

برداشت انرژی از تیر پیزوالاستیک با جرم متمرکز تحت اثر ارتعاشات القایی

گردابه‌ای حول یک استوانه

علی اصغر جعفری*
استاد
دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
ajafari@kntu.ac.ir

محمد سعید جعفری
دانشجوی دکترا
دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
msjafari110@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۲

چکیده

برداشت انرژی از ارتعاشات موجود در طبیعت و تبدیل آن به انرژی الکتریکی سبب بازیافت انرژی‌های تلف شده و استفاده بهینه از آنها می‌شود. انرژی الکتریکی حاصل شده می‌تواند به‌عنوان منبعی ارزان، مداوم و پاک به‌منظور تغذیه تجهیزات کم‌مصرف نظیر سنسورها، عملگرها، کنترل‌کننده‌ها، تجهیزات پزشکی و غیره مورد استفاده قرار گیرد. این مقاله شامل یک استوانه افقی صلب است که صرفاً دارای حرکت عمودی بوده و به‌وسیله ۴ فنر مقید شده است. در اثر برخورد باد با استوانه، نیروی القایی گردابه‌ای به استوانه وارد گردیده و باعث ارتعاش در جهت عمود بر جریان باد می‌گردد. داخل این استوانه یک سیستم برداشت‌کننده انرژی پیزوالاستیک قرار داده شده است که از طریق بخش گیردار تیر، به استوانه افقی متصل است. در واقع با حرکت استوانه افقی از طریق ارتعاش پایه، نیرو به انتهای تیر منتقل شده و باعث ارتعاش تیر پیزوالاستیک می‌شود. نیروی غیرخطی القایی گردابه‌ای^۱ در اثر برخورد باد با استوانه افقی به کمک معادله وندریپل^۲ محاسبه و اثر آن در ارتعاش سیستم معادل مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس به کمک المان پیزوالکتریکی که روی تیر نصب شده است، انرژی الکتریکی به‌صورت ولتاژ برداشت خواهد شد. در اینجا سرعت باد بهینه و همچنین مقاومت بهینه برای اینکه توان الکتریکی خروجی بیشینه شود، محاسبه می‌گردد. در انتها اثر پارامترهای مختلف روی توان خروجی بررسی می‌گردد.

واژگان کلیدی: برداشت انرژی، ارتعاشات القایی گردابه‌ای، پیزوالکتریک، توان الکتریکی، جرم متمرکز

۱. مقدمه

محسوب می‌شوند. بحران اتمام سوخت‌های فسیلی از گذشته‌ای بسیار دور مورد توجه بشریت قرار گرفته بود و همچنین پیامدهای ناشی از استفاده از این نوع سوخت‌ها اعم از ایجاد آلودگی و خطرات زیست محیطی، باعث شده است

در حال حاضر سوخت‌های فسیلی مانند زغال سنگ، نفت، گاز طبیعی و غیره که از منابع تجدیدناپذیر هستند، از عمده‌ترین منابع تأمین انرژی در مناطق مختلف جهان

که بسیاری از محققان در جهان امروز در پی یافتن راه‌هایی نوین برای تأمین انرژی مورد نیاز زندگی بشر در جنبه‌های بسیار مختلفی باشند. هرچند قدمت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی باد و آب به ۳۰۰۰ سال پیش از میلاد برمی‌گردد، کماکان استفاده بهینه از انرژی‌های تجدیدپذیر از اهداف اصلی محققان در زمینه تأمین انرژی است. مطالعات و تحقیقات بسیاری در زمینه ارتعاشات القایی گردابه‌ای در سال‌های گذشته انجام شده است که در اینجا به‌طور خلاصه به برخی از این فعالیت‌ها پرداخته می‌شود. فاکتیتی و همکاران در سال ۲۰۰۴ به کمک معادله کلاسیک و ندرپل، ماهیت نوسانی را توصیف نمودند. آنها معادله حرکت سیستم یک درجه آزادی را در نظر گرفته و مدل دینامیکی کوپل شده را به‌صورت تحلیلی بررسی و مورد بحث قرار دادند [۱].

در سال ۲۰۱۲ باررو و همکاران به‌صورت تئوری یک مدل از برداشت‌کننده انرژی گردابه‌ای را بررسی کردند. آنها تأثیر نسبت جرم، میرایی مکانیکی و عدد رینولدز (Re) را بر بازده سیستم مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که مقادیر بازدهی بالا را می‌توان با افزایش مقدار به‌دست آورد [۲]. سونگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ یک برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک ناشی از گردابه (3VIPEH) ارائه کردند و توانایی برداشت انرژی $VIPEH$ را به‌صورت تئوری و تجربی نشان دادند. نتایج نشان داد که توانایی برداشت انرژی $VIPEH$ با کاهش جرم M و افزایش قطر D سیلندر افزایش می‌یابد [۳]. در سال ۲۰۱۷ ژانگ و همکاران برداشت انرژی ارتعاشی ناشی از گردابه از دو جسم بلوف^۴ به‌صورت پشت سرهم با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی دو بعدی در محدوده فاصله ۲-۵۰ برابر قطر را بررسی کردند. پنج گروه از بدنه بلوفی با مقطع مختلف (منشور مثلثی، منشور مربعی، منشور ۵ ضلعی، استوانه دایره‌ای و منشور دایره‌ای - مثلثی) تجزیه و تحلیل شده است [۴]. در سال ۲۰۱۷ ناصر و همکاران برداشت انرژی از ارتعاشات ناشی از گردابه را با معرفی نیروهای مغناطیسی برای اولین بار پیشنهاد و بررسی

کردند. آنها به بررسی تأثیرات فاصله دو آهنربا بر روی فرکانس طبیعی و نسبت میرایی دستگاه برداشت انرژی پرداختند [۵]. پان و همکاران در سال ۲۰۱۷ برای تبدیل انرژی جنبشی آب جاری به الکتریسیته، یک سیستم برداشت انرژی مبتنی بر ارتعاش ناشی از گردابه طراحی کردند و نشان دادند که نیروهای اعمال شده بر روی تیر و همچنین ولتاژ خروجی با سرعت جریان و قطر سیلندر رابطه مستقیم دارند [۶]. ژو و وانگ در سال ۲۰۱۸ یک سیستم برداشت انرژی ارتعاشی ناشی از گردابه سریالی دوگانه برای افزایش برداشت انرژی ارائه کردند. این شامل دو دستگاه برداشت‌کننده انرژی ارتعاشی ناشی از گردابه پیزوالکتریک یکسرگیردار یکسان است که به‌طور متوالی در یک صفحه از تونل باد نصب می‌شوند. نتایج تجربی تجزیه و تحلیل عددی را تأیید می‌کند و راندمان بالاتر برداشت انرژی سیستم ارائه شده را نسبت به برداشت‌کننده تکی آن نشان می‌دهد [۷]. ژو و همکاران در سال ۲۰۱۹ ویژگی‌های منحصربه‌فرد دینامیکی برداشت‌کننده‌های انرژی سه پایا با ارتعاش از نظر تئوری و تجربی را تأیید کردند. چنین برداشت‌کننده‌های انرژی سه پایای ارتعاشی دارای عملکرد عالی برداشت انرژی هستند. نتایج تجربی تأیید می‌کند که برداشت‌کننده انرژی سه پایا ارتعاشی ناشی از گردابه عملکرد بهتری از برداشت‌کننده انرژی ارتعاش ناشی از گردابه سنتی دارد [۸]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ یک تیر دوگانه (دو لایه پیزوالکتریک و دو لایه تیر) برای برداشت انرژی از ارتعاشات ناشی از گردابه طراحی کردند. مجموعه‌ای از آزمایش‌های تونل باد برای بررسی عملکرد برداشت‌کننده انرژی پیشنهادی تحت بار باد با سرعت‌ها و جهت‌های مختلف انجام می‌شود. تیرهای پیزوالکتریک بالا و پایین به‌ترتیب می‌توانند حداکثر توان خروجی ۶.۷۷ میکرووات و ۵۶.۶۴ میکرووات تولید کنند [۹]. سان و سوک در سال ۲۰۲۰ یک سیستم جدید برداشت انرژی پیزوالکتریک مبتنی بر ارتعاش ناشی از گردابه را با یک بدنه بلوف لغزنده در یک استوانه

