

معرفی کشورهای پیشرو در استفاده از انرژی باد در صنعت ساخت (فضاهای ساخته شده)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۸

کد مقاله: ۲۸۱۵۶

راحله رستمی^۱، فاطمه جهان تیغ^۲، الهه کیا^۳

چکیده

استفاده از انرژی بادی در صنعت ساخت، به دلیل توجه به مسائل زیست‌محیطی و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، در حال رشد قابل توجهی است. در این راستا، کشورهای پیشرو در این زمینه با توربین‌های بادی، توانسته‌اند نیازهای انرژی الکتریکی و گرمایی خود را تامین کنند. آلمان، دانمارک، هلند، سوئد، فنلاند و ژاپن به عنوان کشورهای پیشرو در استفاده از انرژی بادی در صنعت ساخت شناخته می‌شوند. این کشورها با توجه به تکنولوژی پیشرفته‌ای که در زمینه تولید توربین‌های بادی دارند، توانسته‌اند موفقیت‌های چشمگیری را در استفاده از انرژی بادی در صنعت ساخت به دست آورند. در این کشورها توربین‌های بادی در فضاهای ساخته شده مانند خانه‌ها، ساختمان‌های اداری و صنعتی، بندر و فرودگاه‌ها نصب شده است. این توربین‌ها با تامین انرژی الکتریکی و گرمایی به کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و بهبود کیفیت هوای محیط زیست کمک می‌کنند. با توجه به رشد قابل توجه در استفاده از انرژی بادی در صنعت ساخت، پیش بینی می‌شود که کشورهای دیگر نیز در آینده به این روش انرژی‌ای روی خواهد آورد.

واژگان کلیدی: انرژی بادی، تکنولوژی پیشرفته، انرژی الکتریکی

۱- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری

۲- دانشجوی دکترای تخصصی معماری و عضو باشگاه پژوهشگران و نخبگان دانشکده فنی و مهندسی و علوم پایه دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری

۳- دانشجوی دکترای تخصصی معماری دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری

به استناد گزارش اداره اطلاعات انرژی آمریکا (Department, November 2003) در سال ۲۰۰۱، بیش از نیمی از کل انرژی جهان را کشورهای صنعتی مصرف نموده اند. از سوی دیگر، امروزه در کشورهای صنعتی، اکثر مردم، از ذخایر انرژی فسیلی رو به اتمام و اثرات زیست محیطی مصرف بالای انرژی فسیلی آگاه هستند و این موضوع احتمالاً موجب تغییرات در منابع انرژی و رفتار مصرف کنندگان در آینده خواهد شد و نیاز به انرژی های تجدیدپذیر در کشورهای مرفه افزایش خواهد یافت.

هنوز مشخص نیست که افزایش دما در دهه گذشته ناشی از انتشار دی اکسید کربن از سوختن ذخایر انرژی فسیلی باشد. با این حال، پیامدهای اثر گلخانه ای ممکن است اجازه سوزاندن ذخایر انرژی فسیلی بیشتر را به ما ندهد. جمعیت زمین به سرعت افزایش می یابد و تقاضای انرژی به دنبال آن افزایش خواهد یافت. از سوی دیگر، ذخایر فسیلی در حال کاهش است و در آینده تولید آن کاهش می یابد، در حالی که مصرف افزایش می یابد. این موضوع، تاثیر زیادی بر قیمت انرژی در جهان خواهد داشت. علاوه بر این، وضعیت ناپایدار در خاورمیانه موجب تغییرات قابل توجهی در قیمت انرژی فسیلی می گردد. استفاده از منابع انرژی های تجدیدپذیر می تواند وابستگی به انرژی فسیلی را کاهش دهد.

دلیل مهم دیگری نیز برای تغییر منابع انرژی از انرژی فسیلی به انرژی های تجدیدپذیر وجود دارد: هزینه انرژی. مقایسه منصفانه قیمت انرژی باید بر اساس هزینه کل انرژی باشد. از جمله هزینه های خارجی، مانند مخارج درمان افرادی که دلیل آلودگی سوخت های فسیلی، بیمار می شوند. با این حال، ما به در دسترس بودن انرژی فسیلی و چگالی انرژی عادت کرده ایم و آن را مصرف می کنیم، اما منابع انرژی تجدیدپذیر چگالی انرژی بسیار پایین تری دارند. ما برای احداث واحدهای تولید انرژی تجدیدپذیر به مناطق وسیعی نیاز داریم. برآوردن نیازهای انرژی فعلی ما، چه رسد به نیازهای انرژی آینده ما، با انرژی های تجدیدپذیر، چندان آسان نیست. ما نمی توانیم به چند منبع بزرگ تجدید پذیر تکیه کنیم. هر منبع انرژی تجدیدپذیر ممکن جای خود را دارد و باید مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، عاقلانه است که منابع (خورشیدی، باد، آبی، زیست توده، زمین گرمایی) را به منظور ارائه یک منبع انرژی ثابت، متنوع کنیم. به عنوان مثال، انرژی باد همراه با انرژی خورشیدی منبع انرژی تجدیدپذیر ثابت تری را فراهم می کند زیرا در طول زمستان که آفتاب کمتری وجود دارد بادهای قوی تری وجود دارد. سیستم تامین انرژی در آینده به یک سیستم غیرمتمرکز تغییر خواهد کرد: تغییر بسیار گسترده ای که نیاز به تلاش فراوان از سوی جامعه متخصصان دارد. از سوی دیگر، با توجه به تلاش زیادی که برای تولید انرژی های تجدیدپذیر انجام دهیم منطقی نیست آن را با بی دقتی مصرف کنیم. ما باید تولید انرژی تجدیدپذیر را با کاهش مصرف انرژی ترکیب کنیم (Mertens, January 2006).

با توجه به گزارش کتاب اطلاعات انرژی ساختمان ها (Buildings Energy Databook, November 2003)، ساختمان ها تقریباً ۴۰٪ از کل انرژی تولید شده را مصرف می نمایند و تلاش زیادی برای کاهش این میزان در حال انجام است. برای کاهش مصرف انرژی ساختمان ها، برخی از پژوهشگران، طراحی ساختمان های انرژی صفر (ZED) یا کم انرژی (LED) را پیشنهاد کرده اند. با این حال، تمایل برای احداث ساختمان های LED همیشه داوطلبانه نیست، اما گاهی الزامات قانونی در این خصوص لازم است. پرسش کلیدی که مطرح می شود آن است که، چرا انرژی را در جایی که لازم است تولید نکنیم و در عین حال از هزینه های حمل و نقل و آلودگی هوا در مناطق روستایی جلوگیری کنیم؟ علاوه بر این، منابع کوچک انرژی تجدیدپذیر که با ساختمان ها ادغام می شوند منجر به مصرف انرژی کمتری از شبکه برق سراسری می شوند. همچنین، برق تولید شده توسط واحدهای مسکونی کوچک، با قیمت خدمات شهری به دانه ها بازپرداخت می شوند: قیمتی تقریباً سه برابر بیشتر از قیمتی که شرکت برای منابع بزرگ انرژی تجدیدپذیر در مناطق روستایی پرداخت می کند. از این رو، انگیزه های ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر در ساختمان ها تنها ناشی از مسائل زیست محیطی نیست. معماری همیشه منعکس کننده روند تغییرات و نیازهای اجتماعی بوده است و یکی از آن گرایش ها، امروزه، قطعاً نیاز به استفاده از انرژی های تجدیدپذیر است (Mertens, January 2006). انرژی باد یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر ممکن برای محیط ساخته شده است. مقایسه سطح زمین در محیط های شهری با سطح زمین در مناطق روستایی نشان می دهد محیط های ساخته شده نسبت به مناطق روستایی از ناهمواری بیشتری برخوردار است. این ناهمواری زیاد باعث کاهش سرعت باد در مناطق شهری نسبت به مناطق روستایی می شود. بنابراین محیط های روستایی و دورافتاده شرایط مناسب تری برای استفاده از توربین های بادی دارند. اما در محیط های شهری، سرعت باد در اطراف ساختمان های بلند و آسمان خراش ها می تواند به طور قابل ملاحظه ای بیشتر از میانگین سرعت باد جریان آزاد باشد. شاید بتوان از این اثر استفاده کرد و ساختمان هایی با توربین های بادی اختصاصی طراحی کرد تا از سرعت باد جریان آزاد استفاده نمایند.

۲- انرژی باد

انرژی باد از منابع انرژی تجدید پذیر محسوب می گردد و نوعی انرژی خورشیدی به شمار می رود. کلمه انرژی بادی در واقع فرایندی را توصیف می نماید که طی آن از باد برای تولید نیروی مکانیکی یا الکتریکی استفاده می شود. انرژی بادی یک منبع سوختی پاک است. انرژی باد مانند سوخت های فسیلی همچون زغال سنگ یا گاز طبیعی باعث انتشار ذرات، اکسید نیتروژن و دی اکسید گوگرد و آلوده شدن هوا نمی شود، در حالی که این سوخت ها خسارات زیادی به سلامت انسان و اقتصاد وارد می کنند، به علاوه توربین های بادی گازهای گلخانه ای یا باران اسیدی تولید نمی کنند. منشأ باد یک موضوع پیچیده است. از آنجا که زمین

به‌طور نامساوی به وسیله نور خورشید گرم می‌شود بنابراین در قطب‌ها انرژی گرمایی کمتری نسبت به مناطق استوایی وجود دارد همچنین در خشکی‌ها تغییرات دما با سرعت بیشتری انجام می‌پذیرد و بنابراین خشکی‌های زمین نسبت به دریاها زودتر گرم و زودتر سرد می‌شوند. این تفاوت دمای جهانی موجب به وجود آمدن یک سیستم جهانی تبادل حرارتی خواهد شد که از سطح زمین تا هوا، مانند یک سقف مصنوعی عمل می‌کند، ادامه دارد. بیشتر انرژی که در حرکت باد وجود دارد را می‌توان در سطوح بالای جو پیدا کرد چرا که سرعت مداوم باد به بیش از ۱۶۰ کیلومتر در ساعت می‌رسد و سرانجام باد انرژی خود را در اثر اصطکاک با سطح زمین و جو از دست می‌دهد (کاربردهای انرژی بادی در صنعت، ۲۰۲۱). این انرژی یک منبع انرژی بومی و پایدار است و تا زمانی که خورشید در آسمان می‌درخشد می‌توان از آن استفاده نمود.

