

بررسی اثرات شکل مقطع بر عملکرد توربین بادی بدون پره

یاسین معصومی

مهندسی مکانیک، آزمایشگاه آکوستیک،

دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

y_masumi@alumni.iust.ac.ir

سید محمود هاشمی نژاد*

استادیار، پژوهشگاه مواد و انرژی، تهران، ایران

hashemi@merc.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۲

چکیده

هدف اصلی طرح حاضر بررسی آزمایشگاهی و عددی برداشت انرژی آیرولاستیک از نوسانات ناشی از جریان عبوری از یک تیر مرکب پیزوالکتریک انعطاف پذیر نصب شده به صورت عمودی بر کف به عنوان پایه برای یک استوانه صلب با سطح مقطع‌های مربعی، دایره‌ای و ترکیبی به منزله یک پیکربندی ساده از توربین‌های بدون پره می‌باشد. در این آزمایش با استفاده از یک سیستم دمنده، جریان عبوری از روی توربین بادی بدون پره را تغییر داده و در نتیجه نوسانات آن، انرژی جنبشی حاصله توسط تکه پیزوالکتریک چسبانده شده در ریشه تیر الاستیک جذب شده است. با توجه به نتایج حاصله، حداکثر توان برداشت شده بدون بعد برای سطح مقطع 1 در سرعت‌های حدود $3/4 \text{ m/s}$ در حدود $1/8$ و 50 برابر سطح مقطع 3 و سطح مقطع 5 بوده است. همچنین در این سرعت، سطح زیر نمودار توان برداشت شده بر حسب زمان برای سطح مقطع 1 در حدود 6 برابر سطح مقطع 3 بوده است. در این راستا، در سطح مقطع 1 با افزایش سرعت از $2/8 \text{ m/s}$ به $3/4 \text{ m/s}$ مشاهده می‌شود که برداشت انرژی بدون بعد حدود $3/5$ برابر رشد کرده، که این به معنای افزایش راندمان کاری سیستم در سرعت‌های بالاتر است.

واژگان کلیدی: توربین بدون پره، شبیه‌سازی تجربی و عددی، ورق پیزوالکتریک، برداشت انرژی از FIV

۱. مقدمه

با عبور جریان از روی یک سازه توپی شکل و انتقال انرژی سیال به آن، امکان ارتعاشات القایی جریان^۱ وجود داشته که با استفاده از برداشت کننده‌های مختلف می‌توان این انرژی جنبشی سازه را به انرژی

الکتریکی تبدیل نمود [3-1]. در این راستا، اخیراً استفاده از توربین بادی بدون پره به علت مقرون به صرفه بودن، سازگاری با محیط زیست، آلودگی صوتی پایین، ایمنی و قابلیت اطمینان بالا، سادگی طراحی، هزینه ساخت و نگهداری پایین، عمر طولانی، حداقل خرابی‌های مکانیکی، و همچنین قابلیت نصب و

راه‌اندازی و بهره‌وری عملیاتی حتی در محیط‌هایی با میانگین سرعت باد پایین در مقایسه با توربین‌های بادی متداول مورد توجه قرار گرفته است [4, 5]. مقرون به صرفه بودن، یکی از مزایای اصلی این سیستم‌ها است. در واقع بازگشت سرمایه در این نوع سیستم‌ها به واسطه طراحی و مکانیزم‌های پشتیبانی ساده‌تر، به نسبت سریع‌تر از سیستم‌های مربوط به توربین‌های بادی مرسوم است [6]. علاوه بر این، طراحی ساده این توربین‌های بدون پره به این معنی است که به منظور کاهش اصطکاک از روغن روان کننده استفاده نمی‌شود. همچنین، برخلاف نیروگاه‌های بادی معمولی که می‌توانند به دلیل وجود پره‌های بزرگ و آلودگی صوتی تولید شده، حیات وحش را مختل کنند، این سیستم‌ها به حیات وحش اطراف آسیبی نمی‌رسانند و صدای تولید شده آنقدر کم است که آزار دهنده نیست [7]. در این نوع سیستم‌ها، به واسطه جریان عبوری از روی بدنه گردابه‌هایی در پشت استوانه تشکیل و رها می‌شود که در نتیجه آن نیروهایی در راستای عمود بر جریان به سازه وارد می‌شود و در نتیجه سیستم شروع به ارتعاش خواهد کرد. با استفاده از مکانیزم‌های برداشت انرژی همچون پیزوالکتریک و الکترومغناطیس می‌توان این نوسانات مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل نمود.