دایره‌ای برای بهبود عملکرد انرژی خروجی پیشنهاد دادند [۱۰]. جدیدی و زین‌الدینی در سال ۲۰۲۰ تأثیر رسوب سخت دریایی در برداشت انرژی از ارتعاشات ناشی از گردابه یک استوانه را بررسی کردند. رسوب دریایی باعث تغییر رژیم جریان در اطراف سازه‌های زیر دریا می‌شود. با مطالعه تجربی اثرات رسوب دریایی بر عملکرد برداشت قدرت مکانیکی از ارتعاش ناشی از گردابه استوانه‌های دایره‌ای را بررسی کردند. نتایج آزمون نشان می‌دهد که در کل رسوب دریایی نوسانات VIV⁵ را سرکوب می‌کند. همچنین مشخص شده است که درصد پوشش رسوب و بی‌نظمی رسوب اثر منفی بر نسبت انتقال انرژی هیدرولیکی می‌گذارد [۱۱]. دو و همکاران در سال ۲۰۲۰ یک سیستم مبدل پیزوالکتریک جدید برای برداشت انرژی جنبشی از امواج اقیانوس پیشنهاد کردند. این سیستم شامل یک محفظه هوای ستون آب نوسانی (OWC⁶)، دو بدنه بلوف و یک قطعه پیزوالکتریک است. در نهایت یک خروجی الکتریکی پیوسته با حداکثر ولتاژ ۶.۱۱ ولت تولید می‌شود که کاربردهای بالقوه‌ای برای حسگرهای بی‌سیم روی شناور دریایی دارد [۱۲]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۲۱ یک برداشت‌کننده انرژی بادی پیزوالکتریک مبتنی بر ارتعاش غیرتماسی ناشی از گردابه (NC-PWEH⁷) با استفاده از مبدل پیزوالکتریک مرکب طراحی کردند. برداشت انرژی باد از ارتعاشات ناشی از گردابه یک مبدل پیزوالکتریک مرکب تعبیه شده در یک پوسته استوانه‌ای به صورت تئوری و تجربی مورد بررسی قرار گرفت [۱۳].

در سال ۲۰۲۱ وانگ و همکاران یک تیر پیزوالکتریک یکسرگیردار متصل به یک استوانه دایره‌ای را به صورت تجربی تجزیه و تحلیل کردند. آنها یک ورق مستطیل شکل را در پایین دست جریان قرار دادند و تأثیر ورق را بر ولتاژ خروجی سیستم بررسی کردند [۱۴].

در سال ۲۰۲۱ لای و همکاران یک برداشت‌کننده انرژی گردابه‌ای پیزو-دی‌الکتریک جدید پیشنهاد کردند. آنها نشان دادند که توان استحصال شده از این سیستم جدید، بیشتر از برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک است [۱۵].

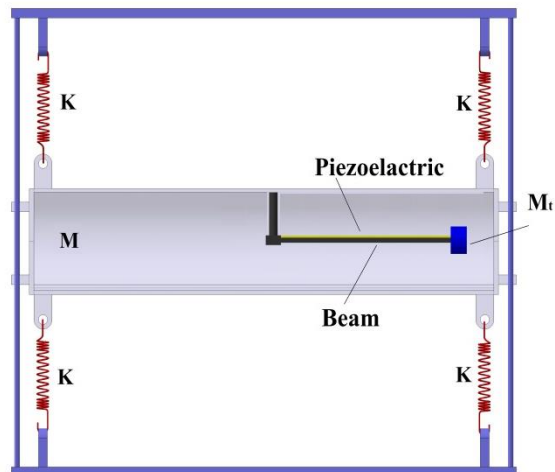
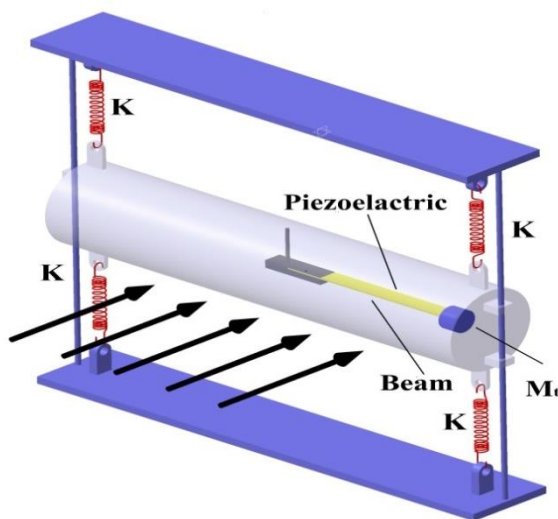
در سال ۲۰۲۲ کریم‌زاده و همکاران به برداشت انرژی از یک سیستم پیزوالاستیک پرداختند که در انتهای آن یک استوانه افقی قرار دارد. جریان باد باعث ایجاد نیروی VIV حول استوانه و در نهایت باعث ارتعاش تیر می‌شود. در بخش نتایج نیز به بررسی عوامل مختلف مانند تغییر مقاومت، تغییر طول تیر، تغییر سرعت باد و ... پرداخته و تأثیر آن را روی توان خروجی مورد بررسی قرار دادند. همچنین برای صحنه‌گذاری نیروی گردابه‌ای از نرم‌افزار انسیس استفاده شده است [۱۶].

در سال ۲۰۲۲ ژائو و همکاران یک راه حل برای برداشت انرژی از ارتعاشات گردابه‌ای خمشی-پیچشی به صورت کوپل ارائه دادند [۱۷].

در سال ۲۰۲۳ منصوری و الهامی با ارائه دو مدل توربین بدون پره، به حل تحلیلی و عددی ارتعاش ناشی از گردابه حول دو توربین پرداختند و در نهایت یک مدل بهینه برای انجام کار تجربی در آینده ارائه شد [۱۸].

۲. تعریف مساله

در این پژوهش مطابق شکل ۱ به برداشت انرژی از یک تیر پیزوالاستیک دارای جرم متمرکز که در داخل یک استوانه افقی صلب که در اثر برخورد سیال به نوسان درمی‌آید، پرداخته می‌شود. سمت گیردار تیر به بالای استوانه متصل است و جریان گردابه‌ای حول استوانه باعث ارتعاش استوانه و سپس تیر می‌شود. لازم به ذکر است که استوانه افقی به وسیله ۴ فنر مقید شده و صرفاً دارای حرکت قائم و در راستای عمود بر جریان بوده و هیچ دورانی ندارد.



