

بررسی ساختارهای برگ - ساقه مانند برداشت‌کننده‌ی انرژی از جریان باد با استفاده از مواد پیزوالکتریک

سمانه فرهانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علیرضا شوشتری* (استاد)

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۴۰۰)
دوری ۳-۳۷، شماره ۲، ص. ۹۵-۸۱، (مردی)

این مقاله مروری بر برداشت‌کننده‌های انرژی باد به‌وسیله‌ی مواد پیزوالکتریک با ساختار برگ - ساقه است. هدف مقایسه پیکربندی‌های مختلف برداشت‌کننده با ساختار برگ - ساقه و بررسی اثرات پارامترهای طراحی بر برداشت انرژی است. به طور کلی، برداشت‌کننده‌های انرژی بر اساس نوع تعامل سیال با ساختار یا نوع پیزوالکتریک بررسی شده‌اند، اما در این تحقیق ابتدا یک تقسیم‌بندی بر اساس ساختار برداشت‌کننده انجام شده و سپس ساختارهایی شبیه برگ - ساقه که در آنها انرژی باد منبع برداشت انرژی است، بررسی می‌شود. توان الکتریکی که به‌وسیله‌ی مواد پیزوالکتریک از باد برداشت می‌شود در مقیاس نانووات تا میکرووات بوده و قابل مقایسه با توان توربین‌های بادی نیست. این نوع برداشت‌کننده‌ها بسیار کم‌هزینه، بی‌صدا و پاک‌اند و می‌توان از آنها برای مصارف کم‌توان، برای راه‌اندازی سیستم در محل، یا به‌عنوان ذخیره‌ساز انرژی استفاده کرد. با بررسی آن دسته از پارامترهای طراحی که به بهبود عملکرد ساختار برگ - ساقه می‌انجامد، مشخص می‌شود که مقاومت بار، محدوده‌ی سرعت باد، هندسه‌ی برگ و ساقه، نحوه‌ی قرارگیری سیستم‌ها در جریان - کنار هم و با / بدون وجود رگ برگ - بر فرکانس فلاتر و عملکرد برداشت‌کننده‌ی انرژی موثرند.

واژگان کلیدی: برداشت‌کننده‌های انرژی، انرژی باد، مواد پیزوالکتریک، تعامل سیال با ساختار، برگ - ساقه، فلاتر، گالوپینگ.

s.farahani@gmail.com
shooshta@basu.ac.ir

۱. مقدمه

۱.۱. دلایل استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر

خورشید اصلی‌ترین منبع انرژی زمین است که حیات را ناشی می‌شود اما تا زمانی که پنل‌های خورشیدی طراحی نشده بودند توسط بشر به‌طور مستقیم استفاده نشده بود.^[۱] بنابراین اولین انرژی پاک که بشر توانست مستقیماً از آن استفاده کند انرژی باد و آب بود. از انرژی آب برای آبیاری و به کار انداختن دستگاه‌های مختلف مانند آسیاب‌ها، دستگاه‌های نساجی دستگاه‌های اره‌کشی و آسانسورهای خانگی استفاده می‌شد.^[۲] ایرانیان با ساختن بادگیرها از انرژی باد برای خنک کردن عمارت‌های خود استفاده کردند سپس این روش توسط بازرگانان و جنگجویان صلیبی به اروپا رسید. پس از کشف و استفاده‌ی گسترده از سوخت‌های فسیلی، محیط زیست آلوده شد و این منابع کاهش یافتند.

امروزه می‌دانیم حتی با وجود مقادیر کافی سوخت‌های فسیلی، اگر نتوان

* نویسنده مسئول

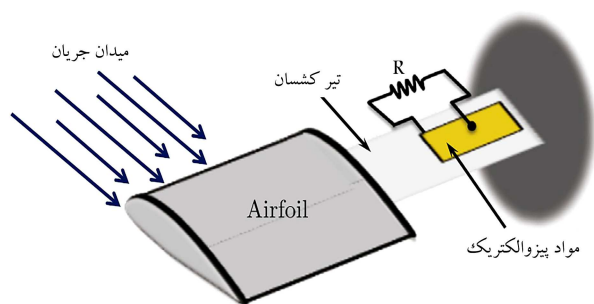
تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۴/۱۶، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱۰/۱۴، پذیرش ۱۳۹۹/۱۱/۱۹.

DOI:10.24200/J40.2021.55827.1553

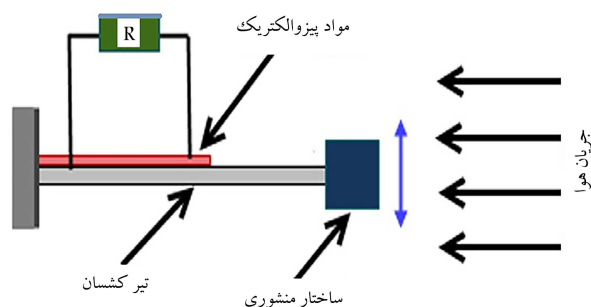
۲.۱. پیزوالکتریک و برخی از خواص آن

مواد پیزوالکتریک وقتی تحت فشار یا تنش قرار بگیرند، در آنها بار الکتریکی ظاهر می‌شود. این پدیده اثر پیزوالکتریک مستقیم و یک فرایند قابل برگشت است، یعنی

بدون گرم شدن کره‌ی زمین، از آنها استفاده کرد، سرانجام محیط زیست آسیب جبران‌ناپذیری را متحمل خواهد شد.^[۳] به دلیل محدود بودن، در دسترس نبودن، بالا بودن هزینه و آلودگی منابع تجدیدناپذیر، ترجیح بشر امروز برای تأمین انرژی، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر است.^[۱] منابعی از قبیل انرژی خورشیدی، آبی و بادی. در این مسیر کشف مواد هوشمند و ترکیب مواد مغناطیسی با سازه‌های مکانیکی راه دیگری است که علم پیش پای انسان نهاد. سپس ژنراتورها و سلول‌های خورشیدی و در نتیجه، مزارع برداشت انرژی بادی و خورشیدی ساخته شد. همچنین ماده‌ی پیزوالکتریک برای برداشت انرژی از ارتعاشات کشف شد. در ادامه خواص مواد پیزوالکتریک شرح داده شده است.



شکل ۲. شماتیکی از برداشت‌کننده‌ی انرژی پیزوالکتریک FIV. [۹]



شکل ۳. شماتیک برداشت‌کننده‌ی انرژی پیزوالکتریک مبتنی بر پدیده‌ی گالوپینگ عرضی. [۹]

پیزوالکتریک مبتنی بر گالوپینگ عرضی شامل منشور (مربعی، D شکل و ...) و تیرطری پیزوالکتریک است (شکل ۳). در برداشت‌کننده‌ی انرژی باد، مبتنی بر گالوپینگ دنباله، علاوه بر منشور متصل به دنباله تیرطری، منشور دیگری در جلوی آن قرار گرفته که وضعیت آن نقش مهمی در حرکات و خروجی توان الکتریکی دارد. [۹، ۸] باید توجه کرد که در سیستم‌های واقعی همواره ترکیبی از این سازوکارها رخ می‌دهد. [۱۲]

۲. سیستم‌های برداشت انرژی باد از طریق مواد

پیزوالکتریک

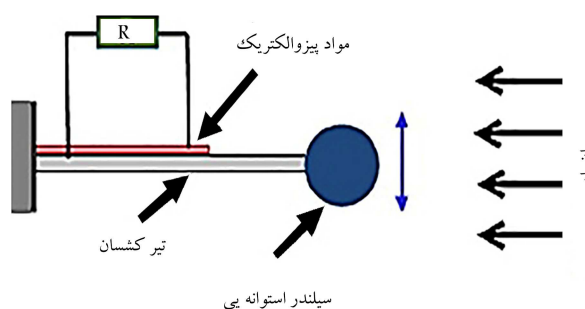
پس از آگاهی به لزوم استفاده از انرژی باد، شناخت مواد پیزوالکتریک و سازوکارهای تعامل سیال و ساختار، نوبت به شناخت برداشت‌کننده‌های انرژی باد به‌وسیله‌ی مواد پیزوالکتریک می‌رسد. در این بخش مزایا و معایب، راه‌های توسعه و انواع ساختارهای برداشت انرژی باد به‌وسیله‌ی مواد پیزوالکتریک را شرح داده‌ایم.

۱.۲. مزایا و معایب برداشت انرژی از باد به‌وسیله‌ی مواد

پیزوالکتریک

چنان‌که در بخش نخست بیان شد، به دلیل آلودگی‌های زیست‌محیطی، گرمایش زمین، هزینه بالای استخراج و به کارگیری و نیز کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک رو به افزایش است. پیشرفت فناوری ساخت، ترکیب و توسعه‌ی انواع مواد هوشمندی که انرژی را از نوعی به نوع دیگر تبدیل می‌کنند، سبب تسهیل استفاده از انرژی‌های پاک شده است. برخی از این مواد هوشمند عبارت‌اند از:

مواد پیزوالکتریک: در پاسخ به محرک الکتریکی از خود حرکت مکانیکی نشان داده و در پاسخ به محرک مکانیکی الکتریسیته تولید می‌کنند. [۱۳]



شکل ۱. دیاگرامی از برداشت‌کننده‌ی انرژی پیزوالکتریک VIV.

اگر به ماده‌ی پیزوالکتریک میدان الکتریکی اعمال شود، تغییر ابعاد می‌دهد. [۴] نیشکر، کوارتز، نمک راشل، زبرجد هندی، استخوان، تاندون، ابریشم، چوب، مینا و عاج دندان مواد پیزوالکتریک طبیعی هستند. [۵] مواد پیزوالکتریک مصنوعی عبارت‌اند از: سرامیک‌ها، پلیمرها و کامپوزیت‌های پیزوالکتریک. سرامیک‌های پیزوالکتریک ضریب تبدیل پیزوالکتریک بالایی دارند و زمانی کاربرد دارند که به تغییر شکل با دامنه‌ی کم و مودهای نوسانی فرکانس بالا نیاز است. اما به دلیل تردی، صلبیت و عمر محدود، نمی‌توان از آنها در سازه‌های متعطف استفاده کرد. [۶] پلیمرها و کامپوزیت‌های پیزوالکتریک انعطاف‌پذیرند و در ساخت منسوجات هوشمند و سنسورهای مورد استفاده در علوم پزشکی کاربرد دارند. [۷]

از انرژی باد و ارتعاشات، انرژی مکانیکی تولید می‌شود. برای تبدیل این انرژی به الکتریسیته، به مبدل نیاز است. این مبدل ممکن است مواد هوشمند (مانند پیزوالکتریک) یا مواد مغناطیسی باشد. سازوکار انتقال پیزوالکتریک کارآمدترین سازوکار برای وسایل میکروالکترونیک و نانوالکترونیک و سنسورهای بی‌سیم است زیرا علاوه بر سادگی ساختشان، قادر به برداشت انرژی در طیف وسیعی از فرکانس‌های ارتعاشی هستند. [۸]

چگونگی تحریک پیزوالکتریک به‌وسیله‌ی باد خود موضوع مهمی است که به ساختار برداشت‌کننده و نحوه‌ی تعامل آن با باد بستگی دارد. در ادامه برخی از سازوکارهای تعامل سیال و ساختار را شرح داده‌ایم.

۳.۱. ارتعاشات ناشی از تعامل سیال با ساختار

برای افزایش بازده برداشت‌کننده‌های پیزوالکتریک تحت اثر باد، حرکات نوسانی پیوسته‌ی مورد نیاز است که با کنترل ناپایداری‌های آبرودینامیکی ایجاد می‌شوند. این ناپایداری‌های بر اثر ارتعاشات ناشی از تعامل سیال با ساختار به وجود آمده و به سه دسته‌ی کلی ارتعاشات ناشی از گردابه (VIV)،^۲ ارتعاشات ناشی از فلاتر (FIV)^۳ و ارتعاشات ناشی از پدیده‌ی گالوپینگ^۴ تقسیم می‌شوند. [۹، ۸]

شناخته شده‌ترین مفهوم در برداشت‌کننده‌ی پیزوالکتریک مبتنی بر ارتعاشات ناشی از گردابه، استوانه‌یی است که در دنباله‌ی تیر طری پیزوالکتریک قرار می‌گیرد (شکل ۱). رفتار جریان پس از برخورد به استوانه به دو پارامتر بی‌بعد عدد رینولدز و عدد استروهال وابسته است. [۸-۱۰]

فلاتر یک پدیده‌ی آیرودینامیک خودتحریک است که در آن ناپایداری پیچشی و خمشی همزمان رخ می‌دهند. [۱۱] در برداشت‌کننده‌ی پیزوالکتریک مبتنی بر ارتعاشات ناشی از فلاتر کلاسیک، شناخته شده‌ترین مفهوم، ایرفویلی است که در دنباله‌ی تیرطری پیزوالکتریک قرار می‌گیرد (شکل ۲). [۹، ۸]

گالوپینگ نوعی فلاتر با ناپایداری خمشی خالص است [۱۱] و به دو دسته‌ی گالوپینگ عرضی^۵ و گالوپینگ دنباله^۶ تقسیم می‌شود. ساختار برداشت‌کننده‌ی

• معایب استفاده از انرژی باد

در این زمینه باید معایب توربین های بادی را از برداشت کننده ی انرژی با استفاده از مواد پیزوالکتریک تفکیک کرد.

• معایب توربین های بادی

۱. جابجایی طبیعت را خدشه دار می کنند، ۲. آلودگی صوتی خواهند داشت ۳. ساخت و اتصال تجهیزات آن ها نیازمند دانش و تکنولوژی پیشرفته است.^[۲]

• معایب برداشت انرژی از باد به وسیله ی مواد پیزوالکتریک

۱. توان الکتریکی تولید شده توسط این نوع برداشت کننده ی انرژی بسیار کم تر از توربین های باد است.

