



توربین‌های بادی سایز کوچک: مطالعه مروری بر مبنای آخرین فناوری‌های توسعه یافته

رضا محمودپور¹، امیر کیومرثی اسکوئی^{2*}، امین ترقی اسگوئی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

* تبریز، 51335-1996، kiumarsi@sut.ac.ir

چکیده

در یک دهه اخیر فناوری توربین‌های بادی رشد قابل توجهی داشته و همه ساله توربین‌های جدید با تنوع بالا به بازار این محصول ارائه شده است. هر کدام از این محصولات ارائه شده مزایای اختصاصی خود را دارند و در صورت بهره‌برداری در شرایط مناسب، بسیار کاربردی خواهند بود ولی اغلب به دلیل تنوع بالا و کارکردهای گسترده، تصمیم‌گیری جهت انتخاب و بهره‌برداری از توربین مناسب، کاری دشوار و بسیار تخصصی می‌باشد. شناخت دقیق هر یک از این تجهیزات، بررسی مزایا و معایب برداشت‌کننده‌های انرژی بادی و مقایسه آن‌ها با تمرکز روی توربین‌های بادی مینیاتوری هدف اصلی این پژوهش می‌باشد. این مطالعه برای توسعه دانش فنی موجود در زمینه برداشت‌کننده‌های انرژی بادی، به گردآوری پژوهش‌های پیشین در زمینه توربین‌های بادی کوچک بر اساس ویژگی‌های مختلف فیزیکی مانند توان، ساختار و نحوه عملکرد پرداخته است. علاوه بر این با ارائه اطلاعات آماری درباره برداشت‌کننده‌های مختلف، فناوری‌های نوین و ترکیب روش‌های مختلف برداشت انرژی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بنابراین، این مقاله با نگاهی جامع به برداشت‌کننده‌های مینیاتوری، دسته‌بندی مناسبی از این سیستم‌های ارائه داده است. نتایج پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد علاوه بر توربین‌های بادی متداول مانند توربین‌های بادی عمودمحور و افق محور، برداشت‌کننده‌های جدید مانند توربین‌های بدون پره گردابی، اویکن، سافونیان و اینولکس نیز می‌توانند با توجه به اصول کارکرد، مکانیزم تبدیل انرژی و ساختار فیزیکی در شرایط مناسب کارکرد خوبی از خود نشان دهند.

کلیدواژه‌گان: انرژی تجدیدپذیر، انرژی باد، انواع برداشت‌کننده‌های انرژی، دسته بندی توربین‌های بادی

Small scale wind turbines: A state of the art review

Reza Mahmoodpoor¹, Amir Kiyoumarsioskouei^{2*}, Amin Taraghi Osguei³

1-Msc Student, Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

2, 3- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

* P.O.B. 51335-1996 Tabriz, Iran, kiumarsi@sut.ac.ir

Received: 15 April 2023 Accepted: 14 Jan. 2024

Abstract

Over the last decade, wind turbine technology has made remarkable progress and new turbines with great variety has been proposed every year. Each of these products has its own advantages and can be very practical when operated under suitable conditions. However, due to their extensive functionalities and wide variety, selecting and operating the appropriate turbine often becomes a challenging and highly specialized task. The primary objective of this research is to examine and compare the advantages and disadvantages of wind energy harvesters, with the main focus on miniature wind turbines. The study contributes to the development of existing technical knowledge in the field of wind energy harvesters by compiling previous research on small wind turbines based on various physical characteristics such as power, structure, and performance. In addition, the article evaluates harvesters based on statistical information and assesses innovative technologies and the combination of different energy harvesting methods. The comprehensive classification provided for these miniature systems reveals that, besides conventional wind turbines like vertical and horizontal axis turbines, new harvesters such as vortex-bladeless, EWICON, Sophonian, and Involex can perform well under suitable conditions, considering their working principles, energy conversion mechanism, and physical structure.

Keywords: Renewable energy, wind energy, types of energy harvesters, classification of wind turbines**1- مقدمه**

ژنراتورهای الکترومکانیکی مختلف، می‌توانند از طریق مکانیزم‌های تبدیلی مختلف، با تکیه بر قطبش مواد، ارتعاشات ناشی از جریان را به انرژی الکتریکی تبدیل کنند [13]. الکترومغناطیس [14]، پیزوالکتریک [15]، الکترواستاتیک [16]، الاستومر دی‌الکتریک [17] و تریبولکتریک روش‌های متداول تبدیل انرژی هستند. مکانیزم‌های اصلی تبدیل انرژی در میکرو و نانو ژنراتورها برای برداشت انرژی باد در مقیاس کوچک، پیزوالکتریک [18، 19] و تریبولکتریک‌ها [20، 21] هستند. اما روش‌های مبتنی بر الکترواستاتیک و الکترومغناطیس نیز همچنان به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. محققان مطالعات زیادی را در مورد برداشت نیروی باد با استفاده از آسیاب‌های بادی کوچک^۶ [22] یا استفاده از ناپایداری‌های هوایی، مانند ارتعاش ناشی از گردابه^۷ [23، 24]، گالوپینگ^۸ [25، 26]، فلاتر^۹ [27] و دنباله-گالوپینگ^۸ [28، 29] انجام داده‌اند. همچنین از ارتعاش ناشی از تلاطم^{۱۰} نیز برای برداشت انرژی از باد استفاده شده است [30]. تنوع بالا در روش برداشت، تجهیزات استفاده شده و کاربردهای متنوع باعث شده است که پژوهشگران مختلفی اقدام به جمع و دسته‌بندی روش‌های برداشت انرژی کنند.

توملا و همکاران [31] مروری بر انواع مختلف توربین‌های بادی در مقیاس کوچک (توربین‌های بادی افق محور و عمود محور) ارائه کرده و آنها را از منظر عملکرد، طراحی پره، کنترل و ساخت توربین‌های بادی افق محور بررسی کرده‌اند. اسلام و همکاران [32] روند پیشرفت فناوری انرژی بادی و چالش‌های بالقوه آن را به طور کامل مورد بررسی قرار دادند. عمده مقالات مروری در حوزه توربین‌های بادی در مقیاس کوچک، بیشتر مربوط به توربین‌های بادی مرسوم بوده و فناوری‌های نوین در توربین‌های بادی کمتر مورد توجه پژوهشگران برای گردآوری قرار گرفته است.

لی و همکاران [33] پژوهش‌های مرتبط با سه نوع برداشت‌کننده انرژی مبتنی بر فلاتر (FEH)، که شامل برداشت‌کننده‌های مبتنی بر ایرفویل، مبتنی بر صفحه تخت و مبتنی بر بدنه انعطاف‌پذیر می‌باشد را مرور کردند. وی و جینگ [34] به مرور کاربرد مواد پیزوالکتریک پرداخته و روش‌های مدل‌سازی برداشت‌کننده‌ها را مورد بحث قرار دادند. یانگ و همکاران [35] و تران و همکاران [36] روش‌هایی را که منجر به بهبود عملکرد برداشت‌کننده‌ها می‌شود را مرور کرده و به کاربردهای امیدوارکننده‌ای از فناوری برداشت انرژی ارتعاشی پیزوالکتریک اشاره کردند. همچنین هارن و همکاران [37] پیشرفت‌های حاصل شده در برداشت‌کننده‌های انرژی پیزوالکتریک دوپایه^{۱۰} را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. ترویت و همکاران [38] مرور مختصری بر طراحی‌ها انجام داده و عوامل موثری را که می‌توانند بر پاسخ خروجی برداشت‌کننده‌های انرژی باد تأثیر بگذارند، تحلیل کردند. عبدالکافی [39] برخی از ساختارها و مفاهیم برداشت انرژی برای برداشت‌کننده‌های ارتعاش ناشی از جریان را بررسی و مرور کرد و اصول کارکرد آن‌ها را مورد بحث قرار داد. نیشی و همکاران [40] یک برداشت‌کننده ارتعاش ناشی از گردابه با دو درجه آزادی

با توجه به روند رو به رشد جمعیت جهان که انتظار می‌رود تا سال 2050 به 9/6 میلیارد نفر برسد [1] و پیشرفت تکنولوژی، به صورت مداوم بر میزان تقاضای انرژی افزوده می‌شود. این نیاز عمدتاً از طریق سوخت‌های فسیلی یا منابع تجدیدپذیر تامین می‌شود. استفاده گسترده از نفت، زغال سنگ و گاز طبیعی برای تامین انرژی مورد نیاز باعث افزایش انتشار دی اکسید کربن و سایر گازهای گلخانه‌ای می‌شود که در نهایت به تشدید گرمایش جهانی ختم می‌شود. به گفته مؤسسه مطالعات فضایی گدارد^۱، الگوهای دما و بارندگی در سراسر جهان ممکن است تا پایان قرن بیست و یکم تغییر کند. علاوه بر این، متوسط دمای جهانی می‌تواند تا سال 2100 بین 2 تا 11 درجه فارنهایت افزایش یابد [2]. علاوه بر مشکلات کلان ذکر شده می‌توان به مشکلاتی نظیر آلودگی هوا و محدود بودن سوخت‌های فسیلی نیز اشاره کرد. همین امر موجب شده تا در سال‌های اخیر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. هدف اصلی برداشت انرژی، تأمین انرژی شبکه‌های برق و پوشش بخشی از تقاضای برق کشورها است، هرچند در مقیاس کوچک انرژی‌های محیطی برای تامین بخشی از تقاضای انرژی الکتریکی خانگی، تامین آب گرم، آبیاری مزارع کوچک، فراهم کردن توان قایق‌های بادبانی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند [3]. هدف اصلی بخش دیگری از مطالعات، حذف وابستگی دستگاه‌های الکترونیکی کم‌مصرف به باتری‌های الکتروشیمیایی به دلیل معایب موجود در این باتری‌ها از جمله نیاز به تعویض و نگهداری دوره‌ای آن‌ها است [4].