۲-۱- کاربردهای انرژی بادی

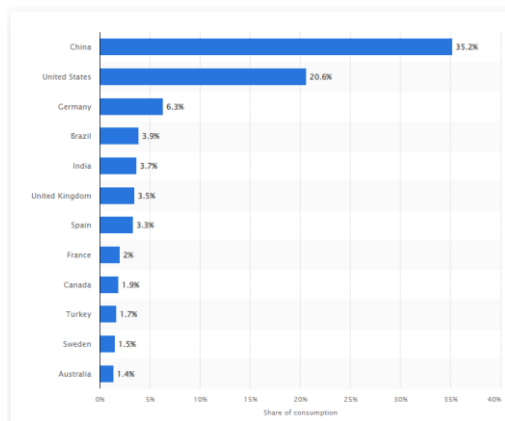
انرژی بادی مانند سایر منابع انرژی تجدیدپذیر، از نظر جغرافیایی گسترده و در عین حال به صورت پراکنده تقریباً همیشه در دسترس می‌باشد. هزاران سال بود که انسان‌ها با استفاده از آسیاب‌های بادی، تنها جزء بسیار کوچکی از آن را استفاده می‌کنند. این انرژی تا پیش از انقلاب صنعتی به عنوان یک منبع انرژی، به طور گسترده مورد بهره‌برداری قرار می‌گرفت، ولی در دوران انقلاب صنعتی استفاده از سوخت‌های فسیلی به دلیل ارزانی و قابلیت اطمینان بالا، جایگزین انرژی باد شد. تا این که در سال‌های ۱۹۷۳ و ۱۹۷۸ دو شوک بزرگ نفتی، ضربه بزرگی به اقتصاد انرژی‌های حاصل از نفت و گاز وارد کرد به طوری که باعث ایجاد تمایلات جدیدی در زمینه کاربرد تکنولوژی باد جهت تولید برق متصل به شبکه، پمپاژ آب و تأمین انرژی الکتریکی نواحی دور افتاده شد. همچنین در سال‌های اخیر، مشکلات زیست محیطی و مسائل مربوط به تغییر آب و هوای کره زمین به علت استفاده از منابع انرژی فسیلی بر شدت این تمایلات افزوده است (کاربردهای انرژی بادی در صنعت، ۲۰۲۱). چراکه انرژی بادی تجدیدپذیر و پاک محسوب می‌شود و استفاده از آن در مقایسه با انرژی سوخت‌های فسیلی، میزان کمتری گاز گلخانه‌ای منتشر می‌کند. انرژی باد با تبدیل شدن به نوعی مفید از انرژی، شامل انرژی الکتریکی (با استفاده از توربین‌های بادی)، انرژی مکانیکی (مثلاً در آسیاب‌های بادی یا پمپ‌های بادی) یا پیش‌رانش قایق‌ها و کشتی‌ها و یا در قایق‌های بادبانی) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۲- مزایای و معایب انرژی باد

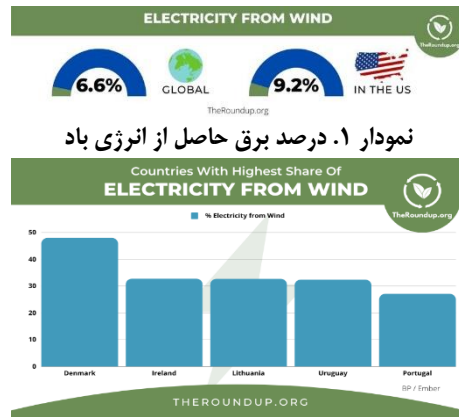
- | | |
|--|---|
| الف- مزایا: | ب- معایب انرژی باد |
| - انرژی باد رایگان است. | - ورزش باد غیر قابل پیش‌بینی است، بنابراین به تنهایی قابل اعتماد نیست. |
| - انرژی باد پاک است و هیچ‌گونه آلاینده‌ای تولید نمی‌کند | - توربین‌های بادی آلودگی صوتی تولید می‌کنند. |
| - انرژی باد نامحدود است، هیچگاه به اتمام نمی‌رسد. | - امکان نصب توربین‌های بادی بزرگ در نزدیکی مناطق مسکونی وجود ندارد. |
| - انرژی باد را می‌توان به‌طور مستقیم استفاده کرد. | - نصب توربین‌های بادی هزینه اولیه زیادی نیاز دارد. |
| - قابلیت استفاده از انرژی باد در مناطق دورافتاده وجود دارد. | - مراکز بادی خوب اغلب در مزارع دور افتاده و به دور از شهرهایی که برق آن‌ها را تأمین می‌کنند قرار دارند، برای انتقال این برق از مزرعه بادی به شهر باید خطوط انتقال احداث شود |
| - در صورت وجود زیرساخت شبکه، انرژی باد توسط شبکه برق خریداری می‌شود. | - توربین‌های بادی بسیار آسیب‌پذیر هستند. (برخورد صاعقه، بادهای شدید و ...) |
| - توربین‌های بادی در مناطق بادخیز، بازدهی بیشتری نسبت به سلول‌های خورشیدی دارند. | - مزارع بادی بزرگ روی محیط زیست اثرات مخربی می‌گذارند. (احتمال برخورد پرندگان، تغییرات باد و ...) |
| - باعث ایجاد شغل می‌شود | |

۲-۲-۲- آمارهای جهانی از انرژی باد

بر اساس آخرین تحقیقات سال ۲۰۲۳ (Cole, 2023): ۶,۵۹ درصد از برق جهان از نیروی باد تأمین می‌شود. ظرفیت جهانی انرژی بادی اکنون بیش از ۷۴۳ گیگاوات است. در ایالات متحده، این رقم بالاتر از سطح جهانی است. باد در حال حاضر ۹,۲ درصد از برق ایالات متحده را تأمین می‌کند. پنج کشور برتر در تولید برق بادی و درصد سهم آنها از کل تولید برق بادی جهان در سال ۲۰۲۱ عبارتند از: چین (۳۵٪)، ایالات متحده (۲۱٪)، آلمان (۶٪)، برزیل (۴٪)، هند (۴٪) دانمارک (۴۷,۹ درصد) بیشترین درصد از کل مصرف انرژی خود در سال ۲۰۲۱ را از انرژی باد تأمین کرده است. ایرلند (۲۲,۷٪) و اروگوئه (۲۲,۳٪) نیز بسیار متکی به انرژی باد بودند. بیش از ۵۰ کشور در سراسر جهان از انرژی باد برای تولید ۱۰ درصد یا بیشتر برق خود، استفاده می‌کنند.

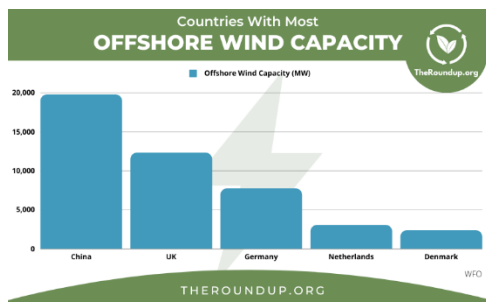


نمودار ۲. کشورهای پیشرو در تولید انرژی باد

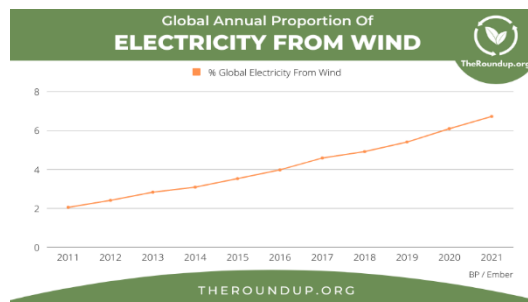


نمودار ۳. سهم باد از مصرف انرژی در کشورهای پیشرو

استفاده از نیروی باد در حال افزایش است. آمارها نشان می‌دهد که درصد برق جهانی که از انرژی باد بدست می‌آید، افزایش تقریباً خطی دارد و در طول یک دهه بین سال‌های ۲۰۱۱ (۲,۰۴ درصد) و ۲۰۲۱ (۶,۷۲ درصد) بیش از سه برابر شده است. چین به بزرگ‌ترین تولیدکننده نیروی بادی دریایی و همچنین بزرگ‌ترین تولیدکننده انرژی بادی تبدیل شده است. این کشور بریتانیا را که قبلاً رهبر جهان بود، با افزایش گسترده ظرفیت در سال ۲۰۲۱ پشت سر گذاشت.



نمودار ۵. کشورهای پیشرو در تولید انرژی بادی دریایی



نمودار ۴. میزان تولید انرژی از باد در جهان

به طور متوسط، یک توربین بادی تجاری جدید می‌تواند برق ۹۴۰ خانه را در ایالات متحده تامین کند. البته میزان مصرف کاملاً وابسته به اندازه خانه، محل قرارگیری آن (و میانگین سرعت باد در آن منطقه) و میزان انرژی مورد نیاز برای راه اندازی وسایل برقی داخل آن بستگی دارد. اما می‌توانیم با استفاده از داده‌های میانگین آماری، برآوردی کلی انجام دهیم. تخمین زده می‌شود که یک خانه آمریکایی به طور متوسط ۸۹۳ (کیلووات ساعت) برق در ماه مصرف می‌کند. توربین‌های بادی تجاری مدرن و تازه نصب شده دارای ظرفیت ۲,۷۵ مگاوات هستند، به این معنی که می‌توانند حدود ۸۴۳,۰۰۰ کیلووات ساعت در ماه تولید کنند. بنابراین، یک توربین بادی تجاری که به طور متوسط با ظرفیت ۴۲ درصد کار می‌کند، می‌تواند برق حدود ۹۴۰ خانه در ایالات متحده را تامین کند.

۳- انرژی بادی در صنعت ساخت

کشورهای پیشرو، غالباً، انرژی باد را از طریق مزارع بادی تامین می‌نمایند. از آنجاییکه، زمین در مناطق شهری و حومه شهری محدود است و این موضوع، محدودیت مهمی در نصب توربین‌های بادی در مقیاس بزرگ بشمار می‌رود. یک انتخاب جایگزین، استفاده از سیستم‌های انرژی باد تلفیق شده با ساختمان است (Stathopoulos, 2018). ایده تولید انرژی میکرو باد در محلات شهری بسیار مهم است زیرا انرژی در نزدیکی محل مورد نیاز تولید می‌شود. در (Harries, & Sinisa, Neil, 2009)، پژوهشگران سیستم‌های تولید انرژی بادی در محیط‌های شهری را به سه دسته تقسیم نموده‌اند: (۱) قرار دادن توربین‌های بادی مستقل در مکان‌های شهری، (۲) مقاوم سازی ساختمان‌های موجود و نصب توربین‌های بادی بر روی آنها و (۳) تلفیق کامل توربین‌های بادی با فرم معماری. گروه‌های ۲ و ۳ اغلب به عنوان توربین‌های بادی تلفیق شده با ساختمان (BIWT) شناخته می‌شوند.

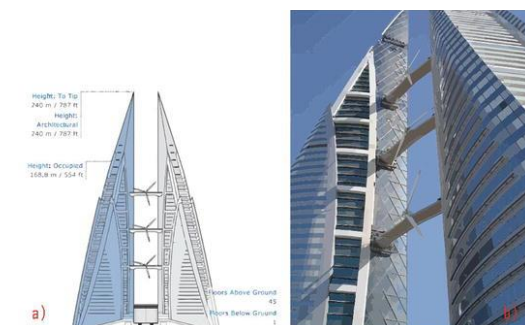
در مورد گروه ۲، مطالعات تحقیقاتی بسیار کمی در مورد استفاده از نیروی باد بر روی ساختمان‌های موجود در مناطق شهری وجود دارد. گروه ۳ شامل فرم‌های ساختمانی هستند که به صورت آیرودینامیکی برای ادغام با توربین‌های بادی طراحی شده

است. همانگونه که مشخص است، در محیط های شهری میانگین سرعت باد کمتر از مناطق روستایی است. با این حال، در مناطق شهری، سرعت باد، در مکان های خاص، مانند اطراف ساختمان های بلند، به طور قابل توجهی، بالا است و می توان آن را برای تولید انرژی باد شهری مانند توربین های بادی کوچک که روی ساختمان های بلند یا اطراف آن نصب می شوند، بکار گرفت. مزیت اصلی چنین سیستم هایی آن است که انرژی تولید شده می تواند مستقیماً در محل مونتاژ مصرف شود و کاربرد ساختمان، انرژی تجدیدپذیر را بدون واسطه دریافت کند. از آنجایی که انرژی تولید شده به صورت تئوری، تابعی از مکعب سرعت باد است، افزایش اندک در سرعت باد می تواند به تفاوت قابل توجهی در تولید نیروی باد منجر شود. ارزیابی صحیح منابع باد در یک منطقه شهری و تلاش برای بهبود آن از طریق روش های مختلف آیرودینامیکی با محدودیت روبرو است. ازیرا با استراتژی سنتی مهندسی باد که در آن اولویت کاهش سرعت و فشار باد به منظور به حداقل رساندن بارهای جانبی ناشی از باد برای ایمن سازی سیستم سازه است، در تناقض می باشد. وقتی صحبت از توربین های بادی تلفیق شده با ساختمان می شود، مرکز تجارت جهانی بحرین، برج استراتا در لندن و برج رودخانه مروارید در گوانگژو و برج شانگهای چین، نمونه های بسیار مهم و پیشگامان در این زمینه هستند. در ادامه؛ استراتژی های تلفیق توربین های بادی در این ساختمان ها، برای به تصویر کشیدن رویکرد میان رشته ای بین معماری و مهندسی باد آورده شده اند.