در این زمینه محققین زیادی اقدام به بررسی جدایش جریان و در نتیجه رهایش گردابه‌ها و نوسانات سیستم با هدف کنترل نوسانات و اخیراً برداشت انرژی انجام داده‌اند. یکی از این ابزارهای جدید در زمینه برداشت انرژی ارتعاشات سیستم از جریان سیال، توربین‌های بدون پره هستند. این وسیله بدون داشتن قسمت‌های محرک چرخشی، طراحی ساده و هزینه ساخت کم به

نسبت توربین‌های بادی مرسوم انرژی جریان را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. در این راستا سونگ و همکاران [8] در سال ۲۰۱۵ اثرات وزن و قطر را بر راندمان برداشت انرژی از این نوع توربین‌ها بررسی کرده و نتیجه گرفتند که کاهش وزن و افزایش قطر نتیجه مطلوبی را در راستای برداشت انرژی به همراه دارد. دایی و همکاران [9] در سال ۲۰۱۶ با چسباندن یک لایه پیزوالکتریک به پایه این توربین‌ها اقدام به برداشت انرژی از آن‌ها کردند. ژانگ و همکاران [10] در سال ۲۰۱۷ با یک استوانه در کنار استوانه و ورق متصل به آن، برداشت انرژی را بررسی نمودند. سونگ و همکاران [11] در سال ۲۰۱۷ با یک ورق که یک سر آن به تکیه‌گاه و سر دیگر به استوانه متصل است، اقدام به برداشت انرژی از ورق پیزوالکتریک کردند. مجیا و همکاران [12] در سال ۲۰۱۸ با بررسی خصوصیات هندسی یک استوانه بلند متصل به یک ورق پیزوالکتریک قائم انرژی برداشت شده ناشی از خمش ورق پیزوالکتریک متصل به آن را بررسی نمودند. ثومایی و همکاران [13] در سال ۲۰۱۹ به صورت آزمایشگاهی با تغییر هندسه سازه اقدام به برداشت انرژی از یک توربین بادی بدون پره نمودند. فرانسیس و همکاران [14] در سال ۲۰۲۱ دامنه و فرکانس نوسانات این نوع توربین را با تغییر پارامترهای مختلف هندسی بررسی نمودند. دهقانی و همکاران [6] در سال ۲۰۲۱ با به کارگیری روش یادگیری عمیق^۲ یک رابطه را برای پیش‌بینی راندمان این نوع سیستم‌ها ارائه نمودند. مافتونی و همکاران [15] در سال ۲۰۲۱ کنترل دامنه و فرکانس نوسانات سیستم را با توجه به نیروی پسا^۳ وارد بر سیستم بررسی نمودند. سباب و همکاران [16] در سال ۲۰۲۱ با انجام شبیه‌سازی‌های

نیروهای وارد بر آن پرداختند. معصومی و همکاران [23] در سال ۲۰۲۴ با استفاده از روش حل عددی به بررسی برداشت انرژی ترکیبی از یک سیستم توربین بدون پره با سطح مقطع دایره‌ای به کمک برداشت کننده‌های پیزوالکتریک و الکترومغناطیس پرداختند. با توجه به مطالبی که گفته شد، هدف اصلی طرح حاضر مطالعه آزمایشگاهی برداشت انرژی آیروالاستیک از نوسانات ناشی از جریان عبوری از یک تیر مرکب عمودی انعطاف‌پذیر نصب شده بر کف، که در امتداد یک استوانه صلب با سطح مقطع‌های مختلف دایره‌ای، مربعی و ترکیبی قرار گرفته است، به عنوان یک پیکربندی ساده از توربین‌های بدون پره می‌باشد. مکانیزم اصلی برداشت انرژی در این سیستم بر مبنای تکه‌های مواد پیزوالکتریک چسبانده شده در ریشه تیر الاستیک است. در این تحقیق با تغییر سطح مقطع استوانه در سرعت‌های مختلف میزان انرژی برداشت شده از سازه محاسبه شده و نشان داده شده است که برای این نوع مکانیزم، چه نوع سطح مقطعی در چه سرعت‌هایی بهترین عملکرد را دارد. امید است با انجام این تحقیق بتوان گام بلندی را در زمینه توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در جمهوری اسلامی ایران برداشت.

۲. روش آزمایشگاهی

در شکل ۱ هندسه‌های ساخته شده مرتبط با توربین بدون پره آورده شده است. مشاهده می‌شود که در این شکل تعداد ۶ هندسه مختلف از جنس فوم طراحی و آماده شده است. با توجه به شکل، مشخص است که استوانه با سطح مقطع دایره‌ای با قطر ۱۰ cm، استوانه با سطح مقطع مربعی با ضلع ۱۰ cm، و یک استوانه با

