

تجهیزات اندازه‌گیری سرعت و جهت باد: روش‌ها، چالش‌ها و روند فناوری

نوید چینی فروش^{۱*}، غلامرضا لطیف شبگاهی^۲

۱- دانشجوی دکتری دانشگاه شهید بهشتی

۲- عضو هیات علمی دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ وصول: ۱۳۹۶/۱۰/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۵/۲۷

چکیده

باد پدیده‌ای نامنظم است که سبب برخی از پدیده‌های جوی می‌شود و تغییراتی شدید و ناگهانی دارد. اثرات مختلفی که تندبادها بر پرواز هواپیماها دارند در کنار خطرات ناشی از توفان برای مناطق مسکونی و صنعتی و کشاورزی، همچنین اثر گذاری مستقیم باد بر بسیاری از صنایع از جمله نیروگاه‌های بادی، ضرورت بررسی بیشتر عنصر باد را ایجاد می‌کند. ابزارهای اندازه‌گیری باد از جمله ابزار سنجش در محل، مانند بادسنج و سنجش از دور مانند رادار، هر یک با قابلیت‌ها و الزامات خاص خود، در سنجش باد بکار گرفته می‌شوند. روش‌های متنوعی نیز برای کشف پدیده‌های مرتبط و پیش‌بینی این پدیده‌ها در کنار پیش‌بینی کمی سرعت و جهت باد ابداع شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مقاله در کنار گذری بر مفاهیم مرتبط نظیر تلاطم و چینش باد، ابزارهای سنجش در محل و سنجش از دور سرعت و جهت باد را بررسی کرده و چارچوب‌های نوین اندازه‌گیری سرعت و جهت باد، شامل روش‌های هوشمند و مبتنی بر اینترنت اشیا که موجب تحولی در امر داده‌برداری و دریافت و نمایش داده‌ها شده است را معرفی و مقایسه‌ای بین روش‌های پیش‌بینی باد ارائه می‌کند. همچنین در این مقاله مقایسه‌ای بین روش سنجش در محل (استفاده از داده‌های باد اندازه‌گیری شده توسط رادیوسوند) و روش سنجش از راه دور (داده‌های VVP و CAPPI تولید شده توسط رادار داپلر باند S در اهواز) صورت گرفته است که نتایج نشان می‌دهد که در ارتفاعات بالا این دو مقدار به هم نزدیک شده و میزان اختلاف به حداقل می‌رسد.

کلید واژگان: بادسنج، رادار، تلاطم، چینش باد، سنجش از دور

مقدمه

باد از مهمترین پدیده‌های جوی به شمار می‌رود. دلیل این اهمیت، تأثیر و نقش بسیار مهم آن در بسیاری از شئون زندگی بشری است. بسیاری از موارد مانند تصمیم‌گیری‌های مرتبط با کشاورزی، مدیریت آلودگی هوای شهری، حمل و نقل دریایی و هوایی، گردشگری، ورزش و خطرات ناشی از تندبادها در محیط شهری، وابستگی مستقیم به سرعت و جهت باد دارند. اثراتی که وزش باد بر صنایع هوایی دارد بسیار حیاتی است و یکی از مهمترین زمینه‌های متأثر از وزش باد، پرواز هواپیماهاست.

برای سنجش باد از ابزارهای بسیار متنوعی استفاده می‌شود. به طور کلی می‌توان روش‌های سنجش باد را به دو دسته سنجش در محل و سنجش از دور تقسیم کرد. در روش سنجش در محل، حسگر در محل اندازه‌گیری و در تماس فیزیکی با پدیده قرار می‌گیرد. از جمله روش‌های سنجش در محل می‌توان به انواع مختلف بادسنج‌ها (فنجانی، فراصوت و سیم داغ) و همچنین رادیوسوند اشاره کرد. در روش سنجش از دور، ابزار سنجش، در محل خود پارامتر مورد اندازه‌گیری قرار نمی‌گیرد. رادار، لیدار و سودار از جمله مهمترین ابزارهای سنجش از دور باد هستند. اصول کلی اندازه‌گیری این تجهیزات، ارسال پالس و دریافت بازتابش آن و محاسبه سرعت و پارامترها بر اساس مشخصه‌های بازتابش است که در رادار ارسال امواج الکترومغناطیس، در لیدار ارسال پالس‌های نور لیزر و در سودار ارسال امواج صوتی صورت می‌گیرد. انتخاب نوع روش و دستگاه اندازه‌گیری به دقت آن دستگاه، سرعت نمونه‌برداری، قابلیت پردازش برخط، طول عمر دستگاه، بازه کالیبراسیون دستگاه و مواردی دیگر بستگی دارد.

پیشرفت در ارتباطات و تکنولوژی‌های محاسباتی و همچنین رشد سریع اینترنت، تقاضای فزاینده‌ای درخصوص بهبود عملکرد ادوات هواشناسی پدید آورده‌است. این موضوع تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر سیستم‌های جمع‌آوری داده در سرویس‌های هواشناسی گذاشته است. پیشرفت درافزایش سرعت تبادل و محاسبات و ذخیره‌سازی داده، منجر به این شده است که بتوان داده‌های اندازه‌گیری شده را با دقت‌های بالاتری منتقل و ذخیره‌سازی نمود. این پیشرفت‌ها، همچنین امکان

سنجش‌های هواشناسی را در نقاط دور از دسترس فراهم آورده است. در مدل مبتنی بر اینترنت اشیا هر یک از حسگرها به تنهایی دارای توانایی اتصال به اینترنت و تبادل داده بر بستر اینترنت هستند و هر یک از نمایشگرها نیز به تنهایی قابلیت اتصال به اینترنت و دریافت داده از هریک از آنها را دارد. آنچه در سال‌های اخیر بیشتر موجب توجه به باد، اندازه‌گیری و پیش‌بینی آن شده است، مساله تولید انرژی از باد و بهره‌برداری از نیروگاه‌های بادی است. با توجه به اینکه انرژی تولیدی توربین بادی مستقیماً تحت تأثیر وزش باد است، پیش‌بینی دقیق و به موقع سرعت باد و همچنین امکان پیش‌بینی هرچند کوتاه‌مدت پدیده تلاطم که موجب تغییر ناگهانی و شدید سرعت و جهت باد می‌شود و می‌تواند اثرات نامطلوبی بر عملکرد توربین‌های بادی (عملکرد بد یا توقف) داشته باشد، می‌تواند کمک شایانی به مدیریت نیروگاه‌های بادی کند.

مبنای کلیه روش‌های پیش‌بینی باد، استفاده از آخرین مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت و جهت باد توسط ادوات سنجش می‌باشد. پیش‌بینی‌ها در هواشناسی بسته به افق زمانی به چهار دسته اصلی خیلی کوتاه مدت، کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت تقسیم می‌شوند. روش‌های پیش‌بینی باد به دو گروه عمده یعنی پیش‌بینی بر اساس مدل‌های فیزیکی و پیش‌بینی بر اساس مدل‌های ساخته شده بر اساس داده تقسیم می‌شوند. ساده‌ترین روش پیش‌بینی باد که در افق خیلی کوتاه مدت کارایی خوبی دارد روش تداوم است. روش‌های مبتنی بر داده در پیش‌بینی باد، به سه دسته عمده روش‌های مبتنی بر سری‌های زمانی، روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و روش‌های مبتنی بر احتمال تقسیم می‌شوند. در طول چند دهه، به علت پیشرفت‌های سریع فناوری ادوات اندازه‌گیری، ابزار سنجش باد نیز بسیار متحول شده‌اند و ادوات ساده مکانیکی اندازه‌گیری، به مرور زمان جای خود را به تجهیزات سنجش الکترونیکی، دیجیتالی و ادوات سنجش از دور داده‌اند.

سازمان‌دهی مقاله به این صورت است که در بخش اول، تعاریف و مفاهیم بنیادی مرتبط با باد بیان می‌شود. در این بخش علاوه بر سمت و سرعت باد مفاهیمی مانند تلاطم و چینش باد نیز معرفی خواهند شد. در بخش دوم ابزارها و

تلاطم شناخته می‌شود. رفتار باد تابع متغیرهای متعددی از جمله ارتفاع از سطح زمین، منطقه جغرافیایی و اقلیم آن است (Bianchi et al., 2006). طبق تعریف؛ شدت تلاطم عبارتست از نسبت انحراف معیار سرعت باد به متوسط مقدار سرعت باد در بازه زمانی مشخص (Barthelmie et al., 2014). می‌توان سرعت باد را طبق رابطه (۱) به دو جزء مجزا شامل \bar{v}_w سرعت میانگین باد و $v_{w,t}$ سرعت تلاطم باد تجزیه کرد:

$$v_w = \bar{v}_w + v_{w,t} \quad (1)$$

به عنوان یک روش عملیاتی، برای مدل‌سازی تلاطم، از یک مدل استاندارد مانند فیلتر تلاطم کارمن^۱ استفاده می‌شود که یک فیلتر پایین گذر ساده به فرم رابطه (۲) است.

$$H_{w,s}(s) = \sigma_v \frac{K_v}{(1 + sT_v)^{5/6}} \quad (2)$$

که پارامترهای فیلتر شامل T_v ، K_v و σ_v به ترتیب نشان‌دهنده پهنای فرکانس تلاطم، توان تلاطم و انحراف معیار هستند و باید به صورت تجربی در محل به دست آیند. این فیلتر با فیلتر درجه دو بیان شده در رابطه (۳) تقریب زده شده است.

$$H_{turb}(s) \approx \sigma_v K_v \frac{0.4sT_v + 1}{(sT_v + 1)(0.25sT_v + 1)} \quad (3)$$

با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده محلی، پارامترهای فیلتر قابل محاسبه است.

با تبدیل مدل حوزه فرکانس رابطه (۳) به حوزه زمان، معادله حالت مطابق رابطه (۴) حاصل می‌شود که $v_{w,t2}$ و $v_{w,t1}$ حالت‌های داخلی تلاطم و ω نویز سفید است.

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_{w,t1} \\ \dot{v}_{w,t2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.42 & -0.22 \\ 0.13 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{w,t1} \\ v_{w,t2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix} \omega \quad (4)$$

مولفه تلاطم باد از حل رابطه (۴) بدست می‌آید.

تخمین توان قابل استحصال از باد، کاربرد عمده‌ای در طراحی و راهبری نیروگاههای بادی دارد. منحنی توزیع چگالی توان باد برای بررسی توان باد در توربین‌های بادی ضروری است. روش عملی برای تخمین این منحنی از داده‌های سرعت باد اینست که ابتدا توزیع احتمال سرعت باد تخمین زده شود و سپس این توزیع در نصف مکعب سرعت باد و در جرم حجمی هوا ضرب شود (Morrissey et al., 2010)

روش‌های سنسجش باد شامل سنسجده‌های در محل و سنسجده-های مبتنی بر سنسجش از دور و موارد استفاده آن‌ها در اندازه-گیری باد مورد بررسی قرار خواهد گرفت، سپس چارچوب-های نوین برای اندازه‌گیری سرعت باد و سایر اندازه‌گیری-های هواشناسی بر پایه اینترنت اشیا و مزایا، الزامات و چالش-های آن‌ها معرفی خواهد شد و در نهایت طبقه‌بندی روش‌های موجود در پیش‌بینی سرعت باد شامل روش‌های مبتنی بر مدل‌های فیزیکی و روش‌های مبتنی بر داده‌های آماری و همچنین مقایسه‌ای بین روش سنسجش در محل (استفاده از داده‌های باد اندازه‌گیری شده توسط رادیسوند) و روش سنسجش از راه دور (داده‌های VVP و CAPPI تولید شده توسط رادار داپلر باند S اهواز) ارائه خواهد گردید.

