنجش از راه دور ماهواره ای بر پایه پراکندگی امواج مایکروویو و رادار بر سطح دریا است. به هر حال طبیعت کالیبراسیون و یا اعتبارسنجی و طبقه بندی هر یک از این وسایل اندازه گیری، ممکن است منجر به اجرایی متفاوت گردد. این ابزارها مناسب برای اندازه گیری بوده ولی با محدودیت هایی در بعضی از زمینه ها مواجه هستند. مشخصاً اینکه توربین های باد هر روز بزرگ تر می شوند، به اینکه بگوییم اندازه گیری سرعت باد در یک ارتفاع می تواند سرعت باد در همه قطر روتور را معرفی کند پذیرفتنی نیست. پس با یک شبیه سازی ریاضی در تمام ارتفاع در برگیرنده قطر روتور به فواصل مشخص، سرعت باد در تمام قطر روتور اندازه گیری می گردد. منحنی توان بدست آمده بر اساس سرعت باد در ارتفاع هاب و سرعت باد در تمام قطر روتور با هم متفاوت می باشند. در بخش های مختلف این گزارش سعی گردیده است روش لیدار که بیشتر مقبول است ترسیم و ارائه شود.

## چکیده پروژه/طرح:

امروزه توربین‌های بادی به طور گسترده در خشکی و دریا نصب شده‌اند. روند توسعه توربین‌های باد به گونه‌ای است که ابعاد بسیار بزرگتر شده و توان تولیدی توربین‌های بادی افزایش چشمگیری یافته است. امروزه توربین‌های باد با قطر روتور ۱۵۰ متر و توان ۵ مگاوات در خشکی و در فراساحل با قطر روتور ۲۰۰ متر و توان ۱۶ مگاوات نصب گردیده است. توربین‌های بادی با این ابعاد در ارتفاع‌های بالاتر در معرض برش باد بالا و پدیده آشفتگی شدیدتر قرار خواهند گرفت. روش مرسوم بادنسنجی بر اساس دکل و بادنسنج‌های فنجان‌ی، اگرچه مورد تایید استاندارد بین‌المللی (IEC (International Electrotechnical Commission هستند، اما امروزه با محدودیت زیادی برای اندازه‌گیری دقیق جریان باد برای توربین‌های بزرگ مواجه هستند. بنابراین متخصصان بدنبال یافتن روش‌های نوین جهت جایگزینی دکل بادنسنجی می‌باشند تا براحتی بتوانند تا ارتفاع ۲۰۰ متر سرعت باد را اندازه‌گیری نمایند. در روش مرسوم بادنسنجی، برای ارتفاع‌های ۱۵۰ متر و بالاتر، به دکل‌های بلندتر و گران‌تر نیاز است. خصوصاً در سایت‌های فراساحل با مشکلات عظیم نصب دکل‌های بلندتر روبرو هستیم. امروزه بادنسنجی به روش از راه دور و بطور خاص لیدار که در دو نوع نصب زمینی یا نصب بر روی ناسل توربین باد توسعه یافته، توسط استانداردهای IEC پذیرفته شده است. ویرایش اول استاندارد بین‌المللی ۱-۱۲-۶۱۴۰۰-IEC تدوین سال ۲۰۰۵، صرفاً دکل بادنسنجی را مورد تایید قرار داده بود، اما در ویرایش دوم تدوین سال ۲۰۱۷، روش بادنسنجی از راه دور پذیرفته شد. بهرحال استراتژی اندازه‌گیری در چندین ارتفاع از ۵۰ تا ۲۰۰ متر برای اندازه‌گیری توزیع انرژی باد در تمام قطر روتور مورد توجه صنعت باد قرار گرفت. بدین منظور تکنولوژی سنجنش از راه دور با تکیه بر روش‌های سودار، لیدار و ماهواره‌ای مورد توجه قرار گرفت. انرژی سیستم باد و توان تولیدی، متأثر از سرعت باد است. در نتیجه بادنسنجی با وسیله‌ای با کیفیت خوب و حساسیت بالا، قابل اعتماد و کاملاً کالیبره پذیر، بسیار ضروری می‌باشد. امروزه انواع مختلفی از بادنسنج‌ها با دقت‌های متفاوت مورد استفاده قرار می‌گیرند هر چند تاکنون روش غالب بادنسنجی، استفاده از بادنسنج فنجان‌ی به همراه دکل بوده است. اما روش‌های سودار و لیدار برای اندازه‌گیری سرعت باد توانسته‌اند محدودیت‌های ابزارهای گذشته را یکی پس از دیگری برطرف نموده و به سرعت اعتماد متخصصان و صنعتگران را جلب نمایند و اثبات کرده‌اند که سنجنش از راه دور یک موضوع قابل استفاده در انرژی بادی است. در این گزارش سعی شده است تا حد امکان به جایگزین مناسب دکل بادنسنجی با تکیه بر روش لیدار پرداخته شود.