معمولاً برای بسیاری از سیستم‌های الکترونیکی دور از شبکه، منابع مختلفی از انرژی‌های محیطی مانند انرژی‌های بادی [5]، خورشیدی [6]، حرارتی [7]، مکانیکی [8]، جزر و مد [9] و غیره در دسترس هستند که قابلیت بهره‌برداری را دارند. در میان منابع مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی بادی یا به طور کلی جریان هوا مقدار زیادی از انرژی مکانیکی را دارا است. این انرژی می‌تواند از طریق مکانیزم‌های مختلف برداشت انرژی، تبدیل به انرژی الکتریکی شود و برای تامین برق سیستم‌های الکتریکی مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان مثال، جریان در سیستم‌های تهویه و باد طبیعی نمونه‌هایی از جریان هوای موجود در محیط پیرامونی هستند. در مقیاس کوچک این منابع می‌توانند به عنوان منبع تغذیه جایگزین برای سیستم‌های الکترونیکی به جای تعویض باتری‌های تخلیه شده، تجهیزات و تکنولوژی مربوط به اینترنت اشیا، حسگرهای بی‌سیم خودکار^۲ عمل کنند [10].

وجود ویژگی‌های منحصر به فرد در توربین‌های مینیاتوری یا میکرو و نانو ژنراتورها^۳ از جمله چگالی توان بالا، سهولت ادغام با میکروسیستم‌ها [11]، حساسیت زیاد، هزینه کم و برداشت هرچه بیشتر انرژی باد بر خلاف سیستم‌های معمول باعث افزایش چشم‌گیر تحقیقات درباره این برداشت‌کننده‌ها در سالین اخیر شده است.

6. Galloping
7. Flutter
8. Wake galloping
9. Turbulence-induced vibration (TIVs)
10. Bistable

1. Goddard Institute for Space Studies
2. Wireless sensor networks (WSNs)
3. Micro- and nanogenerators (MNGs)
4. Miniaturized windmills
5. Vortex-induced vibrations (VIVs)

توربین‌های بادی تجاری تجهیزاتی هستند که انرژی جنبشی باد را به انرژی مکانیکی و سپس به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. عمده استفاده از این توربین‌ها بخاطر توان تولیدی مطلوبشان، در تامین برق شبکه است. این نوع توربین‌ها به دو دسته افق محور و عمود محور تقسیم می‌شوند.

3-1- توربین‌های بادی افق محور

این توربین‌ها متداول‌ترین نوع توربین‌های بادی می‌باشند که اجزای سازنده‌ی آنها شامل: تیغه یا پره، ژنراتور، روتور، گیربکس، پایه یا برج و سیستم ترمز هستند. چرخش پره‌های توربین بر مبنای نیروی لیفت و سطح آیرودینامیکی پره‌ها انجام می‌شود. این مقطع آیرودینامیکی برای ایجاد اختلاف فشار بین سطح بالا و پایین است که در نهایت منجر به ایجاد یک نیروی خالص عمود بر جهت باد می‌شود. در قسمت انتهایی توربین یک بادسنج و یک جهت‌نمای باد نیز وجود دارد که دائماً تغییرات مرتبط با افزایش یا کاهش باد و یا تغییر جهت باد را نشان که باعث افزایش تولید و بهره‌وری آن می‌شود. برای جلوگیری از آسیب دیدن پره‌های توربین در شرایط بحرانی، موتورهای منحرف‌کننده به سرعت با جهت باد هماهنگ می‌شوند. گام قابل تنظیم پره و بلندی پایه برج امکان دسترسی به بادهای قوی‌تر را فراهم کرده و در نهایت باعث افزایش بازدهی این توربین‌ها می‌شود. افزودن ۱۰ متر به پایه برج، سرعت باد را ۲۱ درصد افزایش داده و باعث افزایش ۳۴ درصدی توان تولیدی می‌شود [3]. این توربین‌ها، به دو نوع مستقر در خشکی یا زمین^۴ و مستقر در دریا^۵ تقسیم‌بندی می‌شود و بزرگترین توربین ساخته شده دریایی، هالیاده-ایکس^۶ نام دارد که دارای سه پره فیبر کربنی، ارتفاع برج 107 متر و توان تولیدی 13 مگاوات است [41]. معایب این توربین‌ها شامل هزینه‌های بالای ساخت و راه‌اندازی می‌شود که پره‌های بزرگ آنها حدود ۳۰ درصد از کل هزینه تجهیزات را تشکیل می‌دهند. بازتاب امواج الکترومغناطیسی یکی دیگر از معایب این نوع توربین‌ها است که باعث ایجاد اختلال در سیستم‌های راداری می‌شود. علاوه بر این بهره‌گیری از این نوع توربین‌ها باعث از بین رفتن چشم‌اندازها و زیبایی طبیعت، مرگ و میر پرندگان و آلودگی صوتی می‌شود [42].

3-2- توربین‌های بادی عمود محور

توربین‌های عمودمحور برخلاف توربین‌های افقی، دارای پره‌های عمود بر زمین و محور دورانی عمودی هستند. تجهیزات و قطعات این توربین‌ها نزدیک به سطح زمین است. اساس حرکت این نوع توربین‌ها، نیرو درگ است. توربین‌های بادی بر پایه نیروی درگ مانند یک بادبان باز عمل می‌کنند که نیروی باد، سطح مورد نظر را به جلو می‌راند. این توربین‌ها به طور قابل توجهی نسبت به توربین‌های افق محور ارزان‌تر هستند و ساختار ساده‌ای هم دارند. از جمله مزایای این نوع توربین‌ها می‌توان به وابسته نبودن آن‌ها به جهت باد، سطح مقطع بزرگتر پره‌ها برای جذب انرژی بیشتر، کارآمدی بیشتر در برابر تندبادها، کم هزینه بودن تعمیر و نگهداری، کارکرد در سرعت‌های پایین باد به طوری که می‌توانند به راحتی از چند میلی‌وات تا چند مگاوات را تولید کنند و در نهایت آسیب کمتر به پرندگان اشاره کرد.

4- فناوری‌های نوین در توربین‌های بادی

را درون آب مطالعه کردند. این برداشت‌کننده از دو استوانه تشکیل شده است که توسط فنر به هم متصل شده‌اند. با بررسی اکثر پژوهش‌های منتشر شده در این حوزه می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای کلیدی در تعیین کارایی و راندمان این برداشت‌کننده‌ها عبارتند از: نوع مبدل، سرعت برش باد ورودی^۱، سرعت برش باد خروجی^۲، حداکثر توان خروجی، سرعت باد در توان حداکثر، ابعاد دستگاه، چگالی توان در ناحیه درگیر با باد و شکل هندسی جسم‌نما^۳.

طبق پژوهش‌های موجود، برداشت‌کننده‌های انرژی ناشی از جریان علاوه بر هوا در داخل آب نیز مدل سازی و آزمایش می‌شوند و نیاز است در مطالعات مروری مورد توجه قرار گیرند. علاوه بر این، برداشت‌کننده‌های انرژی بادی به طور عمده به دو دسته، شامل آسیاب‌ها بادی مینیاتوری و برداشت‌کننده‌های انرژی ارتعاش ناشی از جریان تقسیم بندی می‌شوند که در اغلب پژوهش‌های مروری پیشین این دو دسته به صورت مجزا مطالعه شده‌اند. همچنین برداشت‌کننده‌های انرژی ارتعاش ناشی از تلاطم نیز در کنار سایر برداشت‌کننده‌های بادی، مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند. از این رو نیاز به مطالعه جامع‌تری بود تا روش‌های مختلف برداشت انرژی از باد را به صورت یکجا جمع‌آوری کرده و بتواند مرجع مناسبی به سوالات کلان شرکت‌ها، پژوهشگران، سیاست‌گذاران و علاقه‌مندان به حوزه انرژی بادی باشد. در این پژوهش، تلاش بر این بوده است که تا جای ممکن اشاره‌ای اجمالی به روش‌های مختلف برداشت انرژی از باد در مقیاس‌های توانی مختلف شود. در ادامه برداشت‌کننده‌های بادی میناتوری با توجه به نوع مبدل استفاده شده در آنها و برداشت انرژی در اثر پدیده‌های مختلف هوایی، دسته بندی و مورد ارزیابی دقیق‌تری قرار گرفته‌اند.

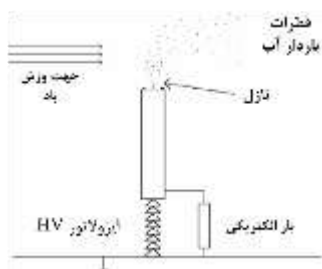
2- روش پژوهش

این مقاله مروری به منظور گسترش دانش عمومی در زمینه انرژی بادی، یک رویکرد ترویج و توسعه‌ای را اتخاذ کرده است. با توجه به ماهیت توصیفی گردآوری، فرضیه‌ای تعیین نشده، و تمرکز اصلی بر دسته‌بندی جامع‌تر برداشت‌کننده‌های انرژی بادی است. روش به کاررفته برای جمع‌آوری اطلاعات به شکل مطالعات موردی است. با مطالعه پژوهش‌های موجود در این حوزه، برداشت‌کننده‌های انرژی بادی بر اساس مقیاس تولید توان از چند کیلووات تا چند میلی‌وات دسته‌بندی شده‌اند. این برداشت‌کننده‌ها در 3 دسته کلی قرار گرفته‌اند که عبارت است از: ۱- برداشت‌کننده‌های انرژی بادی در مقیاس بزرگ و صنعتی که برداشت انرژی عمدتاً با استفاده از توربین‌های بادی مرسوم و کلاسیک انجام می‌گیرد. ۲- فناوری‌های نوین برداشت انرژی که بیشتر برای مصارف خانگی در مکان‌های دور افتاده مورد استفاده قرار می‌گیرند و یا در حد نمونه اولیه بوده و به تولید انبوه نرسیده‌اند. ۳- توربین‌های بادی مینیاتوری که توان تولیدی آنها در مقیاس میلی‌وات بوده و به عنوان جایگزین باتری‌های تجهیزات الکترونیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ادامه، میکروتوربین‌های بادی با جزئیات بیشتر در مقایسه با سایر روش‌های برداشت انرژی مورد بررسی قرار گرفته است.