مواد و روش‌ها

تعاریف و مفاهیم بنیادی (ادبیات تحقیق)

در این بخش مفاهیم اصلی مرتبط با باد تعریف می‌شوند. باد یک بردار است که با سنسجش اندازه و جهت آن معرفی می‌شود. هرچند سرعت خود یک بردار است و می‌تواند مبین اندازه و جهت باشد، اما عموماً سرعت باد به تنهایی جابجایی هوا، و جهت باد، به جهتی که باد از آن سو می‌وزد، گفته می‌شود. بادی که از شمال به جنوب می‌وزد جهت صفر درجه دارد و بادی که از شرق به غرب می‌وزد، دارای جهت ۹۰ درجه است. هرچند سرعت و جهت باد مانند سایر کمیت‌های فیزیکی در زمان و مکان پیوسته است، اما بسته به شرایط، امکان تغییرات شدید آن در فواصل زمانی و مکانی کوتاه وجود دارد. آهنگ تغییرات باد، گستره و الگوهای حاکم بر آن می‌تواند متفاوت باشد و این تفاوت، انواع مختلفی از پدیده‌ها را ایجاد می‌کند که از جمله آنها می‌توان به تلاطم اشاره کرد. تلاطم اغتشاش و بی‌نظمی سریع در سرعت، جهت و مولفه قائم باد است. باد بر اثر عوامل مختلفی از جمله برخورد با موانع و اصطکاک با سطح زمین و یا اثرات گرمایی که باعث حرکت قائم هوا می‌شود، دچار تلاطم می‌شود. در مطالعات دینامیک شاره‌ها، تلاطم به حالتی از حرکت شاره گفته می‌شود که در آن بردار سرعت، کاملاً متغیر و تصادفی است. از این رو، باد با مشخصه‌های سرعت، جهت و شدت

غافلگیری خلبان و در نهایت سقوط هواپیما می‌شود. به منظور اتخاذ عکس‌العمل مناسب در جهت جبران عملکرد، می‌بایست میزان و کیفیت آن به اطلاع خلبان برسد (کیانی، ۱۳۸۸). یک راه حل برای مشکل مذکور تخمین مولفه قائم از روی مدل‌های تحلیلی تئوری - تجربی می‌باشد که در آن شناسایی مدلی که دقیق‌ترین بیان از این پدیده را داشته باشد، حائز اهمیت است. در حالت ایده‌آل انتظار می‌رود که مدل قادر باشد بردار باد را به صورت تابعی از موقعیت سه بعدی ارائه نماید. چنین مدلی نه تنها باد در موقعیت هواپیما، که مهمترین مشخصه حاکم بر تعیین نیروی آیرودینامیکی است را تولید می‌نماید، بلکه گرادین‌های قائم، افقی و مؤلفه‌های عرضی سرعت باد در طول بدنه و دهانه بال را نیز به دست می‌دهد. البته میدان تولید شده توسط مدل باید شباهت منطقی با آنچه که در طبیعت رخ می‌دهد داشته باشد و همچنین دارای پارامترهایی باشد که امکان تغییر اندازه، توزیع سرعت و شدت را داشته باشد. شبیه‌سازی و محاسبات ویژگی‌های میدان جریان یک خردپکه، معمولاً به یکی از سه روش زیر انجام شده است: ۱- حل عددی معادلات بنیادی مکانیک سیالات و شرایط مرزی مربوطه ۲- به کارگیری تقریب‌های تحلیلی ساده برای ساختار باد ۳- ترکیبی از دو روش اول

ابزارها و روش‌های سنجش

برای سنجش باد از ابزارهای بسیار متنوعی استفاده می‌شود. در اندازه‌گیری‌های معمول هواشناسی، سرعت و جهت باد در ارتفاع ۱۰ متری سطح زمین به عنوان یک پارامتر استاندارد بطور دائم اندازه‌گیری می‌شود. بسته به نوع اندازه‌گیری و اهداف آن، فاصله‌های زمانی خیلی کوتاه در حد نیم دقیقه و یا فواصل طولانی‌تر استفاده می‌شود ولی در هر صورت در ایستگاه‌های اصلی، فاصله بین دو دیدبانی^۴ بیشتر از ۳ ساعت نمی‌شود. پدیده‌هایی مانند تلاطم یا چینش باد، بر اساس تغییرات سمت و سرعت باد در نقاط مجاور تعریف می‌شوند و به همین دلیل، با سنجش تک نقطه‌ای قابل شناسایی و ردیابی نیستند و برای سنجش آن‌ها نیاز به تجهیزاتی با گستره

یکی از مهمترین عوامل ایجاد تلاطم در سطوح بالا چینش باد است. چینش باد به معنی اختلاف در سرعت و یا جهت باد در یک فاصله نسبتاً کم است. تحقیقات متنوعی در زمینه شبیه‌سازی و کشف چینش باد صورت پذیرفته است که عموماً بر مبنای داده‌های جمع‌آوری شده محلی و یا داده‌های بدست آمده از ابزارهای سنجش از دور است روش‌هایی برای مدل‌سازی چینش باد معرفی شده‌است که از جمله می‌توان به طراحی مدلی بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده محیطی، که در طول زمان جمع‌آوری می‌شوند، اشاره کرد

(Yanfei et al., 2016). داده‌ها در این روش کاملاً قابل اطمینان هستند اما لازم است به مدت طولانی کار داده‌برداری انجام شود که این کار عملی هزینه‌بر و زمان‌بر است. در این روش، بر اساس تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده، امکان کشف چینش باد با توجه به اطلاعات دریافتی از رادار وجود دارد. روش‌های دیگر بکار گرفته شده، روش‌های ترکیبی از مدل‌های فیزیکی و داده‌های رادار هستند که با استفاده از معادلات دینامیک جو، مدل‌سازی شرایط جوی هواشناسی را در سایز کوچک، انجام داده و بر اساس داده‌های رادار هوا پایه، شبیه‌سازی چینش باد در ارتفاع پایین راه، به روش محاسبات دینامیک شاره (CFD) انجام می‌دهند. در همین راستا روشی برای کشف چینش باد در سطوح پایین از داده‌های رادار هواپایه که معمولاً همراه با نویز شدید است ارائه شده است. (Li et al., 2016). در این روش، اعمال پردازش تطبیقی برای رادارهای هواپایه آرایه فازی بکار گرفته شده است که خود شامل دو مرحله است، یکی پاک کردن کلاترها و دیگری تطابق سیگنال. برای تطابق سیگنال نیاز به بردار راهبر^۲ (که خصوصیت زمانی فضایی هدف را توصیف کند) می‌باشد.

خرد پکه^۳، جریان قوی موضعی به سمت پایین است که در برخورد با زمین مولفه‌های شعاعی واگرا از هم تولید می‌کند و موجب چینش باد شدید می‌شود. تبدیل ناگهانی جریان باد روبرو به باد از پشت همراه با جریان باد قائم، ماهیتی فریبنده به آن می‌دهد که سبب افت ناگهانی و شدید عملکرد هواپیما،

۳. Microburst

۴. Observation

۱. Computational Fluid Dynamic

۲. Steering Vector

مبنای کار بادسنج‌های فراصوت، ارسال یک پالس فراصوت و محاسبه زمان عبور پالس فراصوت از یک فاصله هوایی است. هرچه سرعت باد بیشتر باشد، زمان طولانی‌تر می‌شود و بر مبنای زمان بدست آمده سرعت باد محاسبه می‌شود. با استفاده از دو زوج فرستنده و گیرنده که بصورت متعامد نصب شده‌اند، امکان تعیین جهت باد نیز وجود دارد (Fernandes et al., 2017). به همین روش با اضافه کردن یک زوج فرستنده گیرنده دیگر در مسیر متعامد، امکان سنجش باد در سه بعد پدید می‌آید. البته شکل هندسی پایه‌های فرستنده و گیرنده باید به‌گونه‌ای طراحی شود که کمترین اثر را بر مولفه‌های باد داشته باشد (Lopes et al., 2017).

روش بادسنجی با "سیم داغ" بر مبنای تغییر مقاومت بر اثر خنک شدن ناشی از عبور هوا از روی یک سیم داغ بنا نهاده شده است. این روش به علت پاسخ زمانی بسیار کم و آستانه حرکت بسیار پایین، علاوه بر سنجش باد به منظور هواشناسی در مطالعات جریان‌های گردابی باد در پشت اجسام نیز استفاده می‌شود. انتخاب رسانای مناسب برای این نوع از بادسنج‌ها اهمیت زیادی دارد. رسانای مورد نظر باید بیشترین حساسیت را برای تغییر مقاومت بر اثر تغییر دما داشته باشد. تنگستن، پلاتینیوم و آلایژ پلاتینیوم و ایریدیوم انتخاب‌های مناسب و مرسوم برای این کار هستند. اخیراً مطالعاتی در جهت استفاده از فیبر نوری با پوشش نقره^۱ برای این کار انجام شده تا آستانه اندازه خیلی پایین بدست آید (Wang et al., 2013).

ب- رادیوسوند: رادیوسوند ابزار سنجشی است که بوسیله یک بالن به طبقات بالایی جو صعود می‌کند و در مسیر اندازه‌گیری پارامترهای مختلف جوی را انجام می‌دهد. چون رادیوسوند در طول مسیر صعود خود با وزش باد حرکت می‌کند، بنابراین با محاسبه سرعت رادیوسوند بر اساس تغییرات موقعیت مکانی آن می‌توان مقادیر سرعت و جهت باد را بدست آورد. رادیوسوندهای اولیه از رادار برای بدست آوردن سرعت باد استفاده می‌کردند. به این صورت که آن‌ها یک منعکس‌کننده که از حلقه فلزی ساخته شده بود و امواج رادیویی را منعکس می‌کرده است را حمل می‌کردند. رادار

پوشش وسیع است. ابزار سنجش باد به دو دسته عمده، سنجش در محل و یا سنجش از دور تقسیم می‌شوند.

روش سنجش در محل

بنا بر تعریف هنگامی که سنسور در محل اندازه‌گیری و در تماس فیزیکی با پدیده باشد، اندازه‌گیری در یک نقطه انجام می‌شود و به آن "اندازه‌گیری در محل" گفته می‌شود. انواع مختلف حسگرهای اندازه‌گیری در محل عبارتند از بادسنج-های فنجان‌ی، بادسنج‌های فراصوت و بادسنج‌های سیم‌داغ. انواع دیگری از بادسنج‌های در محل نیز وجود دارند که در هواشناسی کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. ابزار دیگری که برای سنجش باد استفاده می‌شود رادیوسوندها هستند. هرچند رادیوسوند، پارامترهای اندازه‌گیری شده را از راه دور به ایستگاه گیرنده زمینی مخابره می‌کند اما چون خود در محل اندازه‌گیری قرار دارد، جزء روش‌های سنجش در محل در نظر گرفته می‌شود. در ادامه هر یک از این ابزار به طور مختصر معرفی می‌شوند.