در آخر لازم به ذکر است که ساخت، راه اندازی و هزینه راه اندازی و نگهداری برداشت کننده ی انرژی باد به وسیله ی مواد پیزوالکتریک، به طور چشمگیری ساده تر و کم تر از توربین های باد است. از طرفی به دلیل کوچک بودن این نوع برداشت کننده، برخی معایب استفاده از توربین باد را نداشته و در هر مکانی قابل استفاده و حتی قابل حمل خواهد بود و در مقایسه با باتری های معمولی کارآمدتر هستند.^[۸] این برداشت کننده ها به دلیل کوچکی، خدشه یی به طبیعت وارد نکرده و آلودگی صوتی ندارند و اگر هم داشته باشند آلودگی صوتی آنها نسبت به توربین های بادی بسیار کم است. در میان تکنیک های مختلف برداشت انرژی های پاک، برداشت کننده ی انرژی به وسیله ی مواد پیزوالکتریک، نسبت به دیگر مواد هوشمند، چگالی توان خروجی بالاتری دارد.^[۹]

با این حال، اگرچه استفاده از برداشت کننده ی انرژی باد به وسیله ی مواد پیزوالکتریک، از نظر اقتصادی بسیار به صرفه تر است اما راه زیادی در پیش است تا بتوان آن را به گونه یی به کار گرفت که توان الکتریکی قابل توجهی تولید شود. در حال حاضر از این نوع برداشت کننده در زمینه هایی که به توان الکتریکی در محدوده ی میکرووات و میلی وات نیاز باشد، استفاده می شود. البته بهتر است توربین باد و برداشت کننده ی انرژی باد به وسیله ی مواد پیزوالکتریک با هم مقایسه نشوند، زیرا هرکدام در شرایط مناسب خود به کار گرفته شده و قرار نیست جایگزین هم باشند.

۲.۲. راه های توسعه ی برداشت کننده ی انرژی از باد به وسیله ی مواد

پیزوالکتریک

برخی از راه های توسعه ی برداشت کننده ی انرژی از باد به وسیله ی مواد پیزوالکتریک، که در تحقیقات انجام شده در این زمینه مشاهده می شوند، عبارت اند از:

- تولید مواد پیزوالکتریک با توان تولید جریان الکتریکی بیشتر و مقاوم تر به شرایط تحرک،^[۱۵-۱۷]
 - طراحی مدارات الکترونیکی توسعه یافته یی که بتوانند ولتاژ متناوب تولید شده در ماده پیزوالکتریک را با بیشترین بهره به ولتاژ مستقیم تبدیل کنند؛^[۱۸، ۱۹]
 - ترکیب برداشت کننده ی انرژی باد و نور، این امکان را می دهد که در فضای کم تر، انرژی بیشتری برداشت شود؛^[۲۰]
 - می توان با استفاده از آهن ربا های قوی و فنرها، سازوکار انتقال انرژی باد به حرکت مکانیکی سازه را تسریع کرد؛^[۲۱-۲۳]
 - طراحی سیستمی که بتواند در فضای کم، تعداد زیادی پیزوالکتریک را به وسیله ی انرژی باد، دچار تنش نماید.
- در ادامه ساختار برداشت کننده های انرژی باد از طریق مواد پیزوالکتریک بررسی می شود.

مواد فتولتائیک (قدرت زای نوری): این مواد در پاسخ به محرک نور مرئی جریان الکتریکی ایجاد می کنند.^[۱۳]

مواد ترموالکتریک (دما برقی): این مواد نیز در مقابل تغییرات دما توانایی تولید برق را دارند.^[۱۳]

استفاده از هریک از انرژی های پاک مزایا و معایب خود را دارد. اما به طور کلی معایب استفاده از این نوع انرژی نسبت به سوخت فسیلی بسیار کم تر است. در ادامه مزایا و معایب استفاده از انرژی باد به وسیله ی توربین های بادی و برداشت کننده های انرژی باد به وسیله ی مواد پیزوالکتریک بیان شده است.

• مزایای استفاده از انرژی باد

لازم به ذکر است موارد ذیل هم برای توربین های بادی و هم برای برداشت کننده ی انرژی باد به وسیله ی مواد پیزوالکتریک صدق می کنند.

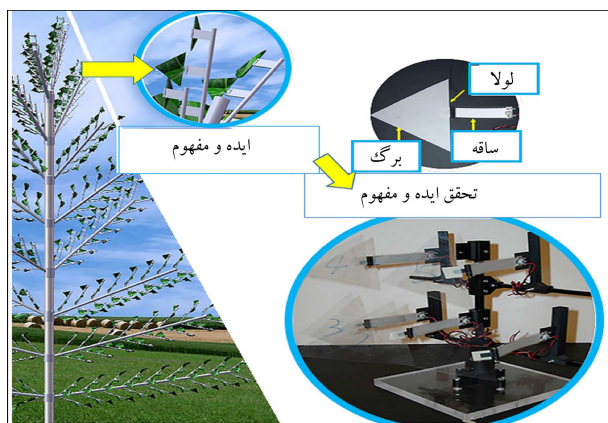
۱. در دسترس بودن: انرژی باد تقریباً در همه جای زمین در دسترس است؛ برآوردی نشان می دهد که یک میلیون گیگاوات انرژی بادی در کل زمین وجود دارد و اگر فقط یک درصد از این زمین ها از نیروی باد بهره برداری کنند، می توان تمامی تقاضای جهانی برق را تأمین کرد؛^[۲]

۲. کاهش تأثیرات مخرب زیست محیطی: برداشت کننده های انرژی باد مستقیماً، هیچ گونه آلودگی آب و هوایی یا زیست محیطی ندارند. تجهیزات آنها گاز گلخانه یی منتشر نمی کند در نتیجه بیماری خاصی انسان ها را تهدید نکرده، حیوانات نیز در محیطی سالم تر پرورش می یابند. انرژی باد به کشتیرانی یا ذخایر زیرزمینی متکی نبوده و مانع آلودگی های ناشی از حمل و نقل می شود. همچنین برخلاف بسیاری از روش ها، برق بدون استفاده از آب تولید شده و از آلودگی آب و کمبود انرژی ناشی از خشکسالی جلوگیری می شود. در مناطق بادخیز (به خصوص مناطق ساحلی و کوهستانی)، می توان در تمام ساعات شبانه روز برق تولید کرد. همچنین برای به حداکثر رساندن تولید انرژی، می توان برداشت کننده های بادی و پانل های خورشیدی را در مکان هایی با آفتاب و باد متناوب ترکیب کرد؛^[۴]

۳. مقیاس پذیری و جاگیر نبودن: تجهیزات بادی را می توان در منازل، مزارع، سکوهای دریایی و در بالای تپه های بلند نصب کرد.^[۲] توربین های بادی در مقایسه با دیگر نیروگاه ها فضای زیادی را اشغال نمی کنند^[۴] برداشت کننده های انرژی باد نیز چنان که در تحقیقات دیده می شود، در ابعاد بسیار کوچکی ساخته می شوند و حتی قابل حمل می باشند؛

۴. کم بودن احتمال وقوع حوادث فاجعه آمیز: انرژی باد و تجهیزات تبدیل آن به برق متکی به سوخت هایی نیستند که باید حفرو استخراج یا در کشتی بارگیری شوند. این مورد می تواند، تا حد زیادی از خطرات مرتبط به این تکنولوژی بکاهد. اگرچه چنین حوادثی نادر هستند، اما نیروگاه های هسته یی می توانند نشت کنند و فجاجی مانند چرنوبیل یا فوکوشیما را رقم بزنند و نواحی مسکونی و زمین های بزرگی را غیر قابل زندگی کنند یا دریاها و اقیانوس های وسیعی را آلوده نمایند.^[۱۴] استخراج گاز طبیعی هم به آلودگی آب های زیرزمینی و حتی زمین لرزه مرتبط است. اما نیروی باد، می تواند اجازه دهد که برق بدون ریسک چندانی تولید شود؛^[۲]

۵. مزیت دیگر انرژی باد، اقتصادی است: استفاده از انرژی باد با استفاده از تجهیزات برداشت انرژی و یا توربین بادی، به کسانی که آنها را در زمین های خود نصب کرده اند، کمک می کند که در زمین کوچکی، انرژی مورد نیاز کسب و کار خود را تأمین کنند. و هزینه های ماهانه برق را کاهش دهند.^[۳]



شکل ۴. طرح مفهومی و یک نمونه‌ی آزمایشی ژنراتور «درخت‌پیزو» بر اساس ایده‌ی ارائه شده توسط دیکسون.^[۲۵]

چون پارک‌ها از آن استفاده کرد. به این ترتیب با توجه به ساختار نسبتاً ساده‌ی این نوع از برداشت‌کننده‌ها می‌توان گفت در صورت طراحی صحیح، ساخت مناسب و نصب صحیح آنها، شاید این نوع از برداشت‌کننده‌ها نسبت به بسیاری دیگر از برداشت‌کننده‌های انرژی باد با استفاده از مواد پیزوالکتریک از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر باشد. از این منظر مروری بر تحقیقات انجام شده در رابطه با این نوع از برداشت‌کننده‌ها می‌تواند زمینه‌ی توسعه‌ی بیشتر این ساختارها را فراهم کند.

برگ و ساقه به پایه‌یی که آن‌ها را در برابر جریان‌های ملایم یا شدید باد نگه دارد، وصل می‌شوند. چگونگی اتصال این قسمت‌ها به هم، شرایط هندسی آنها، شرایط برخورد سیال با سازه، مقاومت بار، محل قرار گرفتن ماده‌ی پیزوالکتریک و جنس آن، پارامترهای مؤثر بر عملکرد برداشت‌کننده‌اند.

بعد از مطالعه‌ی منابع متعدد مشخص شد که پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه‌ی برداشت‌کننده‌ی انرژی از جریان باد به‌وسیله‌ی مواد پیزوالکتریک با ساختار برگ - ساقه، در سه زمینه‌ی مختلف صورت گرفته است که عبارت‌اند از: بررسی پیکربندی و هندسه‌ی برگ و ساقه، بررسی برداشت‌کننده‌های برگ - ساقه‌ی چندگانه و بررسی سیستم برگ - ساقه‌یی که برگ پیزوالکتریک دارای رگ برگ است.

در ادامه، تحقیقاتی که در این زمینه انجام گرفته و اثر هر یک از پارامترها، بررسی شده و عملکرد سیستم‌های برگ - ساقه با هم مقایسه می‌شود.

۱.۳. بررسی اثرات پیکربندی و هندسه‌ی برگ و ساقه بر عملکرد برداشت‌کننده

ایده‌ی استفاده از ساختار برگ - ساقه توسط دیکسون^[۲۴] بیان شد. اما لی و لیسون^[۲۵] از آن الهام گرفته و عملکرد دو پیکربندی افقی و عمودی سیستم ساقه - برگ را آزمایش کردند. آنها در پژوهش خود سه پیکربندی اولیه، افقی و عمودی را طراحی کرده و در پیکربندی اولیه، با اتصال برگ و ساقه با استفاده از یک لولا و اتصال ساقه‌ی افقی به استوانه‌ی مانع در برابر باد (شکل ۵ الف)، ماده‌ی پیزوالکتریک با بازده مناسب را انتخاب کردند.^[۲۵] در مرحله‌ی دوم برگ‌های مختلفی به ساقه‌ی افقی (شکل ۵ الف) وصل کردند و با بررسی سختی ساختار برداشت‌کننده و خروجی توان بالاتر برای آن، برگ مثالی شکل بهترین انتخاب بود. چنان که در شکل ۵ ب نشان داده شده است، در پیکربندی عمودی جسم مانع وجود ندارد، ساقه عمود است و برگ مانند حالت افقی، در راستای باد قرار می‌گیرد در این پیکربندی، ساقه هم‌زمان دچار پیچش و خمش می‌شود.^[۲۵]

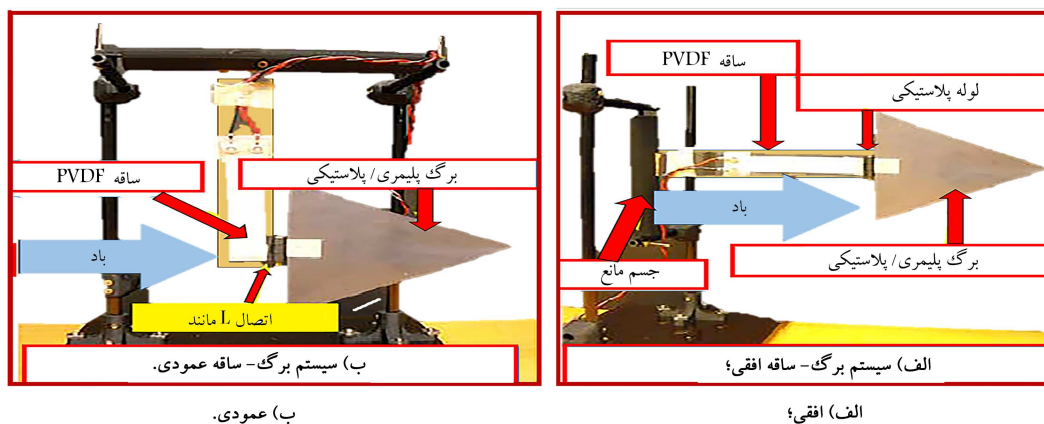
۳.۲. ساختار برداشت‌کننده‌ی انرژی باد از طریق مواد پیزوالکتریک

به منظور برداشت انرژی باد توسط مواد پیزوالکتریک، ابتدا باید سازه‌یی طراحی شود تا انرژی مکانیکی باد را به پیزوالکتریک منتقل کند. با مقایسه‌ی تعدادی از مطالعات انجام شده، می‌توان این سیستم‌ها را با توجه به سازوکار انتقال انرژی باد به ساختار، به دو دسته‌ی غیردوار و دوار تقسیم کرد. در سیستم‌های دوار، باد یک پره را می‌چرخاند و از طریق سازوکارهای متنوعی، چرخش پره سبب اعمال ضربه یا تنش به پیزوالکتریک می‌شود و بدین ترتیب انرژی الکتریکی تولید می‌شود. در سیستم‌های غیردوار معمولاً جسمی که به یک پایه‌ی کشسان متصل است، در برابر باد قرار گرفته و انرژی باد را به ارتعاش تبدیل می‌کند؛ این ارتعاش به پیزوالکتریک منتقل و در نتیجه به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. سیستم‌های غیردوار را می‌توان به ساختارهای برگ - ساقه،^۷ پرچم‌های معکوس،^۸ قاب‌های خمیده،^۹ جسم ضخیم^{۱۰} در برابر باد و تیرطره‌ها^{۱۱} تقسیم کرد. برای استفاده از هر ساختار باید سازوکار تبدیل انرژی باد به ارتعاش یا ضربه، پارامترهای میرایی و کشسانی سازه، سرعت باد و نوع ماده‌ی پیزوالکتریک را بررسی کرد. به طور مثال در سازه‌یی که دچار ارتعاشات با دامنه‌ی بزرگ می‌شود، ماده‌ی پیزوالکتریک باید بسیار منعطف و پلیمر باشد. همچنین محدوده‌ی بادی که دستگاه قرار است در آن عمل کند پارامتر مهمی است. یک ایرفویل بسته به سرعت جریان هوا، هنگام پرواز تحت اثر نیرو و گشتاور متغیر آیرودینامیکی قرار می‌گیرد. اگر میرایی سازه برای از بین بردن تحریکات کافی نباشد، ممکن است در یک سرعت مشخص تعادلی ایجاد شود و سازه ارتعاش ناشی از فلاتر را تجربه کند. با افزایش بیشتر سرعت جریان هوا، دامنه‌ی ارتعاش ساختار بدون محدودیت رشد کرده و ایرفویل را می‌شکند.^[۱۰]

در ادامه مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه‌ی برداشت‌کننده‌ی انرژی باد به‌وسیله‌ی مواد پیزوالکتریک با ساختار برگ - ساقه، از نظر اثر پارامترهای مختلف طراحی (ابعاد، چیدمان، ماده پیزوالکتریک) بیان شده است.