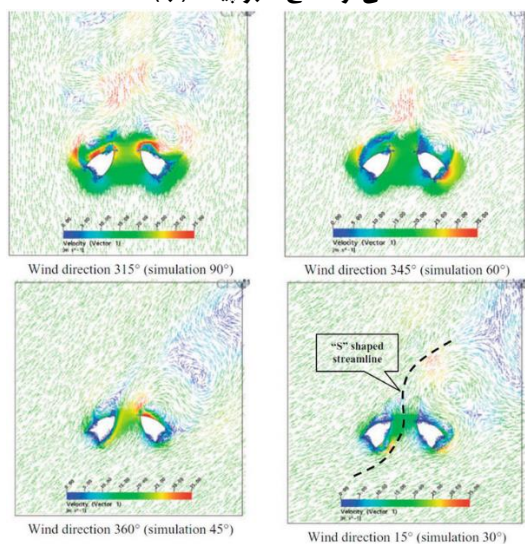
۳-۱- مرکز تجارت جهانی بحرین

مرکز تجارت جهانی بحرین، طرحی برای نوسازی هتل و مرکز خرید موجود، در مکانی متمایز مشرف به خلیج منامه در منطقه تجاری مرکزی بحرین است. دو برج اداری بادبانی شکل ۵۰ طبقه تا ارتفاع ۲۴۰ متر با فرمی مخروطی شکل، از سه توربین بادی محور افقی با قطر ۲۹ متر در پل های آسمانی که دو برج ۵۰ طبقه را به هم متصل می کند پشتیبانی می کنند (شکل ۱). هزینه توربین های بادی حدود ۳٫۵ درصد از کل هزینه پروژه گزارش شده است. این سه توربین بادی سالانه بین ۱۱۰۰ تا ۱۳۰۰ مگاوات ساعت تولید می کنند که حدود ۱۱ تا ۱۵ درصد نیاز برق ساختمان را برآورده می کند.

پلان برج ها، فرم بیضی دارد و پروفیل های بادبانی شکل به عنوان ایرفویل عمل می کنند، با ورود نسیم خشکی در بین آنها، مانند قیف عمل می کنند و فشار منفی پشت آنها ایجاد می شود که در نتیجه موجب افزایش سرعت باد بین دو برج می گردد. به صورت عمودی، شکل برج نیز نتیجه دینامیک جریان هوا است. بخش های ایرفویل آنها در حال کاهش است که به سمت بالا می روند (Smith & Killa, 2007). همراه با افزایش سرعت نسیم خشکی در ارتفاعات فزاینده، این ضربه یک رژیم سرعت باد تقریباً برابر در هر یک از سه توربین ایجاد می کند. درک و استفاده از این پدیده یکی از متغیرهای اصلی است که امکان اجرای عملی سیستم های توربین بادی را در طراحی یک ساختمان بلند فراهم می کند. آزمایش تونل باد تأیید کرد که چگونه شکل ها و رابطه فضایی برج ها جریان هوا را تغییر می دهند و جریانی شبیه S شکل می دهند که به موجب آن مرکز جریان باد تقریباً عمود بر توربین در یک آزمون باد ۴۵ درجه در دو طرف محور مرکزی می ماند. این کار ظرفیت تولید برق توربین ها را بهبود می بخشد و در عین حال خستگی روی پره ها را تا سطوح قابل قبول در هنگام انحراف باد در سراسر پره ها کاهش می دهد (Killa, 2007 & Smith).



شکل ۱: توربین های بادی ادغام شده در بین برج های مرکز تجارت جهانی بحرین. نمای ارتفاعی (الف) و نمای کلی از سطح عابر پیاده (ب).



شکل ۲: تصاویر CFD توسط Ramboll، الگوهای جریان هوا را در نزدیکی برج ها نشان می دهد، شبیه سازی برای زوایای مختلف جریان باد آزاد با توجه به محور "x" در سطح توربین بالایی انجام شده است.

توربین های بادی محور افقی که بین برج ها قرار می گیرند، معمولاً روی پایه نصب می شوند و به گونه ای می چرخند که با جهت باد مطابقت داشته باشند تا خروجی انرژی را به حداکثر برسانند. بنابراین، قرار دادن چنین توربین هایی در ساختمان های بلند با شرایط آب و هوایی دارای جهت باد متغیر، بسیار دشوار است. اکثر پروژه های معماری که توربین های محور افقی تلفیق شده با

ساختمان را به کار می‌گیرند، مانند مورد مرکز تجارت جهانی بحرین، توربین ثابت را اجرا می‌کنند. به نظر می‌رسد استقرار توربین‌های بادی با محور عمودی مفیدتر باشد زیرا آنها از باد در جهت‌های مختلف می‌توانند انرژی تولید کنند. اما در زمان طراحی مرکز تجارت جهانی بحرین، توربین‌های عمودی تأیید شده در مقیاس بزرگ، برای بکارگیری در این ساختمان، در دسترس نبودند. فرم برج‌ها از ابتدای این پروژه به گونه‌ای طراحی شد که باد پیش رو را گرفته و آن را بین برج‌ها هدایت کند. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، آزمایش جامع تونل باد که اخیراً توسط CFD تأیید شده نشان داده، باد توسط برج‌ها به شکل یک خط جریان S شکل که از فضای بین برج‌ها با زاویه عبور می‌کند منحرف می‌شود. قیف شدن برج‌ها سرعت باد را تا ۳۰ درصد در محل برخورد با توربین تقویت می‌کند. همچنین شکل برج‌ها و مشخصات سرعت باد، با افزایش ارتفاع از سطح زمین، بر متعادل کردن انرژی خروجی موثر است. به طوری که توربین‌های بالا و پایین ۱۰۹ و ۹۳ درصد تولید انرژی دارند و توربین وسط ۱۰۰٪ تولید انرژی (Killa, 2007 & Smith).

۳-۲- برج استراتا، لندن

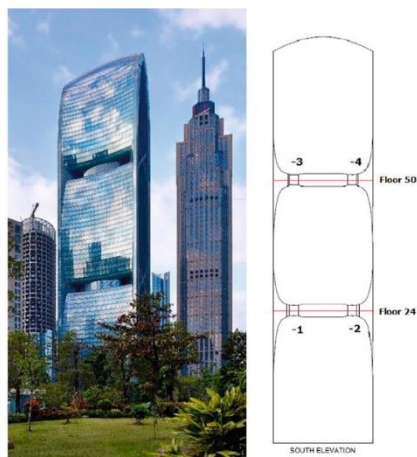


شکل ۳: برج استراتا، لندن.

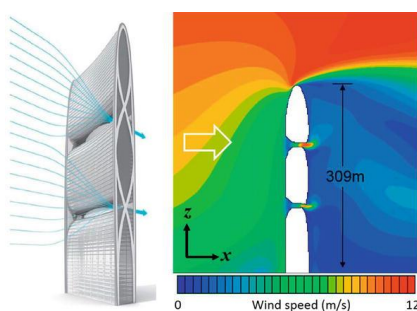


شکل ۴: مطالعه جهت‌گیری بر اساس جهت باد غالب. طرح نقشه سایت با نمودار وضع هوا و میزان وزش بادهای جهت‌دار (a) و تصویری از توزیع جریان هوا در اطراف برج (b)

پس از انتخاب توربین‌های بادی به عنوان گزینه انرژی تجدیدپذیر مبتنی بر سایت، قیف کردن و هدایت باد، عنصر اصلی طراحی است که می‌تواند تولید عملیاتی توربین‌های بادی را در زمان بهره‌برداری به طور قابل توجهی بهبود بخشد. در واقع، برای طراحی برج استراتا مانند طراحی مرکز تجارت جهانی بحرین از مفهوم "ونتوری" برای هدایت جریان باد استفاده شده است. توربین‌های نصب شده بر روی بام، آلودگی صوتی ایجاد می‌کنند، برای حل این مسئله، از محفظه‌های Venturi مانند، استفاده شده است که در حداقل رساندن تولید نویز موثر بوده و کارایی را بهبود بخشیده است. در محفظه‌های ونتوری مانند، قرار دادن دقیق توربین‌ها بر روی پلان تأثیر قابل توجهی هم در عملکرد کلی و هم در تنظیم خروجی نویز دارد. علاوه بر این، برخلاف توربین‌های سه پره استانداردتر مورد استفاده در ساختمان‌های بزرگ‌تر، انتخاب توربین‌های پنج پره باعث کاهش بیشتر نویز می‌شود. نکته قابل توجه آن است که، خروجی انرژی در توربین بادی تلفیق شده با ساختمان کاملاً وابسته به مورد است و برای هر ساختمان متفاوت است. توربین‌های برج استراتا، برای تولید ۵۰ مگاوات برق در سال طراحی شده‌اند که حدود ۸ درصد کل انرژی مصرفی ساختمان است.



شکل ۵: برج رودخانه مروارید: موقعیت باز شو ها



شکل ۶: برج رودخانه مروارید: الگوهای جریان هوا در اطراف توربین های بادی [۱۷].



شکل ۷: شکل آیرودینامیکی در نما (a) و نمای دقیق توربین بادی محور عمودی مارپیچ شکل (b)

۳-۳- برج رودخانه مروارید، گوانگژو چین

یک نمونه از توربین بادی BIWT و فتولتائیک تلفیق شده با ساختمان (BIPV) در آسیا، برج رودخانه مروارید در گوانگژو، چین است. این ساختمان ۷۱ طبقه به ارتفاع ۳۰۹ متر در سال ۲۰۱۱ تکمیل شد (Kim, Jeon, & Kim, 2016). برای افزایش سرعت باد، از طریق اثر نازل، منافذ باز جریان هوا در ساختمان طراحی شده است (شکل ۵) در داخل ساختمان مجموعاً چهار توربین بادی با محور عمودی به ارتفاع ۸ متر نصب شده است که هر کدام در دهانه داخلی سمت چپ و راست قرار دارند. چهار باز شو در برج رودخانه مروارید در مجاورت طبقات مکانیکی (تاسیساتی) (طبقه ۲۴، از ۱۰۴ تا ۱۱۱،۳ متر، و طبقه ۵۰، از ۲۰۵ تا ۲۱۲،۷ متر)، وجود دارد. باز شو-۱ و باز شو-۲ در ارتفاع پایین تر قرار دارند که دهانه-۱ در غرب و دهانه-۲ در شرق قرار دارد. به همین ترتیب، باز شو-۳ و باز شو-۴ به صورت جفت در کنار طبقه مکانیکی بالایی قرار دارند (شکل ۵). جهت گیری برج رودخانه مروارید موازی با جهت باد غالب گوانگژو است که به دنبال به حداکثر رساندن توان خروجی توربین است. علاوه بر این، برج رودخانه مروارید به لحاظ آیرودینامیکی دارای یک دیواره مقعر در سطح جنوبی و یک دیواره محدب در سطح شمالی می باشد که باعث تشدید و تجمع بهتر باد از طریق دهانه ها می شود (شکل ۶).