الف- انواع بادسنج‌ها: در بادسنج فنجان‌ی سرعت باد با سرعت زاویه‌ای محور بادسنج، متناسب است و سرعت زاویه‌ای محور بادسنج، مطابق مدل ساده رابطه (۶) تعریف می‌شود.

$$I \frac{d\omega}{dt} = Q_A + Q_f \quad (5)$$

که در آن I اینرسی روتور، $\frac{d\omega}{dt}$ سرعت زاویه‌ای روتور، Q_A نیروی ایرودینامیک و Q_f نیروی ناشی از اصطکاک است. با توجه به ناچیز بودن Q_f در سرعت‌های بالای یک متر بر ثانیه، از این مقدار صرف نظر می‌شود. علاوه بر این با ساده‌سازی-هایی رابطه بین سرعت زاویه‌ای روتور و سرعت باد خطی فرض می‌شود و در چند ناحیه اقدام به خطی‌سازی و پیدا کردن ضرایب رابطه بر اساس کالیبراسیون می‌شود (Pindado et al., 2012). اثر شکل هندسی بادسنج فنجان‌ی بر تابع تبدیل بادسنج موضوعی است که در ساخت انواع بادسنج‌ها مد نظر قرار می‌گیرد و بر پارامترهایی مانند آستانه حرکت، درصد خطا و پاسخ زمانی این مدل از بادسنج‌ها اثر می‌گذارد (Pindado et al., 2014).

^۱ Silver-coated optical fiber

اطلاعات متناظر با پدیده‌های هواشناسی از دامنه و فاز سیگنال برگشتی و همچنین تفاوت بازتابش ناشی از ارسال امواج در پلاریزاسیون‌های مختلف، قابل استخراج است. سرعت حرکت پدیده‌ها که متناظر با سرعت باد است با توجه به شیفت داپلری ایجاد شده روی امواج برگشتی قابل محاسبه است (Kumjian, 2013).

داده‌های رادار هواشناسی به لحاظ گستردگی منطقه تحت پوشش (بسته به باند فرکانسی و توان تا شعاع ۴۰۰ کیلومتر) و دقت بالا در اندازه‌گیری (در نقاط مناسب با دقت ۵۰۰ متر و کمتر)، ابزاری منحصر بفرد در پایش پدیده‌های جوی هستند که امکان پوشش^۲ کامل حجمی با فواصل ۱۵ دقیقه و پایین‌تر را فراهم می‌آورند. تصویربرداری کاملی که رادار از داخل پدیده‌های جوی انجام می‌دهد، امکان بکارگیری الگوریتم‌های متنوع و مختلفی را جهت شناسایی و طبقه‌بندی انواع پدیده‌ها فراهم می‌کند. این پدیده‌ها می‌تواند شامل تلاطم، چینش باد، انواع توفان و پدیده‌های مرتبط با باد باشد. دو نوع پایه‌ای‌ترین داده تولیدی رادار داپلری هواشناسی، داده بازتابشی و داده سرعت شعاعی است. علاوه بر این، داده‌های مرتبط با تلاطم نیز از رادار هواشناسی داپلری قابل استخراج است.

رادارهای هواشناسی داپلری، از اختلاف فاز بین دو پالس متوالی دریافتی برای محاسبه سرعت حرکت پدیده استفاده می‌کنند. شدت سیگنالی که از هدف ثابتی که کمی حرکت کرده بدست می‌آید عبارت است از:

$$I = I_0 \sin\left(\frac{4\pi(x_0 + v\Delta t)}{\lambda}\right) = I_0 \sin(\theta_0 + \Delta\theta) \quad (6)$$

که در آن λ طول موج رادار، x_0 فاصله رادار از هدف و Δt زمان بین دو پالس است. بنا براین $\Delta\theta = \frac{4\pi v\Delta t}{\lambda}$ و v معادل سرعت هدف و برابر $\frac{\lambda\Delta\theta}{4\pi\Delta t}$ است. البته سرعت محاسبه شده سرعت شعاعی باد است و آن مولفه‌ای از سرعت باد است که در راستای خط اتصال نقطه هدف به محل رادار باشد. از آنجا که فاز بین π و $-\pi$ تغییر می‌کند حداکثر سرعت برابر $v_{max} = \mp \frac{\lambda}{4\Delta t}$ خواهد بود که به آن سرعت نایکویست می‌گویند.

از طرفی، حداکثر فاصله بین هدف و رادار محدود می‌شود به

دنبال‌کننده، زمان مسیر یک پالس رادیویی از آنتن رادار به رادیوسوند و برگشت به آنتن را اندازه‌گیری می‌کرده است. در نهایت با استفاده از اندازه‌گیری‌های متوالی موقعیت مکانی، بردار سه بعدی سرعت محاسبه می‌شده است. سپس سامانه‌های ناوبری رادیویی در دسترس قرار گرفتند به طوری که موقعیت دقیق از مکان و زمان را در اختیار قرار می‌دادند. در سیستم LORAN، سیگنال‌های رادیویی با فرکانس خیلی پایین به طور سنکرون و همزمان از فرستنده‌های رادیویی با موقعیت‌های مکانی مختلف و مجزا، ارسال می‌شوند. سپس با محاسبه اختلاف زمانی دریافت این سیگنال‌ها، موقعیت مکانی رادیوسوند و متعاقب آن سرعت و جهت آن مشخص می‌شود. آنچه که امروزه در تعیین سمت و سرعت باد توسط رادیوسوند استفاده می‌شود، ماهواره‌های سامانه‌ی مکانیابی عمومی^۱ هستند. سیگنال چندین فرستنده ماهواره که هرکدام یک مشخصه منحصر به فرد می‌فرستند، توسط رادیوسوند دریافت می‌شوند که این امر به تعیین موقعیت مکانی آن می‌انجامد. با داشتن موقعیت مکانی رادیوسوند در هر لحظه و محاسبه جابجایی مکان آن در یک بازه زمانی مشخص، می‌توان سرعت و جهت باد را بدست آورد.

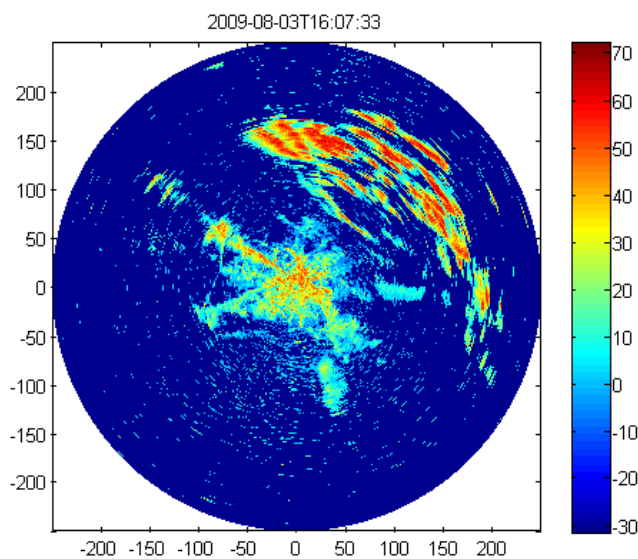
روش سنجش از دور

هنگامی که ابزار سنجش در محل خود پارامتر مورد اندازه‌گیری نیست، اندازه‌گیری بر مبنای سنجش از دور است. اصول کلی اندازه‌گیری این تجهیزات ارسال پالس و دریافت بازتابش آن و محاسبه سرعت و پارامترها بر اساس مشخصه‌های بازتابش است. از مهمترین ابزارهای سنجش از دور باد می‌توان رادار، لیدار و سودار را نام برد.

الف - رادار: رادار هواشناسی، ابزاری برای دیدبانی برخط جو در محدوده نسبتاً وسیعی از محل نصب آن است. رادارهای هواشناسی عموماً بر اساس طول موج کارکردی آن‌ها طبقه‌بندی می‌شوند که رادارهای اصلی زمین پایه، در سه باند فرکانسی، باند X (۸ تا ۱۲ گیگا هرتز)، باند C (۴ تا ۸ گیگا هرتز) و باند S (۲ تا ۴ گیگا هرتز) کار می‌کنند. باندهای فرکانسی در رادارهای هواشناسی، ویژگی‌های متفاوتی از نظر قطر ذرات قابل شناسایی و میزان تضعیف را تعیین می‌کنند.

بصورت بر خط با فشردگی زمانی و مکانی خوب، موجب توسعه روش‌های مختلف پیش‌بینی آماری سرعت باد شده است. بردار سرعت را در هر نقطه می‌توان به دو مولفه‌ی شعاعی و مماسی تجزیه نمود. مولفه‌ی مماسی باد، تأثیری بر تغییر فرکانس و فاز امواج دریافتی ندارد، به این ترتیب رادار در هر نقطه تنها قادر به اندازه‌گیری سرعت شعاعی می‌باشد. داده‌های سرعت شعاعی باد در نوعی از نمایش که "شائنگر موقعیت در صفحه" (PPI) نامیده می‌شود قابل نمایش است. داده‌های راداری با فرمت‌های متنوعی ذخیره‌سازی می‌شوند که عموماً فایل‌هایی حاوی داده‌های حجمی برای این منظور استفاده می‌شوند. مؤلفان این مقاله برای انجام تحقیقات مرتبط کدنویسی مناسبی جهت رمز گشایی و استخراج داده‌های عددی از فایل‌های داده‌ای حجمی رادار انجام داده‌اند که نمونه خروجی آن در شکل ۱ دیده می‌شود.

نصف فاصله‌ای که موج الکترومغناطیس در زمان بین دو پالس (یعنی PRT) طی می‌کند و آن برابر است با $R_{max} = \frac{C \cdot \Delta t}{2}$. ملاحظه می‌شود که حاصل ضرب حداکثر فاصله و حداکثر برد رادار عددی است ثابت که بستگی به طول موج رادار دارد. لذا هر چند با افزایش زمان بین دو پالس، برد اندازه‌گیری رادار بیشتر می‌شود، اما حداکثر سرعت قابل اندازه‌گیری آن کاهش می‌یابد. روش‌های متنوعی از جمله انتخاب PRT چندگانه برای کاهش این محدودیت وجود دارد. با محاسبه سرعت شعاعی باد و اجرای پردازش‌های بعدی نظیر روش باد یکنواخت^۱، امکان تخمین بردار باد که حاوی اطلاعات سرعت و جهت باد است وجود دارد. استفاده از چند رادار که بطور همزمان سرعت شعاعی باد را اندازه‌گیری می‌کنند بهبود قابل ملاحظه‌ای در تخمین بردار سرعت باد می‌دهد (Hagen et al., 2002). داشتن بردار سرعت باد



شکل ۱- نمونه خروجی بدست آمده فایل‌های حجمی رادار با کد نویسی انجام شده

از داده‌های اسکن حجمی رادار داپلری، با روش‌های مختلف پردازشی، برای هر یک از روش‌های VAD^۲ و VVP^۳

تحقیقات متنوعی در زمینه استفاده از داده‌های راداری برای تخمین سرعت و جهت باد صورت پذیرفته است که با استفاده

بصورت منحنی نشان می‌دهد.