۳. سیستم برگ - ساقه

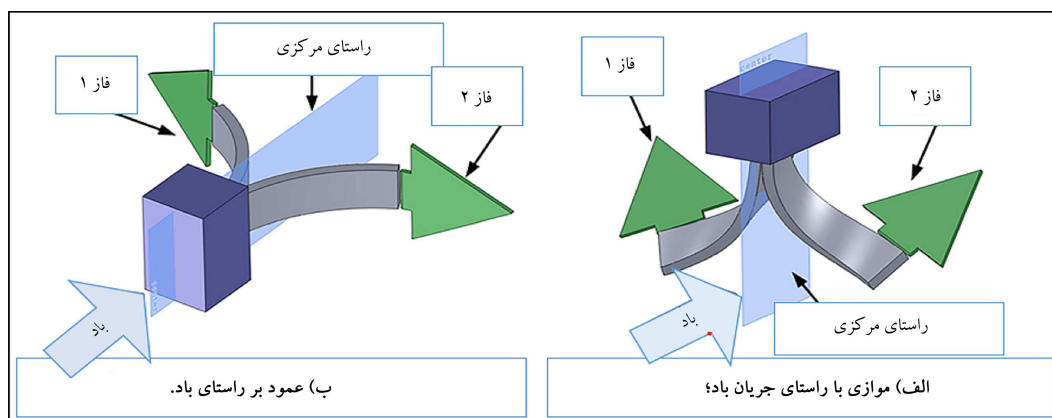
گروهی از محققان برای تبدیل انرژی باد به انرژی الکتریکی به سیستم‌های برگ - ساقه علاقه‌مندند. از مهم‌ترین دلایل استفاده از این ساختارها برداشت انرژی الکتریکی از باد، در بسیاری از شرایط محیطی کم‌برخوردارتر از باد مناسب است؛ به نحوی که حتی با وجود اندک نسیمی از این ساختارها می‌توان انرژی برداشت کرد. علاوه بر آن استفاده از این ساختارهای ساده معایب دیگر سازه‌های برداشت انرژی از باد چون توربین‌های بادی را ندارند. معایبی چون ساختار و اجزاء پیچیده، محدودیت در مکان، نصب در مکان‌های بادخیز، هزینه‌های گران نصب و همچنین تعمیرات و در نهایت تخریب چهره‌ی مناظر که هم‌اکنون مردمان بعضی از کشورها با توجه به این مشکل مخالف جدی نصب توربین‌های بادی در کشور خود هستند. در این ساختارها سعی شده است با ارائه‌ی طراحی برداشت‌کننده‌ی به‌صورت برگ - ساقه تا حد امکان مطابقت آن با چهره طبیعت حفظ شود. ساختار این سیستم‌ها از برگ و ساقه‌ی درختان الگوبرداری شده که شامل یک صفحه‌ی نسبتاً پهن به‌عنوان برگ است که به‌وسیله‌ی لولایی به یک ساقه‌ی نسبتاً کوتاه متصل شده و آن را نیز به حرکت در می‌آورد. طرح مفهومی بیان شده توسط دیکسون^[۲۴] و یک نمونه‌ی آزمایشی از سیستم‌های برگ - ساقه در شکل ۴ نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود از این ساختارها می‌توان به‌صورت انبوه تولید کرد و مانند یک درخت که قابلیت برداشت انرژی دارد در بسیاری از محیط‌های شهری و دیگر مناطق طبیعی



ب) عمودی.

الف) افقی؛

شکل ۵. برداشت‌کننده‌ی انرژی باد با ساختار برگ - ساقه در پیکربندی.



شکل ۶. سیستم برگ - ساقه با ساقه‌ی.

جدول ۱. هندسه‌ی مناسب ساقه برای هر محدوده‌ی سرعت باد. [۲۶]

محدوده‌ی سرعت باد ($W(m/s)$)		
$W > 7.5$	$4 < W < 7.5$	$W < 4$
ساقه‌ی کوتاه	ساقه‌ی کوتاه و باریک	ساقه‌ی بلند

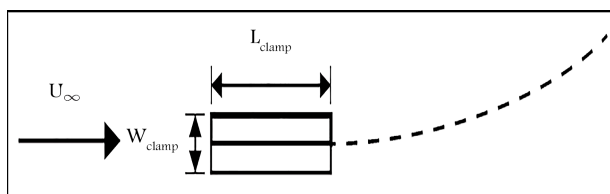
با عرض ساقه، سختی خمشی ساقه افزایش می‌یابد. مقاومت الکتریکی بهینه نیز تأثیر زیادی بر توان خروجی دارد که در این مقاله چگونگی آن به دقت بررسی نشده است.

در سیستم با ساقه‌ی کوتاه و باریک در سرعت باد $7m/s$ به‌ازای مقاومت بار $30 M\Omega$ ، مقدار چگالی توان خروجی $(\mu W/cm^2)$ 2039 است. نتیجه‌ی کلی آن است که با قرارگیری ساختار برگ - ساقه به صورت عمودی در حالی که در معرض راستای جریان باشد، توان الکتریکی بیشتری تولید می‌شود؛ البته برگ مثلی شکل، ساقه، سرعت باد و مقاومت بار بهینه در افزایش توان خروجی مؤثرند. ساقه را باید با انجام آزمایشات متناسب با سرعت باد در نظر گرفت. [۲۶]

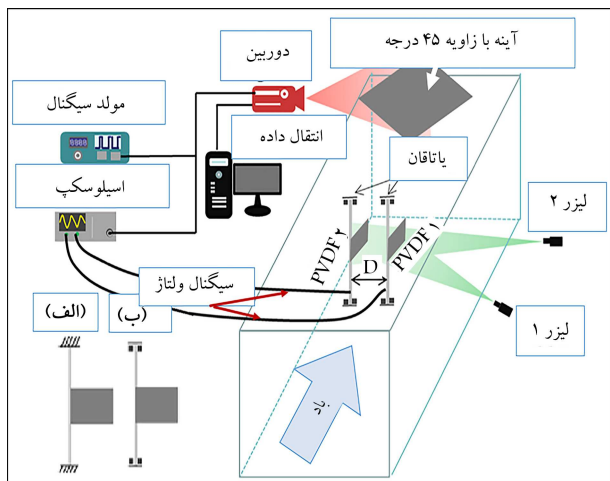
مک‌کارتی و همکاران، [۲۷] دو فاکتور مساحت برگ $A = (hb/2)$ و نسبت ابعاد (h/b) آن را تغییر دادند که در آن ارتفاع مثلث و b مبنای آن است. سپس تأثیر آنها بر خروجی توان سیستم برگ - ساقه را بررسی کردند. در مرحله‌ی اول در یک محدوده‌ی سرعت باد آزمایشی، نسبت ابعاد برگ ثابت بوده و مساحت برگ تغییر داده شده و خروجی توان ثبت می‌شود.

در مرحله‌ی سوم هریک از پیکربندی‌های افقی و عمودی، با برگ یکسان در تونل باد قرار گرفته و عملکرد آن‌ها به‌ازای اشکال مختلف ساقه در محدوده‌ی سرعت باد ثبت شد. بررسی نتایج نشان می‌دهد پیکربندی عمودی نسبت به افقی، بازده بیشتری داشته و در این پیکربندی نیز ساقه‌ی تک‌لایه‌ی کوتاه با مقاومت بار $(M\Omega)$ 10 بیشترین توان خروجی را تولید می‌کند. [۲۵]

مجدداً لی و لیسون [۲۶] چنان که در شکل ۶ ب دیده می‌شود، ساقه را نه در راستای جریان بلکه در راستای عمود بر جریان قرار دادند و عملکرد برگ مربعی، دایره‌ی، مثلث متساوی‌الساقین با زاویه 30° ، مثلث قائم‌الزاویه، مثلث متساوی‌الاضلاع و مستطیل شکل، متشکل از PVDF با ضخامت 0.1° اینچ و مساحت (cm^2) 144 را در برابر جریان آرام بررسی کردند، که مثلث متساوی‌الاضلاع با ابعاد مشخص شده، در این مرحله بهترین عملکرد را داشت. همان اینرسی برگ نسبت به محور دورانی بین برگ و ساقه، یکی از مؤلفه‌های مهم طراحی است. سپس مثلث متساوی‌الاضلاع را با همان ماده PVDF با مساحت‌های مختلف آزمایش کردند که در این مرحله نیز مثلث متساوی‌الاضلاع با اضلاع $1^\circ cm$ و مساحت (cm^2) $43/3$ بهترین گزینه بود. پیکربندی ساقه از نظر قرارگیری ماده PVDF می‌تواند تک‌لایه (S)، دولایه (D) و دولایه با فاصله‌ی هوایی (A-D) باشد و از نظر هندسه ساقه بین سه حالت بلند (L)، کوتاه (S) و کوتاه و باریک (N-S) تغییر داده می‌شود که طبق نتایج (جدول ۱)، هر ساقه‌ی با هندسه‌ی مشخص برای یک محدوده‌ی سرعت باد مناسب است و باید متناسب با آن انتخاب شود، زیرا با کاهش طول



شکل ۷. نمای گیره نگه‌دارنده از بالا L_{clamp} طول گیره، W_{clamp} عرض گیره، U_{∞} جریان آزاد یکنواخت و خط چین ساقه مستطیلی را نشان می‌دهند. [۲۸]



الف) پایه دو سر درگیر؛ ب) پایه دو سر مفصل.

شکل ۸. تنظیمات آزمایش دو برداشت‌کننده‌ی کنار هم در برابر جریان باد (U)، با تکیه‌گاه دو سر مفصل و طرحی از غشاء PVDF متصل به قسمت‌های الف و ب. [۲۹]

نتایج بیان‌گر برتری پیکربندی دوسر مفصل نسبت به دوسرگیردار است زیرا در این پیکربندی ۴۲٪ الی ۶۴٪ انرژی بیشتری برداشت می‌شود. این انرژی اضافی به تشدید دامنه‌ی حرکت رفت و برگشتی برگ، همراه با وقوع انحنای بزرگ نسبت داده شد. نتایج نشان می‌دهد که به دلیل انحنای بزرگ، بهره‌ی انرژی برداشت شده از پیکربندی دوسر مفصل، قابل توجه است. ماهیت خودانطباقی پیکربندی دوسر مفصل در پاسخ به جهت‌های مختلف جریان نیز نشان داده شده است. [۲۹]

محمد حج و همکارش، [۳۰] از یک صفحه‌ی پیکان (فلش) مانند استفاده کردند که دنباله‌ی آن بدون هیچ لولایی به قطعه‌ی پیزوالکتریک وصل شده و اثر زاویه‌ی برخورد و سرعت باد، هندسه، سختی خمشی و نسبت جرم پیکان را بر خروجی سیستم بررسی کردند. [۳۰] متغیرهای طراحی در شکل ۹ نشان داده شده است. ارتفاع مثلث پیکان (L_2) ثابت است و تأثیر تغییر مبنای مثلث پیکان (W_2)، زاویه‌ی رأس (θ) و تغییر طول دم آن (L_1)، زاویه‌ی برخورد باد (α) و سرعت باد (U) بر توان برداشت شده بررسی شده است. پیکربندی‌های در جدول ۲ نشان داده شده است. دم پیکان به یک نوار پیزوالکتریک وصل است که به سروموتوری وصل شده تا امکان تنظیم زاویه‌ی برخورد باد با سیستم امکان‌پذیر باشد. برای تعیین اثر تغییر زاویه‌ی برخورد باد بر توان برداشت شده، عملکرد سیستم در سرعت‌های مختلف بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که جز در سرعت $9.5(m/s)$ ، بیشترین توان در هر سرعت باد، وقتی زاویه‌ی برخورد نزدیک به $3/4^\circ$ است، رخ می‌دهد. دیگر پیکربندی‌های رفتار مشابهی دارند که نشان‌گر این است که اگرچه فلاتر به یک زاویه‌ی برخورد غیر صفر نیاز دارد اما در محدوده‌ی 1° تا $6/5^\circ$ ، توان برداشت شده

در مرحله‌ی دوم مساحت برگی که بیشترین توان خروجی را تولید کرده و سرعت فلاتر بحرانی مناسبی دارد (برگ با ابعاد $h = b = 80(mm)$ و مساحت $(A = 32(cm^2))$ ، ثابت شده و نسبت ابعاد $1, 4, 1, 4, 0.86, 0.25$ (h/b) برای آن در نظر گرفته می‌شود. با تغییر ساده‌ی این دو پارامتر، سرعت فلاتر بحرانی، رژیم فلاتر و مؤلفه‌های خروجی توان به طور چشمگیری تغییر می‌کند. افزایش مساحت برگ، در حالی که نسبت ابعاد آن ثابت و برابر با ۱ است باعث می‌شود برگ هم بلندتر و هم پهن‌تر شود. نتیجه‌ی آزمایشات در مرحله‌ی اول، نشان می‌دهد برگ‌های بلندتر در سرعت باد پایین‌تری تمایل به فلاتر دارند و نیز گرایش زیادی به رژیم فلاتر بی‌نظم دارند که در آن خروجی توان کم‌تر است.