یک توربین بادی با محور عمودی مارپیچ شکل بر روی هر یک از چهار دهانه نصب شده است (شکل ۷). این توربین ها دارای توان نامی ۸ کیلووات با سرعت نامی ۲۵ متر بر ثانیه هستند. چنین توربینی برای تولید الکتریسیته زمانی که محدوده سرعت باد ۲،۷ تا ۴۰ متر بر ثانیه وجود دارد طراحی شده است. مساحت این توربین حدود ۱۰ متر مربع و ارتفاع آن ۸ متر است. شایان ذکر است؛ با اینکه توربین های بادی محور عمودی (VAWTs) معمولاً ممکن است بازده انرژی کمتری نسبت به توربین های بادی محور افقی (HAWTs) داشته باشند، به نظر می رسد که آنها به ویژه در توسعه انرژی بادی شهری مورد توجه هستند. به دلیل سرعت نوک پایین تر، اثر نويز VAWT ها نسبتاً کم است و VAWT ها در محیط های شهری می توانند در برابر تلاطم بالا مقاومت کنند. نکته قابل توجه این است که VAWT ها همه جهته هستند، بنابراین باد و تلاطم را می توان به طور موثرتری از همه جهت با کاهش اثربخشی استخراج کرد. این امر به ویژه برای نصب توربین های بادی در محیط های شهری که جهت باد به دلیل تأثیرات تداخلی ساختمان ها و سازه های مجاور بسیار متغیر است، مفید است (Li, 2016).

نتایج مطالعات نشان می دهد؛ طراحی برج رودخانه مروارید به خوبی از ویژگی های آیرودینامیکی ساختمان فوق بلند استفاده می کند که می تواند ، سرعت باد را ۲،۵ برابر در چهار دهانه افزایش دهد و توربین های برج در مقایسه با توربین هایی که در یک میدان باز قرار دارند، بیش از هشت برابر برق تولید می کنند. با این حال، به دلیل شرایط باد عمدتاً ضعیف در گوانگژو، خروجی توان تخمینی از چهار توربین بادی تلفیق شده در ساختمان نسبتاً کم است و تقریباً ۳۰۰۰۰۰ کیلووات ساعت ظرفیت سالانه دارند که حدود ۲٪ از مصرف ساختمان را پوشش می دهد.

۳-۴- برج شانگهای چین

برج بلند شانگهای چین، با حدود ۶۳۲ متر ارتفاع، دومین آسمان خراش دنیا می باشد و در منطقه مالی لو جیازو شانگهای واقع شده است. این ساختمان بلند در سال ۲۰۱۴ به اتمام رسید البته در سال ۲۰۱۶ به روی مردم گشوده شد. این برج ۱۲۷ طبقه با کاربری مختلف دارای فضاهای اداری، تجاری، مرکز کنفرانس، هتل، موزه، فضاهای رفاهی فرهنگی و ۱۸۰۰ جای پارک اتومبیل است. این ساختمان فوق العاده مرتفع دارای مساحت ناخالص ۵۷۸ هزار مترمربع است و مساحت خالص آن ۲۰۰ هزار مترمربع

می‌باشد. برج شانگهای به شکل ۹ ساختمان استوانه‌ای می‌باشد که روی یکدیگر چیده شده‌اند و همگی توسط لایه داخلی نمای شیشه‌ای محصور شده‌اند. هر منطقه را می‌توان یک شهر یا روستای مستقل با فضای رفاهی مشترک در نظر گرفت. یک سوم فضای این برج را فضای سبز تشکیل می‌دهد که شامل ۲۴ باغ آسمانی می‌شود که بین دو پوسته قرار گرفته‌اند.



شکل ۸: برج شانگهای



شکل ۹: محل نصب توربین های بادی در طبقات بالای برج شانگهای



شکل ۱۰: نصب ۲۷۰ توربین بادی محور افقی در بالاترین قسمت نمای برج



شکل ۱۰: بنیاد تحقیقات پزشکی اوکلاهما



شکل ۱۱: توربین های بادی بنیاد تحقیقات پزشکی اوکلاهما

باغ‌های آسمانی نوآورانه این برج، با قراردادن فضاهای عمومی، مغازه‌ها، رستوران‌ها و امکانات شهری در سطح آتریوم، ساختمان را از هر ساختمان دیگر متمایز کرده و تجربه جدیدی برای زندگی و کار ایجاد کرده است. شکل برج با ۳ استراتژی کلیدی؛ شکل نامتقارن برج، نمایه باریک‌تر و گوشه‌های گرد، آن را در مقابل بادهای طوفانی رایج شانگهای مقاوم کرده است. پیچش این ساختمان در هر طبقه حدود یک درجه است تا تأثیر و ش باد به سازه کمتر شود. طراحی نمای شیشه ای برج با افزایش ارتفاع با یک پیچ ۱۲۰ درجه همراه شده است و می‌تواند بارهای باد بر روی ساختمان را تا ۲۴٪ کاهش دهد. طراحی منحصر به فرد برج، موجب شد که برج شانگهای ۲۵ درصد فولاد ساختاری کمتری نسبت به یک طرح معمولی با ارتفاع مشابه استفاده کند (Li, 2022 & Chen).

این برج از چهل و سه فناوری سبز برای کاهش مصرف انرژی تا ۲۱ درصد و مصرف آب تا ۴۰ درصد استفاده می‌کند که هر سال تولید کربن ساختمان را به میزان ۳۴۰۰۰ تن کاهش می‌دهد. استرلاب، معمار آمریکایی برج در این باره می‌گوید "دو پوسته بودن این برج آن را به یک بطری دو جداره (فلاسک) تبدیل می‌کند که باعث می‌شود تا نور طبیعی به ساختمان نفوذ کند و در مصرف برق صرفه جویی شود، همچنین بر کیفیت روانی ساکنین بیافزاید، فضاهای داخلی را ایزوله (ضدعفونی) کند و در مجموع در کاهش مصرف انرژی و هزینه ها بسیار موثر باشد". دو فناوری به کار رفته در سیستم تهویه مطبوع برج شانگهای - پمپ های حرارتی زمین گرمایی (GSHP) و نماهای دو پوسته (DSF) می‌باشند. مواد مورد استفاده از منابع محلی با محتوای بازیافتی بالا تهیه شده است. یک سوم محوطه پوشیده از فضای سبز است که باعث کاهش گرمای تولید شده از نمای ساختمان شده و با استفاده از روش های آبیاری کارآمد مدیریت می‌شود (Chen & Li, 2022).

اصلی ترین فن آوری سبز برج شانگهای، استفاده از ۲۷۰ توربین بادی برای تامین ۵۴۰۰۰ کیلووات ساعت انرژی تجدید پذیر سالانه است. توربین های بادی محور افقی با ظرفیت واحد ۵۰۰ وات و مجموع ۱۳۵ کیلووات در نمای بیرونی و بالای برج شانگهای نصب شده اند که پیش بینی می‌شود تا ۱۰ درصد از برق ساختمان را تامین کنند. "کنترل های هوشمند ساختمان" برای نظارت و تنظیم سیستم ها در ساختمان بکار گرفته شده اند. برج شانگهای سبزترین آسمان خراش جهان می‌باشد. در سال ۲۰۱۰، برج شانگهای گواهینامه طلایی پیشرو در طراحی انرژی و محیطی (LEED) را به دست آورد و در سال ۲۰۱۲، رتبه سه ستاره برچسب انرژی ساختمان سبز (GBEL) را دریافت کرد (Li, 2022 & Chen).

۳-۵- بنیاد تحقیقات پزشکی اوکلاهما

اوکلاهما (Oklahoma) خانه بزرگ‌ترین نیروگاه بادی ساخته شده در ساختمان شهر است. فشار برای ساختمان‌های انرژی صفر خالص که به اندازه مصرف، انرژی تولید می‌کنند، شکل و اندازه سیستم‌های بادی و خورشیدی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

اگرچه آینده مشوق‌های مالی برای فناوری‌های انرژی پاک، در بهترین حالت، نامشخص است، علاقه به فناوری‌هایی که توانایی تولید برق را مستقیماً در ساختمان‌هایی مسکونی ادغام می‌کنند، همچنان در حال رشد است و این فقط به معنای خورشیدی نیست. به تازگی مطالعه‌ای در مورد سیستم برق بادی که با استفاده از فناوری کمپانی Venger Wind بر روی بام بنیاد تحقیقات پزشکی اوکلاهاما اجرا شده، انجام شده است (Oklahoma Medical Research Foundation (OMRF) (Wind and Solar PV Design and Engineering, 2008)

این سیستم، بزرگترین سیستم برق بادی نصب شده بر روی ساختمان، در ایالات متحده می‌باشد، از ۱۸ توربین بادی محور عمودی تشکیل شده که حدود ۵۶ متر ارتفاع دارند و با سرعت باد حدود ۸٫۹ مایل در ساعت، شروع به تولید برق می‌کنند. هر یک از توربین‌ها ظرفیت تولید ۴٫۵ کیلووات دارند که ظرفیت اسمی مجموع توربین‌ها ۸۱ کیلو وات است که هر چند زیاد نیست، اما برای حفظ عملکرد برج تحقیقاتی جدید بدون استفاده از برق شبکه کافی است. هدف کمپانی Venger، استفاده از سیستم‌های بادی کوچک با تعداد بیشتر است که به کاهش وابستگی شرکت‌ها به برق گران‌قیمتی که معمولاً توسط نیروگاه‌هایی با منابع انتشار کربن بیشتر مانند نیروگاه‌های زغال‌سنگ تولید می‌شود، کمک می‌کند. کن مورگان، رئیس و مدیر دفتر بازاریابی کمپانی Venger Wind گفت: «در محیط‌های شهری، پتانسیل تأمین انرژی بادی در نقطه استفاده، یک تغییر رویکرد بزرگ نسبت به ساخت نیروگاه‌های معمول چند مگاواتی است که برای بهره‌گیری از بادهای بزرگ، ناچارند، دورتر و دورتر از جمعیت‌هایی که بیشتر به انرژی نیاز دارند نصب شوند (Oklahoma Medical Research Foundation (OMRF) Wind and Solar (PV Design and Engineering, 2008).