شکل ۱. مدل اصلی سیستم برداشت انرژی مورد مطالعه در این مقاله

با توجه به روابط موجود در کتب ارتعاشات مکانیکی مقدار سختی و جرم معادل یک تیر یکسرگیردار که در انتهای آن بار متمرکز وارد می شود، به صورت زیر تعریف می شود [۱۹]:

$$k_e = \frac{3EI}{L^3}, \quad m_e = \frac{33}{140}mL + M_t \quad (1)$$

که در رابطه فوق k_e و m_e به ترتیب سختی و جرم معادل در انتهای تیر یکسرگیردار، L طول تیر، EI سختی خمشی تیر، m جرم بر واحد طول تیر و M_t جرم متمرکز انتهای تیر است.

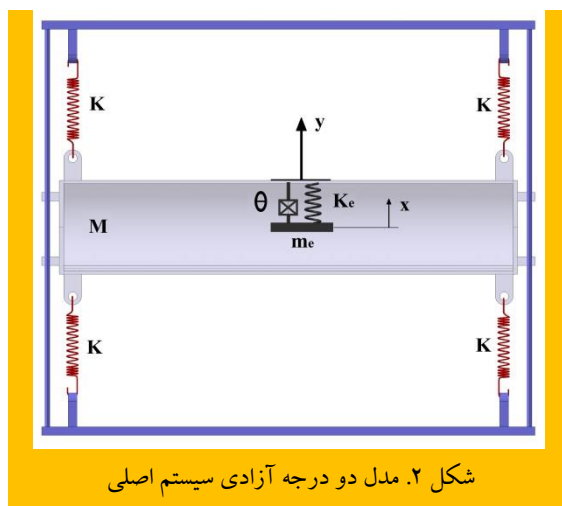
حال برای تیر پیزوالاستیک مقادیر k_e و m_e به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$k_e = \frac{3E_t}{L^3}, \quad m_e = \frac{33}{140}m_{sp}L + M_t \quad (2)$$

که در رابطه فوق E_t سختی خمشی مقطع معادل کامپوزیت (تیر پیزوالاستیک) است که به صورت زیر تعریف می شود [۲۰]:

مطابق شکل ۱، جرم استوانه و k سختی فنرهای متصل به آن و M_t جرم متمرکز متصل به انتهای تیر پیزوالکتریک است.

هدف این مقاله ارائه یک مدل ساده شده از سیستم اصلی است. با ساده سازی مدل اصلی به یک سیستم دو درجه آزادی معادل به حل آن پرداخته می شود که در شکل ۲ مشاهده می شود.



شکل ۲. مدل دو درجه آزادی سیستم اصلی

[۱۵]، مقدار k_e و m_e مفروض در رابطه ۱ برای تکیه‌گاه کاملاً گیردار سازگار است ولی برای حالت ارتعاش پایه که تیر پیزوالاستیک در قسمت اتصال به استوانه دارای درجه آزادی در راستای قائم است، مقدار دقیقی نیست. لذا ضریبی تحت عنوان ضریب تصحیح^۹ به معادلات حرکت اضافه نموده تا نتایج حاصل با نتایج حل دقیق برهم منطبق شود. در نهایت معادلات حرکت سیستم دو درجه آزادی به صورت زیر باز تعریف می‌شود:

$$M\ddot{y} + 4ky - k_e z = 0 \quad (7)$$

$$m_e \ddot{z} + k_e z = -\mu m_e \ddot{y}$$

که در رابطه فوق $z = x - y$ بوده (جابه‌جایی تیر نسبت به استوانه) و همچنین μ همان ضریب تصحیح است.

۳. سیستم برداشت انرژی

در این مرحله به برداشت انرژی از تیر پیزوالاستیک تحت اثر ارتعاشات القایی گردابه‌ای حول استوانه افقی پرداخته می‌شود.

معادله دیفرانسیل ارتعاشی استوانه افقی مطابق رابطه ۸ در نظر گرفته می‌شود:

$$M\ddot{y} + 4ky - k_e z = F_{viv} \quad (8)$$

که F_{viv} نیروی آیرودینامیک ناشی از ارتعاشات القایی گردابه‌ای است که از رابطه ۹ به دست می‌آید [۵]:

$$F_{viv} = \frac{\rho UDL}{2} \left(\frac{UC_{L0}}{2} q - C_d \dot{y} \right) \quad (9)$$

که در آن ρ و U به ترتیب چگالی و سرعت سیال (هوا)، D و L به ترتیب قطر و طول استوانه، C_{L0} ضریب لیفت ثابت^{۱۰} (پایدار)، C_d ضریب درگ^{۱۱} و q تابع ضریب کاهش یافته لیفت^{۱۲} است. نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد هنگامی که عدد رینولدز در ناحیه زیر بحرانی باشد ($40 < Re < 3 \times 10^5$)، ناحیه کم‌فشار^{۱۳} در پشت سازه ایجاد می‌شود. رفتار این ناحیه را می‌توان به صورت معادله غیرخطی وندریل تعریف کرد:

$$E_t = b \left[\frac{E_s(h_b^2 - h_a^2) + E_p(h_c^2 - h_b^2)}{3} \right] \quad (3)$$

که در رابطه فوق b عرض تیر، E_p و E_s به ترتیب مدول الاستیسیته تیر و پیزوالکتریک، همچنین h_a ، h_b و h_c به ترتیب فاصله پایین تیر از لایه خنثی، فاصله پایین و بالای لایه پیزوالکتریک از تار خنثی است که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$h_a = -\frac{h_p^2 + 2h_p h_s + n h_s^2}{2(h_p + n h_s)}$$

$$h_c = \frac{h_p^2 + 2n h_p h_s + n h_s^2}{2(h_p + n h_s)} \quad (4)$$

$$h_b = h_c - h_p$$

که h_s و h_p به ترتیب ضخامت تیر و لایه پیزوالکتریک و n برابر است با نسبت مدول الاستیسیته تیر به مدول الاستیسیته لایه پیزوالکتریک ($n = E_s/E_p$).

همچنین طبق رابطه ۲، جرم بر واحد طول تیر پیزوالاستیک است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$m_{sp}L = \rho_s V_s + \rho_p V_p \quad (5)$$

که در آن ρ_p و ρ_s به ترتیب چگالی تیر و پیزوالکتریک و V_s و V_p نیز حجم تیر و پیزوالکتریک است.

معادلات حرکت سیستم دو درجه آزادی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$M\ddot{y} + 4ky + k_e(y - x) = 0 \quad (6)$$

$$m_e \ddot{x} + k_e(x - y) = 0$$

که در رابطه فوق y و x به ترتیب جابه‌جایی استوانه و جابه‌جایی انتهای آزاد تیر در راستای عمود بر جریان سیال می‌باشد (مطابق شکل ۲).