مختلف به بررسی عددی ۲ و ۳ بعدی راندمان توربین‌های بدون پره پرداختند. رندهانی و همکاران [17] در سال ۲۰۲۲ با تغییر در شکل و هندسه سازه و همچنین اصطکاک سیستم به بهینه سازی طراحی مکانیکی توربین بادی بدون پره برای تامین برق در اندونزی پرداختند. یونیس و همکاران [18] در سال ۲۰۲۲ با تغییر سطح مقطع هندسه، راندمان این نوع سیستم‌ها را بررسی نمودند. یونس و همکاران [18] در سال ۲۰۲۲ یک توربین بادی بدون پره بر اساس ارتعاشات ناشی از رهایش گردابه‌ها طراحی کردند که شامل یک پایه، یک استوانه توخالی، یک میله الاستیک و مواد پیزوالکتریک بود. ژنگ و همکاران [19] در سال ۲۰۲۳ تحقیقات جامعی در مورد برداشت انرژی باد توسط مواد پیزوالکتریک انجام دادند و بر بدنه سازه و طراحی دستگاه برداشت انرژی پیزوالکتریک متمرکز شدند. ژانگ و همکاران [20] در سال ۲۰۲۳ کارایی یک سیستم برداشت کننده انرژی مغناطیسی-پیزوالکتریک را با تغییر فاصله بین آن برداشت‌کنندگان در رژیم‌های ارتعاشات ناشی از رهایش گردابه‌ها^۳ و گلوپینگ^۴ (ارتعاشات با فرکانس کم و دامنه نوسان زیاد، ناشی از تشکیل لایه‌های برشی پشت جسم) بهبود بخشیدند. هاشمی‌نژاد و معصومی [21] در سال ۲۰۲۳ به صورت عددی برداشت انرژی مبتنی بر FIV به کمک برداشت‌کننده‌های پیزوالکتریک و الکترومغناطیس را برای یک استوانه افقی متصل به یک پایه افقی در راستای جریان بررسی نمودند. هاشمی‌نژاد و معصومی [22] در سال ۲۰۲۳ به صورت عددی با تغییر پارامترهای هندسی همچون طول و الاستیسیته ورق و همچنین قطر و وزن استوانه به بررسی برداشت انرژی از یک توربین بدون پره با سطح مقطع دایره‌ای و

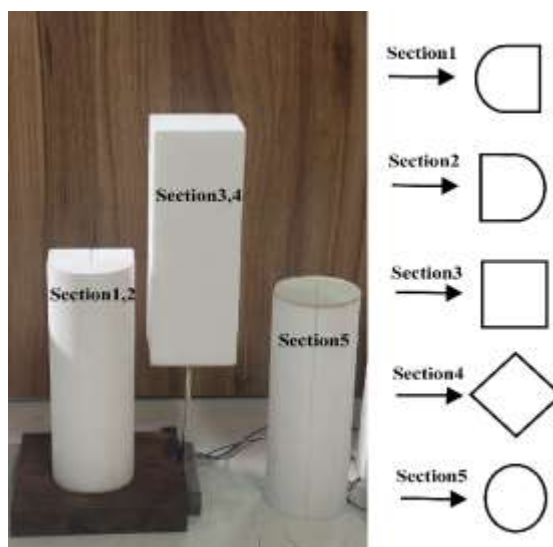
و چگالی 7000 kg/m^3 در ریشه توربین نصب شده است. لازم به ذکر است که با قرار دادن استوانه بر روی تیر، 15 cm از آن قابل رویت است. مشخصات هندسی در جدول ۱ آورده شده است. در شکل ۱، سطح مقاطع هندسی با شماره‌های ۱ تا ۵ مشخص شده‌اند. منظور از جهت فلش‌ها در این شکل جهت قرارگیری هندسه در جلو سیستم دمنده است.

سطح مقطع هندسه ترکیبی آماده شده است. طول این استوانه‌ها 30 cm و با چگالی 25 kg/m^3 بوده است. همچنین پایه در نظر گرفته شده برای نگهداری استوانه‌ها از جنس فولاد فنی^۵ با ضخامت 0.7 mm ، عرض 2.7 cm ، طول 48 cm و با چگالی 5500 kg/m^3 و مدول یانگ 200 GPa است. همچنین یک تکه پیزوالکتریک بایمورف^۶ PZT با ابعاد $6 \times 3 \times 0.06 \text{ cm}^3$

جدول ۱. مشخصات هندسی توربین بدون پره در بررسی تجربی

استوانه		پایه		لایه پیزوالکتریک	
قطر دایره	0.1 m	طول	0.48 m	طول	0.15 m
طول ضلع مربع	0.1 m	عرض	0.27 m	عرض	0.3 m
چگالی	25 kg/m^3	ضخامت	0.0007 m	ضخامت	0.0006 m
مقاومت الکتریکی	$100 \text{ k}\Omega$	چگالی	5500 kg/m^3	چگالی	7000 kg/m^3
چگالی هوا	1.2 kg/m^3	مدول یانگ	200 GPa	مدول یانگ	80 GPa