۳-۵- آپارتمان‌های Near North

Near North یک ساختمان پنج طبقه شیک در شیکاگو است که از شیشه، فولاد و بتن ساخته شده و یکی از معدود نمونه‌هایی است که از توربین بادی جهت تأمین انرژی ساختمان استفاده شده است، این بنا توسط معمار مشهور هلموت جان طراحی شده است. پیش‌بینی می‌شود که Near North تا ۲۲ درصد کمتر از سیستم‌های سنتی انرژی مصرف کند. این امر می‌تواند حدود ۱۸۰۰۰ دلار پس‌انداز سالانه به همراه داشته باشد. ۸ توربین بادی روی پشت بام، تقریباً ۱۰ درصد برق ساختمان را تولید می‌کنند. توربین‌های ماریپچی AI 520H هر کدام شامل یک جفت روتور ماریپچ و ایرفویل است که در داخل یک قفس فولادی قرار دارند و به صورت افقی روی سقف آپارتمان نصب شده‌اند. هندسه و جهت ساختمان به طور خاص برای افزایش سرعت باد در هنگام عبور از سقف طراحی شده است. منحنی بالای ساختمان تقریباً شبیه بالای یک قرص نان است. محاسبات و مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهد؛ وقتی بادهای غالب به نمای ساختمان برخورد می‌کنند، به سمت بالا شتاب می‌گیرند، مانند حرکت باد بر روی بال هواپیما که موجب افزایش سرعت و بهبود حرکت باد به سمت توربین‌ها می‌شود. این توربین‌های بادی دارای فناوری بسیار پیشرفته‌ای هستند و یکی از اولین توربین‌های بادی نصب شده بر روی ساختمان‌های مسکونی در شیکاگو است. پنل‌های خورشیدی برای تأمین آب گرم ساختمان گرما تولید می‌کنند. Near North همچنین دارای اولین سیستم آب خاکستری شیکاگو است که از آب روان از سینک‌ها و دوش‌ها برای شستشوی توالت‌ها استفاده مجدد می‌کند. Near North Apartments، در مارس ۲۰۰۷ در محله‌ای در شیکاگو افتتاح شد. در سال‌های اخیر، جامعه به سرعت در حال فقیر شدن است و مسکن ارزان قیمت برای نیازمندان محدود است. به عنوان بخشی از برنامه ۱۰ ساله شهردار شیکاگو برای پایان دادن به بی‌خانمانی، ساخت یک آپارتمان‌های تک اتاقه (SRO) در این منطقه، در دستور کار قرار گرفت. در Near North اکنون ۹۶ بزرگسال بی‌خانمان و بسیار کم درآمد زندگی می‌کنند که بسیاری از آنها با ناتوانی‌های جسمی و یا ذهنی دست و پنجه نرم می‌کنند. این آپارتمان که دارای چندین عنصر طراحی پایدار منحصر به فرد است، نه تنها به خانه دار شدن مردم کمک می‌کند، بلکه به آنها یک محیط زندگی سالم می‌بخشد (Rafter, 2007). Near North همچنین در سایت براون فیلد احداث شده است. ملکی که به دلیل وجود زباله‌های خطرناک و سایر آلاینده‌ها، خالی از سکنه بود. با تمیز کردن و توسعه مجدد سایت براون فیلد، علاوه بر حفاظت از محیط زیست، این املاک ارزشمند به استفاده عمومی بازگردانده شده است (Rafter, 2007).



شکل ۱۲: توربین‌های بادی آپارتمان‌های Near North از نماهای متفاوت

۳-۶- طراحی پل باد خورشیدی



شکل ۱۳: توربین‌های بادی تلفیق شده با سازه موجود پل "Costaviola"



شکل ۱۴: آسفالت Solar Roadways، مسیر پیاده رو و گلخانه‌های خورشیدی پل "Costaviola"



شکل ۱۵: افزایش مقاومت سازه به کمک توربین‌های بادی تلفیق شده با سازه موجود پل "Costaviola"

باد خورشیدی نوعی سیستم تولید انرژی ترکیبی (بادی/خورشیدی) است که از ادغام یک نیروگاه انرژی بادی طراحی شده در سازه موجود پل "Costaviola" و یک جاده پوشیده شده با پانل‌های فتوولتائیک ایجاد شده است. بادهایی که دائماً در میان دره‌ها می‌وزند، می‌توانند برای تولید انرژی پاک مورد استفاده قرار گیرند: در سازه‌ی پل‌هایی که بر روی دره‌ها احداث می‌شوند، فضاهای خالی بین دکل‌های نگه‌دارنده می‌تواند با توربین‌های بادی پر شود. این ایده به دنبال ایجاد مفهوم جدیدی از ترکیب انرژی باد و پنل‌های فتوولتائیک است که علاوه بر تولید انرژی، تأثیر بصری عمیقی بر چشم‌انداز طبیعی دارد. در طراحی این پل، ادغام توربین‌ها در سازه موجود، به گونه‌ای صورت گرفته که علاوه بر حفظ زیبایی بصری و امکان بهره‌برداری از مناظر طبیعی؛ از نقطه نظر استاتیک، مقاومت سازه را بهبود می‌بخشد. پروژه "باد خورشیدی" علاوه بر توربین‌های بادی، شامل پنل‌های خورشیدی و عناصر ضربه‌ای در امتداد سطح جاده است. سطح جاده با نوع خاصی از آسفالت Solar Roadways (تولید شده در ایالات متحده)، که با سلول‌های فتوولتائیک پوشانده شده است، جایگزین می‌شود، همچنین مسیر پیاده‌رو، با نقاط دارای چشم‌اندازهای وسیع، فضای سبز و گلخانه‌های خورشیدی غنی‌سازی می‌شود (neira, 2015). انرژی‌های تجدیدپذیر، امن‌ترین منبع انرژی برای انسان و طبیعت هستند، اگرچه دو مشکل بزرگ هنوز حداکثر بهره‌برداری از آنها را محدود می‌کند: اول؛ نسبت هزینه به فایده و دوم؛ ارتباط با زمینه (مناظر طبیعی یا مصنوع) سیستم ۱۵ مگاواتی با چهارده توربین پیش‌بینی شده در این سازه، می‌تواند ۲۲۵۰۰ مگاوات ساعت در سال تولید کند که برای تأمین انرژی مورد نیاز پنج هزار خانواده کافی است. باید تأکید نمود که "چشم‌انداز جذاب" این طرح پیشنهادی با مفهوم یک "موتور تجدیدپذیر" مطابقت دارد و مجموعه‌ای از اهداف زیست‌محیطی، انرژی و اقتصادی را تأمین می‌کند. مشارکت تولیدکنندگان و سرمایه‌گذاران محلی نیز کمک مهمی به اقتصاد منطقه خواهد کرد، اگرچه نتایج مثبت واقعی بسیار وسیع‌تر خواهد بود (neira, 2015).

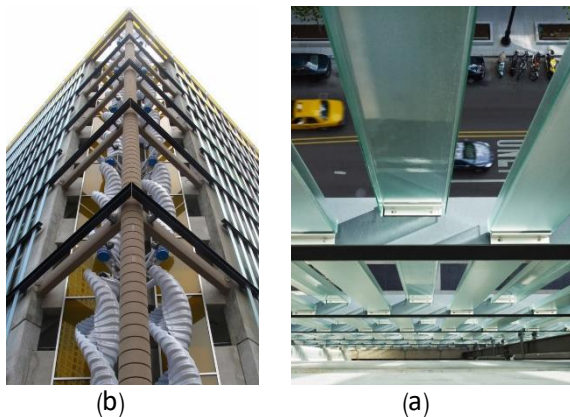
۳-۷- پارکینگ گرین وی (Greenway)



شکل ۱۶: پارکینگ گرین وی (Greenway)

توربین‌های بادی ادغام‌شده در ساختمان، علی‌رغم ظاهر پیشرفته‌شان و وعده انرژی رایگان، به‌عنوان سیستمی ناکارآمد، پرسر و صدا و ناسازگار با الگوهای باد غیرقابل پیش‌بینی شهرها مورد انتقاد قرار گرفته‌اند. یکی از پروژه‌های اخیر که ممکن است در تطبیق انرژی باد با معماری، موفق‌تر عمل کرده باشد، پارکینگ هوشمند گرین‌وی است، یک پارکینگ ۱۱ طبقه نیمه‌خودکار در مرکز شهر شیکاگو. اولین گاراژ پارکینگ دوستدار زمین شیکاگو، Greenway به اقدامات دوستدار محیط زیست خود افتخار می‌کند، از جمله: توربین‌های بادی، سقف سبز و مخازن آب باران برای آبیاری، شیشه‌های با راندمان بالا، برنامه‌های بازیافت، روشنایی کم مصرف، ماشین الکتریکی. ایستگاه‌های شارژ، وسایل نقلیه Zipcar و Enterprise CarShare. نکانی برای زندگی سبزتر در لابی‌ها، و استفاده از مصالح ساختمانی محلی و پایدار در طول فرآیند ساخت و ساز (LLC, 2012).

در امتداد گوشه جنوب غربی ساختمان، توربین‌های بادی با محور عمودی، در دو ستون دوتایی مارپیچ چیده شده‌اند که انرژی کافی برای پوشش هزینه روشنایی نمای بیرونی ساختمان در شب، از جمله خود سیستم توربین زیبا را تولید می‌کنند.



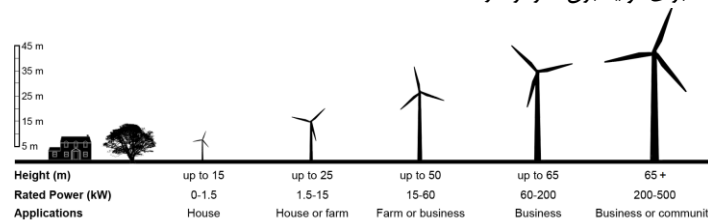
شکل ۱۷: (a) دیواره شیشه ای متخلخل (b) توربین های بادی محور عمودی پارکینگ گرین وی

این طراحی از فناوری های غیرفعال و فعال برای مهار جریان های انرژی طبیعی استفاده هوشمندانه می کند. برای مثال، تهویه ساختمان بدون تاسیسات مکانیکی انجام می شود و برای این کار از پوسته متخلخل پارکینگ - لایه هایی از نوارهای شیشه ای عمودی که با فاصله کمی از هم قرار دارند - بهره می گیرد. برای تامین انرژی این ساختمان، ۱۲ توربین آلومینیومی S594 خود راه انداز و سبک وزن، برای سرعت باد نسبتاً کم (۱۱،۱ مایل در ساعت) انتخاب شده اند. توربین های محور عمودی می توانند باد را از هر جهت با طیف وسیعی از سرعت ها بهره برداری کنند، که یک امتیاز قوی برای مهار نسیم های بی ثبات محیط های کوچک شهری است. توربین های با محور افقی بازدهی بالاتری داشته و انرژی بیشتری تولید می کنند، اما فضای بیشتری را اشغال می کنند و از نظر معماری ادغام آنها سخت تر است.

هر توربین به طور مستقل می چرخد و می تواند تا ۴،۵ کیلو وات نیرو تولید کند. برق تولید شده، متصل به شبکه بوده و یک کنترلر برگشت پذیر برای اندازه گیری و بازگشت برق به شبکه شهر در طول سال، نصب و راه اندازی شده است (LLC, 2012).