تیر پیزوالاستیک سیستم مورد نظر اصطلاحاً با ارتعاش پایه در حال نوسان است (یعنی نیروی آیرودینامیک باعث حرکت استوانه و سپس از طریق ارتعاش پایه باعث حرکت سیستم برداشت انرژی می‌شود). طبق گفته آقایان ارترک و اینمن^۸

$$\theta = \chi / \phi(L) \quad (14)$$

در رابطه فوق $\phi(L)$ شکل مود تیر پیزوالاستیک یکسرگردار به ازاء $z = L$ است که در ادامه تعریف خواهد شد. همچنین پارامتر χ نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\chi = \vartheta \left. \frac{d\phi(z)}{dx} \right|_{z=L} \quad (15)$$

عبارت $\left. \frac{d\phi(z)}{dx} \right|_{z=L}$ مشتق شکل مود نسبت به x به ازاء $z = L$ است. پارامتر ϑ اصطلاحاً ضریب کوپلینگ نامیده می‌شود و برابر است با:

$$\vartheta = -\frac{E_p d_{31} b}{2h_p} (h_c^2 - h_b^2) \quad (16)$$

E_p مدول الاستیسیته ماده پیزوالکتریک و d_{31} ضریب پیزوالکتریک، h_c و h_b به ترتیب فاصله بالا و پایین لایه پیزوالکتریک از تار خنثی است که قبلاً تعریف شده است. $\phi_r(z)$ شکل مود مورد استفاده در حل مسئله، شکل مود تیر یکسرگردار با در نظر گرفتن جرم متمرکز در انتهای تیر است:

$$\phi(z) = C \left\{ \cos\left(\frac{\lambda}{L}z\right) - \cosh\left(\frac{\lambda}{L}z\right) + \sigma_r \left[\sin\left(\frac{\lambda}{L}z\right) - \sinh\left(\frac{\lambda}{L}z\right) \right] \right\} \quad (17)$$

که در رابطه فوق σ_r برابر است با:

$$\sigma_r = \frac{\sin\lambda - \sinh\lambda + \lambda \frac{M_t}{ml} (\cos\lambda - \cosh\lambda)}{\cos\lambda + \cosh\lambda - \lambda \frac{M_t}{ml} (\sin\lambda - \sinh\lambda)} \quad (18)$$

همچنین λ مقادیر ویژه سیستم مورد نظر است که از حل معادله زیر به دست می‌آید:

$$1 + \cos\lambda \cosh\lambda + \lambda \frac{M_t}{ml} (\cos\lambda \sinh\lambda - \sin\lambda \cosh\lambda) = 0 \quad (19)$$

در نهایت چهار معادله اصلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\ddot{q} + \beta \omega_s (q^2 - 1) \dot{q} + \omega_s^2 q = \frac{A}{D} \dot{y} \quad (10)$$

در رابطه فوق q ضریب کاهش یافته لیفت، β ضریب میرایی جریان سیال، A ثابت آزمایشگاهی، ω_s فرکانس گردابه‌ای است که با رابطه زیر به سرعت سیال، قطر استوانه و عدد بی بعد استروهال^{۱۴} (S_t) وابسته است:

$$\omega_s = 2\pi S_t \frac{U}{D} \quad (11)$$

همچنین معادله حاکم بر تیر و معادله برداشت انرژی به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} m_e \ddot{z} + k_e z - \theta V &= -\mu m_e \ddot{y} \\ C_p \dot{V} + \frac{V}{R} + \theta \dot{z} &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

همان طور که مشاهده می‌شود در رابطه فوق، V ولتاژ خروجی تیر پیزوالاستیک، θ ضریب کوپلینگ الکترومکانیکی پیزوالکتریک، C_p ظرفیت پیزوالکتریک، و R مقاومت الکتریکی است. با توجه به اینکه برداشت انرژی در قسمت پایینی سیستم دو درجه آزادی انجام می‌شود (تیر پیزوالاستیک) عبارت θV در معادله مربوط به تیر است. همچنین در معادله برداشت انرژی عبارت $\theta \dot{z}$ نشان‌دهنده این است که ارتعاش تیر پیزوالاستیک از نوع ارتعاش پایه است و برای برداشت انرژی بایستی از جابه‌جایی یا سرعت نسبی استفاده کرد (جابه‌جایی یا سرعت تیر پیزوالاستیک نسبت به استوانه).

رابطه C_p در معادله برداشت انرژی از عبارت زیر استفاده می‌شود:

$$C_p = \frac{\epsilon_{33}^s b L_p}{h_p} \quad (13)$$

که در رابطه فوق ϵ_{33}^s ، b ، L_p و h_p به ترتیب ضریب ثابت گذردهی (ضریب دی الکتریک) پیزوالکتریک، عرض، طول و ضخامت پیزوالکتریک هستند.

همچنین ضریب کوپلینگ الکترومکانیکی پیزوالکتریک (θ) برای یک سیستم گسسته به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۱]:

۴. جاذب دینامیکی و برداشت انرژی همزمان

در این مرحله به بررسی جاذب دینامیکی و برداشت انرژی همزمان پرداخته می‌شود. منظور از جاذب دینامیکی در این سیستم نیروی آیرودینامیکی که به‌عنوان نیروی ورودی به استوانه، به نحوی اعمال شود که تیر پیزوالاستیک نقش جاذب را برای استوانه ایفا کند و باعث شود جابه‌جایی استوانه به حداقل برسد. همزمان که تیر پیزوالاستیک نقش جاذب را برای استوانه بازی می‌کند، برداشت انرژی از تیر پیزوالاستیک نیز اتفاق می‌افتد.

برای حل مسئله جاذب بایستی فرکانس نوسان ورودی به استوانه (که در اینجا همان ω_s فرکانس گردابه‌ای است) به نحوی انتخاب شود که جابه‌جایی استوانه به کمینه خود برسد. لازم به ذکر است که فرکانس گردابه‌ای خود نیز ناشی از سرعت باد است و در واقع هدف انتخاب یک سرعت باد مناسب (U) برای جاذب دینامیکی سیستم می‌باشد. در بخش نتایج به حل عددی و انتخاب ω_s و U مناسب برای سیستم پرداخته خواهد شد.

۵. نتایج عددی و بحث

۵-۱. صحنه‌گذاری

مشخصات تیر و ماده پیزوالکتریک مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و هندسی سیستم برداشت انرژی

استوانه و سیال		پیزوالکتریک		تیر و جرم متمرکز	
۰/۲ (m)	L	۰/۱ (m)	L_p	۰/۱ (m)	L_s
۰/۰۴ (m)	D	۰/۰۲ (m)	b_p	۰/۰۲ (m)	b_s
۱۰ (g)	M	۰/۴ (mm)	h_p	۰/۵ (mm)	h_s
۱/۲۰۴ (kg/m ³)	ρ	۶۶ (GPa)	E_p	۲۰۹ (GPa)	E_s
۰/۳	C_{L0}	۷۵۰۰ (kg/m ³)	ρ_p	۷۸۰۰ (kg/m ³)	ρ_s
۲	C_d	5×10^{-3} (C/Volt.m)	ϵ_{33}^s	۱ (g)	M_t
۰/۳	β	-۱۶/۶ (C/m ²)	e_{31}		-
۱۲	A	۱۰ ^۶ (Ω)	R		-
۰/۱۱۶	S_t		-		-

$$\begin{aligned}
 M\ddot{y} + 4ky - k_e z &= \frac{\rho U D L}{2} \left(-\frac{U C_{L0}}{2} q - C_d \dot{y} \right) \\
 m_e \ddot{z} + k_e z - \theta V &= -\mu m_e \ddot{y} \\
 \ddot{q} + \beta \omega_s (q^2 - 1) \dot{q} + \omega_s^2 q &= \frac{A}{D} \dot{y} \\
 C_p \dot{V} + \frac{V}{R} + \theta \dot{z} &= 0
 \end{aligned} \quad (20)$$

مجهولات مسئله شامل y (جابه‌جایی استوانه)، z (جابه‌جایی نسبی انتهای تیر)، V (اختلاف ولتاژ دو سر پیزوالکتریک) و q (پارامتر معادله وندریل) که بایستی معادلات کوپل فوق حل شود. با توجه به اینکه معادلات کوپل برداشت انرژی به صورت غیرخطی است، بایستی از روش حل عددی استفاده نموده و مجهولات مسئله را به دست آورد (فرم فضای حالت معادلات شماره ۲۰ در پیوست آورده شده است).