از طرفی نتایج آزمایش در مرحله‌ی دوم نشان می‌دهد سرعت بحرانی فلاتر سیستم با نسبت ابعاد $h/b = 4$ (بلندترین برگ) از همه برگ‌های دیگر بیشتر است. این با نتیجه آزمایش حالت نسبت ابعاد ثابت، همخوانی ندارد.

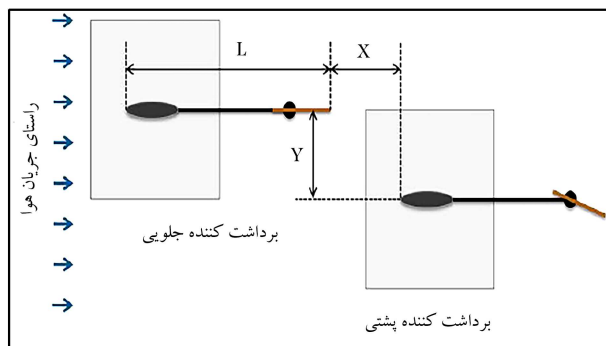
دلیل این امر این است که در مرحله‌ی دوم با افزایش طول برگ (h) و کاهش عرض آن در حالی که مساحت برگ ثابت است و با توجه به رابطه‌ی ممان اینرسی برگ حول لولا $I_b = I_b = (mh^3/6)$ افزایش یافته و در نتیجه برای شروع فلاتر، انرژی بیشتری مورد نیاز است، پس باید در برگ بلندتر فلاتر دیرتر رخ می‌دهد. در نتیجه اثر کاهش پهنای برگ بر سرعت فلاتر بحرانی، از اثر افزایش طول خیلی بیشتر است یا بهتر است بگوییم اثر ممان اینرسی در مقایسه با نسبت ابعاد برای یک مساحت ثابت، مهم‌تر است. مشخص شد که برگ با نسبت ابعاد $h/b = 4$ از برگ با نسبت ابعاد $h/b = 0.25$ ، توان خروجی بالاتری دارد و برای دو روزنانش اصلی، برگ با نسبت ابعاد $h/b = 4$ و ممان اینرسی بزرگتر، انرژی دورانی بزرگتری به سیستم اعمال می‌کند و فرکانس فلاتر آن در محدوده‌ی سرعت باد آزمایش شده، به مقدار بهینه نزدیک‌تر است. [۲۷]

آنها در پژوهش دیگری، [۲۸] تأثیر هندسه گیره بر سرعت فلاتر بحرانی در سیستم برگ - ساقه را بررسی کرده، سپس سعی کردند فاصله‌ی مناسب بین دو سیستم برگ - ساقه پشت سر هم را مشخص کنند. سیستم برداشت‌کننده‌ی انرژی با ساقه مستطیل شکل و بدون برگ (مانند ساختار برداشت‌کننده‌های پرچم معکوس)، در برابر جریان باد قرار گرفته است. در این مطالعه، طول و عرض سطح مقطع مستطیلی گیره تغییر داده شد.

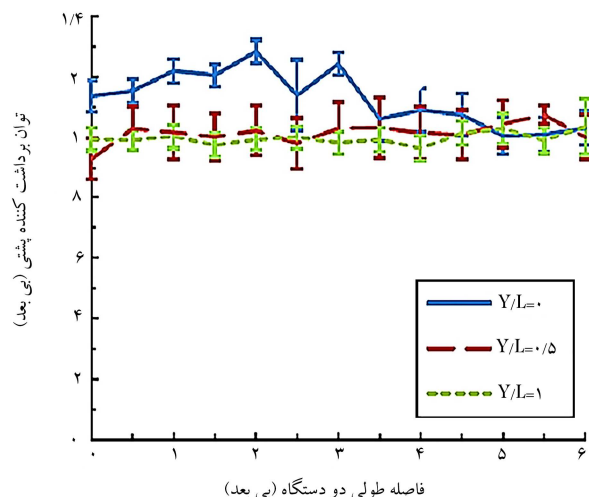
در شکل ۷ پارامترهای هندسی گیره و جهت وزش باد، مشخص شده است. عرض مقطع گیره $3/5mm$ و طول آن $12mm$ بود. ابتدا طول مقطع گیره از مقدار $12mm$ تا $70mm$ تغییر داده شد در حالی که عرض آن ثابت بود. سپس طول مقطع گیره ثابت و عرض آن از $3/5mm$ تا $12mm$ تغییر داده شد. [۲۸]

در هر مرحله، سرعت باد به آهستگی افزایش داده شد تا جریان پایدار باشد و سرعت باد متناظر با شروع فلاتر غشاء ثبت شود. نتایج نشان می‌دهد که طول سطح مقطع گیره تأثیر خیلی کمی بر سرعت بحرانی فلاتر دارد و افزایش عرض سطح مقطع گیره شروع فلاتر را به تأخیر می‌اندازد. تأثیر وزش باد از جهات مختلف اندازه‌گیری نشده است. این نتایج فقط برای جریان آرام، استفاده می‌شود و نباید آن را به نتایج جریان آشفته بسط داد. [۲۸]

یو و لیو [۲۹] ابتدا دو برداشت‌کننده‌ی پشت سر هم را از نظر تکیه‌گاه پایه نگهدارنده ساقه، که به کف و سقف تونل باد متصل است، مقایسه کردند. سپس دو برداشت‌کننده را در برابر جریان کنار هم قرار دادند تا فاصله‌ی عرضی برای برداشت انرژی بهینه را بیابند. [۲۹] تنظیمات آزمایش در شکل ۸ مشاهده می‌شود که در یک پیکربندی تکیه‌گاه‌ها دوسرگیردار و در دیگری دوسر مفصل‌اند. عملکرد هر برداشت‌کننده‌ی انرژی در جریان آزاد با سرعت ۹ تا $19/5$ متر بر ثانیه بررسی شد. [۲۹]



شکل ۱۰. پارامترهای مکانیکی. [۱۱]

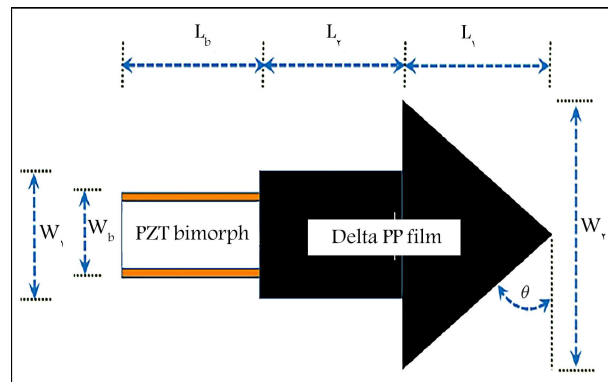


شکل ۱۱. توان خروجی برداشت‌کننده‌ی پشتی به ازای (x/L) . [۳۱]

می‌گیرد، مقایسه کنند. در این پیکربندی‌های معمولاً برداشت‌کننده‌ی دوم تحت اثر ارتعاشات ناشی از ریزش گردابه قرار می‌گیرد. برابان و همکاران [۳۱] دو سیستم برگ - ساقه را با فاصله در برابر باد قرار داده و اثرات این فاصله بر توان خروجی کل را بررسی کردند. ابتدا فاصله‌ی طولی (x) و فاصله‌ی عرضی (y) مانند شکل ۱۰ تعیین می‌شود. جریان در این آزمایش آرام و موازی است. برگ یک ایرفویل مستطیل شکل و ساقه یک تیر فولادی افقی نسبتاً بلند است که سختی کمی دارد. در این کار از مواد پیزوالکتریک سرامیکی استفاده شده است.

در مرحله‌ی اول هریک از برداشت‌کننده‌ها به طور مجزا در تونل باد قرار داده شده تا از شباهت آنها اطمینان حاصل شود. در مرحله‌ی دوم متغیرهای بی‌بعد (y/L) و (x/L) تعریف شده و برداشت‌کننده‌ی جلویی در جای خود ثابت می‌شود، در حالی که برداشت‌کننده‌ی پشتی در موقعیت‌های مختلفی نسبت به آن قرار می‌گیرد. توان برداشت شده از هر دو برداشت‌کننده و نسبت فرکانس برداشت‌کننده‌ی پشتی به جلویی به ازای تغییر (x/L) برای همه مقادیر (y/L) بررسی شده است. [۳۱]

نتایج نشان می‌دهند که تغییر (y/L) و (x/L) بر توان برداشت‌کننده‌ی جلویی تأثیر چندانی ندارد اما در برداشت‌کننده‌ی پشتی وقتی $(y/L) = 0$ و $(x/L) = 2$ است، بیشترین توان به دست می‌آید (شکل ۱۱) که از مقدار توان برداشت شده برای یک سیستم برگ - ساقه‌ی مجزا ۳۰٪ بیشتر است. در بازه $0 \leq (x/L) \leq 2$ توان برداشت‌کننده‌ی پشتی رو به افزایش است زیرا فرکانس دو برداشت‌کننده در این فواصل طولی تقریباً برابر است و هنگامی که این اتفاق بیفتد، جریان موجود در



شکل ۹. طرحی از برداشت‌کننده‌ی برگ - ساقه پیکان مانند و پارامترهای طراحی مربوط به آن. [۳۰]

جدول ۲. پیکربندی‌های بررسی شده به عنوان برگ پیکان مانند (واحد L و W میلی متر است). [۳۰]

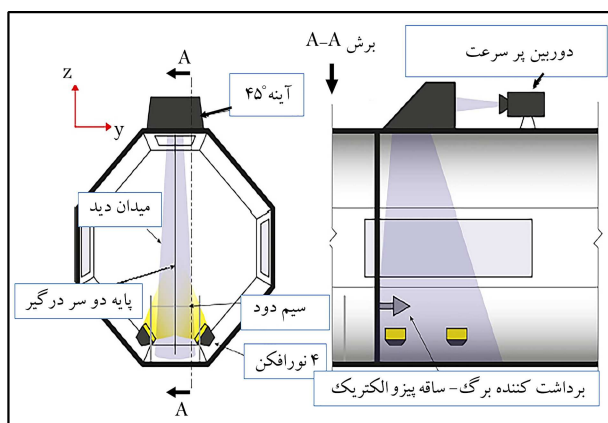
$\theta(^{\circ}) = \tan^{-1}(\frac{2L_r}{W_r})$	W_r	W_b	L_r	L_b	Δ
60°	۳۵	۱۳	۳۰	۲۰	۱S
50°	۵۰	۱۳	۳۰	۲۰	۲S
40°	۷۰	۱۳	۳۰	۲۰	۳S
60°	۳۵	۱۳	۳۰	۳۰	۱L
50°	۵۰	۱۳	۳۰	۳۰	۲L
40°	۷۰	۱۳	۳۰	۳۰	۳L

در سرعت بادهای $7 - 8 \text{ m/s}$ به ازای تغییرات زاویه‌ی برخورد روند یکسان و مقدار کمی دارد. [۳۰]

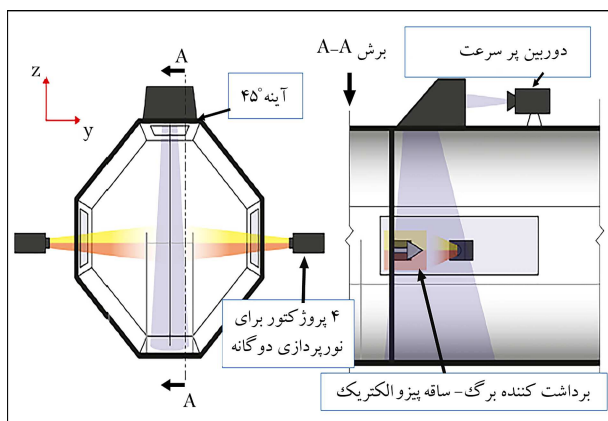
تغییرات توان برداشت شده‌ی هریک از پیکربندی‌های به ازای سرعت باد، نشان‌دهنده‌ی تأثیر طول دم پیکان بر سرعت آستانه‌ی فلاتر است. یعنی دم بلندتر منجر به سرعت آستانه‌ی کم‌تر فلاتر می‌شود. در مقابل، پیکربندی ۱S و ۲S که دم پیکان کوتاه‌تری دارند، انرژی بیشتری برداشت می‌کنند. اما این موضوع برای پیکربندی ۳S با همان طول دم و پهنای بیشتر مبنای مثلث پیکان، صدق نمی‌کند. سه پارامتری بعد ولتاژ (Q) ، نسبت جرم (μ) و سختی خمشی (β) سیستم، تعریف شده و تغییرات (Q) به ازای سختی خمشی برای هر پیکربندی با نسبت جرم مشخص بررسی و مشخص شد که پیکربندی با نسبت جرم بیشتر در سرعت بالاتری توان برداشت می‌کند و برای برداشت انرژی به سختی خمشی بزرگ‌تری نیاز دارد. [۳۰] این نتایج نشان داد که برای برداشت بهینه‌ی انرژی از این سیستم، بین نسبت جرم و سختی خمشی یک تعادل بحرانی وجود دارد. بین پیکربندی‌های در نظر گرفته شده، بهترین برداشت‌کننده، از لحاظ تولید توان بیشینه، در سرعت جریان 7 m/s و یا بیشتر از آن، پیکربندی ۲S است و بیشینه‌ی توان خروجی $771/3 (\mu W)$ بود که در سرعت $9/5 \text{ m/s}$ ، متناظر با چگالی توان $2/2 \text{ mW/cm}^2$ است. [۳۰]