## مراحل و روش‌های انجام پروژه/طرح:

در این گزارش با تاکید بر دستگاه لیدار بعنوان یک وسیله سنجنش سرعت باد در مزارع بادی سعی شده است که لیدار بخوبی تشریح گردد. لیدار از نظر حالت نصب و نیز نوع بهره‌گیری به چهار دسته قابل تقسیم است:

۱- لیدار نصب زمینی

۲- لیدار بر روی ناسل توربین باد

۳- لیدار شناور

۴- لیدار اسکتری

ما در این گزارش تمرکز بر لیدار نصب زمینی داریم و آنرا به تفصیل از لحاظ تکنولوژی و نوع بکارگیری در همه موارد بررسی کردیم. وقتی که اندازه‌گیری‌های بادنسنج فنجان‌ی دکل هواشناسی، با وسایل اندازه‌گیری از راه دور مقایسه شود نوعاً پراکندگی چند درجه‌ای مشاهده می‌شود. تعدادی از این پراکندگی‌ها ناشی از حساسیت وسایل سنجنش از راه دور مرتبط به محیط‌های متفاوت (مانند درجه حرارت و برش باد) است. وظیفه این است که طبقه بندی تست برای شناسایی و مقدار دهی این حساسیت‌ها برای یک تعداد ارتفاعات گسسته که دامنه‌ای از اندازه‌گیری مورد نظر را بپوشاند ارزش گذاری شود. مانند بادنسنج فنجان‌ی فرض می‌شود که این حساسیت‌ها نیاز به طبقه بندی تست و نوع خاص دارد تا برای هر نوع از وسایل سنجنش از راه دور برای حداقل دو ابزار از هر نوع و در حداقل دو موقعیت صورت گیرد. پراکندگی باقی مانده در مقایسه بادنسنج فنجان‌ی بصورت نوین اتفاقی در نظر گرفته می‌شود. این تست مقایسه‌ای است از اندازه‌گیری وسایل سنجنش از راه دور با بادنسنج‌های فنجان‌ی کالیبره شده روی دکل هواشناسی که مجموعه‌ای از ارتفاع‌ها را در بر می‌گیرد. معمولاً تست منحنی توان در موقعیت‌های مختلف و در زمان‌های متفاوت و بنا بر شرایط محیطی با توزیع متفاوت انجام می‌شود. وابسته به حساسیت‌های شناسایی شده در طی طبقه بندی تست، شرایط محیطی متفاوت عملکرد وسایل سنجنش از راه دور را متأثر می‌نماید. افزایش عدم قطعیت در بازبینی تست تعیین می‌شود. با اطمینان داشتن از حداقل یک ارتفاع مشترک اندازه‌گیری، امکان دارد ارزیابی چگونگی عدم قطعیت در طبقه بندی بدست آید و بررسی تست با وسایل سنجنش از راه دور در طی تست منحنی توان پیوستگی را بررسی نماییم. اگر ناپیوستگی از این پایش شناسایی شود، عدم قطعیت‌های متناظر بکار رفته در تست منحنی توان افزایش می‌یابد. مشخصات عملکرد توان توربین بادی توسط منحنی توان اندازه‌گیری شده و برآورد انرژی تولیدی سالانه (AEP) تعیین می‌شود. منحنی توان اندازه‌گیری شده، بوسیله رابطه بین سرعت باد و توان خروجی توربین بادی تعیین می‌شود. ما اینجا لیست استاندارد‌های مرتبط به بادنسنجی یعنی سری IEC 61400-50 در ارتباط با اندازه‌گیری سرعت باد بر پایه دکل بادنسنجی و همچنین روش‌های سنجنش از راه دور تا سال ۲۰۲۳ که منتشر شده‌اند را آورده‌ایم:

- IEC 61400-50-1 راهنمای اندازه گیری باد با دکل بادسنجی.