نتایج نشان می‌دهد که با تغییر مقاومت مدار الکتریکی، ابتدا ولتاژ بیشینه خروجی زیاد می‌شود و از یک مقاومت الکتریکی به بعد تقریباً مقدار ولتاژ بیشینه ثابت می‌ماند. لذا پارامتر مهم در سیستم برداشت انرژی، محاسبه توان الکتریکی است. با استفاده از رابطه زیر، میزان توان تولیدی محاسبه می‌شود:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (21)$$

برای پیدا کردن توان بیشینه، مقاومت الکتریکی (R) را تغییر داده تا مقاومت بهینه به دست آید.

شده است. معادلات کوپل برداشت انرژی برای حالت مدار باز ($R \rightarrow \infty$) مورد بررسی قرار گرفته و ولتاژ بیشینه (V_{max}) و ولتاژ میانگین^{۱۵} (V_{rms}) در حالت مدار باز با نتیجه حاصل از نرم افزار المان محدود مقایسه می شود. این مقایسه به ازاء جرم متمرکزهای مختلف (M_t) مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۲. مقایسه ولتاژ بیشینه (V_{max}) با نتایج المان محدود

بر حسب ولت

M_t (g)	تحقیق حاضر	المان محدود	خطا (%)
۰	۱۶/۶۷	۱۶/۴۷	۱/۲
۱	۲۱/۹	۲۱/۵۶	۱/۵
۲	۲۷	۲۶/۴	۲/۲
۳	۳۴/۵	۳۴	۱/۵
۴	۴۱/۷	۴۰/۷۳	۲/۳
۵	۵۰	۵۱	۲

جدول ۳. مقایسه ولتاژ میانگین (V_{rms}) با نتایج المان محدود

بر حسب ولت

M_t (g)	تحقیق حاضر	المان محدود	خطا (%)
۰	۷/۷	۸	۳/۷
۱	۱۰/۱	۱۰/۳۷	۲/۶
۲	۱۲/۸۶	۱۳/۱۴	۲/۱
۳	۱۶/۱۳	۱۶/۳۲	۱/۱
۴	۱۹/۸	۲۰/۵	۳/۴
۵	۲۳/۹	۲۴/۳۵	۱/۸

با توجه به مقادیر ولتاژ خروجی مندرج در جدول ۲ و ۳، نتایج نشان می دهد که ولتاژ بیشینه و ولتاژ میانگین حاصل از حل عددی معادلات به نتایج المان محدود نزدیک است. در نهایت می توان نتیجه گرفت که تقریب مدل اصلی سیستم برداشت انرژی (سیستم پیوسته) به سیستم دو درجه آزادی معادل آن مدل قابل قبولی است.

۲-۵. بررسی رفتار غیرخطی سیستم

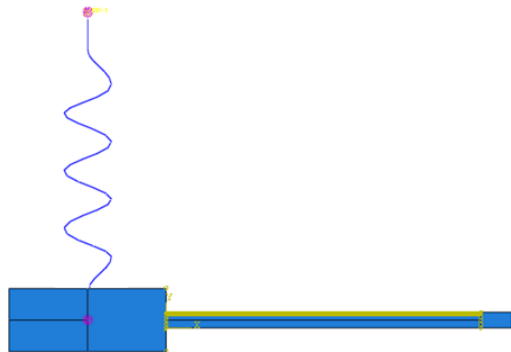
با توجه به اینکه در بخش صحنه گذاری اثبات شد که مدل دو درجه آزادی یک مدل تقریبی قابل قبول است، از این مرحله

در بخش اول به صحنه گذاری معادلات سیستم برداشت انرژی پرداخته می شود. در قسمت صحنه گذاری به جای نیروی گردابه ای و معادله وندریل، برای ارتعاش سیستم از نیروی هارمونیک ساده استفاده شده است.

لذا معادلات برداشت انرژی به صورت معادلات زیر نوشته می شود:

$$\begin{aligned} M\ddot{y} + 4ky - k_e z &= F_0 \sin(\omega_s t) \\ m_e \ddot{z} + k_e z - \theta V &= -\mu m_e \dot{y} \\ C_p \dot{V} + \frac{V}{R} + \theta \dot{z} &= 0 \end{aligned} \quad (22)$$

که در رابطه فوق $F_0 = 1\text{N}$ و $\omega_s = 90\text{ rad/s}$ (سرعت زاویه ای معادل با سرعت باد $U = 5\text{ m/s}$) در نظر گرفته می شود. برای صحنه گذاری نتایج حاصل از معادلات فوق، از نرم افزار المان محدود آباکوس استفاده می گردد. به این ترتیب که مدل سیستم پیوسته (مدل اصلی) به طور کامل در نرم افزار شبیه سازی می شود و در شکل ۳ قابل مشاهده است.

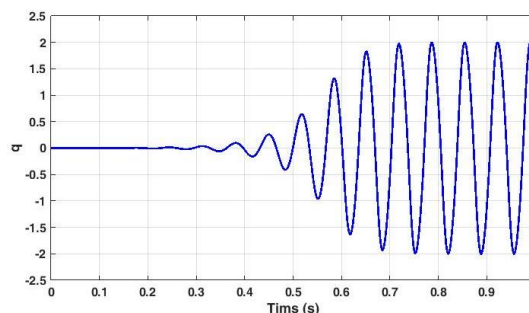


شکل ۳. مدل سیستم پیوسته (مدل اصلی) شبیه سازی شده در نرم افزار المان محدود آباکوس

در این مدل استوانه به صورت یک جسم صلب در سمت چپ شکل و تیر پیوسته دو لایه (لایه بالایی پیزوالکتریک و لایه پایینی تیر فلزی) در سمت راست آن با شرایط مرزی گیردار متحرک مدل شده و المان بندی گردیده اند. از نکات مهم در مدل سازی سیستم برداشت انرژی در نرم افزار المان محدود، تعیین شرایط مرزی الکتریکی است. در این تحلیل سطح پایین لایه پیزوالکتریک، به صورت پتانسیل صفر و سطح بالای آن به صورت هم پتانسیل (دارای ولتاژ یکسان) تعریف

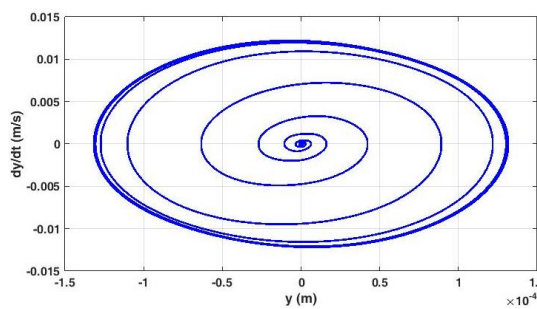
به بعد به برداشت انرژی ناشی از ارتعاشات القایی گردابه‌ای پرداخته می‌شود.