۴- کشورهای پیشرو در فناوری توربین های بادی کوچک

بخش عمده ای از نیروگاه بادی نصب شده امروزی به شکل نیروگاه های بادی بزرگ است که عمدتاً از ماشین های چند مگاواتی تشکیل شده است، با وجود آنکه، افزایش قدرت نامی و ابعاد توربین ها، به دلیل کاهش هزینه های تولید، روند رو به رشدی را طی می کند، با این حال، توربین های بادی کوچک (SWT) در سراسر جهان برای کاربردهای مختلف، از جمله تولید برق برای خانوارها، مورد استفاده هستند. توربین های بادی کوچک برای مراکز صنعتی، مزارع، مناطق مسکونی دورافتاده؛ ترکیب با سایر منابع انرژی و ذخیره سازی در سیستم های انرژی هیبریدی تولید الکتریسیته برای پشتیبانی، نظارت از راه دور و ارتباطات از راه دور و ارائه خدمات انرژی مستقیم مانند پمپاژ آب، نمک زدایی و تصفیه کاربرد دارند (Moreira Chagas, Giannini, Pereira, Pinguelli Rosa, & Fidelis da Silva, 2020). استفاده از توربین های بادی در مناطق روستایی برای برخی کشورها اهمیت ویژه ای دارد. به عنوان مثال، در اطراف شاخ آفریقا، توربین های بادی کوچک قابل اجراترین راه حل در بخش های وسیعی از کشورهایی هستند که شبکه برق سراسری توسعه یافته ای ندارند (Gabra, Miles, & Scott, 2021). گزارش ها نشان می دهد که آفریقای جنوبی بیش از ۱۰۰۰۰۰ پمپ بادی در حال کار دارد که در بیش از ۴۵۸۱۸ مزرعه استفاده می شود. SWT ها زیرمجموعه ای از بخش بازار انرژی بادی بزرگتر هستند که می توانند شامل توربین های بزرگ نصب شده در برنامه های شبکه توزیع برق باشند (Karekezi, 2002). شکل ۱۸ اندازه های معمول توربین های ساخته شده را با انواع اصلی کاربرد آنها مرتبط می کند. هنگامی که SWT ها برای اهداف جانبی مختلفی به غیر از تولید برق مانند تهویه یا پمپاژ آب استفاده می شوند، مفاهیم مختلف توربین می توانند وارد عمل شوند. این کاربردها ممکن است از توربین محور عمودی یا آسیاب بادی آمریکایی چند پره استفاده کنند که مقدار کوچکی را در بازار تشکیل می دهد. اگرچه این ماشین ها از همه نظر SWT هستند، اما مطالعه حاضر، بر SWT ها برای تولید برق تمرکز دارد.



شکل ۱۸. ابعاد توربین بادی و خروجی توان نامی به عنوان تابعی از کاربردهای مختلف.

حداقل ۱،۸ گیگاوات ظرفیت باد کوچک نصب شده در سطح جهان از بیش از ۱ میلیون توربین وجود دارد (Orrell, Kazimierczuk, & Sheridan, 2021). گسترش جهانی این ظرفیت الکتریکی، شامل انواع توربین های بادی کوچک، بر

اساس گزارش های موجود از برخی کشورهای پیشرو، بررسی شده که در جدول ۱ نشان داده شده است. بر این مبنای، به ترتیب کشورهای دانمارک، چین، ایتالیا، ایالات متحده و بریتانیا، کشورهای دارای بیشترین توربین های بادی کوچک نصب شده بوده اند.

جدول ۱. نصب توربین های بادی کوچک تا سال ۲۰۲۰. داده های (Sheridan, 2021 & Orrell, Kazimierczuk)
ستاره ها به داده های نامشخص برای آن سال خاص اشاره دارند.

Table 1. Global Small Wind Capacity Reports

Country	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Cumulative	Cumulative Years
	(MW)									
Australia ^a	*	0.02	0.03	*	0.02	*	0.01	0.00	1.47	2001-2020
Brazil ^b	0.03	0.02	0.11	0.04	0.11	0.29	0.44	0.07	1.11	2013-2020
Canada ^c	*	*	*	*	*	*	*	*	13.47	As of 2018
China ^{d,e}	72.25	69.68	48.60	45.00	27.70	30.76	21.40	25.65	610.61	2007-2020
Denmark ^{f,g}	11.04	7.50	24.78	14.61	2.58	0.40	0.18	0.05	610.88	1977-2020
Germany ^h	0.02	0.24	0.44	2.25	2.25	1.00	2.50	2.50	35.75	As of 2020
Italy ⁱ	7.00	16.27	9.81	57.90	77.46	*	*	0.65	190.08	As of 2020
Japan ^k	*	*	*	*	*	*	*	*	12.88	As of 2019
New Zealand ^l	*	*	*	*	*	*	*	*	0.19	As of 2015
South Korea ^m	0.01	0.06	0.09	0.79	0.08	0.06	0.00	*	4.08	As of 2019
UK ⁿ	14.71	28.53	11.72	7.73	0.39	0.42	0.43	*	141.51	As of 2019
United States	5.70	3.67	4.32	2.43	1.74	1.51	1.30	1.55	152.65	2013-2020
Global	110.75	126.01	99.90	130.75	112.32	34.43	26.25	30.46	1774.68	

* Data not available

a www.cleanenergyregulator.gov.au

b www.aneel.gov.br

c The Atlas of Canada – Clean Energy Resources and Projects

d China Wind Energy Equipment Association

e Chinese Wind Energy Association

f www.energinet.dk

g Danish Energy Agency, Master Data Register of Turbines

h Bundesnetzagentur; Bundesverband Kleinwindkraftanlagen; 0-50-kW capacity (estimate)

i www.assieme.ed; 0-250-kW capacity

j Gestore dei Servizi Energetici

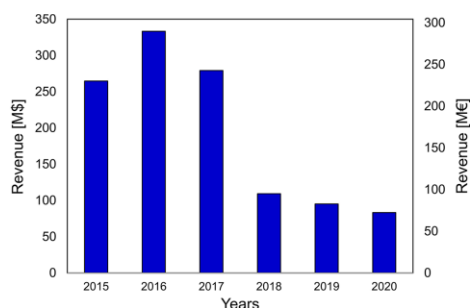
k Japan Small Wind Turbine Association

l SustainableElectricity Association of New Zealand

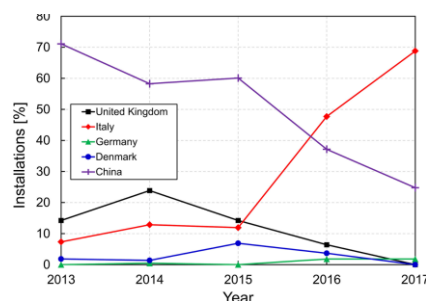
m Korea Energy Association

n www.gov.uk, Monthly Microgeneration Certification Scheme and Renewables Obligation Order Feed-in Tariffs

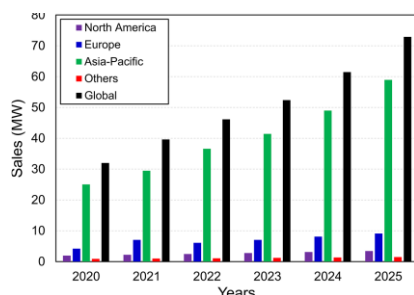
degression statistics



نمودار ۷. وضعیت بازار جهانی SWT از نظر درآمد (تحقیق اطلاعات جهانی، ۲۰۲۱).



نمودار ۶. تکامل سهم کشور در ظرفیت SWT جدید نصب شده در آن سال برای تعدادی از کشورهای کلیدی اروپایی و چین. داده های (Orrell, Kazimierczuk & Sheridan, 2021).



نمودار ۸. پیش بینی فروش جهانی SWT بر اساس منطقه (۲۰۲۰-۲۰۲۵). (Research Global Info, 2021).

شکل ۲ بینش جامع تری را در مورد چندین کشور پیشرو در حوزه توربین های بادی کوچک ارائه می دهد که روندهای متفاوتی را در سال های ابتدایی و انتهایی دهه گذشته نشان دادند. در حالی که دانمارک، بریتانیا و ایالات متحده سابقه طولانی در استفاده از توربین های بادی کوچک دارند، چین در سال های اخیر مقادیر بیشتری ظرفیت بادی کوچک را به طور مداوم اضافه کرده است. از سوی دیگر، ایتالیا و بریتانیا که در ابتدا رشد چشمگیری در نصب تاسیسات بادی کوچک داشتند، هر دو در سال های اخیر، به دلیل تغییر سیاست FIT و اصلاح تعرفه خرید تضمینی، کاهش را تجربه کردند. FIT ها به صاحبان ژنراتورهای تجدیدپذیر کوچک با نرخ ثابتی به ازای هر واحد برق تولیدی، پول می پردازند و هزینه بازگشت سرمایه را کاهش می دهند. در ایتالیا، در سال های ۲۰۱۶-۲۰۱۷ به دلیل مشوق های ویژه برای توربین های زیر ۶۰ کیلووات، افزایش قابل توجهی در تاسیسات برق بادی کوچک مشاهده شده بود. نرخ FIT در ایتالیا قبل از انقضا در سال ۲۰۱۷ به مرور زمان کاهش یافت و در سال ۲۰۱۹ لغو شد. مطابق با این تغییرات، حدود ۷۷,۴۶ مگاوات پروژه بادی با استفاده از توربین های تا ۲۵۰ کیلووات در ایتالیا در سال ۲۰۱۷ نصب شد، در حالی که هیچ گزارش نصبی برای سال های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ وجود نداشت و ۰,۶۵ مگاوات پروژه برای سال ۲۰۲۰ گزارش شد. بریتانیا برنامه FIT خود را به متقاضیان جدید در سال ۲۰۱۹ معرفی کرد و برنامه ضمانت صادرات هوشمند را معرفی کرد. تحت آن برنامه، متقاضیان اکنون تعرفه ای را دریافت می کنند که توسط خریدار تعیین می شود نه قیمت ثابتی که توسط دولت تعیین می شود. در نتیجه، نصب توربین های بادی کوچک از ۲۸,۵۳ مگاوات در سال ۲۰۱۴ به تنها ۰,۴۳ مگاوات در سال ۲۰۱۹ رسید (Orrell, Kazimierczuk, & Sheridan, 2021). در شرایطی که مشوق های دولتی رو به زوال است، در یونان، هنوز FIT برای SWTs ارائه می شود. برنامه این کشور برای ایجاد ظرفیت نصب شده ۲۰ مگاوات بود که با تعرفه ۱۵۷ یورو در هر مگاوات ساعت (۱۸۱ دلار آمریکا در هر مگاوات ساعت) شروع می شد که به طور خودکار بر اساس توان قراردادی تجمعی پروژه ها کاهش می یافت. یک جایزه نیز بر مبنای معافیت مالیاتی وجود دارد که FIT را به ۱۶۳ یورو در هر مگاوات ساعت (۱۸۷ دلار در هر مگاوات ساعت) می رساند. از نمونه های دیگر این تعرفه ها می توان به تعرفه های ژاپن و جمهوری کره اشاره کرد. برنامه FIT ژاپن در پی فاجعه هسته ای فوکوشیما دایچی ایجاد شد که نرخ آن به طور پیوسته کاهش یافته است، از اوج ۵۵ ین به ازای هر کیلووات ساعت در سال ۲۰۱۵ به ۱۹ ین (تقریباً ۰,۱۲۵ یورو یا ۰,۱۷۵ دلار) در هر کیلووات ساعت در سال ۲۰۱۹ برای توربین های کمتر از ۲۰ کیلووات ساعت. جمهوری کره نیز یک برنامه FIT داشت، اما در سال ۲۰۱۲ به پایان رسید. در حالی که تغییر در برنامه FIT باعث افزایش ظرفیت ها در برخی از انرژی های تجدیدپذیر در جمهوری کره شد، مانند توسعه همزمان زیست توده و استقرار سلول های سوختی، تاسیسات کوچک بادی کاهش یافت (Orrell, Kazimierczuk, & Sheridan, 2021). ماهیت ناپیوسته مشوق ها و برنامه های ملی، مانند در بازار را برای تولیدکنندگان دشوار می کند، حتی در کشورهایی مانند انگلستان، ایتالیا و ایالات متحده که فناوری SWT در آن ها سابقه طولانی تری دارد. در سال ۲۰۱۵ در ایالات متحده، شش شرکت صادر کننده توربین کوچک بادی، صادرات بین المللی خود را گزارش کردند که تنها سه شرکت در سال ۲۰۲۰ این کار را انجام دادند (Orrell, Kazimierczuk, & Sheridan, 2021). به طور مشابه، در سال ۲۰۱۷، تنها ۱۵ تولیدکننده توربین بادی کوچک چینی فروش خود را گزارش کردند که نسبت به ۲۸ شرکت در سال ۲۰۱۴ کاهش یافت و مربوط به کاهش ۶۰ درصدی فروش از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ است (Orrell, Kazimierczuk, & Sheridan, 2021). در مقیاس جهانی، بزرگترین بازار توربین های بادی کوچک همچنان در اختیار اروپا، ایالات متحده و چین است. SWT ها بیشتر برای کاربردهای خارج از شبکه، مانند دکل های مخابراتی و کشاورزی استفاده می شوند. آنها همچنین برای تامین انرژی منازل مسکونی و مشاغل کوچک استفاده می شوند که می توانند به شبکه متصل شوند. در سال ۲۰۱۹، ۹۴ درصد از فروش SWT به برنامه های خارج از شبکه اختصاص یافت (Research Global Info, 2021). بر این اساس می توان گفت؛ هیچ توافق روشنی در مورد چشم اندازهای آینده وجود ندارد که این موضوع عمدتاً به دلیل بحران مالی مرتبط با همه گیری جهانی COVID-19 در سال ۲۰۲۰ و جنگ اوکراین است. مرکز تحقیقات اطلاعات جهانی پیش بینی می شود که بازار جهانی SWT در سال ۲۰۲۵ به ۱۹۰ میلیون دلار (۱۶۵ میلیون یورو) با نرخ رشد مرکب سالانه ۱۱,۴۵ درصد از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ خواهد رسید (Research Global Info, 2021). بنابراین بازار می تواند با افزایش روزافزون توجه به سمت سیستم های انرژی پاک تر دوباره امیدوار شود. در این صورت انتظار می رود، اروپا، آسیا-اقیانوسیه و ایالات متحده بازیگران اصلی سهم آینده در این بخش باقی بمانند. به طور خاص، بازار آسیا و اقیانوسیه کل فروش SWT در سراسر جهان را رهبری خواهد کرد، در حالی که بازار اروپا کاهش در سهم نسبی جهانی را نشان خواهد داد (نمودار ۸). در آسیا، در مغولستان داخلی، حدود ۲۵۰۰۰۰ میکرو توربین بادی نصب کرده و استفاده از WHS ها به یک هنجار تبدیل شده است. ظرفیت تولید در مغولستان داخلی حدود ۴۰۰۰۰ دستگاه در سال است. پس از فاجعه هسته ای فوکوشیما دایچی، انتظار می رود؛ ژاپن تولید انرژی های تجدیدپذیر را در مقیاس های بزرگ ایجاد کند، در حالی که سایر کشورها مانند مالزی بازاری بکر با شرایط مناسب برای SWT ها را نشان می دهد.