3- توربین‌های بادی تجاری

4. On-shore
5. Off-shore
6. Haliade-x

1. Cut-in wind speed
2. Cut-out wind speed
3. Bluff body



شکل 2 اساس کارکرد توربین اویکن [45]

این توربین‌ها متشکل از یک چهارچوب فولادی و چندین لوله عایق افقی متصل به چهارچوب هستند. هر لوله دارای چندین کتروود و نازل است که به طور پیوسته ذرات دارای بار مثبت را در هوا منتشر می‌کند و وزش باد آنها را حرکت داده و با جدا شدن آنها بار منفی جایگزین شده و موجب تغییر ولتاژ می‌شود. بازدهی این توربین‌ها علاوه بر سرعت باد به قدرت میدان و میزان بار قرارگرفته روی قطرات هم بستگی دارد. با در نظر گرفتن همه این شرایط، بیشترین بازدهی این توربین‌ها را 30 درصد می‌توان در نظر گرفت. حذف پره‌ها، قطعات دوار و گیربکس از مزایای این توربین‌ها می‌باشد که باعث کاهش چشم‌گیر هزینه‌های تعمیر، نگهداری و استهلاک آنها شده است [45].

3-4- توربین بدون پره سافونیان³

این توربین در سال 2012 و توسط استارت‌آپ سافون انرژی ساخته شد (شکل 3). الگوی کارکرد این نوع توربین‌ها دقیقاً مشابه مهار باد، توسط کشتی‌های بادبانی است. شکل حرکت این توربین‌ها شبیه عدد 8 لاتین در فضا است. در این توربین‌ها به جای پره‌های دوار از یک صفحه دایره‌ای شکل استفاده شده است. حرکت این صفحه باعث به حرکت درآمدن پیستون سیلندرهای هیدرولیکی متصل به آن می‌شود که بدین‌گونه انرژی جنبشی باد به فشار هیدرولیکی تبدیل شده و در نهایت فشار هیدرولیکی را می‌توان ذخیره (در باتری هیدرولیکی) یا مستقیماً با استفاده از مولدهای هیدرولیکی به برق تبدیل کرد [46].



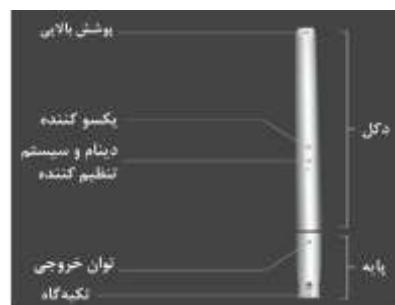
شکل 3 نمونه اولیه ساخته شده از توربین سافونیان [46]

بازده این توربین‌ها در حدود 80 درصد و تقریباً 2 برابر توربین‌های بادی مرسوم است. هزینه تمام شده این توربین‌ها 45 درصد ارزان‌تر از توربین‌های معمولی هست. توان تولیدی در این توربین‌ها با افزایش سرعت به صورت نمایی افزایش می‌یابد و تولید برق در سرعت‌های بالا از دیگر خصوصیات این توربین‌ها به‌شمار می‌رود. حذف پره‌ها در این فناوری، همانند سایر توربین‌های بدون پره باعث شده که تحت تاثیر نیروهای ژيروسکوپی قرار نگیرد، به پرندگان آسیبی نرساند و امواج مضر و آلودگی صوتی ایجاد نکند [46].

در حالت کلی این توربین‌ها را می‌توان در 5 گروه دسته‌بندی کرد: توربین‌های بدون پره گردابی، توربین‌های اویکن، توربین‌های بدون پره سافونیان، توربین‌های اینولکس، توربین‌های هواپرد و شناور که در ادامه به صورت مختصر معرفی شده است.

1-4- توربین بدون پره گردابی¹

جریان‌های گردابی در اثر قرار گرفتن اجسام در مسیر باد و در پشت آن‌ها ایجاد می‌شوند. ایده استفاده از انرژی جریان‌های گردابی باد توسط یک استارت‌آپ اسپانیایی در سال 2013 ارائه شد. از دلایل توسعه این مدل توربین‌ها می‌توان به رفع مشکلات توربین‌های سنتی از جمله تعمیر و نگهداری، استهلاک، سروصدا، اثرات زیست محیطی و جنبه‌های بصری اشاره کرد. به طوری که انتظار می‌رود هزینه ساخت و عملکرد این توربین‌ها در مقایسه با توربین‌های بادی مرسوم به مقدار 53 و 51 درصد و هزینه‌های نگهداری 80 درصد کاهش یابد. مطابق شکل 1 نسل جدید این توربین‌ها استوانه‌ای شکل بوده و از جنس فیبرکربن و فایبرگلاس هستند که ژنراتور آن‌ها در قسمت پایینی توربین تعبیه شده است. طرز کار توربین به این صورت است که جریان گردابی، قسمت بالای توربین را به حرکت وا می‌دارد که این حرکت در قسمت ژنراتور به صورت ارتعاشی توسط یک مولد برق خطی، برداشت شده و به الکتریسیته تبدیل می‌شود. تنها عیب این نوع توربین‌ها در مقایسه با توربین‌های مرسوم کمبود 30 درصدی بازده آن‌ها است [43, 44].



شکل 1 شماتیکی از جدیدترین توربین بدون پره گردابی در حال توسعه، به ارتفاع 2.75 متر و اجزای تشکیل‌دهنده آن [43]

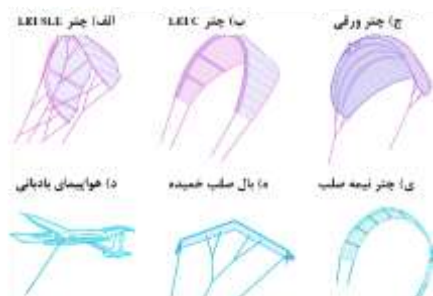
2-4- توربین اویکن²

فناوری کارکرد این توربین‌ها در واقع فناوری برداشت انرژی باد با استفاده از قطرات باردار آب است. این توربین‌ها از سال 2013 شروع به توسعه کرده‌اند. همانطور که در شکل 2 نیز آمده است جریان هوا، قطرات باردار (بار مثبت) آب را به سمت الکترودهای مثبت حرکت می‌دهد و این امر موجب افزایش انرژی پتانسیل آن‌ها شده و باعث تغییر ولتاژ می‌شود که در نهایت این تغییرات ولتاژ به الکتریسیته تبدیل می‌شود.

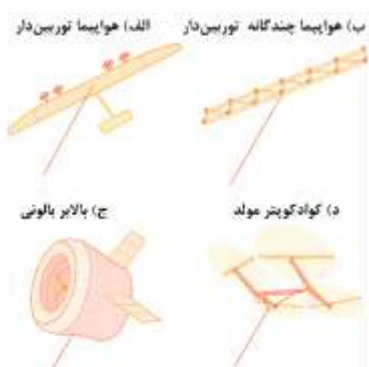
3. Sophonian

1. Vortex-bladeless
2. Electrostatic wind energy convertor (EWICON)

به یک دیگر متصل شده‌اند. این توربین‌ها را می‌توان از لحاظ نوع به دو دسته سیستم‌های ژنراتور زمینی^۴ که در آنها تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی در سطح زمین و سیستم‌های ژنراتور هوایی^۵ که در آنها چنین تبدیل در هواپیما انجام می‌شود، تقسیم کرد که در شکل‌های 5 و 6 چند نمونه از مدل‌های مختلف آن‌ها آورده شده است.



شکل 5 انواع مختلف هواپیما در سیستم‌های ژنراتور زمین [48]



شکل 6 انواع مختلف هواپیما در سیستم‌های ژنراتور هوایی [48]

این توربین‌ها نیاز به برج ندارد و از پره‌های بزرگ نیز در ساختار آن‌ها استفاده نشده است. اساس کار این توربین‌ها قرار گرفتن در ارتفاع بالاتر جهت بهره‌مندی از سرعت‌های بالا و پایدارتر باد و همچنین آشفتنگی کمتر است. در مدل‌های شناور این توربین‌ها از گاز هلیوم استفاده می‌شود و در ارتفاع 1000 تا 2000 پا بالاتر از سطح زمین قرار می‌گیرند. در این ارتفاع وزش باد نسبت به ارتفاع سایر توربین‌های مرسوم 5 تا 8 برابر قوی‌تر است. بازدهی این نوع توربین‌ها از توربین‌های مرسوم 2 برابر بیشتر بوده و هزینه تولید برق نیز 80 درصد کاسته شده است و هرکدام قادر به تولید 100 کیلووات الکتریسیته هستند [48, 49].

5- برداشت‌کننده‌های انرژی بادی مینیاتوری یا میکرو و نانو ژنراتورها

در این بخش به بررسی انواع برداشت‌کننده‌های انرژی بادی در مقیاس کوچک پرداخته شده است، از جمله آسیاب‌های بادی کوچک و برداشت‌کننده‌هایی که بر اساس ناپایداری‌های هوایی طراحی شده‌اند مانند: ارتعاش ناشی از گردابه، گالوپینگ، ویک‌گالوپینگ، فلاتر و ارتعاش ناشی از توربولانس.

4-4- توربین اینولکس^۱

ایده اولیه ساخت این توربین از سازه‌های بادگیر شهر یزد برداشته شده است. همان‌طور که در شکل 4 گویاست این توربین‌ها از یک برج عمودی، جهت مکش باد محیط به داخل و از یک سازه افقی که توربین‌ها در آن قرار گرفته، ساخته شده‌اند.