۵. Volume Velocity Processing: روش پردازشی که همه مشخصه‌های دینامیک باد خطی (به غیر از چرخش) را از داده‌های حجمی رادار استخراج می‌کند.

۱. Pulse Repetition Time

۲. Uniform Wind Technique

۳. Plan Position Indicator

۴. Velocity-Azimuth Display: نوعی از نمایش سرعت باد در رادار که سرعت باد را برای ۳۶۰ درجه زاویه سمت الراس

چگونه داده‌های با فشردگی زمانی و مکانی بالا که توسط رادار هواشناسی تولید می‌شوند، در بهتر شدن ساختار این سیستم "کمک تصمیم‌گیر" تأثیر می‌گذارند (Trombe et al., 2014). در این مرجع مواردی نظیر تنظیمات رادار برای کارکرد بهتر برای پوشش روی دریا، نتایج تجارب بدست آمده از این تنظیمات بر روی رادار در عملکرد کمک تصمیم‌گیر و آینده رادارها در تولید انرژی بادی بررسی شده‌اند.

ب - سودار: سودار نوعی ابزار اندازه‌گیری از راه دور است که روی زمین نصب شده و امواج صوتی را تولید و به جو ارسال و پس از دریافت امواج بازگشتی از لایه‌های هوا (که دارای دما و بنابراین چگالی‌های متفاوت هستند) و پردازش آنها، کمیت‌هایی مانند سرعت و جهت باد و دما را در ارتفاعات مختلف اندازه‌گیری و محاسبه می‌کند. داده‌های هر ارتفاع، در واقع متوسط حجمی یک لایه (به شکل یک مخروط ناقص) از جو و از طرف دیگر متوسط بازه زمانی داده‌برداری هستند که البته بر روی دستگاه در محدوده‌ای قابل تنظیم است. در سودار از جابجایی داپلر برای اندازه‌گیری سرعت و جهت باد و از اختلاف چگالی لایه‌های هوا برای محاسبه افت دما نسبت به ارتفاع استفاده می‌شود. امواج صوتی ارسالی در حد شنوایی هستند و به وسیله مجموعه‌ای از بلندگوها تولید می‌شوند. از آن جایی که امواج صوتی در جو به سرعت تضعیف می‌شوند، آشکارسازی در ارتفاعات بالا امکان پذیر نمی‌باشد و کارایی در طول یک شبانه روز متغیر بوده و تابع شرایط جوی و محیطی می‌باشد. بیشینه ارتفاع اندازه‌گیری در دستگاه سودار معمولاً ۱۰۰۰ متر است. سودار به نوبه حاصل از خش‌خش برگ‌ها، آمد و شد خودروها و حتی مکالمات، حساس است. هنگامی که بادهای شدید می‌وزند، نوبه حاصل از خود باد نیز تأثیر زیادی روی داده‌ها می‌گذارد (Coulter, 2016).

از کاربردهای سودار بررسی ساختار توفان‌های همرفتی منطقه است. توفان‌های همرفتی میان‌مقیاس، از جمله پدیده‌های پرنرژی جو بوده که از نظر زمانی و مکانی به‌طور نامنظم رخ می‌دهند. فرآیندهای همراه آن‌ها اغلب مخرب و خطرآفرین‌اند. این پدیده‌ها اغلب به‌صورت چندتابی و پشت

پروفایل باد را بدست آورده است (Holleman, 2005). این مقاله، کنترل کیفیت دقیق و مفصلی را برای میزان باد شعاعی و بردار باد تولید شده، اعمال کرده و میزان در دسترس بودن و کیفیت داده‌ها در مقایسه با داده‌های جمع‌آوری شده از دیدبانی با رادیسوند و داده‌های مدل عددی هواشناسی در بازه ۹ ماهه را بررسی کرده است. نتایج به روشنی دقت بالایی داده‌های تولید شده باد توسط رادار هواشناسی را اثبات می‌کند.

نقش زمان بین دو تکرار پالس (PRT) در اندازه‌گیری داپلری در رادار و اثر آن بر حداکثر سرعت و حداکثر برد قابل اندازه‌گیری شناخته شده است. لازم است تعداد PRTهای مناسب برای بهترین اندازه‌گیری داپلری در رادار به گونه‌ای تعیین شود. در این خصوص روش‌های متعددی پیشنهاد شده است (Tahanout et al., 2015). در این روش تعیین PRT به گونه‌ای انجام می‌شود که بازسازی طیف داپلر به بهترین نحو برای رسیدن به حداکثر برد و حداکثر سرعت با محاسبه بر روی خود-همبستگی و تبدیل فوریه سیگنال برگشتی انجام شود. در این کار تخمین بردار باد از روی سرعت شعاعی باد، موضوعی کلیدی است که با استفاده از داده برداری دو رادار داپلری و روش حداکثر مشابهت مورد بررسی قرار گرفته است (Insanic & Siqueira, 2012). در این روش مهمترین منابع خطای اندازه‌گیری، بررسی شده و با بررسی رابطه بین خطای تخمین زده‌شده و اندازه‌گیری شده، عملکرد تخمین‌گر مورد بررسی قرار گرفته است و این عملکرد در صورت لزوم برای حداقل کردن نرُم خطا بهبود داده می‌شود.

سیستم هواشناسی 'DARTS'، یک نمونه از حال‌بینی لاگراژین غیر متغیر است که بر اساس داده‌های انواع مختلف رادارها ساخته شده و کاربرد خوبی در تخمین شرایط سخت جوی و سیستم‌های کمک تصمیم‌گیر^۲ در عملیات هوانوردی دارد (Ruzanski & Chandrasekar, 2015). DARTS بر اساس معادله عمومی پیوستگی که برای حال‌بینی اصلاح شده است، بنا شده است. پیاده سازی یک سیستم "کمک تصمیم‌گیر" خودکار برای مدیریت توربین‌های بادی نصب شده در دریا مبتنی بر داده‌های رادار هواشناسی، نشان می‌دهد که

متری با مقادیر اندازه‌گیری شده با رادیوسوند مقایسه شده است (Kumer et al., 2014). این مقایسه نشان می‌دهد که همبستگی متقابل بین دو مجموعه داده اندازه‌گیری شده، از مقدار $R=0.93$ در ارتفاع ۱۵۰ متر به مقدار $R=0.99$ در ارتفاع ۵۰۰ متر افزایش می‌یابد. لیدار به عنوان ابزاری برای اندازه‌گیری سرعت باد در فواصل تا حدود ۲۰۰ متری از توربین‌های بادی بر روی آن‌ها نصب می‌شود و به عنوان ابزاری برای سنجش سرعت باد و استفاده از آن به عنوان پیش‌خورد در کنترل توربین بادی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نتایج و بحث

چارچوب‌های نوین اندازه‌گیری سرعت باد

پیشرفت‌هایی که در ارتباطات و تکنولوژی‌های محاسباتی پدید آمده‌است و همچنین رشد سریع اینترنت، تقاضای فزاینده‌ای در خصوص بهبود عملکرد ادوات هواشناسی پدید آورده‌است. این موضوع تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر سیستم‌های جمع‌آوری داده در سرویس‌های هواشناسی گذاشته‌است. پیشرفت در افزایش سرعت تبادل و محاسبات و ذخیره‌سازی داده، منجر به این شده‌است که بتوان داده‌های اندازه‌گیری شده را با دقت‌های بالاتری منتقل و ذخیره‌سازی نمود. این پیشرفت‌ها، همچنین امکان سنجش‌های هواشناسی را در نقاط دور از دسترس فراهم آورده‌است. افزایش توان محاسباتی منجر به امکان پذیرش و پردازش داده‌های دقیق‌تر و بیشتر در مدل‌های هواشناسی شده‌است. نسل کنونی کامپیوترهایی که برای محاسبات عددی در مدل‌های هواشناسی به کار گرفته می‌شوند سیستم‌های با امکان پردازش موازی عملیات خیلی بالا (MPP) هستند. ساختار این سیستم‌ها از صدها نود تشکیل شده‌است که هر نود شامل یک حافظه اشتراکی بین ۲ تا ۱۶ پروسسور می‌شود که این نودها به وسیله شبکه خیلی سریع با توپولوژی‌های مختلف به هم متصل شده‌اند. برخی از این سیستم‌ها شامل پردازشگرهای برداری هستند که عملکرد بسیار خوبی برای پردازش داده‌ها دارند در حالی که MPPهایی که دارای پردازشگرهای RISK هستند، هزینه کمتری نسبت به پردازشگرهای برداری دارند. پردازشگرهای بر پایه RISC هر روز بیشتر و بیشتر به کار گرفته می‌شوند و

سرهم ظاهر می‌شوند که مربوط به فرآیند انتشار آن‌هاست. توفان‌های همرفتی ممکن است به صورت تک‌یاخته‌ای یا چندیاخته‌ای ظاهر شوند. مؤلفه قائم تندی متوسط رو به بالا، ممکن است وابسته به ارتفاع از سطح زمین به ۳۰ متر بر ثانیه و مؤلفه افقی ممکن است به ۵۰ متر بر ثانیه برسد. این امر می‌تواند برای پرواز هواپیما به دلیل برش‌های شدید قائم و افقی در سرعت باد، خطرآفرین باشد. داده‌های سودار، در کنار داده‌های حسگرهای محلی نصب شده روی دکل برای بررسی و تحلیل توان قابل حصول از باد در یک محل برای امکان سنجی نصب توربین بادی مورد استفاده قرار گرفته‌است. داده‌برداری توسط حسگرهای نصب شده بر روی دکل تا ارتفاع ۸۰ متری و داده‌برداری توسط سودار تا ارتفاع ۲۰۰ متری انجام شده‌است و مطابق بررسی‌های انجام شده، هزینه خرید و نگهداری سیستم سودار به مراتب کمتر از دکل هواشناسی است. هرچند اندازه‌گیری‌های بادسنج‌های روی دکل مقادیر دقیق‌تری را در همان نقطه بدست می‌دهند، اما بررسی‌های این تحقیق نشان داده‌است که برای بررسی توان قابل حصول از نیروگاه بادی، اندازه‌گیری‌های سودار با توجه به گستره افقی پوشش و هزینه تمام شده مناسب‌تر است (Khan & Tariq, 2017).