ولتاژ خروجی پیزوالکتریک دیده می‌شود. در این شکل یک سیستم دمنده ساده با قابلیت تغییر دور فن دیده می‌شود. ابعاد دهانه کانال $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ و عمق آن 70 cm است. همچنین به منظور شکستن بسته‌های انرژی^۷ ناشی از دمش فن به سمت توربین و یکنواخت کردن جریان، از یک مکانیزم لانه زنبوری (تیغه‌های مشبک دست‌ساز به ضلع 10 cm و عمق 60 cm) استفاده شده است. با قرار دادن سیستم توربین بدون پره در جلو سیستم دمنده، سیستم شروع به نوسان می‌کند. در این شکل از یک دوربین 60 fps به منظور تصویر برداری از نوسانات توربین استفاده شده است. اطلاعات مربوط به این نوسانات با استفاده از نرم‌افزار دنبال کننده^۸ مطابق با شکل ۳ استخراج شده است. در این راستا با تغییر رنگ یک ناحیه از نوک توربین، در



شکل ۱. استوانه‌های مربوط به هندسه توربین بدون پره، پایه نگه‌دارنده و ورق پیزوالکتریک

همچنین در شکل ۲، پیکربندی آزمایشگاهی توربین باد به همراه سیستم برداشت اطلاعات سرعت باد و

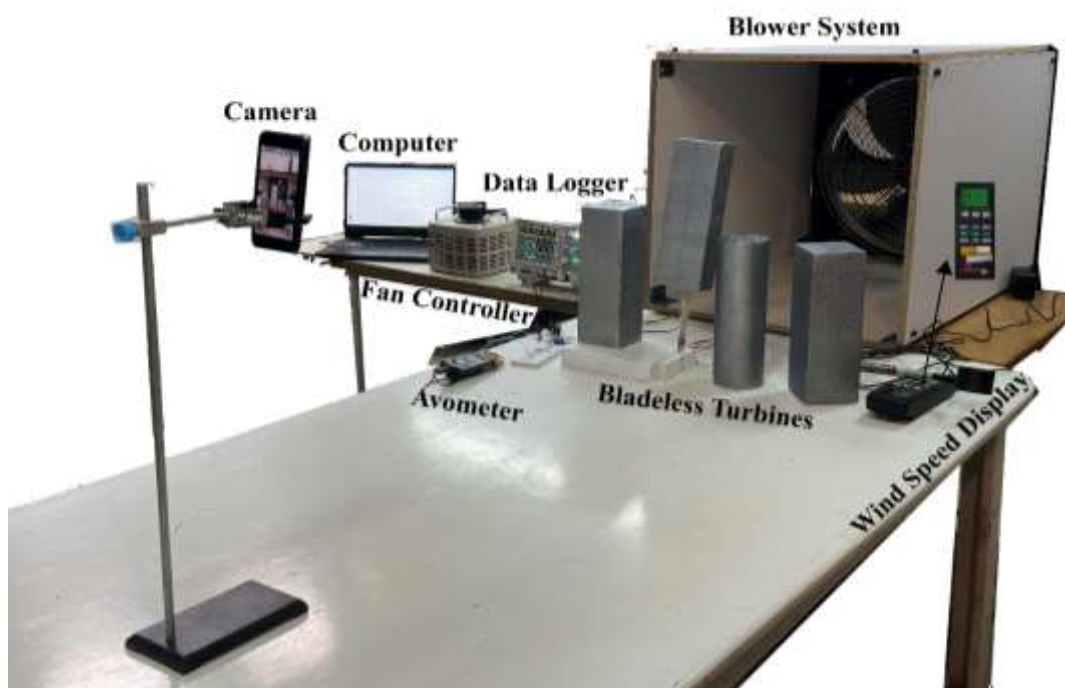
۳. روش حل عددی

در این بخش سیستم توربین بدون پره برداشت کننده انرژی ناشی از عبور جریان از روی سازه شامل استوانه مربعی متصل به یک میله با یک لایه ورق پیزوالکتریک PZT چسبیده به ریشه تشریح شده است. این شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزار تجاری انسیس و مشابه با شبیه‌سازی عددی انجام شده توسط نویسندگان مرجع [22] صورت گرفته است. در این راستا دامنه محاسباتی، شبکه‌بندی و گام زمانی بر اساس این مقاله [22] محاسبه شده و معادلات پیوستگی و ناپیراستوکس در فرم ALE^1 به صورت زیر در محیط تعامل سازه و سیال دو سویه این نرم‌افزار به کار گرفته شده است [24]:

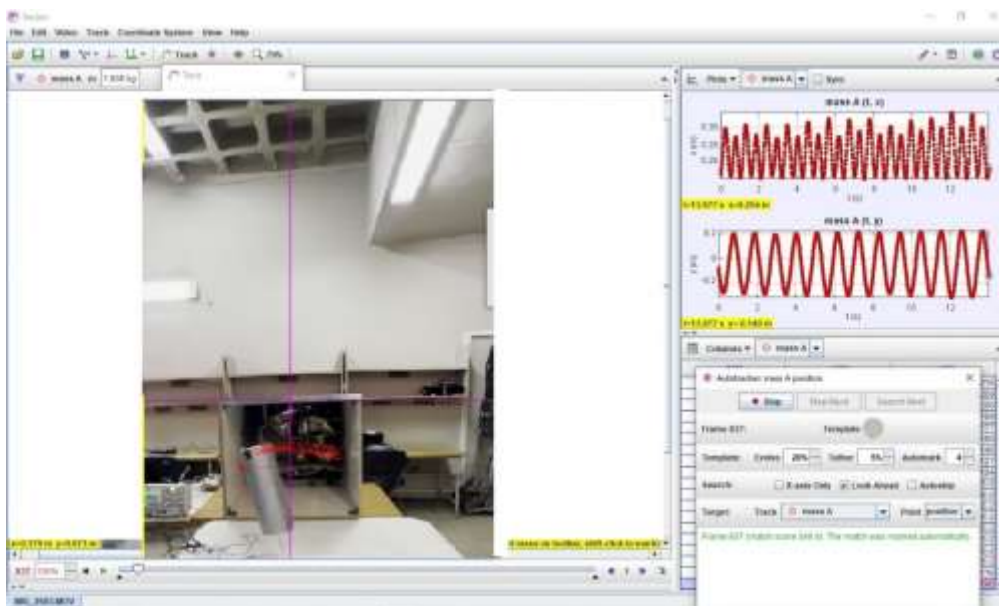
$$\rho_f \frac{\partial}{\partial t} u_f + \rho_f [(u_f - u_m) \cdot \nabla] u_f = \nabla \cdot (\sigma_f) + \rho_f b_f, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot u_f = 0,$$

نرم‌افزار گفته شده مشخص می‌شود که این طیف رنگی دنبال شود. بنابراین با کالیبره کردن اندازه‌ها در نرم‌افزار، اطلاعات مربوط به جابجایی بر حسب زمان اندازه‌گیری می‌شود. همچنین با استفاده از یک کنترل کننده، میزان ولتاژ اعمالی به فن دمنده تنظیم شده و به این ترتیب، سرعت خروجی باد کنترل می‌شود. این اطلاعات سرعت باد توسط یک سرعت‌سنج در محدوده قرارگیری استوانه اندازه‌گیری شده و در هر ولتاژ اعمالی به صورت مجزا یادداشت می‌شود. با عبور جریان از روی استوانه و شروع نوسانات توربین، پیزوالکتریک قرار گرفته در ریشه توربین تحت تنش قرار گرفته و اختلاف پتانسیل به وجود آمده در تکه پیزوالکتریک توسط مدار مقاومتی متصل شده به آن، به صورت مدار باز و مدار بسته توسط یک وسیله برداشت اطلاعات ذخیره می‌شود. در این راستا، این اطلاعات در یک فایل اکسل ذخیره‌سازی شده و اطلاعات آن در یک سیستم کامپیوتری پردازش می‌گردد.



شکل ۲. پیکربندی مربوط به سیستم دمنده به همراه سیستم برداشت اطلاعات خروجی لازم



شکل ۳. پیکربندی مربوط به برداشت اطلاعات جابجایی نوک استوانه از نوسانات توربین بدون پره

$$\frac{d}{dt} \int_{\Gamma_s} (\mathbf{D} \cdot \mathbf{n}) d\Gamma_s = \frac{V_p}{R_p} = I_p \quad (4)$$

که زیرنویس "s" بیانگر مولفه سازه، ρ_s چگالی سازه، \mathbf{u}_s بردار جابجایی سازه، \mathbf{f} بردار نیروی حجمی وارده بر سازه، $\bar{\boldsymbol{\sigma}}_s$ تنش اصلاح شده کوشی، $(\boldsymbol{\sigma}_s, \mathbf{E})$ بیانگر تانسورهای تنش و کرنش؟؟، $(\mathbf{D}, \Phi = -\nabla\phi)$ مشخص کننده بردارهای میدان الکتریکی و جابجایی، $(\mathbf{e}, \boldsymbol{\varepsilon})$ ماتریس‌های پیزوالکتریک و دی الکتریک و ϕ پتانسیل الکتریکی هستند. همچنین \mathbf{n} بردار یکه عمود بر سطح، $V_p = \phi$ پتانسیل الکتریکی روی سطوح پیزوالکتریک و R_p مقاومت متصل به پیزو هستند.

در تحلیل گذرای حاضر، معادلات تعادل پیزو - سازه کوپل شده در حوزه زمان با استفاده از روش مرتبه دوم FCNNTI¹³ تحلیل شده است [24]. بر اساس این روش، معادلات دینامیکی غیرخطی سازه کوپل شده را می‌توان در زمان (t_{n+1}) به شکل زیر گسسته کرد [27, 28]

که در این رابطه اندیس "f" بیانگر مولفه سیال، \mathbf{u}_f بردار سرعت سیال، ρ_f چگالی سیال، \mathbf{u}_m بردار سرعت مش^{۱۰} محاسبه شده [25]، \mathbf{b}_f بردار نیروهای حجمی و $\boldsymbol{\sigma}_f$ تانسور تنش سیال هستند.