شکل 4 نمونه عملیاتی توربین اینولکس

اساس کار این توربین‌ها بر افزایش دادن سرعت باد استوار است، به این صورت که به دلیل اختلاف فشار موجود بین داخل محفظه و محیط اطراف، باد به داخل مکیده شده و بعد از افزایش سرعت به محفظه توربین‌ها می‌رسد و با دوران توربین‌ها انرژی جنبشی باد به الکتریسیته تبدیل شده و باد دچار افت فشار می‌شود و در نهایت باد کم فشار با عبور از یک دیفیوزر به فشار محیط رسیده و دوباره به محیط برگردانده می‌شود. جهت وزش باد در این توربین‌ها اهمیتی نداشته و حجم باد ورودی نیز قابل تنظیم است. این توربین‌ها با سرعت باد کمتری نسبت به توربین‌های افقی محور مرسوم برق تولید می‌کنند (جدول 1) و توان تولید آنها متغیر از 500 وات تا 20 مگاوات است. به دلیل نزدیک بودن ژنراتور آنها به زمین، قابلیت اطمینان بیشتری دارند و هزینه‌های ساخت و تولید برق کمتری نسبت به توربین‌های معمولی دارند. همچنین مزایای عدم استفاده از پره‌های بزرگ، که در بخش‌های قبلی نیز ذکر شده را دارا هستند [47].

جدول 1 مقایسه مشخصات توربین اینولکس و توربین‌های مرسوم [47]

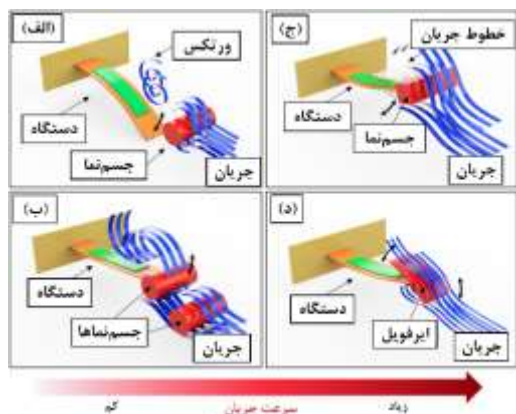
پارامتر	توربین افقی محور	اینولکس
سرعت نامی جریان باد (m/s)	12.5	6.25
توان نامی (w)	600	600
سرعت برش پایین باد (m/s)	2	1
سرعت برش بالای باد (m/s)	25	60
ارتفاع برج (m)	10	18.3
حداکثر گشتاور مجاز (rpm)	1400	1400
حداکثر جریان نامی (A)	35	35

4-5- توربین‌های هوایرد^۲ و شناور^۳

توربین‌های بادی هوایرد عموماً از دو جزء اصلی تشکیل شده‌اند، یک سیستم زمینی و حداقل یک هواپیما^۴ که به صورت مکانیکی (در برخی موارد همچنین از نظر الکتریکی) توسط طناب (که اغلب به عنوان اتصال دهنده نامیده می‌شوند)

4. Aircraft
5. Ground-Gen
6. Fly-Gen

1. Involex
2. Airborne wind energy systems
3. Buoyant air turbine (BAT)



شکل 7 چهار دسته مکانیزم‌های ارتعاش ناشی از جریان که از نظر محدوده سرعت جریان و ویژگی‌های فیزیکی طبقه‌بندی شده‌اند: (الف) ارتعاشات ناشی از گردابه، (ب) ویک‌گالوپینگ، (ج) گالوپینگ، و (د) فلاتر [50]

5-1- آسیاب بادی یا توربین‌های بادی کوچک

رانکورت و همکارانش [60] عملکرد یک نوع توربین بادی با مقیاس سانتی‌متر را مورد بررسی قرار دادند. این توربین از یک مولد الکترومغناطیسی بهره می‌برد. سه نمونه پروانه برای این توربین با زوایای گام متفاوت که همگی به قطر 4.2 سانتی‌متر و هر یک دارای 4 پره بودند، در تونل باد آزمایش شدند. نتایج تجربی نشان داد که "نظریه اش‌میتز"⁵، که برای توربین‌های بادی در مقیاس بزرگ توسعه داده شده بود، برای توربین‌های بادی مقیاس کوچک نیز معتبر است. بر اساس تئوری اش‌میتز حداکثر بازدهی توربین با افزایش نسبت سرعت نوک افزایش می‌یابد [61]. تونل باد استفاده شده در این آزمایش دارای 35 سانتی‌متر قطر با یک محفظه ماند⁶ در ورودی است. سرعت هوا با استفاده از یک لوله پیتوت و با دقت 0.5 درصد اندازه‌گیری می‌شود. تمام آزمایشات در دمای محیط 20°C و در مرکز محفظه آزمایش انجام شده است [60]. در سرعت‌های بالای باد، مثلاً 11.8 متر بر ثانیه، توان‌های بالایی همچون 130 میلی‌وات به دست آمد که منجر به بازده 9.5 درصدی توربین می‌شد. در حالی که در سرعت 5.5 متر بر ثانیه توان پایین 2.4 میلی‌وات تولید می‌شد که بازدهی 1.85 درصدی را به دنبال داشت. این تنوع زیاد در کارایی، ناشی از اصطکاک در ژنراتور و مقاومت الکتریکی داخلی آن است [60].

پریا [62] یک مدل نظری بر اساس نظریه خمش تیر بيمورف⁷ و مدار معادل خازن برای پیش‌بینی توان خروجی یک آسیاب بادی با مولد پیزوالکتریک ارائه کرده است. شکل 8 شماتیک آسیاب بادی پیزوالکتریک را نشان می‌دهد که شامل مبدل‌های بيمورف در امتداد محیط دایره‌ای شکل است. در این نمونه اولیه از 10 بيمورف استفاده شده است. ابعاد هر بيمورف 60×20×0.6 میلی‌متر مکعب با طول آزاد 53 میلی‌متر است. چینش مبدل‌ها به گونه‌ای است که متناسب با جریان باد، مبدل پیزوالکتریک بین استاپرها⁸ نوسان می‌کند. حرکت نوسانی با استفاده از مکانیزم چرخ دنده بادامک ایجاد می‌شود. نوسان مداوم رفت و برگشت بيمورف بین دو استاپر به طور مداوم برق تولید می‌کند.

در دستگاه‌های برداشت انرژی ارتعاش ناشی از گردابه، یک جسم‌نما به مکانیزم تبدیل انرژی متصل است (شکل 7 الف). در این برداشت‌کننده‌ها، سرعت باد و ساختار جسم‌نما پارامترهای کلیدی برای طراحی دستگاه برداشت‌کننده هستند. جریان باد در اطراف جسم‌نما می‌تواند جریان گردابی و میدان فشار متناوب ایجاد کند که باعث ایجاد نیروهای درگ و لیفت و در نتیجه حرکت نوسانی می‌شود [50]. نسبت طول [51] یا تغییر شکل جسم‌نما [52] و سفتی فنر نگهدارنده جسم‌نما [53] برخی از پارامترهایی هستند که توسط محققان مورد توجه قرار گرفته‌است. گالوپینگ، یک سیستم چرخه‌ای یک درجه آزادی خود تحریک¹ و خود محدود کننده² است که در ناپایداری‌های هوایی کار می‌کند (شکل 7 ج). این ناپایداری می‌تواند به دلیل جسم‌نما در انتهای تیر برداشت‌کننده اتفاق بیفتد. در گالوپینگ عرضی، جسم‌نما در انتهای تیر شبیه به یک فلاتر 1 درجه آزادی است که در تعامل مستقیم با جریان هوا باعث ایجاد نوسان عرضی برای تیر می‌شود [54]. گالوپینگ به دلیل دامنه نوسان بزرگتر و دامنه وسیع‌تری از سرعت باد، مکانیزم مناسبی برای برداشت انرژی است. با توجه به موارد ذکر شده، برداشت‌کننده‌های گالوپینگ، برداشت‌کننده‌های مناسب باد برای فرانکس پایین و دامنه زیاد بی‌ثباتی ناشی از ریزش جریان‌های گردابی هستند [50]. ویک‌گالوپینگ، پیکربندی گالوپینگ عرضی با یک جسم‌نما اضافی در جلوی نوک جسم‌نمایش است (شکل 7 ب). در این مکانیزم گالوپینگ، ارتعاش در اثر ناپایداری حاصل از دنباله و در فاصله‌ای بعد از جسم‌نمای ثابت یا بین دو جسم‌نما اتفاق می‌افتد [55]. فلاتر یک سیستم چرخه‌ای جمع‌آوری انرژی دو درجه آزادی (ارتعاشات خمشی و پیچشی)، خود تحریک و خود محدود کننده است که در آن برهم کنش نیروی‌های ناپایدار هوایی با ایرفویل و حالت طبیعی ارتعاش ساختاری باعث ایجاد حرکت نوسانی می‌شود [50] (شکل 7 د). پیکربندی‌های مختلفی از برداشت‌کننده‌های انرژی فلاتر وجود دارد، که مبتنی بر اساس جریان محوری، بالا و پایین شدن [56]، بر اساس جریان متقاطع [57]، فلاتر همگرایی مودال [58]، و کنسول فلاتر دو طرفه [59] هستند. در میان دستگاه‌های برداشت‌کننده انرژی مبتنی بر فلاتر، آخرین و جدیدترین آنها، کنسول فلاتر دو طرفه است که عملکرد بهتری دارد. این دستگاه‌ها گزینه مناسبی برای برداشت انرژی از سرعت‌های بالای باد در سیستم‌هایی مانند: قطارهای سریع‌السیر و پهپادها هستند [50].

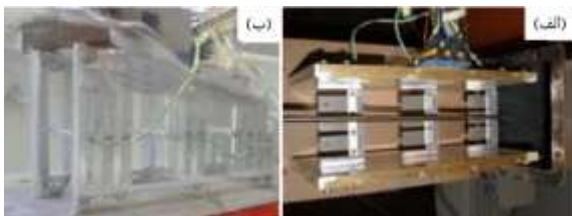
با بررسی مقالات موجود می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای کلیدی در تعیین کارایی و راندمان این برداشت‌کننده‌ها عبارت‌اند از: نوع مبدل، سرعت برش باد ورودی³، سرعت برش باد خروجی⁴، سرعت باد در توان حداکثر، ابعاد دستگاه، چگالی توان در ناحیه درگیر با باد و شکل هندسی جسم‌نما هستند که در ادامه به بررسی چند پژوهش در این خصوص پرداخته شده است.