ج - لیدار: لیدار وسیله‌ایست که با ارسال و دریافت پالس‌های نور لیزر، اطلاعاتی از هدف بدست می‌آورد و کاربردهای وسیعی از جمله در نقشه برداری و هواشناسی دارد. اندازه‌گیری سرعت و جهت باد از کاربردهای عمده لیدار است که با توجه به سطح تحت پوشش آن امکان تشخیص تلاطم و چینش باد را فراهم می‌کند. اصول اندازه‌گیری سرعت همانند رادار استفاده از شیفت داپلر است. صحت و دقت عملکرد لیدار در اندازه‌گیری سرعت و جهت باد تا ارتفاع ۲۰۰ متری مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته و نشان داده شده که از دقتی مشابه با بادسنج‌های فنجان‌ی معمولی برخوردار است (Courtney et al., 2008). با توجه به آنتن گردان لیدارهای جدید امکان اسکن سه بعدی جو و کشف پدیده‌های خردمقیاس لایه مرزی مورد بررسی واقع شده و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط لیدار برای نیم‌رخ قائم باد تا ارتفاع ۲۵۰۰

استفاده از این سیستم‌ها موجب بهینه‌سازی سرعت و هزینه پردازش می‌شود. این نیاز موجب شده است که ابزار سنجش دقیق‌تر با گستره مکانی بیشتر و دقت زمانی و مکانی بیشتر بکار گرفته شود. پس از توسعه سیستم‌های سنجش از دور که به واسطه افزایش ظرفیت پردازش گره‌های دیجیتال اتفاق افتاد و امکان سنجش از دور پارامترهای هواشناسی را با دقت زمانی و مکانی خوب فراهم آورد، اکنون توسعه امکانات ارتباطی، شبکه‌های حسگر بی‌سیم^۱ را به شدت توسعه داده به گونه‌ای که فشردگی خوب مکانی و زمانی برای حسگرهای اندازه‌گیری "در محل" فراهم شده است.

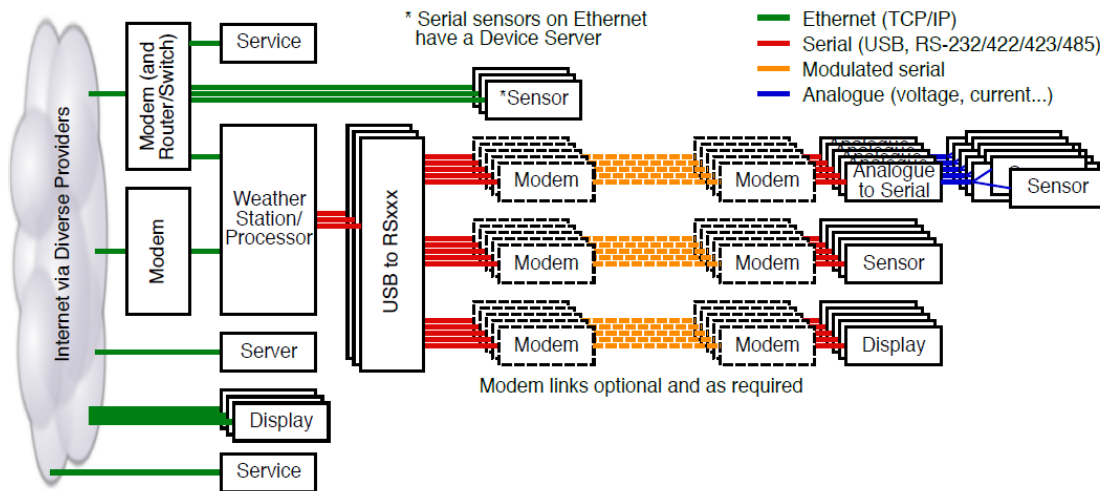
ورود فناوری اینترنت اشیا^۲ به اندازه‌گیری‌های هواشناسی در حال انجام است و این ورود مسایل و چالش‌های خاص خود را به دنبال داشته است. مانند سایر موارد، مسأله تامین انرژی در نبود برق شبکه، قابلیت اطمینان شبکه مخابراتی از چالش‌های مهم است. بستر اینترنت برای اتصال و ارسال دریافت از سوی حسگرها، و دریافت و نمایش اطلاعات در سمت نمایشگرها و بانک‌های داده و یا ارتباط دو طرفه مانند گوشی‌های هوشمند بکار گرفته می‌شود. ابعاد ارتباط بر روی اینترنت به راحتی قابل تغییر است و امکان اتصال کل شبکه جهانی پایه پارامترهای جهانی به آن وجود دارد. که در این صورت سوالات و چالش‌هایی فرا روی خواهد بود از جمله تصمیم در ثبت تمام یا بخشی از اندازه‌گیری‌ها، حل مسأله سرریز اطلاعات، ابزار نمایش هوشمند، الگوریتم‌های کنترل کیفی داده، صدور اخطار، پرکردن خلاءهای داده، چگونگی

ساماندهی حجم بالای اطلاعات، آرشیو و ذخیره‌سازی بلند مدت داده، مالکیت معنوی داده و موارد مشابه، مواردی است که نیاز به بررسی دارد. در یک شبکه مبتنی بر اینترنت اشیا، خودروها، گوشی‌های هوشمند، تک تک وسایل هوشمند در منزل و خیابان، می‌توانند به عنوان عضوی از شبکه حضور داشته باشند و به صورت یک نقطه فعال داده‌های هواشناسی را جمع و ارسال نمایند و یا از سایر منابع، این اطلاعات را برای نمایش دادن دریافت نمایند. در این ساختار تمام حسگرها و نمایشگرها در بستر اینترنت تبادل داده می‌کنند و این اتصال جهانی نه تنها در امر تبادل داده بلکه در تنظیمات سیستم‌ها و مدیریت آن و فرآیندها تعمیرات و نگهداری بکار گرفته می‌شود. سامانه‌های پایش جوی در مدل مرسوم حاضر مجموعه‌ای از حسگرها هستند که اطلاعات اندازه-گیری شده محیطی را از طریق درگاه‌های آنالوگ و دیجیتال به یک جمع‌کننده داده^۳ ارسال می‌کنند و این جمع‌کننده، داده‌ها را از طریق سیستم‌های ارتباطی به مرکز جمع‌آوری اصلی می‌فرستد و نمایشگرها با دریافت داده از مرکز اصلی امکان نمایش آن‌ها را فراهم می‌کند. در مدل مبتنی بر اینترنت اشیا هر یک از حسگرها به تنهایی دارای توانایی اتصال به اینترنت و تبادل داده بر بستر اینترنت هستند و هر یک از نمایشگرها نیز به تنهایی قابلیت اتصال به اینترنت و دریافت داده از هر یک از آن‌ها را دارد و بدیهی است که پرتکل ارتباطی تمام نقاط اتصال TCP/IP می‌باشد.

^۳ Dataloger

^۱ Wireless Sensor Network

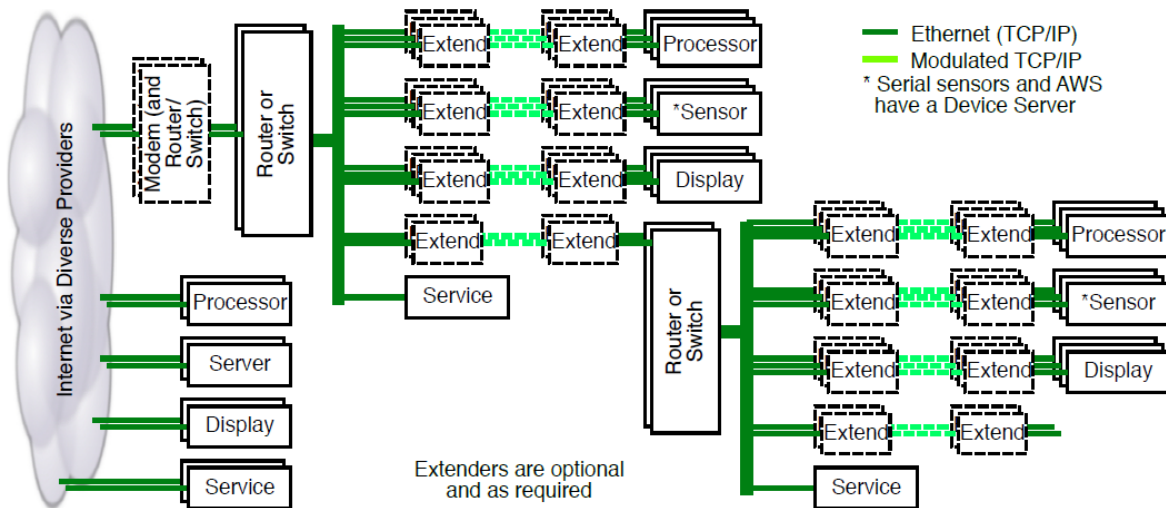
^۲ Internet Of Things



شکل ۲- مدل ارتباطات در ساختار سنتی در هواشناسی نیوزلند

بر خط، ایجاد شود. در شکل مدل ارتباطات سنتی در هواشناسی نیوزلند مشاهده می‌شود و همانطور که دیده می‌شود، خروجی حسگرها پس از عبور از مبدل لازم، از طریق ارتباط مستقیم و یا با واسطه مودم، به جمع‌کننده داده متصل می‌شوند و از آنجا برای کاربران در فضای اینترنت قرار می‌گیرند.

این رویه که توسط سازمان هواشناسی نیوزلند به مرحله اجرا درآمده، در ابتدا موجب بوجود آمدن هزینه بالایی در پیاده‌سازی الزامات این شبکه شد و در ادامه موجب کاهش قابل ملاحظه‌ای در هزینه‌های عملیاتی این شبکه گردید و علاوه بر این موجب شد مزایای فراوانی از جمله کاهش زمان نمونه‌برداری به یک دقیقه، پایش برخط میزان کارایی سیستم، تعمیرات از راه دور صورت بر خط و استفاده از دوربین‌های



شکل ۳- مدل ارتباطات هواشناسی نیوزلند در ساختار جدید مبتنی بر IOT

اینترنت اشیا بنا نهاده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این ساختار، تمام ارتباطات بر اساس پرتکل TCP/IP بنا نهاده شده که اولین قدم برای ایجاد ساختار اینترنت اشیا

شکل شمای شبکه جدید نیوزلند را نشان می‌دهد که بر اساس

- است. در این شبکه تمامی پردازش‌گرها، حسگرها و نمایشگرها، یا بصورت مستقیم و یا از طریق یک واسط ارتباطی به یک سویچ یا روتر متصل می‌شوند و از آن طریق به شبکه جهانی اینترنت متصل می‌شوند. هر پردازش‌گر، حسگر و نمایشگری دیگر، برای اتصال کافی است به شبکه اینترنت متصل باشد و با سایر مجموعه‌ها تبادل داده نماید. شناخت روندهای جهانی برای سازمان‌های خدماتی نظیر سازمان هواشناسی از منظر کارایی و اثربخشی اهمیت والایی دارد. چرا که سازمان هواشناسی بایستی شناخت مناسبی از محیط و تغییرات آن داشته باشد تا در صحنه عمل غافلگیر نشده و در انجام وظایف خود موفق باشد. شناخت و تحلیل روند یکی از روش‌های آینده پژوهی است که به روندهای جهانی "هوشمندسازی" کمک می‌کند. شهر هوشمند، خانه هوشمند، شبکه برق هوشمند، حمل و نقل هوشمند و خودرو هوشمند از جمله طرح‌هایی هستند که در حال بررسی، تبیین، اجرا و پیاده‌سازی در دنیا هستند. شهرهای جهان و امور مرتبط با آن‌ها به سمت هوشمندی میل می‌کنند. اداره شهرهای هوشمند، "هواشناسی هوشمند" لازم دارد زیرا این سازمان بایستی وظایف پایش، نظارت، تجزیه و تحلیل داده‌ها، پردازش اطلاعات، اقدامات پیش‌بینی و کاهش اثرات و اقدامات پس از وقوع رویدادها را با سرعت و دقت و هوشمندی انجام دهد.
- هوشمند شدن کاربران، افزایش توان تحلیل و افزایش سطح انتظارات
 - انفجار اطلاعات و حجم بالای اطلاعاتی که تولید می‌شوند.
 - افزایش توان پردازش و سرعت بالای دریافت، هضم و بکار بست اطلاعات از سوی کاربران
 - ظهور تجهیزات هوشمند نظیر خودروهای بدون راننده و پرنده در جاده‌ها.
 - هوشمند شدن صنایع مرتبط نظیر کشاورزی، منابع تولید و شبکه توزیع برق.