۲.۳. بررسی برداشت‌کننده‌های برگ - ساقه چندگانه

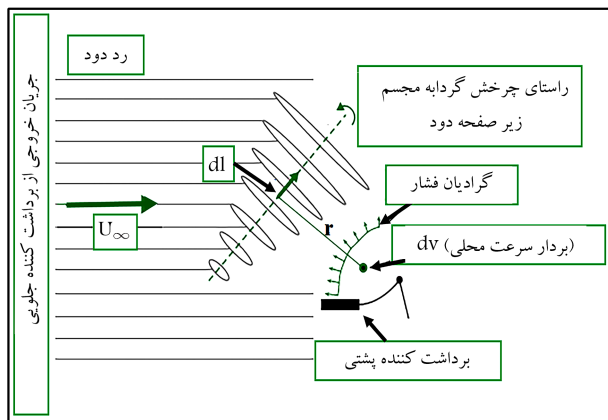
برابان و همکاران، [۳۱] مک‌کارتی و همکاران [۳۲، ۳۳] و یو و لیو [۲۹] در پژوهش خود سعی کردند دو سیستم برگ - ساقه را کنار یا پشت سر هم قرار داده و توان برداشت شده‌ی سیستم در این حالت را با حالتی که فقط یک برداشت‌کننده در تونل قرار



شکل ۱۳. روش اول نورپردازی برای تجسم جریان. [۳۲]

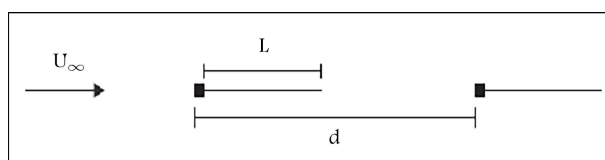


شکل ۱۴. روش دوم نورپردازی برای تجسم جریان. [۳۲]



شکل ۱۵. گرادیان فشار ناشی از رشته‌های گردابه که دامنه فلاتر برداشت‌کننده‌ی پشته‌ی را تقویت می‌کنند. [۳۲]

مهم‌ترین هدف در این تحقیق مشاهده‌ی ویژگی‌های جریان، مشخص کردن مفهوم این ساختارهای جریان و رابطه‌ی خاص بین سرعت جریان و تأخیر فاز برداشت‌کننده‌ها (تفاوت موقعیت دو برداشت‌کننده) با استفاده از دو تکنیک نورپردازی، برای تجسم جریان است. چنان که در شکل ۱۵ قابل مشاهده است، گرادیان فشار محلی متغیر با زمان ناشی از گردابه‌های منتشر شده با فشار دینامیکی جریان آزاد و بی‌ثباتی‌های فلاتر هم‌بسته شده و سبب بالا بردن دامنه‌ی فلاتر برداشت‌کننده‌ی پشته می‌شود.



شکل ۱۶. شماتیک قرارگیری دو برداشت‌کننده نسبت به هم و پارامترهای مکانی آنها. [۲۸]

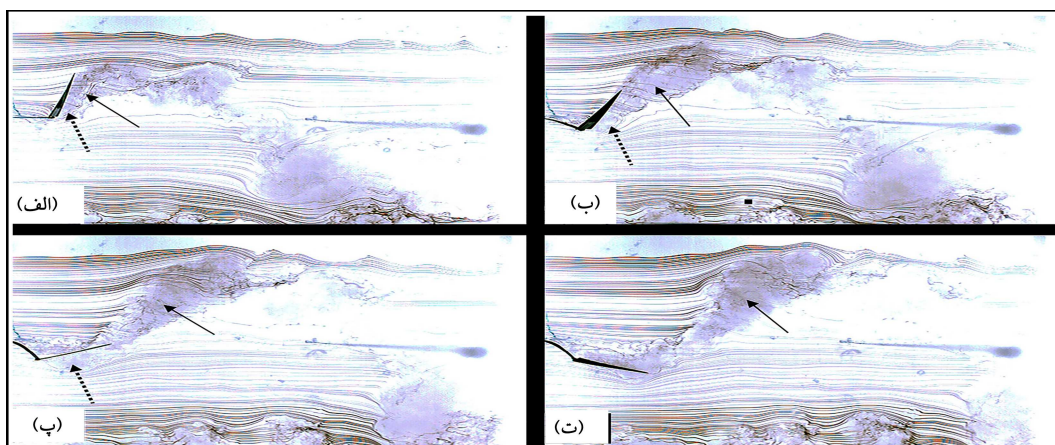
دنباله‌ی دستگاه جلویی با دستگاه پشتی جمع شده و باعث بزرگ‌تر شدن دامنه‌ی نوسان و توان خروجی دستگاه پشتی می‌شود.

اما چنان که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، وقتی $(y/L) = 1$ باشد، دستگاه پشتی حتی با وجود تغییرات (x/L) ، تحت تأثیر دنباله‌ی برداشت‌کننده‌ی جلویی قرار نمی‌گیرد. [۳۱]

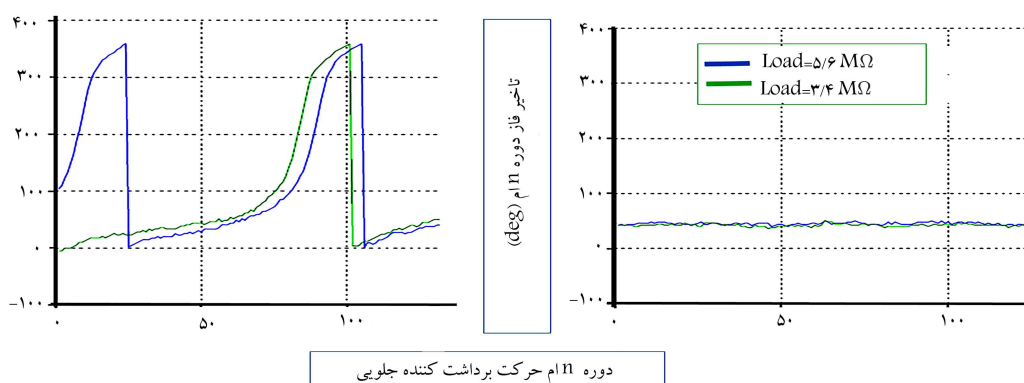
مک‌کارتی و همکاران، [۲۸] پس از بررسی اثر ابعاد سطح مقطع گیره بر سرعت بحرانی فلاتر، دو سیستم برداشت‌کننده را پشت سرهم در تونل باد قرار دادند. ماده پیژوالکتریک استفاده شده در این دو برداشت‌کننده PVDF با ابعاد $41 \times 16 \times 0.25 (mm)$ است. جنس برگ، پلی پروپیلن [۲۵] است و ابعاد آن نیز مانند برگ استفاده شده توسط لی و لیپسون [۲۵] است. برگ و ساقه به وسیله‌ی لولای پلاستیکی سبک به هم وصل می‌شوند. در سرعت باد $5 m/s$ با انجام آزمایشی، مقاومت بهینه برای سیستم $5/6 (M\Omega)$ به دست می‌آید. اگر چنان که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، طول هر برداشت‌کننده L و ثابت باشد و فاصله‌ی دو برداشت‌کننده d و متغیر باشد، متغیر بی‌بعد (d/L) تعریف شده و عملکرد برداشت‌کننده‌ها به‌ازای $1, 2, 3 (d/L)$ بررسی می‌شود و در هر مرحله توان بی‌بعد برداشت‌کننده پشتی به‌ازای سرعت باد در محدوده‌ی $3 (m/s)$ تا $8 (m/s)$ به دست آمده و مشخص می‌شود که در سرعت $8 (m/s)$ ، توان خروجی هر سه مقدار (d/L) ، یکسان و بیشتر از $1/4$ است. در این جا ممکن است با بهینه کردن مقاومت بار برای این سرعت، به توان بیشتری هم دست یافت. برای مقادیر 1 و $2 (d/L)$ توان بی‌بعد مقدار بیشتری را نشان می‌دهد با این حال در $3 (d/L)$ نیز روند خروجی توان در محدوده‌ی سرعت باد، افزایشی است. در سرعت باد $4 (m/s)$ به دلیل وقوع ضدزونانس بین فرکانس گردابه ریزشی سیستم جلویی و فرکانس فلاتر سیستم پشتی، توان کمیته خروجی توان بهینه برای برداشت‌کننده‌ی پشتی در $2 (d/L)$ به دست می‌آید که با یافته‌های بریان و همکارانش، [۳۱] مطابقت دارد. و این افزایش در حدود 40% است. [۲۸]

مک‌کارتی و همکارانش [۳۲] ساختارهای جریانی که از برداشت‌کننده‌ی جلویی عبور کرده‌اند را به دلیل 40% افزایش در خروجی توان برداشت‌کننده‌ی پشتی، به روش تجسم جریان بررسی کردند. برای فهم این پدیده، تجسم جریان به وسیله‌ی دود، به دو روش انجام گرفت. ابتدا یک پایه از دو طرف به تونل باد وصل شده تا حرکت عرضی نداشته باشد و برداشت‌کننده به آن متصل شود. سپس در روش اول (شکل ۱۳)، چهار نورافکن 13 از دو طرف به برداشت‌کننده تابیده می‌شود. روی سقف تونل باد یک آینه با زاویه‌ی 45° قرار داده شده و دوربین پرسرعتی تصاویر روی آینه را ضبط می‌کند. [۳۲]

در روش دوم یا روش نورپردازی دوگانه (شکل ۱۴)، که روشی نوین است، به جای استفاده از نورافکن‌ها داخل تونل، چهار پروژکتور اسلاید 14 خارج تونل قرار داده شده است. برای دستیابی به اثر دورنگ، از فیلترهای رنگی اسلاید با پروژکتورهای اسلاید و برای دستیابی به کنتراست رنگ خوب از نور سفید فیلتر نشده و فیلترهای نارنجی استفاده شد. [۳۲]



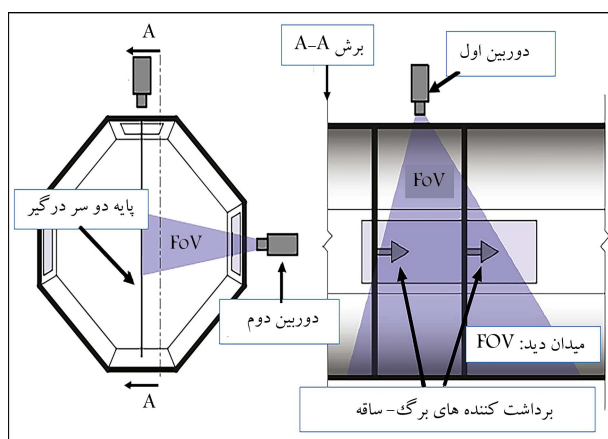
شکل ۱۶. تصاویر متوالی از برداشت‌کننده بین 0° تا 180° با فرکانس فلاتر تقریبی $[327,2(Hz)]$.



(ب) ۵۲۳۰۰

(الف) ۴۱۸۰۰

شکل ۱۷. تأخیر فاز بین برداشت‌کننده‌ها در عدد رینولدز.



شکل ۱۸. طرحی از تنظیمات آزمایش داخل تونل باد و میدان دید تقریبی هر دوربین. جریان در راستای جهت مثبت X است. [۳۳]

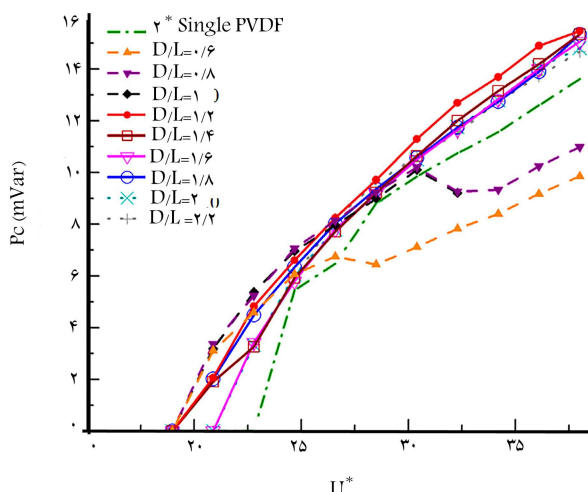
همزمان جریان مجسم شده با دود، به طور قائم در اطراف برداشت‌کننده‌ها قرار دادند. [۳۳]

علاوه بر این، ثبت تصویر با دو دوربین و ثبت هم‌زمان ولتاژ امکان مقایسه بین داده‌های تصویر و ولتاژ و مشاهده ساختار دنباله‌ای تولید شده را فراهم می‌کند. نتایج و یافته‌ها در این پژوهش عبارت‌اند از:

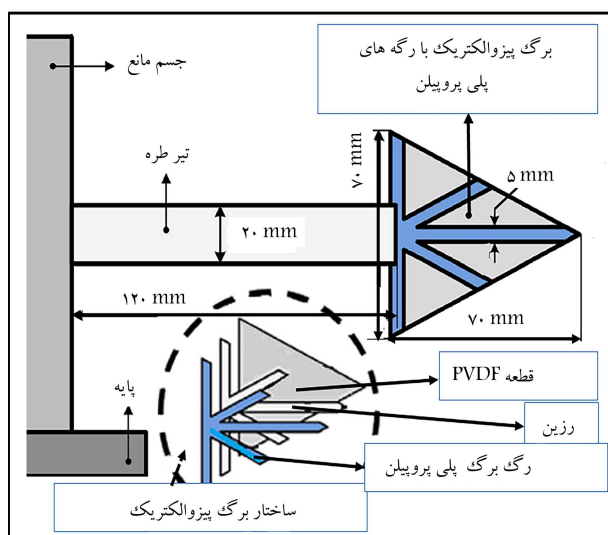
در نتیجه گردابه‌های ریزشی مخروطی شکل برداشت‌کننده‌ی جلویی همواره منجر به افزایش خروجی توان برداشت‌کننده‌ی پشتی می‌شود و تعامل مفیدی با برداشت‌کننده‌ی پشتی دارد. چنان که در شکل ۱۶ دیده می‌شود، تشکیل پایین‌ترین گردابه‌ی مخروطی و گردابه‌ی لپه‌ی جلویی برگ در شکل ۱۶ الف آغاز شد، سپس در شکل ۱۶ ب به سمت بالا حرکت کردند و گردابه‌ها کاملاً تشکیل شدند. در شکل ۱۶ پ گردابه از برگ جدا شد و سرانجام انتشار گردابه در شکل ۱۶ ت دیده شد. [۳۲]