۵- چالش های فناوری توربین های بادی کوچک

الف- بهبود راندمان توربین های بادی کوچک: توربین های بادی در مقیاس تجاری و صنعتی معمولاً به صورت خوشه ای و در مناطقی با منابع بادی زیاد، از چند توربین تا نیروگاه های بادی بزرگ تشکیل شده اند که دور از محل مصرف کننده قرار دارند (مثلاً در دریا). اگرچه برخی از توربین های بادی بزرگ در محیط شهری ممکن است انرژی را برای منازل مسکونی تامین کنند، اما معمولاً متعلق به یک شرکت برق هستند یا به آنها نیرو می دهند. در مقابل، SWT ها معمولاً متعلق به فرد یا سازمانی هستند که از برق استفاده می کنند، مانند خانه یا محل کار و نزدیک به آن مصرف کنندگان نصب می شوند. از آنجا که مکان یابی SWT ها در نزدیکی محل مصرف انجام می شود، معمولاً منبع باد در محل، بهینه نیست و بادها در محیط های شهری، اغلب دارای سرعت متوسط پایینی هستند. بسیار متلاطم هستند و احتمال بیشتری وجود دارد که موانعی در نزدیکی خود داشته باشند، که می تواند جریانی نامناسب برای توربین ایجاد کند. این امر منجر به کاهش توان توربین می شود که تقریباً از ۰.۲۵ تا ۰.۴۰ متغیر است (Wood, 2011)، در حالی که برای توربین های بزرگ این مقادیر بالاتر از ۰.۵ است. در واقع، SWT ها اغلب در دستیابی به AEP پیش بینی شده یا منتشر شده شکست می خورند. این احتمالاً به دلیل مجموعه ای از ملاحظات مانند ارزیابی های بیش از حد خوش بینانه منابع، عملکرد ضعیف روتور در سرعت های کم باد و در زمان تلاطم بالا، یا مکان یابی ضعیف توربین است. دو ویژگی جریان، عملکرد ضعیف روتور در بادهای کم و/یا بادهای متلاطم، برای نصب در بالای برج های کوتاه و در مجاورت موانع طبیعی یا مصنوعی معمول هستند. با وجود این، به دلیل آنکه هر توربین در محیط و شرایط آب و هوایی منحصر به فرد و خاص خود راه اندازی می شود، لازم است که SWT ها به طور خاص و متناسب با محیط خود طراحی شوند تا به طور موثر در هر دو شرایط با منبع باد کم و آشفته کار کنند. پیامدهای این شرایط کاری بسیار زیاد است و تمام جنبه های طراحی و عملکرد توربین را در بر می گیرد (Croce, 2022 & Bianchini, Bangga, Baring-Gould).

ب- بهبود ضریب اطمینان عملکرد طولانی مدت توربین با توجه به منابع مالی محدود: علاوه بر بهینه سازی راندمان و همچنین پیش بینی میزان تولید برق یک SWT بر اساس ویژگی های خاص باد در محل نصب، برای دریافت منابع مالی در پروژه های SWT، صنعت باید بتواند؛ به طور دقیق، میزان تولید برق توربین را در طول چرخه عمر کامل پروژه پیش بینی کند. این دقت پیش بینی عملکرد بلندمدت برای کاهش ریسک پروژه از دیدگاه مصرف کنندگان، بیمه گران، متخصصان برنامه ریزی شهری، تأمین کنندگان مالی پروژه و کنترل کنندگان ضروری است. پیش بینی عملکرد بلندمدت به عوامل مختلفی وابسته است. در درجه اول، ویژگی های عملکردی توربین به همراه برآورد دقیق منابع باد و هرگونه تغییر ناشی از موانع محلی در طول عمر پروژه. علاوه بر این، در دسترس بودن توربین به لحاظ شرایط مکانیکی، الکتریکی و آب و هوایی در سایت خاص. چرا که در دسترس بودن قطعات یدکی و جایگزین، تکنسین های تایید شده تعمیر توربین، تعهدات گارانتی شرکت و مکان خاص توربین، باعث افزایش طول عمر توربین و تولید برق بیشتر خواهد شد. ضمن در نظر داشتن اعتبار شرکت نصاب و سازنده توربین، قابلیت اطمینان تولید بلندمدت را می توان به دو حوزه اصلی تقسیم کرد، یکی عملکرد منابع بادی و دوم قابلیت اطمینان توربین. هنگامی که امکانات و تجهیزات مناسب و ارزان قیمت برای ارزیابی دقیق از منابع باد، در سایت مورد نظر در دسترس باشد، معمولاً برای یک سال مدل، پارامترهای موثر مانند تغییرات سایت در طول زمان، رشد موانع مانند پوشش گیاهی و درخت و کاهش بالقوه جریان باد ناشی از تغییرات آب و هوا باید بررسی شوند. همچنین ابزارهای سنجش منابع نیز باید تأیید شوند و اطمینان را برای نصب کنندگان، مصرف کنندگان و سرمایه گذاران، فراهم کنند. عنصر دوم، توسعه روش هایی است که ضریب اطمینان عملکرد فناوری SWT، در طول عمر طراحی توربین را اثبات می کند. برای مثال، به دلیل سرعت های زاویه ای بالاتر SWT ها، سیکل های خستگی برای پره های SWT در حدود ۱۰۰ برابر تعداد پره های توربین بزرگ است. با وجود این، موسسه استاندارد، آزمایش خستگی را برای تیغه های کوچک الزامی نکرده و هیچ شواهد عملیاتی قوی مبنی بر اینکه خستگی یک مشکل اصلی برای اکثر تیغه های SWT است، وجود ندارد. برای موفقیت بازار توربین های بادی کوچک در آینده، فرآیند صدور گواهی ضریب اطمینان توربین ها، باید توسط سازمان هایی که در سطح کلان، سرمایه گذاری در تولید برق را هدایت می کنند، اجرا شود (Bianchini, Croce, 2022 & Bangga, Baring-Gould).

ج- بهبود دوام اقتصادی انرژی باد کوچک: برای اینکه یک SWT از نظر اقتصادی موفق باشد، باید توان عملکردی مناسبی را با هزینه ای قابل رقابت با سایر فناوری های مشابه، مانند PV های خورشیدی، ارائه دهد و برای بازار مقبولیت داشته باشد. کاهش در LCOE (هزینه تولید به ازای هر کیلو وات) را می توان از طریق ایجاد تعادل بین بهبود ظرفیت و کاهش هزینه های نصب و راه اندازی، به دست آورد. کاهش هزینه همچنین می تواند ناشی از بهینه سازی طراحی باشد. استفاده از مواد جدید و تکنیک های ساخت؛ توسعه راه حل های استاندارد برای قطعاتی که می توانند در مدل های چند توربینه مورد استفاده قرار گیرند، بهبود در تکنیک های نصب، کاهش هزینه پی ها و سایر هزینه های مربوط به تعادل ایستگاه همگی از جمله استراتژی های موثر هستند. بسیاری از استراتژی ها بر اساس کاهش هزینه های ساخت افزاز توربین طراحی شده اند که عمدتاً با کاهش مواد توربین و اطمینان از عملکرد موفقیت آمیز در طول عمر طراحی شده ایجاد می شود. از سوی دیگر، این بهینه سازی باید با استانداردهای بین المللی SLM نیز مطابقت باشد، که ممکن است هزینه های سیستم توربین را افزایش دهد. افزایش اخیر در قیمت کالاها و همچنین وقفه های زنجیره تامین باعث افزایش هزینه ها برای اکثر تولید کنندگان SWT شده است. اگرچه می توان بر برخی از

این چالش‌ها با توسعه تولید غلبه کرد که منجر به صرفه‌جویی و افزایش قدرت خرید صنعت می‌شود، تحقیقات برای جایگزینی و تغییر مواد پرهزینه و کمیاب، به کاهش و تثبیت هزینه‌های ساخت توربین کمک می‌کند. همکاری و همسویی تولید کنندگان و فروشندگان SWT در تامین قطعات می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و رفع اختلال در زنجیره تامین کمک کند. به طور کلی، LCOE کمتر به جوامع کمک می‌کند تا به فناوری SWT دسترسی پیدا کنند و به فناوری باد اجازه می‌دهد تا نقش فعال‌تری در رسیدگی به مسائل فقر انرژی و دسترسی به انرژی پاک ایفا کند و در عین حال نیاز به مشوق‌های مالی را کاهش دهد (Croce, 2022 & Bianchini, Bangga, Baring-Gould).