روش‌های پیش‌بینی باد

مبنای کلیه روش‌های پیش‌بینی باد استفاده از آخرین مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت و جهت باد است. این مقادیر در ساده‌ترین فرم توسط ادوات سنجش مستقر در سطح زمین اندازه‌گیری می‌شوند. ادوات شامل انواع سنجنده‌های جهت و سرعت باد می‌باشد. جایابی بادسنج‌ها، ترکیب داده‌های بادسنجی، دقت اندازه‌گیری در شرایط مختلف آب و هوایی، آرایش بهینه بادسنج‌ها و شبکه کردن آن‌ها، موضوعاتی هستند که طی دو دهه گذشته خصوصاً با اهداف گسترش نفوذ انرژی بادی، به آن‌ها پرداخته شده است و سعی شده است پیش‌بینی باد و تخمین توان از داده‌های بادسنجی بهبود یابد (Zolfaghari et al., 2015)، (Trombe et al., 2014) و (Milan et al., 2014). روش‌های مختلفی که برای پیش‌بینی باد معرفی می‌شوند بسته به زمان مورد نظر برای افق پیش‌بینی دارای کارایی متفاوتی هستند. پیش‌بینی‌ها در هواشناسی بسته به افق زمانی به چهار دسته اصلی تقسیم می‌شوند که عبارتند از خیلی کوتاه مدت، کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت که محدوده افق زمانی هر یک به همراه برخی کاربردهای آن در صنعت برق، در جدول آمده است.

شواهدی از قبیل موارد زیر که همگی محصول فناوری‌های جدید هستند، نشان می‌دهند که ساختار سازمان‌های هواشناسی بایستی هرچه سریعتر هوشمند شوند و گرنه نمی‌تواند نیاز کاربران را بدرستی و در زمان مناسب برآورده کند و جایگاه خود را به نهادهای غیر رسمی می‌دهند.

ظهور و بروز پدیده‌های اجتماعی نوین نظیر زندگی دیجیتال، گرایشات رسانه‌ای، ...

جدول ۱- تقسیم‌بندی پیش‌بینی باد بر اساس افق زمانی

کاربرد	محدوده زمان	مقیاس زمانی
تصحیح بازار برق		
کاربری بر خط شبکه برق	چند دقیقه تا یک ساعت	خیلی کوتاه مدت
عملیات تنظیم		
برنامه‌ریزی توزیع اقتصادی	یک ساعت تا ۶ ساعت	کوتاه مدت

تصمیم‌گیری در مورد بار		
امنیت در عملیات بازار برق		
تصمیم‌گیری درباره مشارکت واحدها		
تصمیم‌گیری در مورد رزرو موردنیاز	۶ ساعت تا یک هفته	میان‌مدت
تصمیم‌گیری در مورد خاموش و روشن ژنراتورها		
برنامه‌ریزی تعمیرات		
مدیریت عملیاتی	یک هفته تا یک سال و بیشتر	بلندمدت
بهینه کردن هزینه کاربری		
امکان‌سنجی طراحی مزرعه بادی		

پیش‌بینی‌های عددی هواشناسی و اعمال تصحیحات لازم بر اساس روابط فیزیکی حاکم بر جو در ارتفاع پایین، پیش‌بینی‌ها را به شرایط محل قرارگیری مزرعه بادی منتقل می‌کند (Bhaskar & Singh, 2012).

روش‌های مبتنی بر داده در پیش‌بینی باد، به سه دسته عمده تقسیم می‌شوند. دسته اول شامل روش‌های آماری هستند که روش‌های شناخته شده‌ای مبتنی بر سری‌های زمانی هستند و انواع روش‌های برون‌یابی و رگرسیون را شامل می‌شوند. دسته دیگر روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی هستند که مبنای اصلی آنها الگوریتم‌های تکاملی و روش‌های یادگیری ماشین است و دسته آخر روش‌های مبتنی بر احتمال هستند که احتمال وقوع فرآیندها را پیش‌بینی می‌کنند (مانند مدل مارکوف). شکل شمایی از انواع روش‌های موجود در پیش‌بینی کوتاه مدت باد را نشان می‌دهد.

بطور کلی در این گونه روش‌ها، چارچوبی بر اساس داده‌های بلند مدت جمع‌آوری شده با دقت زمانی مطلوب ساخته می‌شود و سپس با استفاده آن و بر اساس داده‌های برخط جهت و سرعت باد حال حاضر، سرعت و جهت باد برای آینده نزدیک پیش‌بینی می‌شود.

بنا بر نیاز روش‌هایی بر مبنای ترکیب انواع مختلف روش‌های پیش‌بینی معرفی و بکارگرفته شده‌اند. هدف از مدل‌های ترکیبی به دست آوردن مزایای هر یک از مدل‌ها و در نتیجه به دست آوردن بهترین عملکرد کلی برای پیش‌بینی است (Wu & Hong, 2007). از آنجایی که اطلاعات موجود در هر یک از روش‌های منفرد پیش‌بینی محدود است، مدل ترکیبی می‌تواند اطلاعات در دسترس را بیشینه کرده، اطلاعات مدل‌های منفرد را جمع‌بندی کند و بهترین استفاده را از مزایای روش‌های

ساده‌ترین روش پیش‌بینی باد که در افق خیلی کوتاه مدت کارایی خوبی دارد روش تداوم است. روش تداوم بر اساس این فرض ساده بنا نهاده شده است که سرعت یا توان باد در گام زمانی بعدی با مقدار آن در حال حاضر برابر است. روش تداوم، در پیش‌بینی‌های خیلی کوتاه‌مدت از سایر روش‌ها دقیق‌تر است اما با افزایش افق زمانی پیش‌بینی، این روش به سرعت دقت خود را از دست می‌دهد (Wu & Hong, 2007). این روش نه تنها که ساده‌ترین بلکه ارزان‌ترین روش است که توسط راهبران شبکه برق برای پیش‌بینی خیلی کوتاه‌مدت استفاده می‌شود و هر روش دیگری در ابتدا با این روش مقایسه می‌شود.

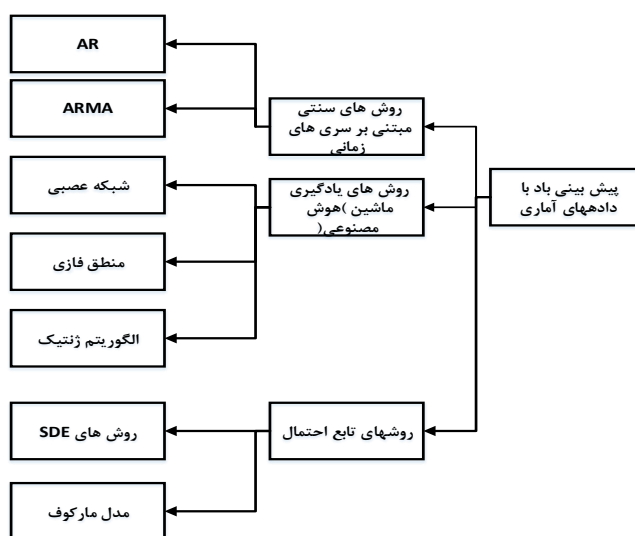
روش‌های پیش‌بینی باد به دو گروه عمده یعنی پیش‌بینی بر اساس مدل‌های فیزیکی و پیش‌بینی بر اساس مدل‌های ساخته شده بر اساس داده تقسیم می‌شوند.

مدل‌های فیزیکی بر مبنای روابط فیزیکی حاکم بر جو نزدیک زمین بنا نهاده شده‌اند و با استفاده از داده‌های جوی مانند دما و فشار که از روش‌های پیش‌بینی عددی هواشناسی به دست می‌آیند و با در نظر گرفتن ناهمواری‌های سطح زمین پیش‌بینی باد را انجام می‌دهند. مدل‌های پیش‌بینی عددی هوا، توسط هواشناسان برای پیش‌بینی‌های بزرگ‌مقیاس وضع هوا ساخته شده است.

(Lei et al., 2009). مدل‌های فیزیکی به علت نیاز به توان محاسباتی بالا، با استفاده از ابررایانه‌ها اجرا می‌شوند. در این مدل‌ها به‌طور معمول داده‌های مدل‌های عددی هواشناسی که با دقت مکانی کم تولید می‌شوند، با توجه به شرایط محلی به محل مزارع بادی منتقل می‌شوند (Kariniotakis et al., 2006). روش‌های تجاری موجود با دریافت خروجی

هدف و نقاط مجاور آن برای پیش‌بینی سرعت باد در نقطه هدف، به کار گرفته می‌شود. به عنوان نمونه، می‌توان به بکارگیری یک شبکه عصبی-فازی دینامیک با فیدبک محلی (LF-DFNN) برای پیش‌بینی سرعت باد بر اساس همبستگی مکانی اشاره کرد (Barbounis & Theocharis, 2007). در اجرای این روش، بر اساس موقعیت سایت مبنا، دونقطه به‌عنوان سایت‌های جانبی در فواصلی از سایت مبنا، انتخاب شده‌اند و تجهیزات هواشناسی در آن‌ها نصب شده است.

پیش‌بینی چندگانه فراهم کند و بدین طریق پیش‌بینی را بهبود بخشد (Zhao et al., 2011). در روش‌های ترکیبی، روش‌های متفاوت مانند روش‌های فیزیکی و روش‌های آماری و یا مدل‌های کوتاه‌مدت و میان‌مدت ترکیب می‌شوند و برای پیش‌بینی توان باد استفاده می‌شوند (Soman et al., 2010). در کنار روش‌های معرفی شده روش همبستگی مکانی نیز وجود دارد. مدل‌های همبستگی مکانی، ارتباط مکانی سایت‌های مختلف را در خصوص سرعت باد در نظر می‌گیرند. در این مدل‌های سری زمانی سرعت باد در نقطه



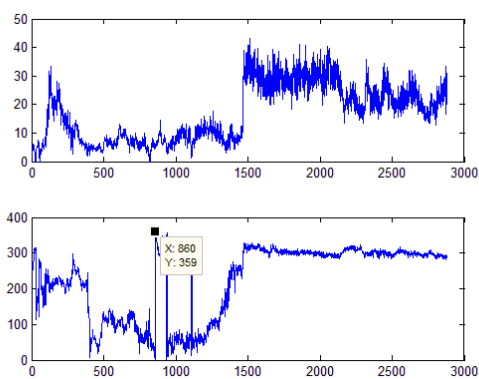
شکل ۴- روش‌های پیش‌بینی کوتاه مدت سرعت و جهت باد

داده‌های جمع‌آوری شده از بادسنج‌های نصب شده در فرودگاه امام خمینی در یازدهم فروردین ۱۳۹۴ به منظور بررسی همبستگی مکانی مقادیر سرعت باد مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

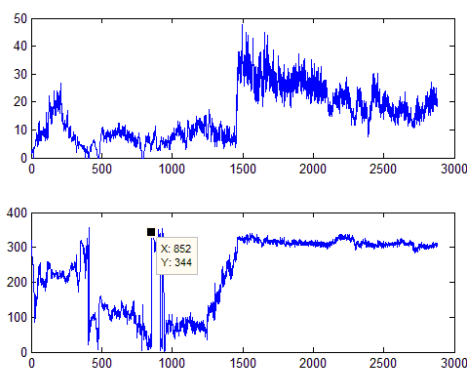


شکل ۵- قرارگیری دو سایت بادسنجی در فرودگاه امام خمینی

دو سایت باندسنجی که در شکل ملاحظه می‌شوند در فاصله تقریبی ۳ کیلومتر از هم در باند ۲۹ و باند ۱۱ قرار گرفته‌اند. جهت و سرعت باد در هر دو سایت با بادسنج فراصوت اندازه‌گیری شده و داده‌ها با فرکانس دو هرتز ذخیره شده‌اند.