با توجه به اینکه این سیستم ارتعاشی ناشی از جریان هوا ذاتاً یک سیستم غیرخطی است و پاسخ سیستم نیز به طبع آن باید یک رفتار غیرخطی از خود نشان دهد، ابتدا نمودار تغییرات پارامتر q (ضریب کاهش یافته لیفت) و همچنین دیاگرام فازی مربوطه رسم می‌شود تا اثر غیرخطی بودن سیستم برداشت انرژی در پاسخ مشخص گردد:



شکل ۴. نمودار تغییرات پارامتر بدون بعد q بر حسب زمان به ازاء $U = 5 \text{ m/s}$

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود نمودار تغییرات پارامتر q بعد از مدتی وارد سیکل حدی^{۱۶} می‌شود و همچنین ملاحظه می‌شود که فرکانس سیکل حدی برابر با فرکانس گردابه‌ای است که نشانه صحت حل معادله وندریل است. در شکل ۵ دیاگرام فازی مربوط به استوانه رسم شده است:

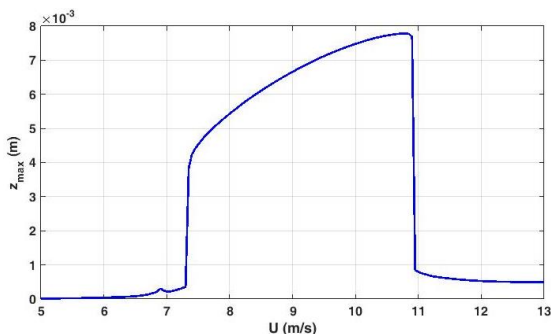


شکل ۵. نمودار دیاگرام فازی تغییرات سرعت استوانه نسبت به جابه‌جایی آن به ازاء $U = 5 \text{ m/s}$

در شکل ۵ نیز مشاهده می‌شود که به دلیل نوع غیرخطی بودن معادلات، سیستم بعد از مدتی وارد سیکل حدی می‌شود.

حال برای آنکه بیشترین جابه‌جایی نسبی تیر و همچنین توان خروجی حاصل شود، سیستم در حالت قفل‌شدگی^{۱۷} مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این حالت فرکانس گردابه‌ای (ω_s) که رابطه مستقیم با سرعت هوا دارد به فرکانس طبیعی سیستم (ω_n) نزدیک می‌شود.

لذا در این بخش به بررسی بیشترین جابه‌جایی نسبی تیر در حالت سیکل حدی پرداخته می‌شود. سرعت جریان هوا را بین بازه ۵ تا ۱۳ متربرثانیه تغییر داده و به ازاء هر سرعت مقدار بیشینه جابه‌جایی خوانده می‌شود.



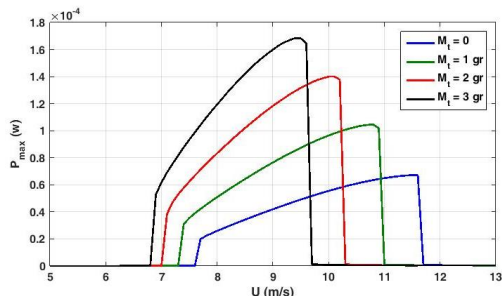
شکل ۶. نمودار تغییرات بیشینه جابه‌جایی نسبی بر حسب سرعت جریان هوا

مطابق شکل ۶ هرچه سرعت جریان هوا به سرعت بحرانی نزدیک می‌شود (سرعتی که فرکانس گردابه‌ای را به فرکانس طبیعی سیستم نزدیک می‌کند)، مقدار بیشینه جابه‌جایی افزایش پیدا می‌کند. در اصطلاح به ناحیه‌ای که بیشترین جابه‌جایی در آن اتفاق می‌افتد، ناحیه قفل‌شدگی اطلاق می‌شود. هنگامی که سرعت جریان هوا از این ناحیه عبور می‌کند، مقدار جابه‌جایی افت محسوسی می‌نماید.

حال به بررسی مقدار بیشینه توان الکتریکی پرداخته می‌شود. برای این کار مشابه روندی که برای به دست آوردن بیشینه جابه‌جایی نسبی طی شد، عمل می‌گردد.

۴-۵. اثر جرم متمرکز انتهایی تیر

در این قسمت اثر جرم متمرکز انتهایی تیر بر روی توان خروجی مورد بررسی قرار می‌گیرید که در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

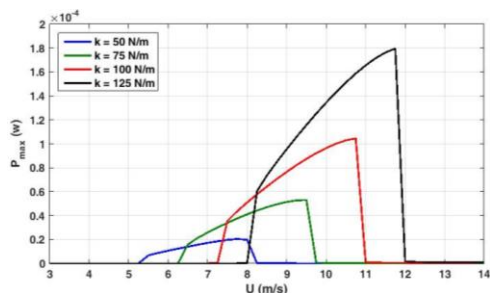


شکل ۹. نمودار تغییرات بیشینه توان الکتریکی بر حسب سرعت جریان هوا به ازاء جرم متمرکزهای مختلف

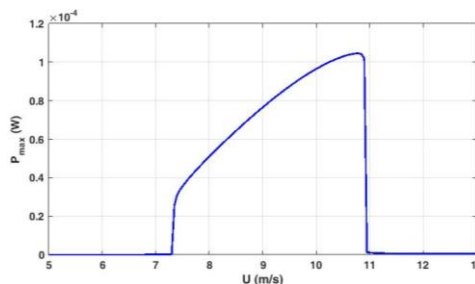
همان‌طور که ملاحظه می‌شود هر چه مقدار M_t بیشتر شود، جابه‌جایی نسبی انتهایی تیر بیشتر شده و ولتاژ و توان خروجی سیستم نیز بیشتر می‌شود. همچنین افزایش جرم باعث می‌شود که فرکانس طبیعی سیستم نیز کاهش یابد، لذا با سرعت باد کمتر (و در نتیجه فرکانس گردابه‌ای پایین‌تر) به حالت تشدید می‌رسد.

۵-۵. اثر سختی فنرهای متصل به استوانه

همان‌طور که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود با افزایش سختی فنرهای متصل به استوانه علی‌رغم اینکه سختی سیستم و به تبع آن فرکانس طبیعی سیستم بیشتر می‌شود، مقدار جابه‌جایی نسبی و توان بیشینه سیستم نیز افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۱۰. نمودار تغییرات بیشینه توان الکتریکی بر حسب سرعت جریان هوا به‌ازاء سختی‌های فنر مختلف

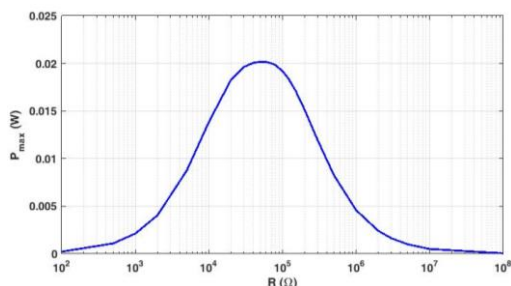


شکل ۷. نمودار تغییرات بیشینه توان الکتریکی بر حسب سرعت جریان هوا

مطابق شکل ۷ مشاهده می‌شود که نمودار بسیار شبیه به شکل ۶ است، یعنی هنگامی که سرعت هوا به سرعت بحرانی نزدیک می‌شود، بیشینه توان به بالاترین مقدار خودش می‌رسد.