5. Schmitz theory
6. Settling chamber
7. Bimorph
8. Stopper

1. Self-excited
2. Self-limiting
3. Cut-in wind speed
4. Cut-out wind speed

کیلووات بر متر مربع با سرعت جریان 2 متر بر ثانیه است. به جای استفاده از پلیمر انعطاف پذیر، یک دنباله پیزوالکتریکی (بیمورف) به پشت بدنه جسم‌نمای ثابت وصل شده است. حداکثر توان ایجاد شده برای سه نمونه اولیه بسته به موقعیت آنها با سرعت باد متغیر است. بیشترین خمش، 51 میکرومتر و با سرعت باد 40 متر بر ثانیه بر روی پایه بیمورف دوم به دست آمد. حداکثر ولتاژ 0.8 ولت با مقاومت بار 1 مگا اهم و حداکثر توان 0.108 میلی‌وات با مقاومت بار برابر 1.2 کیلو اهم در سرعت باد 45 متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری در آب گزارش نشده است اما پیش‌بینی می‌شد که سرعت جریان پایین آب منجر به توان قابل مقایسه‌ای شود زیرا چگالی انرژی در آب حدود 1000 برابر بیشتر از هوا است.

پوپرینگ و همکارانش [65] آزمایشات دیگری در آب و هوا را در این زمینه انجام دادند. مشخص شد که پایه‌های بیمورف با چینش پشت سر هم، قادر به نوسان همزمان در محیط‌های با چگالی بالا مانند آب هستند (شکل 10).

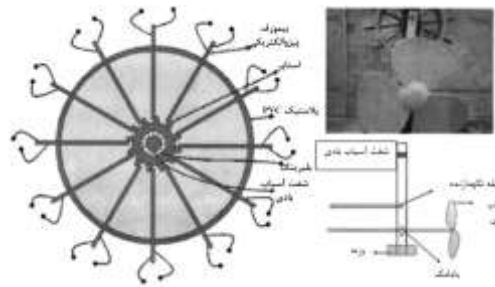


شکل 10 ستاپ آزمایشگاهی در هوا (الف) و در آب (ب) [65]

با توجه به تولید حداکثر توان 0.055 میلی‌وات از یک لایه پیزوالکتریک منفرد در سرعت 40 متر بر ثانیه، می‌توان مجموع توان خروجی حدود 1 میلی‌وات را برای یک سری 9 تایی از پایه‌های بیمورف را تخمین زد. در نهایت نیز نتیجه گرفته شد که قدرت سیستم برداشت کننده پیشنهادی برای تغذیه سنسورهای مدارهای منطقی و مدارهای انتقال داده بی‌سیم کافی است.

3-5 برداشت کننده‌های انرژی بر اساس پدیده گالوپینگ

یک مطالعه مقایسه‌ای و جامع برای سطح مقطع‌های مختلف جسم‌نما برای برداشت انرژی باد بر اساس پدیده گالوپینگ توسط ژائو و همکاران [66] و یانگ و همکاران [67] انجام شده است. آزمایش در تونل باد و با یک نمونه اولیه، شامل یک پایه پیزوالکتریک و جسم‌نما با مقاطع: مربع، مستطیل، مثلث، و پروفیل D شکل با ابعاد مشخصی، انجام شد.

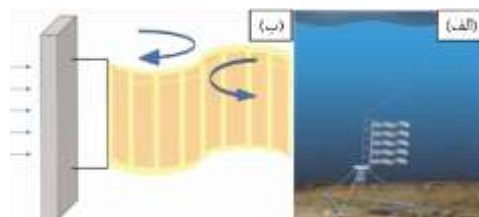


شکل 8 شماتیک آسیاب بادی پیزوالکتریکی که آرایش محرک‌های پیزوالکتریک را نشان می‌دهد [62]

سرعت برش ورودی باد 4.7 مایل در ساعت و سرعت برش خروجی باد 12 مایل در ساعت (که بیشتر از آن موجب آسیب به سازه می‌شود) اندازه‌گیری شد. حداکثر توان 7.5 میلی‌وات پس از یک‌سوسازی جریان با سرعت 10 مایل بر ساعت و در طول بار 6.7 کیلووات به دست آمد. در نهایت مشخص شد که توان تولید شده تقریباً به صورت خطی با فرکانس افزایش می‌یابد. بر اساس این مقاله پیشنهاد شد که آسیاب بادی پیزوالکتریک می‌تواند منبع تغذیه‌ای برای سنسورهای بی‌سیم باشد [62].

5-2 برداشت کننده‌های انرژی بر اساس ارتعاشات ناشی از گردابه

تیلور و همکاران [63] برداشت کننده ایل¹ که مشابه حرکت مارماهی است را برای برداشت انرژی از آب جاری مانند خور² یا حتی در اقیانوس پیشنهاد کرده‌اند. نوسانات ایجاد شده در ایل ناشی از ریزش گردابه‌های جسم‌نمای بالادست آن و شبیه به پرچی در پشت یک میله در یک روز بادی است. شکل 9 (الف) یک تصویر شبیه‌سازی شده از ایل است و شکل 9 (ب) شماتیک نیروهای تحت تأثیر ایل را نشان می‌دهد. از نظر تجربی، کرنش با ثبت بصری انحنا ایل در مخزن جریان و با اندازه‌گیری ولتاژ محاسبه می‌شود. حداکثر ولتاژ در حدود 3 ولت برای قطعه نزدیک جسم‌نما، با سرعت جریان 0.5 متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده است. اندازه‌گیری‌ها همچنین نشان داد که از قسمت سر تا دم، اعوجاج در ولتاژ خروجی افزایش یافته و مقدار ولتاژ کاهش یافته است. حداکثر توان، زمانی حاصل شد که فرکانس فلپینگ³ با فرکانس ریزش گردابه⁴ مطابقت داشت [63].

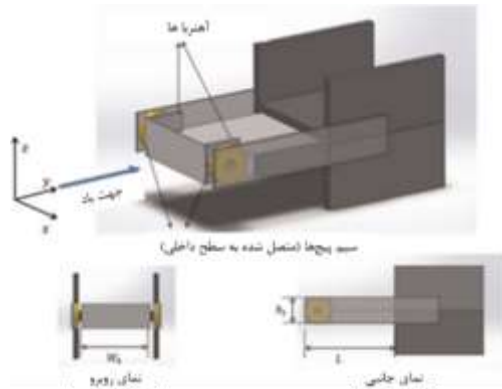


شکل 9 (الف) سیستم ایل مستقر در آب (ب) حرکت ایل در پشت جسم‌نما [63]

پوپرینگ و شوینسجر [64] با یک برداشت کننده انرژی بر اساس ارتعاش ناشی از گردابه، برداشت انرژی را در جریان هوا و آب اجرا کردند. به طور نسبی مشخص شد که چگالی انرژی موجود در محیط‌های جریان‌دار مانند هوا در محدوده 256 وات بر متر مربع با سرعت باد 10 متر بر ثانیه و در آب 1600

3. Flapping frequency
4. Vortex shedding frequency

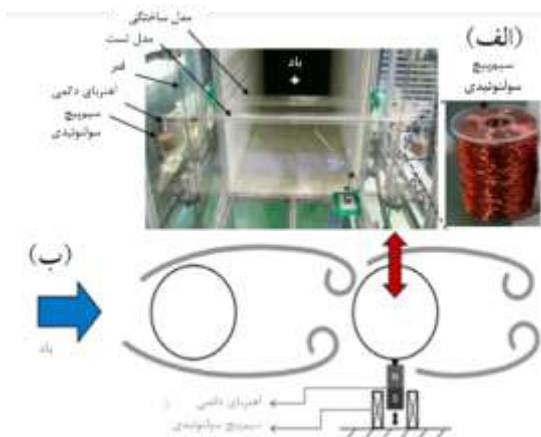
1. Eel
2. Estuary



شکل 13 طراحی نمونه اولیه یک برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی مبتنی بر فلاتر. آهنرباها به نوک کنسول و دو سیم پیچ به نوار کناری که بخشی از قاب ثابت است وصل شده است [72]

پارک و همکاران [72] به مطالعه روی برداشت کننده فلاتر با سر T شکل و مولد الکترومغناطیسی پرداخته اند. به طور تجربی مشخص شد که شروع برداشت انرژی در برداشت کننده تنها زمانی رخ می‌دهد که مقاومت بار از مقدار معینی، یعنی حداقل مقاومت شروع به کار فلاتر، فراتر رود. شبیه‌سازی‌های CFD برای تخمین میرایی آیرودینامیکی انجام شد که به خوبی با آزمایشات تجربی مطابقت داشت. با استفاده از یک نمونه اولیه (مطابق شکل 13)، حداکثر توان حدود 1.1 میلی‌وات و بار 1 کیلو اهم با سرعت باد 8 متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد.

5-5- برداشت کننده‌های انرژی بر اساس پدیده ویک‌گالوپینگ
 برداشت انرژی بادی با استفاده از پدیده ویک‌گالوپینگ و یک مبدل الکترومغناطیسی توسط یونگ و لی [73] مورد مطالعه قرار گرفت. مطابق شکل 14 آنها دستگاهی متشکل از دو استوانه موازی که به دلیل امواج ایجاد شده توسط استوانه رو به باد نوسان می‌کرد، ساختند.