شکل ۱۱ (ب) باند ۱۱



شکل ۲۹ (الف) باند ۲۹

شکل ۶- نمودار سرعت و جهت باد در دو سایت ۱۱ و ۲۹ فرودگاه امام خمینی

چون رادیوسوند با وزش باد حرکت می‌کند، اندازه‌گیری سرعت خود رادیوسوند یک تخمین خوبی از بردار ۲ بعدی افقی سرعت باد در اختیار ما قرار می‌دهد. داده‌های رادیوسوند که در این تست استفاده شده متعلق به ۲۷ نوامبر سال ۲۰۰۹ می‌باشد که از پوشه داده‌های خام و توسط نرم‌افزار Graw-Met استخراج شده است. پوشه داده‌ها شامل پارامترهای مختلفی مانند موارد زیر می‌باشد:

Alt[m]	Temp[°C]	Press[mB]	Hum[%]	Wd[°]	Ws[kn]
1	16.9	1013.3	88	293	0

از میان این پارامترها، ارتفاع (Alt)، سمت باد (Wd) و سرعت باد (Ws) از موارد مورد نیاز برای مقایسه می‌باشند. این پوشه حاوی داده‌های متوالی با توجه به صعود بالن می‌باشد. فاصله بین هر داده، برای آغاز صعود، ۱ متر و در پایان ۱۰۰ متر می‌باشد. بنابراین پوشه داده‌ها تفکیک مکانی مورد نیاز را داراست. واحد سرعت باد نات است که برای مقایسه آسان‌تر به متر بر ثانیه تبدیل می‌شود.

در این تاریخ صعود رادیوسوند در ساعت ۲۳:۴۸ از موقعیت ایستگاه زمینی در مجاورت فرودگاه اهواز با طول جغرافیایی ۴۸/۷۴ و عرض جغرافیایی ۳۱/۳۴ شروع می‌شود و به سمت شمال شرقی حرکت می‌کند.

در همان تاریخ صعود رادیوسوند، نزدیکترین اسکن برای رادار انتخاب شده و دو محصول VVP و CAPPI نیز بوسیله نرم‌افزار سامانه رادار تولید شده است. کار استخراج

همانطور که با مقایسه دو قسمت (الف) و (ب) شکل ملاحظه می‌شود، نمودارهای سرعت و جهت باد در نظر گرفتن یک اختلاف زمانی ثابت تقریباً مشابه هستند. در شکل قسمت (الف) ملاحظه می‌شود یک تغییر جهت شدید در نمونه ۸۵۲ در سایت باند ۲۹ وجود داشته است و مشابه همین الگوی تغییر جهت، در شکل قسمت (ب) ملاحظه می‌شود که با ۴ دقیقه تأخیر در سایت باند ۱۱ نمونه ۸۶۰ اتفاق افتاده است. این موضوعی است که نشان از همبستگی مکانی سرعت باد دارد و امکان استفاده از آن در پیش‌بینی سرعت و جهت باد را فراهم می‌کند.

مقایسه سنجش سرعت باد با رادار و رادیوسوند

در این بخش مقایسه‌ای بین مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت باد با استفاده از دو روش سنجش در محل و سنجش از راه دور ارائه می‌شود. برای این منظور از داده‌های سرعت باد اندازه‌گیری شده توسط رادیوسوند (روش سنجش در محل) و رادار داپلر باند S (روش سنجش از راه دور) که نزدیکی شهر اهواز (جنوب غربی ایران) مستقر است، استفاده شده است. رادیوسوند مورد استفاده در این تست ساخت شرکت Graw و رادار هواشناسی داپلر، یک رادار تک پلاریزه با فرستنده کلاسترون باند S، ساخت شرکت SELEX-Gematronik می‌باشد. رادیوسوند مورد نظر برای اندازه‌گیری سمت و سرعت باد از GPS استفاده می‌کند.

دریا تولید می‌شود.

۱ knot

۲ مشابه محصول PPI است که برای نقاط با ارتفاع ثابت از سطح

سرعت (نات)

جهت (درجه)

برداری رادار نیز ۲۳:۵۰ روز ۲۷ نوامبر سال ۲۰۰۹ می‌باشد که نشان می‌دهد داده‌ها هم زمانی خوبی دارند.

۱۰۰۰۰ متر ارائه شده است.

در این جدول درصد اختلاف بین داده سرعت اندازه‌گیری

شده توسط رادیوسوند (مقادیر ستون سوم $Ws(\text{radiosond})$) و داده VVP رادار (مقادیر ستون پنجم $Ws(VVP)$) با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

نمودار مقادیر اختلاف بدست آمده نیز در **Error!** **Reference source not found.** نشان داده شده است.

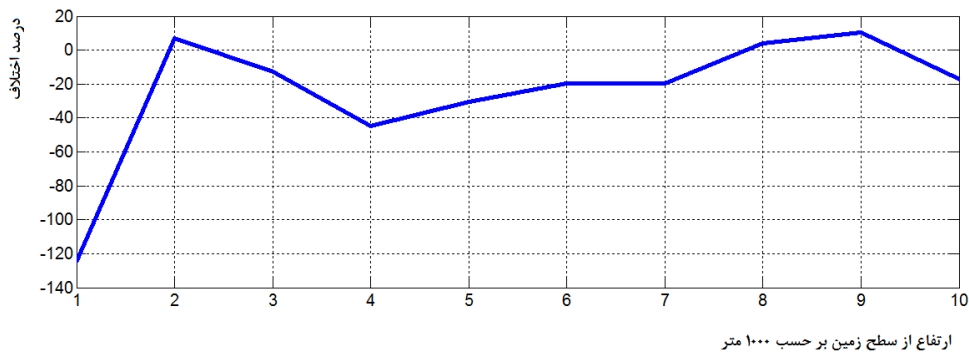
$$\text{Value} = 100 \times \left(\frac{Ws(\text{radiosond}) - Ws(VVP)}{Ws(\text{radiosond})} \right) \quad (۸)$$

داده‌های عددی از فایل‌های داده‌ای که رمزگذاری شده هستند، با کد نویسی در محیط Visual Basic انجام شده است. قابل ذکر است که داده VVP برای هر ۲۰۰ متر و داده CAPPI برای هر ۱۰۰۰ متر استخراج شده است. زمان شروع داده

جدول مقادیر داده‌های سرعت رادیوسوند و مقادیر سرعت تولید شده توسط محصول VVP رادار را ارائه می‌کند. در این جدول سه ستون اول، داده‌های رادیوسوند را نشان می‌دهد به صورتی که ستون اول، ارتفاع رادیوسوند، ستون دوم، جهت باد و ستون سوم سرعت باد اندازه‌گیری شده توسط رادیوسوند می‌باشد. مقایسه داده‌ها برای ارتفاع‌های ۱۰۰۰ تا

جدول ۲- مقایسه داده‌های رادیوسوند و داده‌های VVP رادار

RADIOSONDE		VVP RADAR			Difference % - Between wind speed by radiosonde vs VVP product
Alt[m]	Wd[°]	Ws(m/s)	Wd[°]	Ws(m/s)	
1000	152	1.0288	18.366	2.302	-123.79
2000	219	8.2304	226.27	7.655	6.99
3000	206	9.2592	212.06	10.46	-12.95
4000	217	8.7448	211.32	12.67	-44.86
5000	221	13.3744	214.34	17.42	-30.27
6000	214	16.4608	217.99	19.69	-19.64
7000	212	18.004	221.15	21.53	-19.56
8000	215	22.1192	220.52	21.29	3.76
9000	219	26.7488	229.55	24.01	10.25
10000	226	25.72	234.68	30.12	-17.10



شکل ۷- درصد اختلاف داده‌های سرعت باد رادیوسوند و داده‌های VVP رادار

نمودار **Error! Reference source not found.** نشان

می‌دهد که با افزایش ارتفاع مقادیر سرعت رادیوسوند و مقادیر VVP رادار به هم نزدیک‌تر می‌شوند.

جدول مقایسه بین داده سرعت رادیوسوند و داده CAPPI رادار را ارائه می‌کند. در این جدول نیز مقایسه داده‌ها برای ارتفاع‌های ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ متر ارائه شده است.

جدول ۳- مقایسه داده‌های رادیوسوند و داده‌های CAPPI رادار

RADIOSOND				CAPPI- RADAR		
Alt[m]	Wd[°]	Ws(m/s)	angle	wind component along radius by radiosond (m/s)	Radial Velocity(m/s)	Difference % - between redial velocity and wind component along the radius by radiosond
1000	152	1.0288	92.7	-0.04	-2.2	
2000	219	8.2304	25.7	7.41	6.1	17.75
3000	206	9.2592	38.7	7.22	8.3	-14.82
4000	217	8.7448	27.7	7.74	7.8	-0.72
5000	221	13.3744	23.7	12.24	13.5	-10.22

6000	214	16.4608	30.7	14.15	15.2	-7.37
7000	212	18.004	32.7	15.15	18.3	-20.76
8000	215	22.1192	29.7	19.21	21.8	-13.44
9000	219	26.7488	25.7	24.10	23	4.58
10000	226	25.72	18.7	24.36	24	1.49

ستون اول تا سوم این جدول همانند

$$a = 180 + \text{RdAngle} - \text{Wd} \quad (9)$$

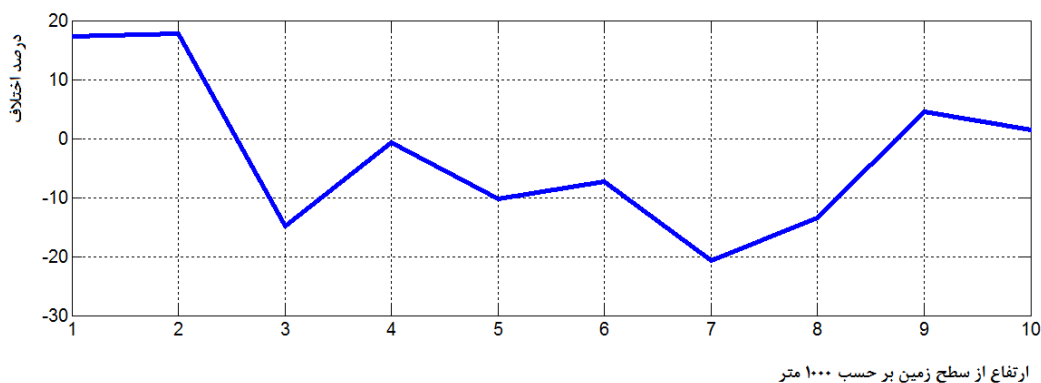
در این رابطه، RdAngle زاویه azimuth رادیوسوند از نقطه رادار و Wd جهت باد اندازه‌گیری شده توسط رادیوسوند است. مقدار این زاویه برای محاسبه مقادیر ستون پنجم (مؤلفه تصویر شده باد رادیوسوند در راستای شعاع) و با استفاده از رابطه (۱۰) بکار می‌رود.