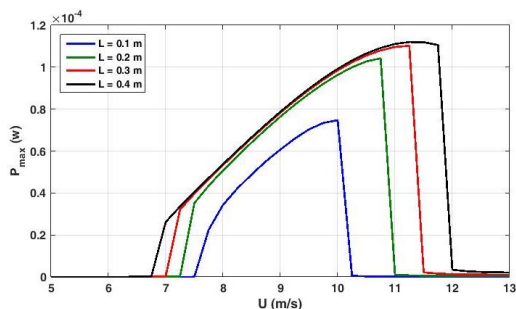
۳-۵. محاسبه مقاومت بهینه

در این بخش به بررسی مقاومت بهینه برای سیستم برداشت انرژی به‌ازاء $U = 8 \text{ m/s}$ پرداخته می‌شود. به این ترتیب که به‌ازاء مقاومت‌های الکتریکی مختلف از 10^2 تا 10^8 اهم، مقدار توان بیشینه محاسبه می‌گردد و مقدار مقاومت بهینه به‌دست می‌آید.



شکل ۸. نمودار تغییرات بیشینه توان الکتریکی بر حسب وات به‌ازاء مقاومت‌های الکتریکی مختلف

همان‌طور که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود، میزان بیشینه توان الکتریکی در مقاومت الکتریکی بهینه 5×10^4 اهم اتفاق می‌افتد. در بخش بعد اثر پارامترهای مختلف روی توان خروجی مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۱۲. نمودار تغییرات بیشینه توان الکتریکی بر حسب سرعت جریان هوا به ازاء طول استوانه مختلف

همان طور که شکل ۱۲ نشان می‌دهد با افزایش طول استوانه، ناحیه قفل شدگی و توان بیشینه کمی افزایش می‌یابد و تغییر قابل توجهی در آنها ایجاد نمی‌شود.

۵-۸. جاذب دینامیکی و برداشت انرژی هم‌زمان

همان طور که در بخش ۴ توضیح داده شده است، هدف در بخش جاذب دینامیکی انتخاب سرعت بادی است که در آن جابه‌جایی استوانه به حداقل رسیده و هم‌زمان از تیر پیزوالاستیک برداشت انرژی شود. پیش‌بینی می‌شود که فرکانس گردابه‌ای که باعث تیر پیزوالاستیک نقش جاذب استوانه را ایفا کند، باید در محدوده فرکانس طبیعی تیر یکسرگیردار (جرم و فنر معادل) باشد.

$$\omega_s = 2\pi S_t \frac{U}{D} \rightarrow U = \frac{\omega_s D}{2\pi S_t} \quad (23)$$

مقدار ω_s با برابر قرار دادن آن با فرکانس طبیعی سیستم جرم و فنر معادل محاسبه می‌شود:

$$\omega_s \approx \omega_n = \sqrt{\frac{k_e}{m_e}} \quad (24)$$

در نتیجه مقدار سرعت باد معادل برابر است با:

$$U = \frac{\omega_n D}{2\pi S_t} = 16.82 \text{ m/s} \quad (25)$$

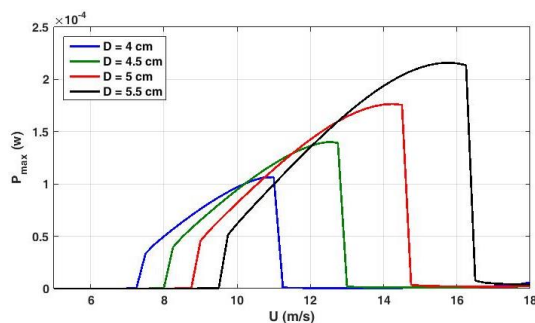
حال نمودار جابه‌جایی استوانه به‌ازاء سرعت‌های باد در محدوده سرعت باد تعیین شده رسم می‌شود:

دلیل این امر هم به‌خاطر ذات غیرخطی بودن سیستم است. درحالی‌که در سیستم‌های خطی با افزایش سختی فنر و فرکانس طبیعی سیستم، مقدار جابه‌جایی و توان سیستم کاهش می‌یابد.

۵-۶. اثر قطر استوانه

در این بخش تغییرات توان خروجی به‌ازاء قطرهای مختلف استوانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

پارامتر قطر استوانه بسیار با اهمیت است. زیرا علاوه‌بر اینکه در مقدار نیروی آیرودینامیک (رابطه ۹) مؤثر است، در مقدار فرکانس گردابه‌ای سیستم (رابطه ۱۱) نیز تأثیر دارد. لذا پیش‌بینی می‌شود که با افزایش قطر استوانه، ناحیه قفل شدگی در سرعت بالاتری تشکیل شود.



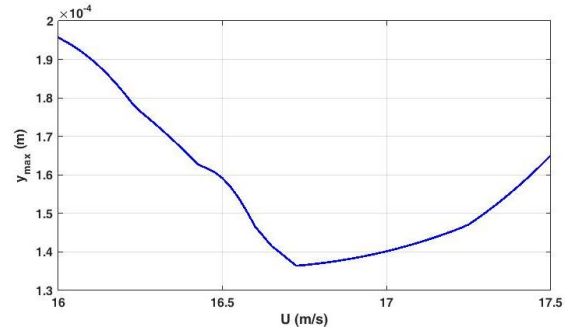
شکل ۱۱. نمودار تغییرات بیشینه توان الکتریکی بر حسب سرعت جریان هوا به‌ازاء قطر استوانه مختلف

مطابق شکل ۱۱ همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش قطر استوانه، فرکانس تشدید و همچنین توان خروجی افزایش یافته است.

۵-۷. اثر طول استوانه

طول استوانه مطابق رابطه ۹ در میزان نیروی آیرودینامیک مؤثر است. در شکل ۱۲ میزان توان خروجی به‌ازاء مقادیر مختلف طول استوانه رسم شده است.

رخ می‌دهد و سیستم وارد ناحیه قفل‌شدگی می‌شود. در ناحیه قفل‌شدگی بیشینه جابه‌جایی، توان خروجی و همچنین محدوده سرعت بحرانی هوا در آن ناحیه به دست می‌آید. همچنین مشخص شد که میزان بیشینه توان الکتریکی در مقاومت الکتریکی بهینه 5×10^4 اهم اتفاق می‌افتد. با افزایش جرم متمرکز انتهای تیر ملاحظه شد که ولتاژ و توان خروجی سیستم نیز بیشتر می‌شود. همچنین افزایش جرم باعث کاهش فرکانس طبیعی و در نهایت با سرعت باد کمتر سیستم به حالت تشدید می‌رسد. به خاطر ذات غیرخطی بودن سیستم با افزایش سختی فنر متصل به استوانه، توان خروجی افزایش می‌یابد. در حالی که در سیستم‌های خطی با افزایش سختی فنر و فرکانس طبیعی سیستم، مقدار جابه‌جایی و توان سیستم کاهش می‌یابد. همچنین نشان داده شد که با افزایش قطر و طول استوانه، علاوه بر افزایش ناحیه قفل‌شدگی، میزان توان بیشینه نیز افزایش یافته است. در نهایت هم میزان سرعت باد بهینه برای آنکه تیر پیزوالاستیک نقش جاذب را برای استوانه افقی ایفا کند و هم‌زمان انرژی از آن استحصال شود، محاسبه گردید.