همچنین، برای تسهیل مشاهده‌ی روابط فاز، ولتاژهای متغیر با زمان از هر دو برداشت‌کننده به طور هم‌زمان ثبت شد و تأخیر فاز با اضافه کردن شکل موج‌های ولتاژ مشاهده شد. خروجی برداشت‌کننده با دو مقاومت بار مختلف، در محدوده‌ی از اعداد رینولدز تکرار شد. مشاهده شد که در برخی از اعداد رینولدز، تأخیر فاز متناسب با سرعت باد، مقدار ثابتی دارد (شکل ۱۷ الف) و در برخی دیگر تأخیر فاز رفتاری پریودیک را نشان می‌دهد (شکل ۱۷ ب) مشخص شد که رابطه‌ی بین تأخیر فاز و سرعت باد حداقل در این پیکربندی خاص، به شدت غیرخطی است و تأخیر فاز بین دو برداشت‌کننده ثابت است و مقاومت بار تأثیری بر تغییرات تأخیر فاز ندارد. [۳۲]

با این حال مک‌کارتی و همکاران [۳۳] برای رسیدن به دلایل روشن‌ترین افزایش توان در برداشت‌کننده‌ی پشتی، آزمایش دیگری در این زمینه انجام دادند و همانند شکل ۱۸ دو دوربین پرسرعت را که از لحاظ زمانی همگام شده‌اند، برای ضبط



شکل ۲۰. وابستگی توان برداشت‌کننده‌های موازی با پایه نگه‌دارنده دوسر مفصل، به سرعت جریان و فاصله‌ی (D/L) آنها. [۲۹]

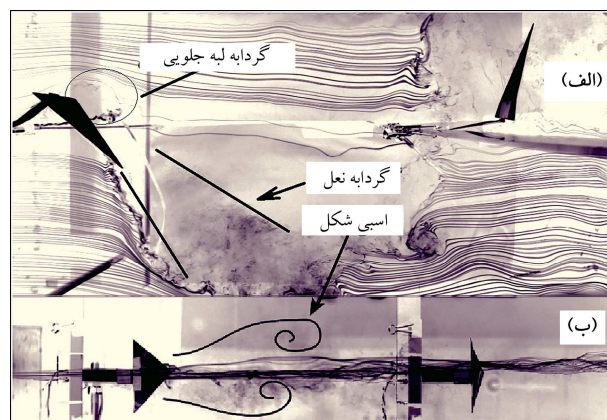


شکل ۲۱. ساختار برگ و سیستم برداشت‌کننده‌ی انرژی. [۳۴]

پس در این تحقیق برگ‌ها همان برداشت‌کننده‌ی انرژی هستند و توسط ارتفاعات ناشی از گردابه که بر اثر برخورد باد با جسم مانع ایجاد می‌شوند، به حرکت درمی‌آیند. ورید برگ ساختاری مادی نیست بلکه نوعی ساختار مکانیکی است و رگ‌های برگ برای مقاومت در برابر بارهای خارجی، باید به اندازه‌ی کافی مستحکم باشند و بتوانند جرم کل برگ را تحمل کنند طوری که به صورت افقی یا عمودی رشد کند. استحکام کششی ساختار طراحی شده مشابه با برگ گیاهانی مانند زردآلو و شمع‌دانی است. [۳۴]

محدوده‌ی سرعت باد $6 (m/s)$ تا $11 (m/s)$ است. مدل‌های برگ از جنس PVDF بوده و مدل ۱ تا ۳ به ترتیب دارای ضخامت $28 (\mu m)$ با رگ برگ، $11 (\mu m)$ با رگ برگ و $11 (\mu m)$ بدون رگ برگ است. خروجی ولتاژ هر برگ در محدوده‌ی باد مشخص، به دست می‌آید و چنان که در شکل ۲۲ مشاهده می‌شود، مدل ۳ ولتاژ خروجی نسبتاً کمی دارد، مدل ۲ روند افزایشی خوبی دارد و ولتاژ خروجی مدل ۱ از مدل ۳ خیلی بیشتر و از مدل ۲ کمی کم‌تر است. [۳۴]

برای فهم بهتر دلیل این پدیده، دینامیک برگ‌های پیزوالکتریک تحلیل و مشخص



شکل ۱۹. تجسم جریان دود. الف) دوربین اول؛ ب) دوربین دوم.

۱. بیشینه‌ی ولتاژ برداشت‌کننده تقریباً همزمان با حداکثر سرعت نوک PVDF در چرخه‌ی فلتر به دست می‌آید؛

۲. ریزش گردابه‌ی لبه‌ی جلویی برداشت‌کننده‌ی جلویی، بر برداشت‌کننده‌ی پشتی تأثیری ندارد؛

۳. گردابه‌های نعل اسبی ساخته شده توسط برداشت‌کننده‌ی جلویی سبب حداکثر افزایش سرعت نوک PVDF برداشت‌کننده‌ی پشتی شد که باعث افزایش خروجی توان می‌شود.

چنان که در شکل ۱۹ دیده می‌شود، گردابه‌ی لبه‌ی جلویی برگ برداشت‌کننده‌ی جلویی تنها با دوربین اول ثبت شده در حالی که گردابه مخروط نعل اسبی تنها با دوربین دوم مشاهده می‌شود. [۳۳]

چنان که در بخش اول (۳.۱) توضیح داده شد، یو ویلو [۲۹] نیز ابتدا عملکرد برداشت‌کننده با پایه‌ی نگهدارنده دوسر درگیر و دوسر مفصل را مقایسه کردند و متوجه برتری پیکربندی با پایه‌ی دوسر مفصل شدند و سپس دو برداشت‌کننده با پایه‌های دوسر مفصل را کنار هم قرار داده (شکل ۸) و اثر پارامترهایی از قبیل فاصله‌ی بین دو برداشت‌کننده، سرعت جریان، اختلاف فاز دو برداشت‌کننده و مقاومت بار بر توان خروجی برداشت‌کننده را در آزمایشات بررسی کردند. [۲۹]

چنان که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود، مشخص شد که در فاصله‌ی $(d/L) = 1/2$ و سرعت جریان بی بعد $U^* = 36/1$ که معادل با سرعت $18/32 (m/s)$ است و به ازای مقاومت بار $R_L = 100 (K\Omega)$ حداکثر توانی که به دست می‌آید، برابر با $P = 10/31 (mW)$ است. [۲۹]

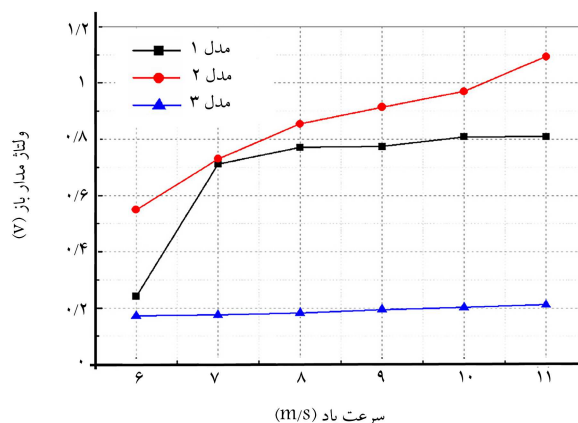
۳.۳. بررسی سیستم برگ - ساقه با برگ‌های دارای رگ برگ

در بین تحقیقات انجام شده روی برداشت‌کننده‌های پیزوالکتریک با ساختار برگ - ساقه، برخی محققان به ساختار برگ توجه کرده و علاوه بر تعیین هندسه مناسب، سعی کردند تا عملکرد برگ با رگ برگ را نیز بررسی کنند.

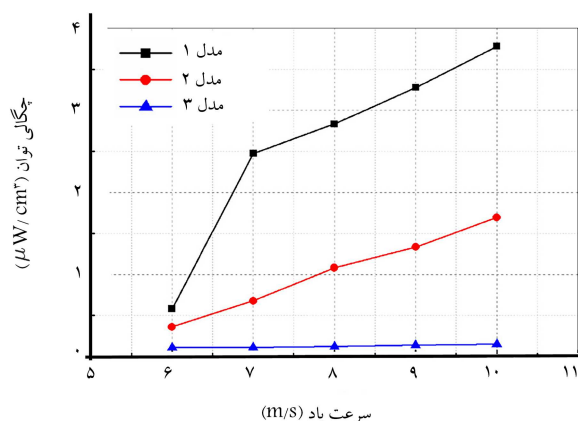
ونگ و همکارانش [۳۴] در پژوهشی برداشت‌کننده‌ی انرژی باد پیزوالکتریک برگ مانند را که از برگ‌های گیاهان دولپه‌ی دارای رگ برگ، الگو برمی‌دارند، ارائه می‌دهند. ساختار برگ و نمونه اولیه برداشت‌کننده‌ی پیزوالکتریک با وریدهای پلی پروپیلن در شکل ۲۱ نشان داده شده است. جسم مانع و برگ پیزوالکتریک با یک تیر فولادی به هم متصل می‌شوند. تیری که برگ به انتهای آزاد آن وصل شده نوعی تیر طره است و به دلیل سختی نسبتاً زیاد، در برابر باد، جابه‌جایی تقریباً ناچیزی دارد.

جدول ۳. فرکانس‌های طبیعی هر مدل به دست آمده از نرم‌افزار COMSOL و فرکانس پاسخ ناشی از تحریک جریان باد به دست آمده از آزمایشات. [۳۴]

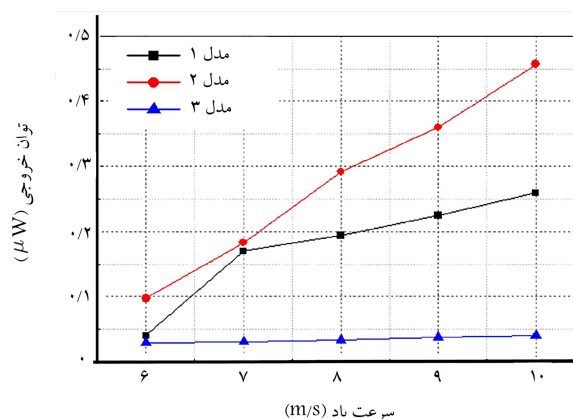
فرکانس‌های طبیعی مرتبه n ام (Hz)			
۳	۲	۱	
۳۰٫۵۴	۲۹٫۲۱	۹٫۹۱	مدل ۱
۴۰٫۳۶	۳۴٫۵۷	۱۳٫۰۴	مدل ۲
۲۷٫۷۸	۲۰٫۷۸	۸٫۶۳	مدل ۳
فرکانس پاسخ ناشی از گردابه در سرعت باد ۶ تا ۱۱ (m/s) ۱۱ (Hz)			
۱۱ (m/s)	۹ (m/s)	۶ (m/s)	
۳۰٫۶۵ و ۴۶٫۱	۳۸٫۰۱	۳۱٫۳۶	مدل ۱
۳۰٫۰۱ و ۴۳٫۴۶	۲۳٫۲۵	۲۷٫۵	مدل ۲
۴۸٫۹۱	۴۱٫۰۶	۴۱٫۵۴	مدل ۳



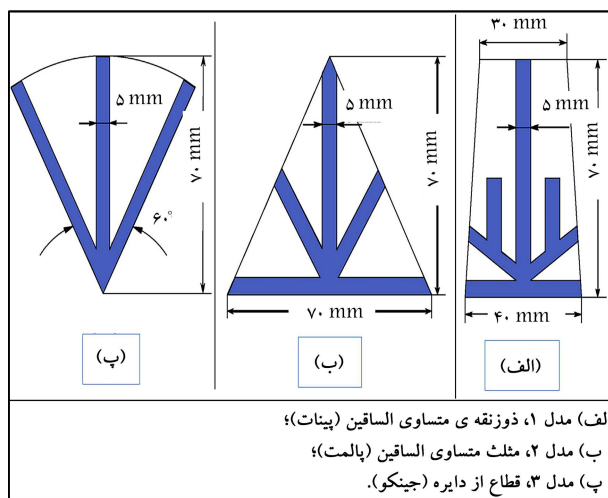
شکل ۲۲. ولتاژ خروجی برداشت‌کننده‌ی انرژی به ازای سرعت باد. [۳۴]



شکل ۲۴. نمودار چگالی توان خروجی هر مدل به ازای تغییرات سرعت باد. [۳۴]



شکل ۲۳. توان خروجی هر مدل به ازای تغییرات سرعت باد. [۳۴]



شکل ۲۵. هندسه‌ی سه مدل برگ پیزوالکتریک. [۳۵]

پس الگو برداری از رگ‌برگ‌های گیاهان باعث بهبود عملکرد برداشت‌کننده خواهد شد. [۳۵]

رگ‌های طراحی شده از نظر هندسه با هم اختلاف دارند و باید اثر این اختلاف مشخص شود، به این منظور، سه مدل برگ با همان هندسه مدل‌های ۱ تا ۳، اما بدون رگ‌برگ طراحی شد و ولتاژ خروجی هر سه مدل بدون رگ‌برگ، به دست آمد؛ مشاهده شد که اگرچه برگ مثلی بالاترین خروجی $(V_{ms} \sim 0.21(v))$ و

شد فرکانس تحریک در مدل‌های ۱ و ۲ نزدیک به فرکانس طبیعی سیستم بوده و حالت تشدید به وجود آمده است. (جدول ۳) تحلیل دینامیکی نشان می‌دهد که رگ‌ها می‌توانند خواص کوپلینگ مکانیکی بین برداشت‌کننده و جریان باد را تا حد زیادی تحت تأثیر قرار دهند، در حالی که ثبات سیستم حفظ شود. [۳۴]

نتایج تجربی نشان می‌دهد که توان خروجی ساختارهای دارای رگ‌برگ ۴ تا ۶ برابر بیشتر از ساختارهای بدون رگ‌برگ است. در سرعت باد $11 (m/s)$ برای مدل ۲ بیشترین ولتاژ $V_{ms} = 1.094(v)$ بدست می‌آید. (شکل ۲۳) اما چگالی توان مدل ۱ بیشتر است (شکل ۲۴). حضور رگ‌برگ‌ها تأثیر مهمی در کارایی سیستم برداشت انرژی دارد. [۳۴]