- IEC 61400-50-2 راهنمای اندازه گیری سنجش از راه دور نصب زمینی.

- IEC 61400-50-3 راهنمای لیدار بر روی ناسل.

- IEC 61400-50-4 راهنمای بکار گیری لیدارهای شناور.

داشتن اندازه‌گیری‌های دقیق جریان باد در اتمسفر پارامتر اساسی برای بهبود طراحی توربین باد و سایت باد سنجی است. بنابراین یک عامل مهم برای ارزان سازی انرژی باد، بهبود قابلیت اعتماد به اندازه‌گیری سرعت باد است. کاربرد لیدار بستگی به نوع لیدار دارد و مباحثی که ما در بخش‌های مختلف این گزارش طرح و مورد بحث قرار دادیم می‌تواند بطور مفصل‌تر در طبقه بندی چهارگانه برای دو حالت لیدار پیوسته و لیدار پالسی مطرح شود. لیدار پالسی در حالت‌های کاربردی نصب بر روی ناسل و لیدار با حالت اسکنر در دو موقعیت دامنه کوتاه و دامنه بلند که پرتو نور قابل کنترل و هدایت پذیر باشد، امروزه عرضه تجاری دارند. نکته‌ای که در اینجا باید روی آن تاکید نماییم توسعه شتابان لیدار و مقبول شدن آن در صنعت باد و استاندارد است. در بخش فراساحل لیدار تقریباً بطور مستقل جهت ارزیابی سایت پذیرفته شده است و در بخش تست عملکرد و منحنی توان نیز با ملاحظاتی پذیرفته گردیده است. در بخش زمین‌های تخت لیدار از نظر استاندارد با اجرای کالیبراسیون پذیرفته گردیده است. در زمین‌های پیچیده هنوز مشکل وجود دارد و تحقیقات در این زمینه ادامه دارد و شاید به کمک نرم افزارهای تحلیل سیالاتی لیدار نیز در آینده بطور مستقل در این نوع زمین‌ها مستقلاً پذیرفته شود.