شکل 14 (الف) ستاپ آزمایشگاهی برداشت کننده در تاسیسات تونل باد و (ب) شماتیک دستگاه برداشت انرژی پیشنهادی [73]

بر اساس آزمایشات مشخص شد که با ایجاد فاصله مناسب (4-5 برابر قطر استوانه) بین استوانه‌های موازی، استوانه‌ی بادگیر می‌تواند با اندازه قابل توجهی نوسان کند. با دو استوانه به قطر 5 سانتی‌متر و طول 0.85 متر با فضای بین

شکل 11 (الف) شماتیک و (ب) ستاپ آزمایشگاهی از برداشت کننده انرژی گالوپینگ با جسم‌نمای مربعی [67]

شکل 11 نمونه اولیه ساخته شده از برداشت کننده گالوپینگ با جسم نما مربعی شکل را نشان می‌دهد. برای اولین بار به طور تجربی مشخص شد که سطح مقطع مربعی بیشترین توان را تولید می‌کند و کمترین سرعت برش ورودی را در بین تمام مقاطع در نظر گرفته شده دارد. با پایه بیمورفی به ابعاد 150 میلی‌متر \times 30 میلی‌متر \times 0.6 میلی‌متر و جسم‌نمایی به ابعاد 40 میلی‌متر \times 40 میلی‌متر \times 150 میلی‌متر، حداکثر توان خروجی 8.4 میلی‌وات، در سرعت باد 8 متر بر ثانیه با مقاومت بهینه بار اندازه‌گیری شد که برای تغذیه یک گروه حسگر بی‌سیم تجاری کافی است. در پایان توصیه شد که از برداشت کننده‌هایی با مقطع مربعی برای برداشت انرژی در پدیده گالوپینگ استفاده شود.

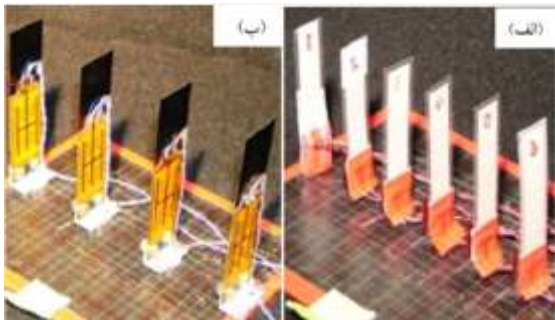
4-5- برداشت کننده‌های انرژی بر اساس پدیده فلاتر

ارتورک و همکارانش [68-71] از جمله اولین کسانی هستند که مهار انرژی جریان را از طریق پدیده آیرولاستیک فلاتر ایرفویل‌ها مطالعه کرده‌اند. مفهوم برداشت انرژی از کامپوزیت‌های ماکروفیبر با ایرفویل منحنی برای اولین بار توسط ارتورک و همکاران ارائه شد [69]. بعدها ارتورک و همکاران [68] یک مدل آیرولاستیک تجربی با پارامترهای یکپارچه برای شرایط مرزی فلاتر ارائه کردند. در این مقاله برآمدگی خطی و ممان در مرز فلاتر با تئوری ایرفویل نازک ناپایدار تئودورسن مدل‌سازی شده است. مطابق شکل 12 با استفاده از یک نمونه اولیه ایرفویل انعطاف پذیر، توان 10.7 میلی‌وات در سرعت فلاتر خطی 9.30 متر بر ثانیه با بار بهینه 100 کیلو اهم اندازه‌گیری شده است. هم از نظر تئوری و هم از نظر تجربی مشخص شد که بار بهینه، حداکثر سرعت را به فلاتر می‌دهد این امر به دلیل حداکثر اثر میرایی شنت در طی فرایند تولید توان است.



شکل 12 ستاپ آزمایشگاهی برداشت کننده مبتنی بر فلاتر [68]

ناچیز باد هم هرگز از بین نمی‌روند و می‌توان با استفاده از دستگاه‌های برداشت کننده انرژی بر اساس ارتعاشات ناشی از تلاطم مورد استفاده قرار گیرند.



شکل 16 تصاویری از چمن پیزوالکتریکی (الف) نوع ۱ و (ب) نوع ۲ [30]

هوبک و اینمن [30] مفهوم برداشت انرژی از جریان‌های بسیار متلاطم را با "چمن پیزوالکتریک" پیشنهاد کردند. مدل‌سازی آماری برای نیروهای القای آشفته به کمک یک تکنیک ترکیبی از مدل‌سازی الکترومکانیکی پیشنهاد و ارائه شد. این مدل‌سازی، اولین مدل تایید شده تجربی برای برداشت انرژی ارتعاشات ناشی از تلاطم بود. به طور تجربی، حداکثر توان خروجی 1 میلی‌وات برای دستگاه چهار مبدلی (شکل 16 ب) ساخته شده با مولدهای پیزوالکتریکی در حداقل سرعت باد 11.5 متر بر ثانیه و بار 49.2 کیلو اهم اندازه‌گیری شد. حداکثر توان 1.2 میکرووات به ازای هر دستگاه با سرعت باد 7 متر بر ثانیه روی بار 4.7 مگا اهم برای دستگاه شش مبدلی (شکل 16 الف) با مبدل‌های PVDF اندازه‌گیری شد. در پایان نتیجه‌گیری شد که مزیت اصلی دستگاه‌ها در استحکام آنهاست. همچنین وجود افزونگی ذاتی^۱ در برداشت کننده‌ها موجب بقای بیشتر آنها شده است. زیرا آسیب دیدن یک مبدل تنها موجب کاهش جزئی از توان کل می‌شود [30].

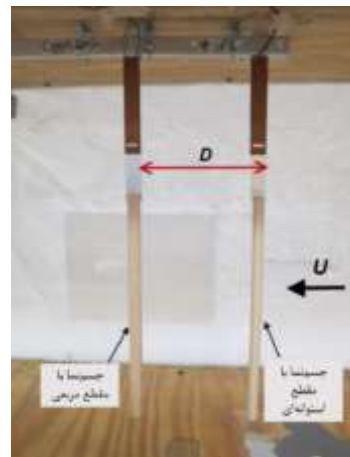
6- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی جامع انواع مختلف روش‌های بهره‌برداری از انرژی باد و کاربردهای آن در سه مقیاس مختلف، یعنی توربین‌های بادی تجاری، فناوری‌های نوآورانه و توربین‌های بادی مینیاتوری، پرداخته شده است. همچنین، یک نمای کلی و تصویر واقعی از هر توربین، توضیح مختصری از نحوه عملکرد و اجزاء تشکیل‌دهنده توربین‌ها ارائه شده و در نهایت مزایا و معایب آنها مقایسه شده است. علاوه بر این، به همراه مقایسه کیفی توربین‌ها، توربین‌های بادی مینیاتوری به صورت کمی نیز بررسی شده است و خلاصه‌ای از پارامترهای حیاتی در جدول 2 ارائه داده شده است تا از مقایسه آنها درک بهتری از این برداشت‌کننده‌های انرژی حاصل شود.

در حال حاضر، توربین‌های بادی مرسوم در مقیاس بزرگ، در صنعت و به ویژه در تولید برق شبکه کاربرد فراوانی دارند. توربین‌های بادی مرسوم به دو صورت مستقر در خشکی و یا مستقر در دریا مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. با این حال، استفاده از پره‌های بزرگ در این توربین‌ها باعث افزایش هزینه‌های ساخت، نگهداری و تعمیر آنها شده است که حدود 30 درصد از این هزینه‌ها، مربوط به این پره‌های غول‌پیکر است. این توربین‌های سنتی دارای معایبی

25 سانتی‌متر، میانگین توان خروجی 50 تا 370 میلی‌وات تحت سرعت باد 2.5 تا 4.5 متر بر ثانیه با پیکربندی‌های سیم پیچ و فنر مختلف اندازه‌گیری شد. بر اساس این نتایج، برداشت کننده انرژی باد با مولد پیزوالکتریک نیز می‌تواند از پدیده ویک‌گالوپینگ با چیدمان مناسب استوانه‌های موازی استفاده کند.

عبدالكافی و همکاران [74] با قرار دادن یک استوانه در جهت باد (برای ایجاد اثرات موجی) و یک استوانه چهارگوش مربعی، یک برداشت‌کننده انرژی گالوپینگ را به یک دستگاه برداشت‌کننده از پدیده ویک‌گالوپینگ تبدیل کرده و با این کار راندمان دستگاه را افزایش دادند. شکل 15 نشان دهنده اجزای تشکیل‌دهنده این برداشت‌کننده است. به طور تجربی مشخص شد که دامنه سرعت باد برای برداشت موثر انرژی را می‌توان با اثرات موجی تولید شده در استوانه بالادست افزایش داد. به کمک یک استوانه بالادست، توان استوانه مربعی، زمانی که فاصله بین این دو بزرگتر از 16 سانتی‌متر بود، بخصوص در بازه سرعت باد 2.58 تا 3.51 متر بر ثانیه که در آن استوانه مربعی به تنهایی هیچ توانی تولید نمی‌کرد، به شدت افزایش یافت. با فاصله 24 سانتی‌متری بین دو جسم نما، حداکثر توان 40 الی 50 میکرووات در سرعت باد 3.05 متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. در پایان نتیجه‌گیری شد که برای بهبود عملکرد برداشت‌کننده‌های گالوپینگ می‌توان آنها را با استفاده از اثرات ویک‌گالوپینگ، ابعاد، فاصله و مقاومت بار مناسب باز طراحی کرد.