همچنین، به منظور برداشت انرژی از طریق تکه پیزوالکتریک، معادلات تنش-تعادل (بقای تکانه)^{۱۱} و پاسخ الکتریکی برای بقای جابجایی الکتریکی، \mathbf{D} با استفاده از معادله ماکسول^{۱۲} در کنار معادلات سازنده متناظر پیزوالکتریک خطی به صورت زیر بیان می‌شود [26]. همچنین جریان الکتریکی در الکترودهای بالایی و پایینی هر لایه ورق جداکننده بایمورف پیزوالکتریک بر اساس قانون گاوس با انتگرال‌گیری بر روی ناحیه قرارگیری الکتروود (Γ_s) محاسبه شده است.

$$\rho_s \ddot{\mathbf{u}}_s = \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\sigma}}_s + \mathbf{f}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0,$$

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}}_s = \boldsymbol{\sigma}_s - \mathbf{e}\Phi, \quad (3)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{e}^T \mathbf{E} - \boldsymbol{\varepsilon}^T \Phi,$$

$$\mathbf{M}_c \ddot{\mathbf{u}}_c^{n+1} + \mathbf{C}_c \dot{\mathbf{u}}_c^{n+1} + \mathbf{K}_c \mathbf{u}_c^{n+1} = \mathbf{F}_c^{n+1} \quad (5)$$

که \mathbf{M}_c ماتریس جرم، \mathbf{C}_c ماتریس اضمحلال، \mathbf{K}_c ماتریس فنریت، و \mathbf{F}_c^{n+1} ماتریس نیروهای وارد بر سیستم هستند. این معادله با توجه به توضیحات [22] با استفاده از روش خانواده نیومارک و الگوریتم تکراری نیوتون-رافسون حل شده است [29]. همچنین شرط سازگاری هندسی برای اندرکنش سیال-سازه نشان می‌دهد که میدان‌های تنش نرمال و سرعت در سطح مشترک سیال-سازه باید پیوسته باشند [30] و نتایج روش اتصال ضعیف تقسیم‌بندی شده^{۱۴}، که می‌تواند از دقت زمانی مرتبه دوم با پایداری بالاتر برخوردار باشد [31]، برای اتصال حل‌کننده‌های ^{15}CSD و ^{16}CFD و حل مسئله شبیه‌سازی مشترک ^{17}FSI استفاده می‌شود [32, 33]. برای بررسی عددی توان خروجی یک توربین بدون پره مربعی شکل، یک هندسه به صورت بیان شده در جدول ۲ در نظر گرفته شده است.

۴. نتایج

در شکل ۴ نتایج حداکثر جابجایی $Y_{\max}(\text{cm})$ ، ولتاژ مدار باز $V_{\text{open loop}}(\text{volt})$ و ولتاژ مدار بسته $V_{\text{close loop}}(\text{volt})$ برحسب سرعت باد $V(\text{m/s})$ و ولتاژ ورودی به فن $V_{\text{in}}(\text{volt})$ ، برای سطح مقطع 1-5 ترسیم شده است. در این آزمایش طول پایه نگه‌دارنده ۱۵ cm، و فاصله آن از فن ۱۰۰ cm بوده و مقاومت الکتریکی $k\Omega$ ۱۰۰ است. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که اثرات سطح مقطع استوانه بر انرژی قابل برداشت بسیار قابل توجه است. در این راستا استوانه با سطح مقطع ۴ و ۲ عملکرد مناسبی را از خود نشان نداده و در واقع سیستم مربوط به (سطح مقطع ۳ و ۱) بهترین عملکرد را داشته و تا حد قابل قبولی انرژی را از نوسانات

توربین برداشت نموده‌اند. در این راستا دیده می‌شود که برای سطح مقطع 1 و در سرعت‌های حدود ۳/۴ m/s، حداکثر میزان جابجایی در حدود ۵۰ cm و در این حالت میزان ولتاژ مدار باز و مدار بسته سیستم به ترتیب در حدود ۳۰ ولت و ۸ ولت بوده است. در نتیجه در سیستم مدار بسته، با توجه به مقاومت متصل شده به مدار و برداشت توان از ۲ تکه پیزوالکتریک، از رابطه $P = V^2/R$ میزان برداشت توان حداکثر 1.3 mW خواهد بود. با بدون بعدسازی با استفاده از رابطه ۶، توان برداشت شده مقدار ۰/۰۰۱ خواهد بود.