جدول، شامل داده‌های رادیوسوند می‌باشد ولی ستون چهارم زاویه بین بردار سرعت باد و شعاع دایره رادار در راستای نقطه تست (رادیوسوند) است که می‌تواند با استفاده از رابطه (۹) محاسبه شود.

$$\text{wind component along radius by radiosond (m/s)} = \text{Ws (third column)} \times \text{Cos}(a) \quad (10)$$

است. همان‌طور که در این نمودار نیز مشخص است با افزایش ارتفاع به شباهت بیشتری در مقادیر داده‌های رادیوسوند و رادار می‌رسیم.

درصد اختلاف بین مؤلفه تصویر شده باد رادیوسوند در راستای شعاع (ستون پنجم) و سرعت شعاعی (ستون ششم) نیز مشابه رابطه (۸) محاسبه می‌شود که نمودار آن در **Error! Reference source not found.** رسم شده



شکل ۲- نمودار درصد اختلاف داده‌های سرعت باد رادیوسوند و داده‌های CAPPI رادار

همراه با اتخاذ تصمیم‌های کنترلی مناسب پدید می‌آورد. پدیده‌ها و کاربردهای معرفی شده هر یک زمینه تحقیقات بسیاری بوده‌اند و برای پایش و کشف آن‌ها ابزارهای مناسب

نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری و کشف پدیده‌های مرتبط با باد در کنار پیش‌بینی این پدیده‌ها، امکان پیش‌آگاهی از اثرات مخرب احتمالی آن‌ها

پیاده‌سازی مدل‌های مناسب و استفاده از داده‌های راداری تا حد زیادی ممکن خواهد بود. پوشش خوبی که این شبکه بر روی برخی فرودگاه‌ها دارد، امکان بالقوه‌ای را برای کشف و هشدار چینش باد و مایکروپرست پدید می‌آورد، که البته عملکرد ترکیبی آن با سایر سنجنده‌های مرتبط مانند لیدار و سودار می‌تواند نتایجی به مراتب بهتر فراهم کند. روش‌ها و ابزار معرفی شده برای سنجش باد بطور خلاصه در جدول معرفی شده و مشخصه‌های اصلی آن‌ها با هم مقایسه شده‌اند.

بصورت تکی و ترکیبی معرفی شده‌اند. ابزارهای سنجش از دور، به دلیل پیشرفت تکنولوژی و افزایش توان پردازش، هم در حوزه طراحی سخت افزاری هم در حوزه تولید محصولات نرم افزاری جدید روز به روز بیشتر مطرح می‌شوند. شبکه ملی رادار ایران که بخشی از کشور را پوشش می‌دهد، با انجام تحقیقات مناسب و پیاده‌سازی روش‌های مناسب برای کشف پدیده‌ها، می‌تواند استفاده مناسبی در پایش و کشف پدیده‌های مرتبط با باد داشته باشد. کشف و پیش‌بینی پدیده‌های مخربی مانند توفان سال ۱۳۹۳ تهران، با

جدول ۴- مقایسه مشخصات ابزار سنجش باد

مدل بادسنج	محدوده سنجش (متر بر ثانیه)	سرعت نمونه برداری	صحت	اندازه‌گیری تالاطم	چینش باد قائم	چینش باد افقی	شرایط محیطی
بادسنج ایدآل	۲۰۰-۰	۱۰۰۰هرتز	٪۱۰۰	بله	بله	بله	همه شرایط
فنجانی	۷۵-۴۰	۱هرتز	±٪۲	محدود	خیر	بله	همه شرایط
فراصوت	۶۵-۰	۲۰هرتز	±٪۵	خیر	خیر	خیر	همه شرایط
سیم داغ	۲۰۰-۰	۱۰۰۰هرتز	±٪۱	بله	خیر	خیر	شرایط خاص
لیدار	۷۵-۰	۱هرتز	±٪۵	بله	خیر	بله	غیر از بارش سنگین
سودار	۷۵-۰	۱هرتز	±٪۵	فقط در هوای صاف	خیر	بله	غیر از بارش سنگین
رادار	۶۵-۰	یک دهم هرتز	±٪۲	فقط در بارندگی	فقط در بارندگی	فقط در بارندگی	فقط در بارندگی

Principles, Modelling and Gain Scheduling Design: Springer London.

- Coulter, R. L., 2016, Sonic Detection and Ranging (SODAR) Wind Profiler Instrument Handbook. U. S. Department of Energy, Office of Science.
- Courtney, M., Wagner, R., & Lindelöw, P., 2008, Testing and comparison of lidars for profile and turbulence measurements in wind energy. Paper presented at the IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*.
- Fernandes, D., Gomes, L., & Costa, A., 2017, Wind speed and direction measurement based on time of flight ultrasonic anemometer. the 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE).
- Hagen, M., Friedrich, K., Seltmann, J., 2002, Wind-Field Observations with the Operational Doppler Radar Network in Germany. Proceedings of ERAD, 195-199.

مراجع

- Barbounis, T. G., & Theocharis, J. B., 2007, A locally recurrent fuzzy neural network with application to the wind speed prediction using spatial correlation. *Neurocomputing*, 70(7), pp. 1525-1542.
- Barthelmie, R., Crippa, P., Wang, H., Smith, C., Krishnamurthy, R., Choukulkar, A., Matthiesen, D., 2014, 3D wind and turbulence characteristics of the atmospheric boundary layer. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(5), pp.743-756 .
- Bhaskar, K & Singh, S. N., 2012, AWWN-Assisted Wind Power Forecasting Using Feed-Forward Neural Network. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 3(2), pp. 306-315.
- Bianchi, F. D., de Battista, H., Mantz, R. J., 2006, Wind Turbine Control Systems:

- Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 6(3) .
20. Morrissey, M. L., Cook, W. E., Greene, J. S., 2010, An improved method for estimating the wind power density distribution function. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 27(7), pp. 1153-1164 .
 21. Pindado, S., Cubas, J., Sorribes-Palmer, F., 2014, The Cup Anemometer, a Fundamental Meteorological Instrument for the Wind Energy Industry. Research at the IDR/UPM Institute. *Sensors* (Basel, Switzerland), 14(11).
 22. Pindado, S., Pérez, J., & Avila-Sanchez, S., 2012, On Cup Anemometer Rotor Aerodynamics. *Sensors*, 12(5).
 23. Ruzanski, E., & Chandrasekar, V., 2015, Weather Radar Data Interpolation Using a Kernel-Based Lagrangian Nowcasting Technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(6), pp.3073-3083.
 24. Soman, S. S., Zareipour, H., Malik, O., & Mandal, P., 2010, A review of wind power and wind speed forecasting methods with different time horizons. The North American Power Symposium, 26-28 Sept.
 25. Tahanout, M., Adane, A. E. H., Châtelet, J. P. d., 2015, An Improved M-PRT Technique for Spectral Analysis of Weather Radar Observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(10), pp.5572-5582.
 26. Trombe, P.-J., Pinson, P., Vincent, C., Bøvith, T., Cutululis, N. A., Draxl, C., Sommer, A., 2014, Weather radars – the new eyes for offshore wind farms? *Wind Energy*, 17(11), pp.1767-1787.
 27. Wang, X., Dong, X., Zhou, Y., Ni, K., Cheng, J., & Chen, Z., 2013, Hot-Wire Anemometer Based on Silver-Coated Fiber Bragg Grating Assisted by No-Core Fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, 25(24), pp. 2458-2461.
 - Wu, Y.-K., & Hong, J.-S., 2007, A literature review of wind forecasting technology in the world. The Power Tech, 2007 IEEE Lausanne.
 28. Yanfei, H., Xia, L., Xiaoguang, L., Hai, L., Wu, R., 2016, The 3D modeling and radar simulation of low-altitude wind shear via computational fluid dynamics method. The 2016 Integrated Communications Navigation and Surveillance (ICNS). 19-21 April.
 29. Zhao, D., Zhu, Y., & Zhang, X., 2011, Research on wind power forecasting in wind farms. The 2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference. 8-9 Sept.
 9. Holleman, I., 2005, Quality Control and Verification of Weather Radar Wind Profiles. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22(10), pp.1541-1550.
 10. Insanic, E., & Siqueira, P. R., 2012, A Maximum Likelihood Approach to Estimation of Vector Velocity in Doppler Radar Networks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(2), 553-567.
 11. Kariniotakis, G., Marti, I., Nielsen, T., Giebel, G., Tambke, J., Waldl, I., Focken, U., 2006, Advanced short-term forecasting of wind generation-anemos. IEEE Trans. On Power Systems-invited paper to Special Section on Power System Performance Issues Associated with Wind Energy, 1-9 .
 12. Khan, K. S., & Tariq, M., 2017, Wind resource assessment using SODAR and meteorological mast – A case study of Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
 13. Kiani, M., & Pourtakdoust, S., H., 2009, Evaluation of microburst models for estimation of hazard index. 8th Iranian congress on Aerospace, Iran, Isfahan.
 14. Kumer, V.-M., Reuder, J., & Furevik, B. R., 2014, A Comparison of LiDAR and Radiosonde Wind Measurements. *Energy Procedia*, 53(Supplement C), 214-220.
 15. Kumjian, M., 2013, Principles and Applications of Dual-Polarization Weather Radar. Part I: Description of the Polarimetric Radar Variables, 1.
 16. Lei, M., Shiyang, L., Chuanwen, J., Hongling, L., & Yan, Z., 2009, A review on the forecasting of wind speed and generated power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(4), pp. 915-920.
 17. Li, H., Zhou, M., Wu, R., & Han, Y., 2016, Wind speed estimation of low-altitude wind-shear based on multiple Doppler channels joint adaptive processing. The 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 20-25 March.
 18. Lopes, G. M. G., Junior, D. P. d. S., França, J. A. d., França, M. B. d. M., Ribeiro, L. d. S., Moreira, M., Elias, P., 2017, Development of 3-D Ultrasonic Anemometer With Nonorthogonal Geometry for the Determination of High-Intensity Winds. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 66(11), pp. 2836-2844.
 19. Milan, P., Wächter, M., Peinke, J., 2014, Stochastic modeling and performance monitoring of wind farm power production.

Conversion and Management, 103, pp. 585-604 .

30. Zolfaghari, S., Riahy, G. H., & Abedi, M., 2015, A new method to adequate assessment of wind farms' power output. *Energy*