شکل ۱۳. نمودار کمینه جابه‌جایی استوانه در محدوده سرعت باد معادل فرکانس جاذب

همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، کمترین میزان جابه‌جایی استوانه در محدوده همان سرعت بادی است که در رابطه ۲۵ محاسبه شد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله به برداشت انرژی از یک سیستم پیزوالاستیک با ارتعاشات ناشی از گردابه با استفاده از یک مدل دو درجه آزادی پرداخته شده است. با توجه به غیرخطی بودن نیروی ناشی از باد، نتایج نشان داد که در نمودارهای تغییرات جابه‌جایی و توان الکتریکی بر حسب سرعت باد، پدیده پرش

۷. پیوست

فرم فضای حالت معادلات شماره (۲۰) به صورت زیر است:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= \dot{y} = x_2 \\
 \dot{x}_2 &= \dot{y} = \frac{1}{M} \left[\frac{\rho U D L}{2} \left(\frac{U C_{L0}}{2} x_5 - C_d x_2 \right) - 4kx_1 + k_e x_3 \right] \\
 \dot{x}_3 &= \dot{z} = x_4 \\
 \dot{x}_4 &= \dot{z} = \frac{-\mu}{M} \left[\frac{\rho U D L}{2} \left(\frac{U C_{L0}}{2} x_5 - C_d x_2 \right) - 4kx_1 + k_e x_3 \right] + \frac{1}{m_e} [-k_e x_3 + \theta x_7] \\
 \dot{x}_5 &= \dot{q} = x_6 \\
 \dot{x}_6 &= \dot{q} = \frac{A}{D} \left\{ \frac{1}{M} \left[\frac{\rho U D L}{2} \left(\frac{U C_{L0}}{2} x_5 - C_d x_2 \right) - 4kx_1 + k_e x_3 \right] \right\} - \beta \omega_s (x_5^2 - 1) x_6 - \omega_s^2 x_5 \\
 \dot{x}_7 &= \dot{V} = \frac{1}{C_p} \left[-\frac{x_7}{R} - \theta x_4 \right]
 \end{aligned} \tag{26}$$

- [1] Facchinetti, Matteo Luca, Emmanuel De Langre, and Francis Biolley, "Coupling of structure and wake oscillators in vortex-induced vibrations", *Journal of Fluids and structures*, 2004, Vol.19, no.2, pp.123-140.
- [2] Barrero-Gil, Antonio, Santiago Pindado, and Sergio Avila, "Extracting energy from vortex-induced vibrations: a parametric study", *Applied mathematical modelling*, 2012, Vol.36, no.7, pp.3153-3160.
- [3] Song, Rujun, Xiaobiao Shan, Fengchi Lv, and Tao Xie, "A study of vortex-induced energy harvesting from water using PZT piezoelectric cantilever with cylindrical extension", *Ceramics International*, 2015, Vol.41, p.S768-S773.
- [4] Zhang, Baoshou, Baowei Song, Zhaoyong Mao, Wenlong Tian, and Boyang Li, "Numerical investigation on VIV energy harvesting of bluff bodies with different cross sections in tandem arrangement", *Energy*, 2017, Vol.133, pp.723-736.
- [5] Naseer, R., H. L. Dai, A. Abdelkefi, and L. J. A. E. Wang, "Piezomagnetoelastic energy harvesting from vortex-induced vibrations using monostable characteristics", *Applied Energy*, 2017, Vol.203, pp.142-153.
- [6] Pan, Feifei, Zhike Xu, Long Jin, Peng Pan, and Xiu Gao, "Designed simulation and experiment of a piezoelectric energy harvesting system based on vortex-induced vibration", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, Vol.53, no.4, pp.3890-3897.
- [7] Zhou, Shengxi, and Junlei Wang, "Dual serial vortex-induced energy harvesting system for enhanced energy harvesting", *AIP Advances*, 2018, Vol.8, no.7.
- [8] Zhou, S., J. Li, J. Wang, G. Li, and Q. Wang, "Vortex-induced vibrational tristable energy harvester: Design and experiments", In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, Vol.531, no.1, p.012011, IOP Publishing, 2019.
- [9] Wang, Junlei, Guobiao Hu, Zhen Su, Guoping Li, Wei Zhao, Lihua Tang, and Liya Zhao, "A cross-coupled dual-beam for multi-directional energy harvesting from vortex induced vibrations", *Smart Materials and Structures*, 2019, Vol.28, no.12, p.12LT02.
- [10] Sun, Wan, and Jongwon Seok, "A novel self-tuning wind energy harvester with a slidable bluff body using vortex-induced vibration", *Energy conversion and management*, 2020, Vol.205, p.112472.
- [11] Jadidi, P., and M. Zeinoddini, "Influence of hard marine fouling on energy harvesting from Vortex-Induced Vibrations of a single-cylinder", *Renewable energy*, 2020, Vol.152, pp.516-528.
- [12] Du, Xiaozhen, Yan Zhao, Guilin Liu, Mi Zhang, Yu Wang, and Hong Yu, "Enhancement of the piezoelectric cantilever beam performance via vortex-induced vibration to harvest ocean wave energy", *Shock and Vibration*, 2020, pp.1-11.
- [13] Wang, Shuyun, Weilin Liao, Zhonghua Zhang, Yong Liao, Mengjia Yan, and Junwu Kan, "Development of a novel non-contact piezoelectric wind energy harvester excited by vortex-induced vibration", *Energy Conversion and Management*, Vol.235, 2021, p.113980.
- [14] Wang, Junlei, Chengyun Zhang, Mingjie Zhang, Abdessattar Abdelkefi, Haiyan Yu, Xiaomeng Ge, and Huadong Liu, "Enhancing energy harvesting from flow-induced vibrations of a circular cylinder using a downstream rectangular plate: An experimental study", *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, Vol.211, p.106781.
- [15] Lai, Zhihui, Shuaibo Wang, Likuan Zhu, Guoqing Zhang, Junlei Wang, Kai Yang, and Daniil Yurchenko, "A hybrid piezo-dielectric wind energy harvester for high-performance vortex-induced vibration energy harvesting", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, Vol.150, p.107212.

- [16] Karimzadeh, Ali, Reza Roohi, and Masoud Akbari, "Piezoelectric wind energy harvesting from vortex-induced vibrations of an elastic beam", *Scientia Iranica*, 2023, Vol.30, no.1, pp.77-89.
- [17] Zhao, Xiang, W. D. Zhu, and Y. H. Li, "Closed-form solutions of bending-torsion coupled forced vibrations of a piezoelectric energy harvester under a fluid vortex", *Journal of Vibration and Acoustics*, 2022, Vol.144, no.2, p.021010.
- [۱۸] منصورى، س.، الهامى، م.، "بهينه‌سازى عددى و تحليلى ارتعاشات توربين‌هاى بدون پره ورتكس"، نشریه صوت و ارتعاش، ۱۴۰۱، دوره ۱۱، شماره ۲۲، صص. ۱۵۵-۱۷۲.
- [19] Erturk, Alper, and Daniel J. Inman, "On mechanical modeling of cantilevered piezoelectric vibration energy harvesters", *Journal of intelligent material systems and structures*, 2008, Vol.19, no.11, pp.1311-1325.
- [20] Erturk, Alper, and Daniel J. Inman, "A distributed parameter electromechanical model for cantilevered piezoelectric energy harvesters", 2008: 041002.
- [21] Tang, Lihua, and Yaowen Yang, "A nonlinear piezoelectric energy harvester with magnetic oscillator", *Applied Physics Letters*, 2012, Vol.101, no.9.

پی‌نوشت

1. Vortex induced vibrations
2. Van der Pol
3. Vortex-Induced Piezoelectric Energy Harvester
4. Bluff body
5. Vortex Induced Vibration
6. Oscillating Water Column
7. Non-Contact Piezoelectric Wind Energy Harvester
8. Erturk and Inman
9. Correction Factor
10. Lift Coefficient
11. Drag Coefficient
12. Educued Lift Coefficient
13. Wake
14. Strouhal number
15. Root mean square
16. Limit cycle
17. Lock-in-region