$$P^* = P / (0.5\rho u^3 A) \quad (6)$$

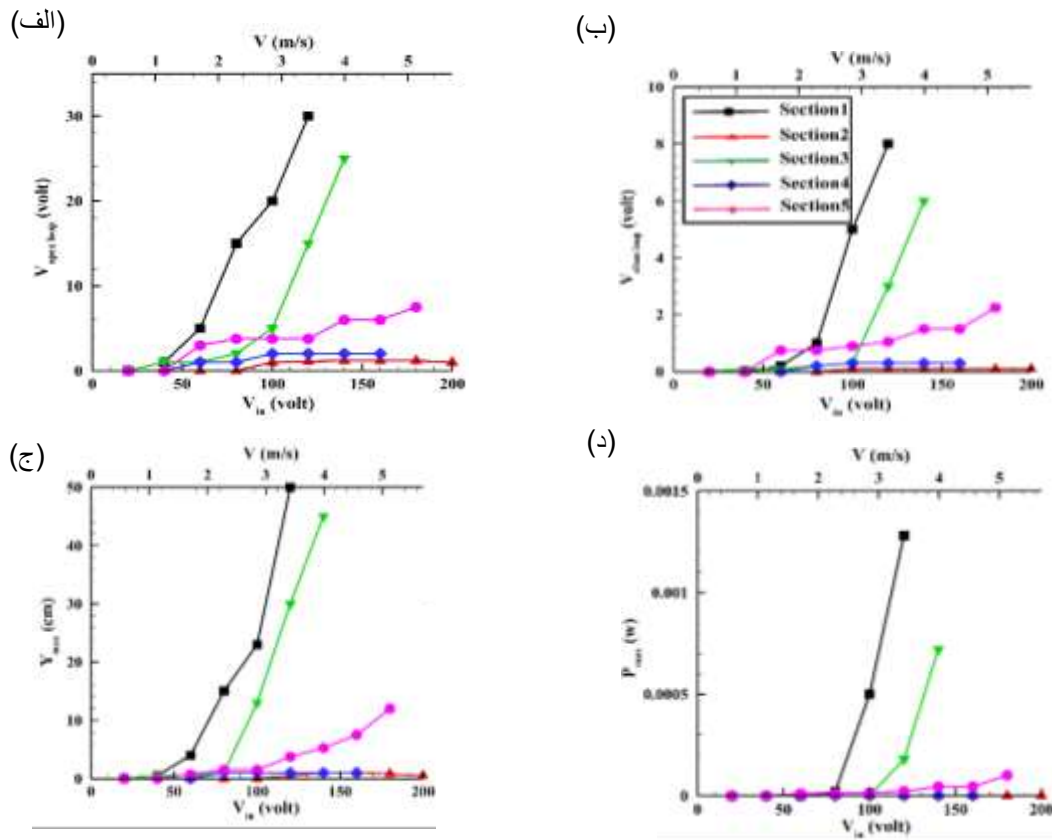
که u بیانگر سرعت جریان سیال ورودی است. برای سطح مقطع 5 مقدار توان برداشت شده بدون بعد در حدود ۰/۰۰۰۰۲۲ بوده است. بنابراین مشاهده می‌شود که طراحی سطح مقطع 1 در مقایسه با طراحی مرسوم سطح مقطع 5 در حدود بیش از ۵۰ برابر برداشت انرژی را بهتر و بیشتر نشان داده است. یکی از دلایل اصلی این ضعف عملکردی به خاطر وجود عدم تقارن‌های موجود در مسئله (هندسه توربین و قرارگیری پیزوالکتریک و جریان باد) است که باعث شده توربین مستقیماً وارد ناحیه گلپینگ شده و ناحیه VIV را تجربه نکند. این مقدار در مقایسه با سطح مقطع 3 به حدود ۱/۸ برابر رسیده است. بنابراین به نظر طراحی پیشنهادی سطح مقطع 1 می‌تواند گامی موثر را در راستای بهبود عملکرد توربین‌های بادی بدون پره به عمل آورد. علاوه بر این، سطح مقطع 1 در شرایط یکسان در سرعت‌های پایین‌تری عملکرد مناسب خود را در راستای برداشت انرژی داشته است. با این وجود، نوسانات شدید و در نتیجه تنش‌های به وجود آمده در پایه تیر نگه‌دارنده نیز

مشخصاً شدیدتر بوده و در نتیجه از نظر طراحی، در برابر بارهای خمشی نوسانی باید مقاومت بهتری از خود نشان دهد. در این راستا، با توجه به اینکه میزان عمر سازه و دامنه نوسانات یک رابطه توان ۳ با هم دارند، بنابراین، با مقایسه سطح مقطع 1 و سطح مقطع 3 در سرعت m/s $3/4$ مشخص است که با استفاده از سطح مقطع 1 به جای سطح مقطع 3 عمر سازه در حدود ۵ برابر کاهش خواهد داد. همچنین با توجه به شکل‌های مربوط به ولتاژ

مدار باز و مدار بسته، مشاهده می‌شود که تنها در حدود ۲۵ درصد از ولتاژ قابل برداشت در بدنه پیزوالکتریک توسط مدار مقاومت منتقل می‌شود. مشخصاً استفاده از مواد پیزوالکتریک مناسب‌تر باعث افزایش بیشتر برداشت انرژی خواهد شد.