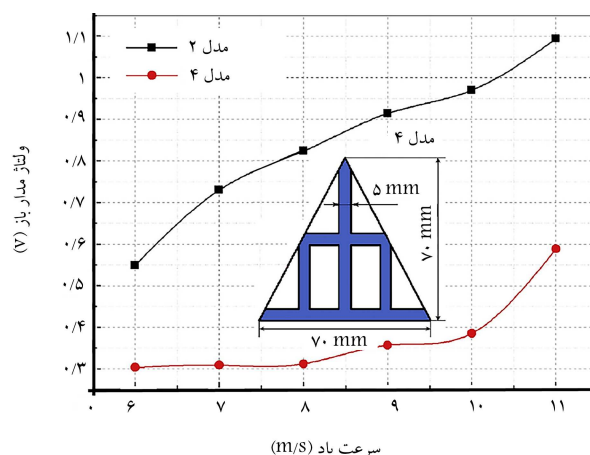
ونگ و همکارانش [۳۵] مجدداً در پژوهش دیگری ساختار برگ‌های PVDF دارای رگ‌برگ پلی‌پروپیلن را بررسی کردند. در این مقاله نیز سه نوع طراحی و ساخته می‌شود که شکل آن‌ها چنان که در شکل ۲۵ دیده می‌شود، مثلث متساوی‌الساقین، دوزنقه‌ی متساوی‌الساقین و قطاع دایره 60° است که به ترتیب مشابه با برگ پالم ۱۵ (پنجه‌مانند)، برگ پیئات ۱۶ (پرمانند) و برگ جینکو ۱۷ (قطاعی از دایره) هستند. [۳۵]

ساختار رگ‌برگ‌ها و برداشت‌کننده مشابه ساختار کار قبلی آنها (شکل ۲۱) است. در این پژوهش یک ساختار کلی به نام مدل کنترل‌ی طراحی شد (مدل ۴) که رگ‌برگ‌های طراحی شده روی آن از گیاهان الگو نمی‌گرفت؛ عملکرد مدل ۲ با آن مقایسه و نتیجه در شکل ۲۶ رسم شده است. مشاهده می‌شود که ولتاژ مدار باز خروجی به ازای سرعت‌های مختلف باد برای مدل ۲، تقریباً دو برابر مدل ۴ است.

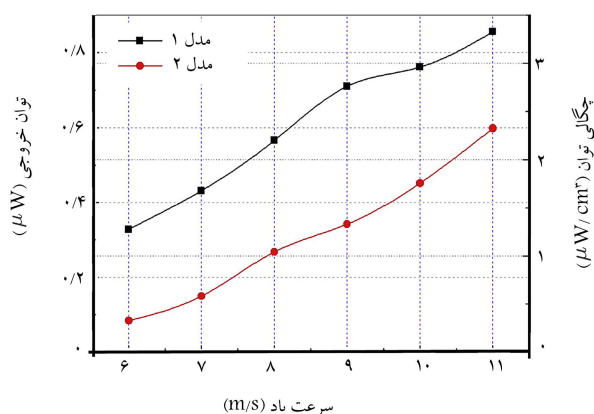
جدول ۴. فرکانس‌های طبیعی هر مدل به دست آمده از نرم افزار COMSOL و فرکانس پاسخ ناشی از تحریک جریان باد به دست آمده از آزمایشات. [۳۵]

فرکانس‌های طبیعی مرتبه n ام (Hz)			
۱	۲	۳	
مدل ۱	۱/۰۷۱	۲۱/۷۱	۲۰/۲۹
مدل ۲	۱۵/۱۴	۳۱/۴۹	۴۴/۶۸
مدل ۳	۵/۸۶	۱۱/۴۷	۲۱/۴۸

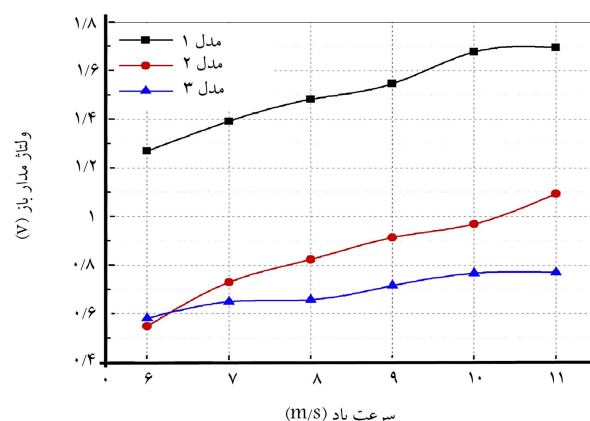
فرکانس پاسخ ناشی از گردابه در سرعت باد ۶ تا ۱۱ (m/s) ۱۱ (Hz)			
۱۱ (m/s)	۹ (m/s)	۶ (m/s)	
مدل ۱	۲۰/۳ و ۳۱/۵	۲۰/۵ و ۳۸/۵	۲۰/۱ و ۴۵/۳
مدل ۲	۲۷/۵ و ۳۶/۷	۳۳/۳	۳۰ و ۴۳/۵
مدل ۳	۲۲/۲ و ۳۲/۲	۲۳/۹ و ۳۹/۴	۲۲/۸ و ۴۳/۹



شکل ۲۶. مقایسه‌ی عملکرد مدل ۲ و مدل ۴ و ساختار مدل ۴. [۳۵]



شکل ۲۸. نمودار تغییرات توان و چگالی توان مدل ۱ و ۲ به‌ازای تغییرات سرعت باد در مقاومت بار $(M\omega)$. [۳۵]



شکل ۲۷. نمودار تغییرات ولتاژ خروجی مدار باز هر سه مدل به‌ازای تغییرات سرعت باد. [۳۵]

نتایج نشان می‌دهند که ساختار تقویت شده با رگ برگ الگوبرداری شده از گیاهان، می‌تواند به طور قابل توجهی بهره‌وری برداشت‌کننده‌ی انرژی پیزوالکتریک را که بر اساس اصل ارتعاش ناشی از باد کار می‌کنند، بهبود بخشد و ورید گیاهان دولپه‌یی بهترین نمونه‌ی اولیه بوده است. [۳۵]

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، هدف اصلی مرور مطالعات انجام شده بر برداشت‌کننده‌های انرژی با ساختار برگ - ساقه مانند است.

بدین منظور، ابتدا در بخش ۱، ضرورت استفاده از انرژی‌های پاک، خواص مواد پیزوالکتریک و سازوکار تعامل سیال با ساختار به طور خلاصه بیان شد. سپس در بخش ۲، مزایا، معایب و اقدامات لازم برای رفع معایب برداشت‌کننده‌ی انرژی باد به‌وسیله‌ی مواد پیزوالکتریک شرح داده شده و به طور مختصر به برخی از ساختارهای ساخته شده برای برداشت انرژی باد از طریق مواد پیزوالکتریک اشاره شد. در بخش ۳ مروری بر مطالعات انجام شده در این زمینه، روش انجام مقایسه‌ی پارامترها و اثرشان بر عملکرد برداشت‌کننده‌ی انرژی، صورت گرفته است.

نتایج جمع‌بندی شده مشخص می‌کند برای داشتن یک پیکربندی مناسب، افزایش و کاهش کدام پارامترها سبب بهبود عملکرد پیکربندی برگ - ساقه می‌شود.

برگ دوزنقه‌یی پایین‌ترین خروجی را دارد اما اختلاف عملکرد آنها آنقدر کم است، (در حدود $0.45(v)$) که در نظر گرفته نمی‌شود. سپس عملکرد مدل‌های ۱ تا ۳ بررسی شد و مطابق شکل ۲۷، مشخص شد که عملکرد آنها از برگ‌های بدون رگ برگ خیلی بهتر است و عملکرد مدل ۱ از مدل ۲ و ۳ بهتر است. [۳۵]

بعد از مشاهده‌ی منحنی ولتاژ زمانی هر مدل، در محدوده‌ی سرعت باد و مشاهده پدیده ضربان در خروجی مدل ۱ و ۲، فرکانس طبیعی هر مدل به دست آمد و با منحنی پاسخ فرکانسی آنها در سرعت بادهای مختلف مقایسه شد و مشخص شد که با توجه به مقادیری که در جدول ۴ ارائه شده، فرکانس پاسخ تحریک ناشی از ریزش گردابه، به برخی از فرکانس‌های طبیعی مدل‌های ۱ و ۲ نزدیک است و دلیل پدیده‌ی ضربان و بیشتر بودن دامنه‌ی پاسخ نیز همین امر است. پس از این نتیجه‌گیری، مقایسه‌ی بین دو مدل ۱ و ۲ ادامه یافت. [۳۵]

آزمایشی به منظور انتخاب مقاومت بهینه انجام شد که در مقاومت بار $2(M\Omega)$ هر دو مدل بهترین عملکرد را دارند. سپس توان خروجی و چگالی توان خروجی هر دو در این مقاومت بار در محدوده‌ی سرعت باد $6(m/s)$ تا $11(m/s)$ به دست می‌آید. چنان‌که در شکل ۲۸ دیده می‌شود، بیشینه توان خروجی برای مدل ۱ (بینات) در سرعت باد $11(m/s)$ ، $0.85(\mu W)$ است و چگالی توان $3.29(\mu W/cm^2)$ است. در این شرایط، حداکثر ولتاژ $V_{rms} = 1.695(v)$ بوده و مقاومت بار بهینه نیز $2(M\Omega)$ است.

۱.۴. پارامترهای بررسی شده

پارامترهایی که در تحقیقات انجام شده بررسی شدند عبارت‌اند از: پیکربندی افقی یا عمودی ساقه: ساقه با پیکربندی عمودی (شکل ۶ ب)، عملکرد بهتری نسبت به پیکربندی افقی دارد و توان بیشتری تولید می‌کند. [۲۶، ۲۵]

شکل برگ: برگ مثلی متساوی‌الاضلاع منجر به تولید بیشترین توان الکتریکی شده است. [۲۷-۲۵]

هندسه‌ی ساقه: ابعاد ساقه می‌تواند برای شرایط مختلف سرعت باد، متنوع باشد و بهتر است با توجه به محدوده‌ی سرعت باد محیط، انتخاب شود. [۲۶]

زاویه‌ی برخورد باد به برگ: پارامتر چندان مؤثری نیست زیرا در محدوده‌ی 1° تا 6.5° ، توان برداشت شده در سرعت بادهای $7 - 8 (m/s)$ به‌ازای تغییرات زاویه‌ی برخورد روند یکسانی دارند. [۱۶]

ممان اینرسی برگ: این مشخصه حول لولای اتصال برگ به ساقه، پارامتری است که اگر زیاد باشد برای شروع فلاتر به انرژی بیشتری نیاز است و در نتیجه سرعت بحرانی فلاتر و فرکانس فلاتر بالا خواهد بود. اثر ممان اینرسی نسبت به اثر مساحت برگ یا نسبت ابعاد آن، مهم‌تر و تعیین‌کننده است. [۲۷]

مساحت برگ: با افزایش این مشخصه توان برداشت شده افزایش سرعت بحرانی فلاتر کاهش می‌یابد و تمایل سیستم به حرکات فلاتر بی‌نظم بیشتر می‌شود. [۲۷]

نسبت ابعاد برگ: توان برداشت‌کننده با افزایش نسبت ابعاد، یعنی افزایش طول و کاهش عرض برگ، افزایش می‌یابد. [۲۷]

افزایش ضخامت گیره‌ی نگهدارنده: سبب افزایش سرعت باد بحرانی می‌شود. [۲۸]

افزایش طول گیره‌ی نگهدارنده: اثر چندان بر سرعت باد بحرانی ندارد. [۲۸]

تکیه‌گاه گیره‌ی نگهدارنده: نتایج بیان‌گر برتری پیکربندی دوسرمفصل نسبت به دوسرگیردار است زیرا سیستم در این پیکربندی ۴۲ تا ۶۴ درصد انرژی بیشتر برداشت می‌کند. این انرژی اضافی به تمدید دامنه‌ی حرکت رفت و برگشتی برگ، همراه با وقوع انحنای بزرگ نسبت داده شده است. ماهیت خودانطباقی پیکربندی دوسرمفصل در پاسخ به جهت‌های مختلف جریان نیز نشان داده شده است. [۲۹]

نسبت جرم: پیکربندی با نسبت جرم بیشتر در سرعت بالاتری توان برداشت می‌کند. [۳۰]

سختی خمشی: برای برداشت انرژی به سختی خمشی بزرگ تری نیاز دارد. [۳۰]

۲.۴. پارامترهای مهم در برداشت‌کننده‌های چندگانه‌ی برگ - ساقه و اثرشان بر عملکرد سیستم

تغییرات فاصله‌ی عرضی و فاصله‌ی طولی دو برداشت‌کننده از هم: این پارامتر تأثیر چندان بر توان برداشت‌کننده‌ی جلویی ندارد اما وقتی برداشت‌کننده‌ی پشتی دقیقاً پشت سر برداشت‌کننده‌ی جلویی قرار بگیرد، یعنی وقتی فاصله‌ی عرضی دو برداشت‌کننده صفر باشد و فاصله‌ی طولی آنها از هم حدوداً دو برابر طول برداشت‌کننده باشد، بیشترین توان به دست می‌آید. [۳۱، ۲۸]

اما وقتی فاصله‌ی عرضی برابر با طول برداشت‌کننده باشد، دستگاه پشتی حتی با وجود تغییرات فاصله‌ی طولی، تحت تأثیر دنباله برداشت‌کننده‌ی جلویی قرار نمی‌گیرد. [۳۱]

با استفاده از تکیه‌گاه دوسر مفصل، توان خروجی برداشت‌کننده‌ی پشتی در فاصله‌ی $D/L = 1/2$ یعنی نیم‌برابر طول برداشت‌کننده، بیشینه شده و این بدان معنی است که در این پیکربندی تعداد برداشت‌کننده‌ها در واحد سطح، نسبت به حالت تکیه‌گاه دوسرگیردار، چهار برابر است. [۲۹]

به طور کلی وقتی دو برداشت‌کننده پشت سر هم قرار بگیرند، گردابه‌های

جدول ۵. نتایج به دست آمده از برخی منابع.