شکل 15 ستاپ آزمایشگاهی استوانه‌های مقطع دایره ای و مربعی (اثرات ویک)

[74]

5-6- برداشت کننده‌های انرژی بر اساس ارتعاش ناشی از آشفتگی

یک مشکل بزرگ در برداشت‌کننده‌های ذکر شده قبلی این است که اکثر آنها فقط در شرایط جریان آرام نوسان و انرژی تولید می‌کنند این در حالی است که در محیط طبیعی معمولاً آشفتگی وجود دارد. همچنین برداشت‌کننده‌های معرفی شده در بخش‌های پیشین نیازمند یک سرعت جریان حداقلی به عنوان سرعت برش باد ورودی برای تولید توان دارند که در سرعت‌های کمتر از آن نمی‌تواند توانی تولید کنند. ارتعاشات ناشی از تلاطم، حتی با سرعت بسیار

1. Inherent redundancy

با توجه به پیشرفت‌های اخیر در تکنیک‌های برداشت انرژی باد، انتخاب توربین باد مناسب برای استفاده، وابسته به نیازهای خاص توان مصرفی می‌باشد. در مواردی که نیاز به تولید توان بسیار زیادی هست، مانند تولید برق شبکه، همچنان توربین‌های بادی تجاری سنتی توصیه می‌شوند. اما در زمینه مصارف خانگی، توربین‌های نوین بدون پرده به‌خصوص توربین بدون پره سافونیان و توربین اینولکس که مورد اول فاقد پرده بوده و هزینه‌های تعمیر و نگهداری کمتری دارد و توربین اینولکس که بخش برداشت انرژی آن نزدیک به زمین است و مستقل از جهت وزش باد کار می‌کند، می‌توانند انتخاب‌های بسیار عملی باشند. علاوه بر این، توربین‌های بادی مینیاتوری نقشی مهمی در تأمین انرژی، برای تجهیزات الکترونیکی را ایفا می‌کنند. با مقایسه مطالعات موجود در زمینه میکروتوربین‌های بادی می‌توان نتیجه گرفت که برداشت‌کننده‌های فلاتر و گالوپینگ بیشتر در سرعت جریان‌های بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند در حالی که برداشت‌کننده‌های ارتعاش ناشی از گردابه و ویک‌گالوپینگ‌ها در سرعت‌های پایین کاربردی تر هستند. همچنین می‌توان گفت اثرات ویک، باعث افزایش توان تولیدی برداشت‌کننده‌ها می‌شود. طراحی و توسعه میکروتوربین‌های بادی در برداشت انرژی باد به طور مداوم فرصت‌های جذابی برای راهکارهای انرژی سبزتر و پایدارتر ارائه می‌دهد.

همچون اختلال در سیستم‌های راداری، اثرات بصری آسیب‌زا بر مناظر طبیعی، کشتار پرندگان و آلودگی صوتی هستند. بر خلاف توربین‌های بادی مرسوم، فناوری‌های نوآورانه هنوز به مرحله تولید انبوه نرسیده‌اند و اغلب برای تأمین برق در مصارف خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. حذف پره‌های بزرگ از ساختار آن‌ها باعث حذف معایب مرتبط با این اجزا شده است. انتظار می‌رود با بهبود کارایی این نوع توربین‌ها، در آینده بتوانند جایگزین مناسبی برای توربین‌های بادی مرسوم شوند و به عنوان یک منبع انرژی پایدار و قابل اطمینان در مناطق دور افتاده مورد استفاده واقع شوند. توربین‌های بادی مینیاتوری نقش مهمی در تأمین نیازهای برقی دستگاه‌های راه دور و بی‌سیم ایفا می‌کنند. حساسیت بالای آن‌ها در برداشت انرژی از باد باعث کاهش تلفات انرژی محیطی شده و ابعاد کوچک آن‌ها باعث کاهش هزینه تولید در مقایسه با توربین‌های بزرگتر می‌شود. با این حال، توان تولیدی این توربین‌ها به طور عمده در محدوده میلی‌وات قرار دارد. مکانیزم‌های تبدیل انرژی در توربین‌های مورد بررسی در این مقاله اساساً بر اساس جریان‌های جابجایی و قطبش مواد می‌باشد و از دو مکانیزم پیزوالکتریک و الکترومغناطیسی برای تولید توان استفاده می‌کنند.

جدول 2 مقایسه پارامترهای مختلف میکروتوربین‌های بادی

نویسنده	مکانیزم تبدیل انرژی	شکل جسم‌نما	سرعت برش ورودی باد (m/s)	سرعت برش خروجی باد (m/s)	حداکثر توان (mW)	سرعت باد در توان حداکثر (m/s)
[60]	رناکورت و همکاران	-	-	-	130	11.8
[62]	پریا	-	2.1	5.4	7.5	4.5
[63]	تیلور و همکاران	صفحه	-	-	3 ولت	0.5 (سرعت آب)
[64]	پوبرینگ و شوپسنجر	چند ضلعی	4.5	45	0.108	45
[65]	پوبرینگ و همکاران	D-شکل	15	-	1	40
[67]	ژائو، یانگ و همکاران	مربع	2.5	-	8.4	8
[68]	ارتورک و همکاران	ایرفویل	9.30	-	10.7	9.30
[72]	پارک و همکاران	نوک تخت، دستگاه T-شکل	4	-	1.1	8
[73]	یونگ و لی	بخش بادگیر: استوانه بخش عقب: استوانه	1.2	-	370.4	4.5
[74]	عبدالكافی و همکاران	بخش بادگیر: استوانه بخش عقب: مربع	0/4	-	0.05 – 0.04	3.05
[30]	هوبک و اینمن	-	9-10	-	4	11.5

- textile-based piezoelectric nanogenerators: A systematic review, *Nano Energy*, pp. 108414, 2023.
- [20] Z. Ren, L. Wu, Y. Pang, W. Zhang, R. Yang, Strategies for effectively harvesting wind energy based on triboelectric nanogenerators, *Nano Energy*, Vol. 100, pp. 107522, 2022.
- [21] X. Dong, Z. Liu, P. Yang, X. Chen, Harvesting Wind Energy Based on Triboelectric Nanogenerators, *Nanoenergy Advances*, Vol. 2, No. 3, pp. 245-268, 2022.
- [22] S. Priya, C.-T. Chen, D. Fye, J. Zahnd, Piezoelectric windmill: A novel solution to remote sensing, *Japanese journal of applied physics*, Vol. 44, 1L, L104, 2004.
- [23] M. Zhao, A review of recent studies on the control of vortex-induced vibration of circular cylinders, *Ocean Engineering*, Vol. 285, pp. 115389, 2023.
- [24] S. Chen, C.H. Wang, L. Zhao, A two-degree-of-freedom aeroelastic energy harvesting system with coupled vortex-induced-vibration and wake galloping mechanisms, *Applied Physics Letters*, Vol. 122, No. 6, 2023.
- [25] H.-T. Li, H. Ren, F. Cao, W.-Y. Qin, Improving the galloping energy harvesting performance with magnetic coupling, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 237, pp. 107785, 2023.
- [26] L. Zhao, Y. Yang, Enhanced aeroelastic energy harvesting with a beam stiffener, *Smart Materials and Structures*, Vol. 24, No. 3, pp. 032001, 2015.
- [27] M. Bryant, E. Garcia, Modeling and testing of a novel aeroelastic flutter energy harvester, *Journal of vibration and acoustics*, Vol. 133, No. 1, 2011.
- [28] X. Du, H. Chen, C. Li, Z. Li, W. Wang, D. Guo, H. Yu, J. Wang, L. Tang, Wake galloping piezoelectric-electromagnetic hybrid ocean wave energy harvesting with oscillating water column, *Applied Energy*, Vol. 353, pp. 122081, 2024.
- [29] T. Dao, T. Yagi, K. Noguchi, H. Fukushima, G. Mohallem, T. Do, Generation mechanism of wake galloping in two staggered circular cylinders in view of hysteretic flow phenomena, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 229, pp. 105127, 2022.
- [30] J. Hobeck, D. Inman, Artificial piezoelectric grass for energy harvesting from turbulence-induced vibration, *Smart Materials and Structures*, Vol. 21, No. 10, pp. 105024, 2012.
- [31] A. Tummala, R.K. Velamati, D.K. Sinha, V. Indraj, V.H. Krishna, A review on small scale wind turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 56, pp. 1351-1371, 2016.
- [32] M.R. Islam, S. Mekhilef, R. Saidur, Progress and recent trends of wind energy technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 21, pp. 456-468, 2013.
- [33] Z. Li, S. Zhou, Z. Yang, Recent progress on flutter - based wind energy harvesting, *International Journal of Mechanical System Dynamics*, Vol. 2, No. 1, pp. 82-98, 2022.
- [34] C. Wei, X. Jing, A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 74, pp. 1-18, 2017.
- [35] Z. Yang, S. Zhou, J. Zu, D. Inman, High-performance piezoelectric energy harvesters and their applications, *Joule*, Vol. 2, No. 4, pp. 642-697, 2018.
- [36] N. Tran, M.H. Ghayesh, M. Arjomandi, Ambient vibration energy harvesters: A review on nonlinear techniques for performance enhancement, *International Journal of Engineering Science*, Vol. 127, pp. 162-185, 2018.
- [37] R.L. Harne, K. Wang, A review of the recent research on vibration energy harvesting via bistable systems, *Smart materials and structures*, Vol. 22, No. 2, pp. 023001, 2013.
- [38] A. Truitt, S.N. Mahmoodi, A review on active wind energy harvesting designs, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 14, pp. 1667-1675, 2013.
- [39] A. Abdelkefi, Aeroelastic energy harvesting: A review, *International Journal of Engineering Science*, Vol. 100, pp. 112-135, 2016.
- [1] E. Until, World Population Prospects: 2012 Revision, *United Nations Department of Economic and Social Affairs: New York, NY, USA*, 2013.
- [2] Y. Kumar, J. Ringenberg, S.S. Depuru, V.K. Devabhaktuni, J.W. Lee, E. Nikolaidis, B. Andersen, A. Afjeh, Wind energy: Trends and enabling technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 53, pp. 209-224, 2016.
- [3] N. Maftouni, Z. Gaffarpour, New technologies of wind energy harvesting, in: *National conference of modern sciences and technologies*, Iran, Tehran, 1397. (in Persian)
- [4] L. Zhao, Y. Yang, Toward small-scale wind energy harvesting: Design, enhancement, performance comparison, and applicability, *Shock and Vibration*, 2017.
- [5] E. Sardini, M. Serpelloni, Self-powered wireless sensor for air temperature and velocity measurements with energy harvesting capability, *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, Vol. 60, No. 5, pp. 1838-1844, 2010.
- [6] K. Solangi, M. Islam, R. Saidur, N. Rahim, H. Fayaz, A review on global solar energy policy, *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 15, No. 4, pp. 2149-2163, 2011.
- [7] G. Sebald, D. Guyomar, A. Agbossou, On thermoelectric and pyroelectric energy harvesting, *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, No.12, pp. 125006, 2009.
- [8] H. Pan, L. Qi, Z. Zhang, J. Yan, Kinetic energy harvesting technologies for applications in land transportation: A comprehensive review, *Applied Energy*, Vol. 286, pp. 116518, 2021.
- [9] Z. Lin, Y. Zhang, Dynamics of a mechanical frequency up-converted device for wave energy harvesting, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 367, pp. 170-184, 2016.
- [10] Q. Wen, X. He, Z. Lu, R. Streiter, T. Otto, A comprehensive review of miniaturized wind energy harvesters, *Nano Materials Science*, 2021.
- [11] X. Guo, L. Liu, Z. Zhang, S. Gao, T. He, Q. Shi, C. Lee, Technology evolution from micro-scale energy harvesters to nanogenerators, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 31, No. 9, pp. 09300, 2021.
- [12] M.F. Daqaq, R. Masana, A. Erturk, D. Dane Quinn, On the role of nonlinearities in vibratory energy harvesting: a critical review and discussion, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 66, No. 4, 2014. *Computer communications*, Vol. 26, No. 11, pp. 1131-1144, 2003.
- [13] M. El-Hami, P. Glynn-Jones, N. White, M. Hill, S. Beeby, E. James, A. Brown, J. Ross, Design and fabrication of a new vibration-based electromechanical power generator, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 92, No. 1-3, pp. 335-342, 2001.
- [14] K. Aouali, N. Kacem, N. Bouhaddi, M. Haddar, On the optimization of a multimodal electromagnetic vibration energy harvester using mode localization and nonlinear dynamics, in: *Actuators*, MDPI, pp. 25, 2021.
- [15] F. Qian, Y. Liao, L. Zuo, P. Jones, System-level finite element analysis of piezoelectric energy harvesters with rectified interface circuits and experimental validation, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 151, pp. 107440, 2021.
- [16] M. Bedier, D. Galayko, A 100nW Power Overhead Load Interface for Electrostatic Vibrational Energy Harvester with a High Biasing Voltage, *Procedia Engineering*, Vol. 168, pp. 1693-1697, 2016.
- [17] C. Zhang, Z. Lai, X. Rao, J. Zhang, D. Yurchenko, Energy harvesting from a novel contact-type dielectric elastomer generator, *Energy conversion and management*, Vol. 205, pp. 112351, 2020.
- [18] X. Zheng, L. He, S. Wang, X. Liu, R. Liu, G. Cheng, A review of piezoelectric energy harvesters for harvesting wind energy, *Sensors and Actuators A: Physical*, pp. 114190, 2023.
- [19] S. Bairagi, M. Shahadat, D.M. Mulvihill, W. Ali, Mechanical energy harvesting and self-powered electronic applications of