### اهم نتایج به‌دست‌آمده از انجام پروژه/طرح (خروجی‌های فنی، ثبت اختراع، مقالات، کتب، گزارش‌های فنی و ...):

استاندارد IEC 61400 12-1 2017 که رویه اندازه‌گیری عملکرد توانی یک توربین باد را معرفی می‌نماید، اندازه‌گیری باد با روش سنجش از راه دور را پذیرفته است. در میان روش‌های سنجش از راه دور، ابتدا به تشریح روش سودار پرداخته شد و سپس روش لیدار که اکنون بعنوان روشی کاربردی پذیرفته شده است تشریح گردید. اندازه‌گیری سرعت باد با تکنیک سودار بر مبنای انتشار امواج صدا با فرکانس‌های (۲۰۰-۴۰۰) هرتز است که این امواج در سه جهت منتشر و انعکاس امواج بوسیله گیرنده دریافت و پردازش می‌شوند. این روش در سال ۱۹۸۰ بطور عملیاتی برای اندازه‌گیری سرعت باد شروع گردید و در ابتدا برای کارهای سنجش محیطی و کنترل آلودگی هوا بود و سپس در زمینه انرژی باد توسعه یافت. موج صدا بوسیله دستگاه فرستنده منتشر و سپس برگشت صدا که حاصل تغییرات درجه حرارت و آشفستگی اتمسفر است بوسیله میکروفون گیرنده دریافت می‌گردد. در شرایط استاندارد اتمسفر، فرستنده امواج صوتی را با سرعت ۳۴۰ متر بر ثانیه برای یک آشکارکننده در ارتفاع ۱۷۰ متری می‌فرستد، سپس پالس برگشتی بعد از ۱ ثانیه دریافت می‌شود. مولفه های سه گانه امواج صوت را در جهت عمودی و دو جهت مورب می‌فرستد، تا بردار سه بعدی باد، شامل سرعت، جهت و انحراف را تشکیل دهند. دقت اندازه‌گیری سودار بر اساس حد قابل قبول نسبت کریر به نویز (C/N) مشخص می‌گردد. این حد با شکل بندیهای قرارگیری فرستنده و گیرنده و تک یا چند گانه بودن دستگاه سودار تناسب دارد. شکل بندی دو گانه استایک نسبت به شکل بندی تک انتشار مزیت بیشتری دارد یعنی نسبت کریر به نویز بهتری دارد. بیشتر دستگاههای سودار که امروزه ساخته می‌شوند دقت لازم برای کار در محدوده ارزیابی منابع باد و سایت‌سنجی ندارند و بیشتر برای یک پیش سنجش ارزان نسبت به بقیه روشهای سنجش از راه دور در یک زمان کوتاه مناسبند. بیشتر سیستمهای سودار مجهز به پنل خورشیدی برای تهیه توان الکتریکی لازم هستند که به تعمیرات بسیار کمی نیاز دارند. در هنگام کار با دستگاه سودار باید این محدودیت دیگر در سرعت‌های بالای باد یعنی بیش از ۱۵ متر بر ثانیه دارای مشکلات تفکیک صدا نسبت به نویز است و بالای ۱۰۰ متر در سودار با محدودیت روبروست و محدودیت دیگر در سرعت‌های بالای باد یعنی بیش از ۱۵ متر بر ثانیه دارای مشکلات تفکیک صدا نسبت به نویز است و دقت پایینی دارد. باید بدانیم همه وسایل سنجش از راه دور در زمین‌های پیچیده با خطا در سنجش روبرو هستند. خطاها برای زمین‌های تپه‌ای بمراتب بزرگتر می‌شود. در زمین‌هایی که آشفستگی شدید است، سودار نسبت به دکل بادسنجی مجهز به بادسنج فنجانی خطای بیشتری دارد. بنابراین امروزه بخصوص از سال ۲۰۱۰ به بعد، بانک‌های وام دهنده به مزارع بادی، ارزیابی دقیق سایت را خواستارند. بدین ترتیب سودار از گردونه صنعت باد جهانی کنار گذاشته شده است و میدان را به لیدار که بسیار دقیق‌تر می‌باشد، داده است. داشتن اندازه‌گیری‌های دقیق جریان باد در اتمسفر پارامتر اساسی برای بهبود طراحی توربین باد و سایت باد سنجی است. بنابراین یک عامل مهم برای ارزان سازی انرژی باد، بهبود قابلیت اعتماد به اندازه‌گیری سرعت باد است. کاربرد لیدار بستگی به نوع لیدار دارد و مباحثی که ما در بخش‌های مختلف این گزارش طرح و مورد بحث قرار دادیم می‌تواند بطور مفصل‌تر در طبقه بندی چهارگانه برای دو حالت لیدار پیوسته و لیدار پالسی مطرح شود. لیدار پالسی در حالت‌های کاربردی نصب بر روی ناسل و لیدار با حالت اسکنر در دو موقعیت دامنه کوتاه و دامنه بلند که پرتو نور قابل کنترل و هدایت پذیر باشد، امروزه عرضه تجاری دارند. نکته‌ای که در اینجا باید روی آن تاکید نماییم توسعه شتابان لیدار و مقبول شدن آن در صنعت باد و استاندارد است. در بخش فراساحل لیدار تقریباً بطور مستقل جهت ارزیابی سایت پذیرفته شده است و در بخش تست عملکرد و منحنی توان نیز با ملاحظاتی پذیرفته گردیده است. در بخش زمین‌های تخت لیدار از نظر استاندارد با اجرای کالیبراسیون پذیرفته گردیده است. در زمین‌های پیچیده هنوز مشکل وجود دارد و تحقیقات در این زمینه ادامه دارد و شاید به کمک نرم افزارهای تحلیل سیالاتی لیدار نیز در آینده بطور مستقل در این نوع زمین‌ها مستقلاً پذیرفته شود.