مرجع	سرعت باد (m/s)	توان (μW)	چگالی توان (μW/cm ^۲)	ولتاژ (V)	مقاومت بار (MΩ)
[۲۲]	۸	۲۹۶	۳۰۰	۵۴/۴	۱۰
[۲۶]	۸	۶۱۵	-	۵۴/۴۵	۵
[۲۷]	۸	۲۲	-	-	۵/۶
[۲۹]	۳۶/۱	۱۰۳۱۰	-	-	۰/۱
[۳۰]	۹/۵	۷۷۱/۳	۲۲۰۰	-	-
[۳۲]	۱۱	-	-	۱/۰۹۴	-
[۳۵]	۱۱	۰/۸۵	۳/۲۹	۱/۶۹۵	۲

ریزشی مخروطی شکل برداشت‌کننده‌ی جلویی همواره منجر به افزایش خروجی توان برداشت‌کننده‌ی پشتی می‌شود و تعامل مفیدی با برداشت‌کننده‌ی پشتی دارد. [۳۲]

سرعت نوک PVDF: مشخص شد که بیشینه ولتاژ برداشت‌کننده تقریباً همزمان با بیشینه سرعت نوک PVDF در چرخه‌ی فلاتر به دست می‌آید و گرداب‌های نعل اسبی ساخته شده توسط برداشت‌کننده‌ی جلویی سبب حداکثر افزایش سرعت نوک PVDF برداشت‌کننده‌ی پشتی شده و منجر به افزایش خروجی توان می‌شوند. [۳۳]

۳.۴. برگ‌های دارای رگ برگ

در این سری تحقیقات، پلیمر پیزوالکتریک PVDF، خود به‌عنوان برگ در نظر گرفته شده و روی آن رگ‌برگ‌هایی از جنس پلیمر پلی‌پروپیلن که بسیار منعطف و سبک است، ساخته می‌شود. پس برگ‌ها المان برداشت‌کننده‌ی انرژی هستند و توسط ارتعاشات ناشی از گردابه که بر اثر برخورد باد با جسم مانع ایجاد می‌شوند، به حرکت درمی‌آیند. تحلیل دینامیکی نشان می‌دهد که رگ‌ها می‌توانند خواص جفت مکانیکی بین برداشت‌کننده و جریان باد را تا حدود زیادی تحت تأثیر قرار دهند، در حالی که ثبات سیستم حفظ شود.

نتایج نشان می‌دهد حضور رگ‌برگ‌ها تأثیر مهمی در کارایی سیستم برداشت انرژی دارد و توان خروجی ساختارهای دارای رگ برگ ۴ تا ۶ برابر بیشتر از ساختارهای بدون رگ برگ است [۳۴] و ساختار تقویت شده با رگ برگ الگو برداری شده از گیاهان، می‌تواند به طور قابل توجهی بهره‌وری برداشت‌کننده‌ی انرژی پیزوالکتریک را که بر اساس اصل ارتعاش ناشی از باد کار می‌کنند، بهبود بخشد و ورید گیاهان دولپه‌یی بهترین نمونه‌ی اولیه بوده است. [۳۵]

۴.۴. جمع‌بندی نتایج تحقیقات

در جدول ۵، اطلاعاتی راجع به نتایج برخی از مقالات آورده شده است. مشاهده می‌شود که در سرعت‌های $8 - 11 (m/s)$ ، سیستم‌های ساخته شده توسط لی و لیسون در [۲۶] و محمد حاج در [۳۰]، نسبت به سیستم‌های دیگر عملکرد بهتری داشته‌اند. سیستم ساخته شده توسط یو و لیو در [۲۹] که در آن از تکیه‌گاه دوسر مفصل برای برداشت انرژی استفاده شده است، [۲۹] در سرعت بادهای بالا عملکرد بهتری داشته و توان تولید شده به‌ازای واحد سرعت و چگالی توان، در این کار بیشتر است.

چنان‌که قبلاً اشاره شد، انتخاب یک پیکربندی برای برداشت انرژی از باد به‌وسیله‌ی مواد پیزوالکتریک باید با توجه به شرایط سرعت وزش باد و ماده پیزوالکتریکی که در

دسترس است، انجام گیرد. یکی از دلایل بالا بودن توان خروجی در کار محمد حاج در ۱۸، ۲۰ [۲۰] استفاده از سرامیک پیزوالکتریک بیمورف است زیرا سرامیک‌های پیزوالکتریک ضریب تبدیل پیزوالکتریک بالایی دارند، اگرچه انعطاف‌پذیری آنها بسیار کم است. [۶]

۵.۴. چالش‌ها و فرصت‌ها

در مسیر ساخت و بهره‌برداری از سیستم‌های برداشت انرژی باد به‌وسیله‌ی مواد پیزوالکتریک، مانند هر تکنولوژی دیگری، نکات مثبت و چالش‌هایی وجود دارد. در دسترس بودن انرژی باد، هزینه‌ی کم و فرایند ساخت ساده از جمله نکات امید بخش در این زمینه هستند. از طرفی خاصیت مقیاس‌پذیری که منجر به سختی و میرایی ساختاری متفاوت در چنین سیستم‌هایی می‌شود، امکان برداشت انرژی طیف وسیعی از سرعت بادها را ایجاد می‌کند.

از جمله چالش‌های پیش رو در ساخت این نوع برداشت‌کننده، تعیین محدوده‌ی سرعت بادی است که دستگاه در آن ارتعاشات با دامنه بزرگ را تجربه کرده اما تخریب نمی‌شود. برای این کار باید محاسبات دقیقی انجام شود، به‌خصوص اگر سازه بزرگ باشد و تخریب آن منجر به آسیب به محیط شود. چنین محاسباتی با توجه به سازوکار تعامل سازه با سیال [۱۰] در دسترس است.

چالش دیگر، انتخاب ماده پیزوالکتریک است. برای انتخاب ماده پیزوالکتریک باید مشخصات ماده را مطالعه کرد تا پیزوالکتریکی انتخاب شود که هم صرفه‌ی اقتصادی و هم قابلیت انعطاف‌پذیری مطلوب برای کار مورد نظر را داشته باشد. مقاومت بار الکتریکی بهینه، نیز پارامتر مهمی است که در اکثر منابع با انجام آزمایش تعیین شده است.

در نهایت باید توجه کرد از چنین سیستمی در حال حاضر برای شارژ باتری، روشنی‌های محیطی، راه‌اندازی سنسورهای بی‌سیم و دیگر مصارف کم‌توان استفاده می‌شود.

پانوشته‌ها

1. Fluid-Structure Interaction (FSI)
2. vortex-induced vibration (VIV)
3. flutter-induced vibration (FIV)
4. galloping phenomenon
5. transverse galloping
6. wake galloping
7. leaf-stalk
8. inverted flag
9. curved panels
10. bluff body
11. cantilever beams
12. polypropylene
13. floodlight
14. slide projector
15. palmate
16. pinnate
17. ginkgo

منابع (References)

1. Bithas, K. and Kalimeris, P. "Revisiting the energy-development link, evidence from the 20th century for knowledge-based and itzerland developing economies", SpringerBriefs in Economics, Switzerland (2016).
2. Sardadeh, M. and Sarparast, A. "St. Anthony Falls, USA", [Cited:2020March5], (In Persian), available from: <http://topelmnnews.mihanblog.com/post/tag/%D8%A7%D9%86%D8%B1%DA%98%DB%8C%20%D8%A7%D8%A8%DB%8C>
3. Zoomit. "Everything you need to know about wind energy and wind turbine", [Cited:2020March5], (In Persian), available from: <https://www.zoomit.ir/2018/8/27/285634/wind-energy-wind-turbines/>.
4. Bornika. "Piezoelectric effect", [Cited:2020March5], (In Persian), available from: <https://translate.google.com/#view=home&op=translate&sl=fa&tl=en&text=%D8%A7%D8%AB%D8%B1%20%D9%BE%DB%8C%D8%B2%D9%88%D8%A7%D9%84%DA%A9>
5. Wikipedia. "Electric pressure effect", [Cited:2020 March5], (In Persian), available from: https://fa.wikipedia.org/wiki/%D8%A7%D8%AB%D8%B1_%D9%81%D8%B4%D8%A7%D8%B1%D8%A8%D8%B1%D9%82%DB%8C
6. Alaei, Z. "Power enhancement in piezoelectric energy harvesting", Degree Project, KTH Royal Institute of Technology, Sweden (2016).
7. Nano Textile Network, "Flexible sensors in medical textiles", Today's textile, (2017 february), (In Persian), available from: <https://www.eranico.com/pooyasoftpublisher/storage/files/20170420123223-nassaji%20emrouz%20170.pdf>
8. Elahi, H. and Eugeni, M. "A review on mechanisms for piezoelectric-based", Energies (2018).
9. Hamledar, M. and Kasaeian, A. "Energy harvesting from fluid flow using piezoelectrics: a critical Review", *Renewable Energy*, **143** (2019).
10. Ding, W. "Chapter 9: self-excited vibrations from interaction of structures and fluid", In Self-Excited Vibration (Theory, Paradigms, and Research Methods), Tsinghua, Beijing, Berlin, Heidelberg, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 243-301.T (2010).
11. Abbas, T., Kavarakov, I. and Morgenthal, G. "Methods for flutter stability analysis of long-span bridges: a review", *Bridge Engineering*, **170**(BE4), Chapter1 pp. 271-310 (17 05 2017).
12. Kaneko, S., Nakamura, T., Inada, F. and et al. *Chapter 1: Introduction, in Flow-Induced Vibrations (Classifications and Lessons From Practical Experiences)*, 2th ed., Elsevir, BookAid, pp. 1-28 (2014).
13. Edu.nano, Familiarity with smart materials. [Cited:2020December20], (In Persian), available from: <http://edu.nano.ir/paper/484>
14. The Guardian, © 2016 Guardian News and Media Limited or its affiliated companies., 14 3 2011. [Online]. Available:

- https://www.theguardian.com/news/datablog/2011/mar/14/nuclear-power-plant-accidents-list-rank. [Accessed 22 12 2020].
15. Mutsuda, H., Tanaka, Y., Doia, Y. and et al. "Application of a flexible device coating with piezoelectric paint for harvesting wave energy", *Ocean Engineering*, **172** pp. 170-182 (2019).
16. Wang, Ch., Song, Zh., Gao, Zh. and et al. "Preparation and performance research of stacked piezoelectric energy-harvesting units for pavements", *Energy & Buildings*, **183**, pp. 581-591 (2019).
17. Kumar, Ch., Gaur, A., Tiwari, Sh. and et al. "Bio-waste polymer hybrid as induced piezoelectric material with high energy harvesting efficiency", *Composites Communications*, **11**, pp. 56-61 (2019).
18. Do, X.D., Nguyen, H.H., Han, S.-k. and et al. "A piezoelectric energy harvester with high efficiency and low circuit complexity", *Journal of Semiconductor Technology and Science*, **15**(3), pp.319-325(JUNE, 2015).
19. Chen, N., Wei, T., Jung, H.J. and et al. "Quick self-start and minimum power-loss management circuit for impact-type micro wind piezoelectric energy harvesters", *Sensors and Actuators A*, **263**, pp. 23-29 (2017).
20. Silva-Leon, J., Cioncolini, A., Nabawy, M.R.A. and et al. "Simultaneous wind and solar energy harvesting with inverted flags", *Applied Energy*, **239**, pp. 846-858 (2019).
21. Karami, M.A., Farmer, J.R. and Inman, D.J. "Parametrically excited nonlinear piezoelectric compact wind turbine", *Renewable Energy*, **50**, pp. 977-987 (2013).
22. Daqaq, M.F. "Response of uni-modal duffing-type harvesters to random forced excitations", *Journal of Sound and Vibration*, **329**, pp. 3621-3631 (2010).
23. Yang, T. and Cao, Q. "dynamics and performance evaluation of a novel tristable hybrid energy harvester for ultra-low level vibration resources", *International Journal of Mechanical Sciences*, **156**, pp. 123-136 (2019).
24. Dickson, R.M. "New concepts in renewable energy", (2008).
25. Li, Sh. and Lipson, H. "Vertical-Stalk flapping-leaf generator for wind energy harvesting", *Proceedings of the ASME 2009 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, **1276** (2009).
26. Li, Sh. and Lipson, H. "Ambient wind energy harvesting using cross-flow fluttering", *Applied Physics*, **109**, pp.026104 (2011).
27. McCarthy, J.M. and Deivasigamani, A. "The effect of the configuration of the amplification device on the power output of a piezoelectric strip", *Proceedings of ASME Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent* (2012).
28. McCarthy, J.M. and Deivasigamani, A. "A parametric study of wind-induced flutter of piezoelectric patches for energy harvesting", *The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7)* (2013a).
29. Yu, Y. and Liu, Y. "Energy harvesting with two pinned piezoelectric membranes in fluid flow," *Journal of Fluids and Structures*, **65**, pp.381-397 (2016).
30. Alrowaijeh, J.S. and Hajj, M.R. "Piezoelectric energy harvesting from flexible delta wings", *Theoretical & Applied Mechanics Letters*, **8**, pp.267-271 (2018).
31. Bryant, M. and Mahtani, R. "Synergistic wake interactions in aeroelastic flutter vibration energy harvester arrays", *Proceedings of the ASME 2011 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems SMASIS2011*, **5103** (2011).
32. McCarthy, J.M. and Deivasigamani, A. "Downstream flow structures of a fluttering piezoelectric energy harvester", *Experimental Thermal and Fluid Science*, **51**, pp.279-290 (2013b).
33. McCarthy, J.M. and Deivasigamani, A. "On the visualisation of flow structures downstream of fluttering piezoelectric energy harvesters in a tandem configuration", *Experimental Thermal and Fluid Science*, **57**, pp.407-419 (2014).
34. Wang, W. and He, X. "A bioinspired structure modification of piezoelectric wind energy harvester based on the prototype of leaf veins", *Sensors and Actuators A: Physical*, **279**, pp.467-473 (2018).
35. Wang, W. and He, X. "Comparisons of bioinspired piezoelectric wind energy harvesters with different layout of stiffeners based on leaf venation prototypes", *Sensors and Actuators A: Physical*, **298**, pp.111570 (2019).