- [62] S. Priya, Modeling of electric energy harvesting using piezoelectric windmill, *Applied physics letters*, Vol. 87, No. 18, pp. 184101, 2005.
- [63] G.W. Taylor, J.R. Burns, S. Kammann, W.B. Powers, T.R. Welsh, The energy harvesting eel: a small subsurface ocean/river power generator, *IEEE journal of oceanic engineering*, Vol. 26, No. 4, pp. 539-547, 2001.
- [64] S. Pobering, N. Schwesinger, Power supply for wireless sensor systems, in: *SENSORS*, 2008 IEEE, IEEE, pp. 685-688, 2008.
- [65] S. Pobering, M. Menacher, S. Ebermaier, N. Schwesinger, Piezoelectric power conversion with self-induced oscillation, *Proceedings of the PowerMEMS*, pp. 384-387, 2009.
- [66] L. Zhao, L. Tang, Y. Yang, Small wind energy harvesting from galloping using piezoelectric materials, in: *Smart materials, adaptive structures and intelligent systems, American Society of Mechanical Engineers*, pp. 919-927, 2012.
- [67] Y. Yang, L. Zhao, L. Tang, Comparative study of tip cross-sections for efficient galloping energy harvesting, *Applied Physics Letters*, Vol. 102, No. 6, pp. 064105, 2013.
- [68] A. Erturk, W. Vieira, C. De Marqui Jr, D.J. Inman, On the energy harvesting potential of piezoaeroelastic systems, *Applied physics letters*, Vol. 96, No. 18, pp. 184103, 2010.
- [69] A. Erturk, O. Bilgen, M. Fontenille, D.J. Inman, Piezoelectric energy harvesting from macro-fiber composites with an application to morphing-wing aircrafts, in: *Proceedings of the 19th international conference on adaptive structures and technologies*, Citeseer, pp. 6-9, 2008.
- [70] J. Dias, C. De Marqui Jr, A. Erturk, Hybrid piezoelectric-inductive flow energy harvesting and dimensionless electroaeroelastic analysis for scaling, *Applied Physics Letters*, Vol. 102, No. 4, pp. 044101, 2013.
- [71] J. Dias, C. De Marqui Jr, A. Erturk, Three-degree-of-freedom hybrid piezoelectric-inductive aeroelastic energy harvester exploiting a control surface, *AIAA journal*, Vol. 53, No. 2, pp. 394-404, 2015.
- [72] J. Park, G. Morgenthal, K. Kim, S.-D. Kwon, K.H. Law, Power evaluation of flutter-based electromagnetic energy harvesters using computational fluid dynamics simulations, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 25, No. 14, pp. 1800-1812, 2014.
- [73] H.-J. Jung, S.-W. Lee, The experimental validation of a new energy harvesting system based on the wake galloping phenomenon, *Smart Materials and Structures*, Vol. 20, No. 5, pp. 055022, 2011.
- [74] A. Abdelkefi, J.M. Scanlon, E. McDowell, M.R. Hajj, Performance enhancement of piezoelectric energy harvesters from wake galloping, *Applied Physics Letters*, Vol. 103, No. 3, pp. 033903, 2013.
- [40] Y. Nishi, K. Fukuda, W. Shinohara, Experimental energy harvesting from fluid flow by using two vibrating masses, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 394, pp. 321-332, 2017.
- [41] K. Serfaty, *missing ingredients*, in: bunged up, 2021.
- [42] D.Y. Leung, Y. Yang, Wind energy development and its environmental impact: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 1, pp. 1031-1039, 2012.
- [43] D. Yáñez, *Vortex Bladeless*, in, 2021.
- [44] P. Kenna, Vortex bladeless wind turbines, *MIT technology*, Vol. 5, pp. 52, 2015.
- [45] D. Djairam, A. Hubacz, P. Morshuis, J. Marijnisen, J. Smit, The development of an electrostatic wind energy converter (EWICON), in: *2005 International Conference on Future Power Systems*, IEEE, pp. 4 pp.-4, 2005.
- [46] A. Aouini, The Saphonian, *the Zero-Blade Wind Converter*, in, 2021.
- [47] D. Allaei, Y. Andreopoulos, INVELOX: Description of a new concept in wind power and its performance evaluation, *Energy*, Vol. 69, pp. 336-344, 2014.
- [48] A. Cherubini, A. Papini, R. Vertechy, M. Fontana, Airborne Wind Energy Systems: A review of the technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 51, pp. 1461-1476, 2015.
- [49] I. Hwang, W. Kang, S. Kim, High altitude cycloidal wind turbine system design, *Procedia Engineering*, Vol. 67, pp. 78-84, 2013.
- [50] M. Mariello, F. Guido, V.M. Mastronardi, F. Madaro, I. Mehdipour, M.T. Todaro, F. Rizzi, M. De Vittorio, Micro-and nanodevices for wind energy harvesting, in: *Nano Tools and Devices for Enhanced Renewable Energy*, Elsevier, pp. 291-374, 2021.
- [51] V. Azadeh-Ranjbar, N. Elvin, Y. Andreopoulos, Vortex-induced vibration of finite-length circular cylinders with spanwise free-ends: Broadening the lock-in envelope, *Physics of Fluids*, Vol. 30, No. 10, pp. 105104, 2018.
- [52] Y. Hu, F. Mou, B. Yang, X. Chen, X. Wang, J. Liu, A broadband E-shaped piezoelectric energy harvester based on vortex-shedding induced vibration from low velocity liquid flow, *AIP Advances*, Vol. 8, No. 12, pp. 125214, 2018.
- [53] W. Wang, X. Wang, X. He, M. Wang, H. Shu, K. Xue, Comparisons of bioinspired piezoelectric wind energy harvesters with different layout of stiffeners based on leaf venation prototypes, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 298, pp. 111570, 2019.
- [54] X. He, X. Yang, S. Jiang, Enhancement of wind energy harvesting by interaction between vortex-induced vibration and galloping, *Applied Physics Letters*, Vol. 112, No. 3, pp. 033901, 2018.
- [55] Y. Hu, B. Yang, X. Chen, X. Wang, J. Liu, Modeling and experimental study of a piezoelectric energy harvester from vortex shedding-induced vibration, *Energy conversion and management*, Vol. 162, pp. 145-158, 2018.
- [56] A. Abdelkefi, A. Nayfeh, M. Hajj, Design of piezoaeroelastic energy harvesters, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 68, No. 4, pp. 519-530, 2012.
- [57] H. Dai, H. Abdelmoula, A. Abdelkefi, L. Wang, Towards control of cross-flow-induced vibrations based on energy harvesting, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 88, No. 4, pp. 2329-2346, 2017.
- [58] C. Boragno, R. Festa, A. Mazzino, Elastically bounded flapping wing for energy harvesting, *Applied Physics Letters*, Vol. 100, No. 25, pp. 253906, 2012.
- [59] J.D. Hobeck, D. Geslain, D.J. Inman, The dual cantilever flutter phenomenon: a novel energy harvesting method, in: *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2014, International Society for Optics and Photonics*, pp. 906113, 2014.
- [60] D. Rancourt, A. Tabesh, L.G. Fréchette, Evaluation of centimeter-scale micro windmills: aerodynamics and electromagnetic power generation, *Proc. PowerMEMS*, Vol. 20079, pp. 93-96, 2007.
- [61] R. Gasch, J. Twele, Wind power plants: fundamentals, design, construction and operation, *Springer Science & Business Media*, 2011.