د- تسهیل سهم توربین‌های بادی کوچک در تقاضای انرژی و یکپارچه سازی سیستم الکتریکی: استفاده بیشتر از نیروی باد در ترکیب انرژی می‌تواند به کاهش انتشار کربن و سایر گازهای گلخانه‌ای کمک شایانی نماید. توانایی باد برای تولید انرژی کم‌هزینه و نزدیک به مصرف‌کنندگان، ابزار مهمی برای دستیابی به هدف سیستم انرژی کم کربن است. علاوه بر این، توربین‌های بادی کوچک قابلیت بومی سازی دارند و ظرفیت ساخت یک SWT بومی، برای بسیاری از کشورهای در حال توسعه، نسبت به سلول‌های خورشیدی، به مراتب بیشتر است. توان تولید متغیر انرژی در SWT‌ها را می‌توان با کمک برخی از شبکه‌های انرژی و یا ترکیب با سایر انواع انرژی‌های تجدیدپذیر بهبود بخشید. فن آوری SWT نه تنها باید برای تولید برق خارج از شبکه، توسعه یابد بلکه به منظور برآوردن الزامات شبکه سراسری برق که به سرعت در حال تحول است نیز نیاز به بهبود عملکرد دارد. از سوی دیگر، مزایای انرژی‌های باد کوچک که ممکن است به قابلیت اطمینان و انعطاف پذیری شبکه اضافه کند باید برجسته و موجب درآمذایی شود. امروزه، استانداردسازی صنعت نیازمند تکنولوژی، امکانات و دانش فنی برای کنترل از راه دور و ایمنی در شبکه‌های هوشمند است. با توجه به ماهیت انرژی‌های باد خارج از شبکه، توانایی SWT‌ها برای کمک به کاهش بار یا جابجایی بار برای ذخیره سازی، به ویژه در بازارهایی که در حال گسترش برق رسانی به منظور کاهش تولید کربن هستند، باید مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر این، به دلیل نیازهای ارتباطی گسترده، ملاحظات امنیت سایبری بیشتری برای فناوری SWT آینده مورد نیاز خواهد بود. نقش SWT‌ها، نباید به تاسیسات متصل به شبکه محدود شود. بازارهای جهانی بزرگ برای سیستم‌های انرژی ایزوله و همچنین خدمات انرژی خارج از شبکه مانند یخ سازی، پمپاژ آب، آبیاری یا گرمای مستقیم می‌تواند پتانسیل بازار این فناوری را افزایش دهد (Croce, 2022 & Bianchini, Bangga, Baring-Gould).

ه- تقویت مشارکت، پذیرش اجتماعی و استقرار برای بازارهای باد توزیع شده جهانی: مشارکت جامعه، گروه‌ها، و مرجع نظارتی، برای توسعه SWT کلیدی است. اقداماتی باید انجام شود تا درک اجتماعی از توربین‌های بادی افزایش یابد و شواهدی مبنی بر کارآمدی و راندمان بالاتر توربین‌های مدرن نسبت مدل‌های قدیمی، ارائه شود. طراحی و نصب توربین‌ها در داخل جوامع و در مجاورت مردم باید با درک روشنی از اثرات اجتماعی و زیست محیطی آنها انجام شود. تحقیقات گسترده‌ای در مورد تأثیرات مبتنی بر جامعه، مانند پرتاب یخ و مشکلات ایمنی، باید انجام شود که منجر به بهبود استانداردها و دستورالعمل‌ها برای نصب توربین شود. اقدامات سیاسی و نظارتی بین‌المللی باید تقویت شود تا امکان استقرار فناوری به روشی مؤثرتر فراهم شود. الزامات قانونی و مجوزهای مشترک بین شهرها و کشورها، بر اساس علم و درک صحیح از اثرات بالقوه، برای کاهش زمانبندی توسعه و کاهش هزینه‌ها مورد نیاز است. مشوق‌ها، استانداردها و سیاست‌های تبلیغاتی نیز باید همسو باشند. این امر نه تنها در چارچوب برنامه دولت‌ها، بلکه در غالب سازمان‌های غیردولتی، بانک‌های توسعه و بنیادها نیز ضروری است. برای مثال، ایجاد مشوق‌های یکسان در بین کشورها و تعیین یک جدول زمانی مشخص برای ثابت نگه داشتن مشوق‌ها، برای تشویق سرمایه‌گذاری لازم است (Croce, 2022 & Bianchini, Bangga, Baring-Gould).

۶- نتیجه‌گیری

برای موفقیت و توسعه کاربری SWT‌ها، فناوری آینده به نسل جدیدی از توربین‌ها نیاز دارد که برای فضاهای پیچیده، با سرعت باد کم و تلاطم زیاد بهینه سازی شده باشند و بتوانند با موفقیت و ضریب اطمینان بالا، در طول عمر طراحی خود کار کنند و انرژی مورد انتظار را پس از نصب و راه اندازی، تولید کنند. برای تحقق این امر لازم است؛ مدل سازی و شبیه سازی با دقت بالاتر و نزدیک تر به شرایط واقعی در محل‌های نصب، انجام شود. علاوه بر این، پیشنهاد می‌گردد، تحقیق و پژوهش در زمینه کنترل و اصلاح نوع و جنس مواد برای بهبود راندمان در جریان‌های طوفانی، افزایش عمر مفید و کاهش هزینه کلی انجام پذیرد. از سوی دیگر برای جلب اطمینان مصرف‌کنندگان و سرمایه‌گذاران، لازم است، توربین‌های تولید شده با راندمان، ضریب اطمینان و چرخه عمر بالاتر، به وسیله ی ابزارهای سنجش و ارزیابی دقیق، راستی آزمایی گردند. در نهایت، این توربین‌ها برای عملکرد موثرتر، با سیستم‌های ذخیره‌سازی و انواع دیگر سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر، ادغام گردند، تا به تولید پایدار انرژی خارج از شبکه، دست یابند.

1. Bianchini, A., Bangga, G., Baring-Gould, I & „Croce, A (۲۰۲۲). Current status and grand challenges for small wind turbine technology .Wind Energ. Sci ۲۰۳۷-۲۰۰۳ , doi:https://doi.org/10.5194/wes-7-2003-2022
2. Bogle, I. (۲۰۱۱). Integrating Wind Turbines in Tall Buildings .CTBUH Journal [Internet. ۳۴-۳۰.]
3. November 2003 .(Buildings Energy Databook .www.btscoredatabook.net.
4. Chen, S & „Li, Y (۲۰۲۲). Comparative Analysis of Two Energy-Efficient Technologies Used in the Shanghai Tower .Energy and Power Engineering از بازیابی ۱۲-۱ , https://doi.org/10.4236/epe.2022.141001
5. Cole, S (۲۰۲۳). Global Wind Energy Statistics .www.statista.com از بازیابی https://theroundup.org: https://theroundup.org/wind-energy-statistics/
6. Department, E. U) .November 2003 .(Energy Information Administration Office of Integrated Analysis and Forecasting .Washington: www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/download.html.
7. Gabra, S., Miles, J & „Scott, S (۲۰۲۱). Techno-economic analysis of stand-alone wind micro-grids . www.energy.gov از بازیابی https://www.energy.gov/eere/wind/articles/distributed-wind-market-report-2021-edition-released
8. Karekezi, S (۲۰۰۲). Renewables in Africa – meeting the energy needs of the poor .Energy Policy , ۱۰۶۹-۱۰۵۹doi:https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00058-7, 2002
9. Kim, H.-G., Jeon, W.-H & „Kim, D.-H (۲۰۱۶). December .(Wind Resource Assessment for High-Rise BIWT Using RS-NWP-CFD .Remote Sens از بازیابی https://doi.org/10.3390/rs8121019
10. Li, Z (۲۰۱۶). Performance assessment of tall building-integrated wind turbines for power generation .Applied Energy. ۷۸۸-۷۷۷ ,
11. LLC, X (۲۰۱۲). September 21 .(Greenway Self Park .architectmagazine از بازیابی https://www.architectmagazine.com/project-gallery/greenway-self-park
12. Mertens, S) .January 2006 .(Wind Energy in the Built Environment .United Kingdom: Multi-Science.
13. Moreira Chagas, C., Giannini Pereira, M., Pinguelli Rosa , L & „Fidelis da Silva , N (۲۰۲۰) . FromMegawattstoKilowatts: AReviewofSmall WindTurbineApplications, LessonsFromTheUS toBrazil .Sustainability .doi:http://dx.doi.org/10.3390/su12072760
14. neira, j (۲۰۱۵). nov 19 .(coffice proposes to transform existing viaducts into electricity generators . designboom.com از بازیابی https://www.designboom.com/architecture/coffice-solar-wind-project-11-19-2015/
15. (۲۰۰۸). Oklahoma Medical Research Foundation (OMRF) Wind and Solar PV Design and Engineering .Synergy California L.P از بازیابی www.synergyii.com
16. Orrell, A., Kazimierczuk, K & „Sheridan, L (۲۰۲۱). Distributed Wind Market Report: 2021 Edition . www.energy.gov از بازیابی https://www.energy.gov/eere/wind/articles/distributed-wind-market-report-2021-edition-released
17. Rafter, D (۲۰۰۷). Solar panels and wind turbines will result in long-term savings for one Chicago apartment complex .Energy Journal از بازیابی http://www.distributedenergy.com/september-october-2007/energy-affordable-housing-1.aspx
18. Research Global Info (۲۰۲۱). Global Small wind Market 2020 by Manufacturers, Regions, Type and Application, Forecast top 2025 .marketstudyreport از بازیابی https://www.marketstudyreport.com/reports/global-small-wind-turbines-market-2020-by-manufacturers-regions-type-and-application-forecast-to-2025
19. Sinisa, S., Neil, C & „Harries, A (۲۰۰۹). July 30 .(Urban Wind Energy .Taylor & Francis Group . London از بازیابی https://doi.org/10.4324/9781849770262
20. Smith, R & „Killa, S (۲۰۰۷). Bahrain World Trade Center (BWTC): The first large-scale integration of wind turbines in a building .The Structural Design of Tall and Special Buildings از بازیابی ۴۳۹ - ۴۲۹ , https://doi.org/10.1002/tal.416
21. Stathopoulos, T (۲۰۱۸). Urban wind energy: Some views on potential and challenges .Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics ۱۵۷-۱۴۶ , doi:https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.05.018
22. Wood, D (۲۰۱۱). Small wind turbines .Springer ,ISBN 9781849961752.
23. (۲۰۲۱) November 10 .(کاربردهای انرژی بادی در صنعت. https://frand.fr از بازیابی https://frand.fr.