جدول ۲. مشخصات هندسی توربین بدون پره مربعی شکل در حل عددی

استوانه		پایه		لایه پیزوالکتریک	
ضلع	۰/۱ m	طول	۰/۳ m	طول	۰/۱ m
طول	۰/۲ mm	عرض	۰/۰۰۷ m	عرض	۰/۰۰۷ m
چگالی	۲۷.۹ kg/m^3	ضخامت	۰/۰۰۰۵ m	ضخامت	۰/۰۰۰۳ m
مقاومت الکتریکی	$۱۰۰ \text{ k}\Omega$	چگالی	۲۷۰۰ kg/m^3	چگالی	۵۴۴۰ kg/m^3
چگالی هوا	$۱/۲ \text{ kg/m}^3$	مدول یانگ	$۶۹/۵ \text{ GPa}$	مدول یانگ	$۳۰/۳ \text{ GPa}$



شکل ۴. نتایج برداشت انرژی از نوسانات سطح مقطع‌های 1-5. (الف) ولتاژ مدار باز برحسب ولتاژ ورودی و سرعت باد. (ب) ولتاژ مدار بسته برحسب ولتاژ ورودی و سرعت باد. (ج) حداکثر جابجایی نوک توربین بدون پره برحسب ولتاژ ورودی و سرعت باد. (د) حداکثر توان برداشت شده از توربین بدون پره برحسب ولتاژ ورودی و سرعت باد.

در شکل ۵ تاریخچه نوسانات برای سطح مقطع 1,3 در سرعت‌های ورودی $2/8$ و $3/4$ متر بر ثانیه آورده شده است. در این شکل، مقادیر ولتاژ مدار باز، مدار بسته و توان برداشت شده از سیستم و همچنین نوسانات نوک استوانه در دو سرعت گفته شده دیده می‌شود. همچنین میزان فرکانس این نوسانات نیز در شکل مشخص شده است. با توجه به این شکل مشخص است که دامنه نوسانات ولتاژ، توان و جابجایی و همچنین فرکانس برای سطح مقطع 1 بیشتر از سطح مقطع 3 بوده است. این بدان معناست که در سطح مقطع 1، منحنی‌های برداشت انرژی دارای منحنی‌هایی با اکسترمم‌های بزرگ‌تر و فشرده‌تر هستند. در

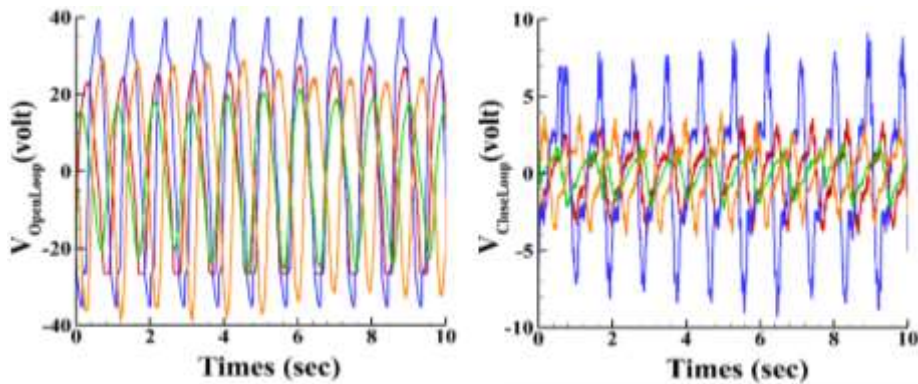
این راستا، توان متوسط از سطح مقطع 1 و سطح مقطع 3 در سرعت $3/4$ m/s به ترتیب 0.00039 W و 0.00064 W (یعنی برداشت انرژی در سطح مقطع 1، تا حدود ۶ برابر سطح مقطع 3) بوده است. همچنین در شکل مشاهده می‌شود که توان بدون بعد شده بر حسب زمان برای سرعت‌های بالاتر افزایش یافته است. این مهم از نمودارهای شکل ۴ که نشان دهنده افزایش نرخ رشد برداشت توان بر حسب سرعت بوده نیز قابل مشاهده است. در این راستا، برای توربین بدون پره با سطح مقطع 1، با افزایش سرعت از $2/8$ m/s به $3/4$ m/s مشاهده می‌شود که توان متوسط بدون بعد برحسب زمان به ترتیب

نتیجه کاهش عمر آن خواهد بود. بنابراین با وجود اینکه استفاده از سطح مقطع 1 از نظر برداشت انرژی مناسب‌تر از دیگر گزینه‌ها بوده و همچنین با افزایش سرعت راندمان کاری آن نیز بهبود بیشتری پیدا نموده است، اما افزایش دامنه و فرکانس نوسانات را با توجه به شدت نیروهای وارده بر سازه در یک طراحی واقعی مناسب باید در نظر داشت.

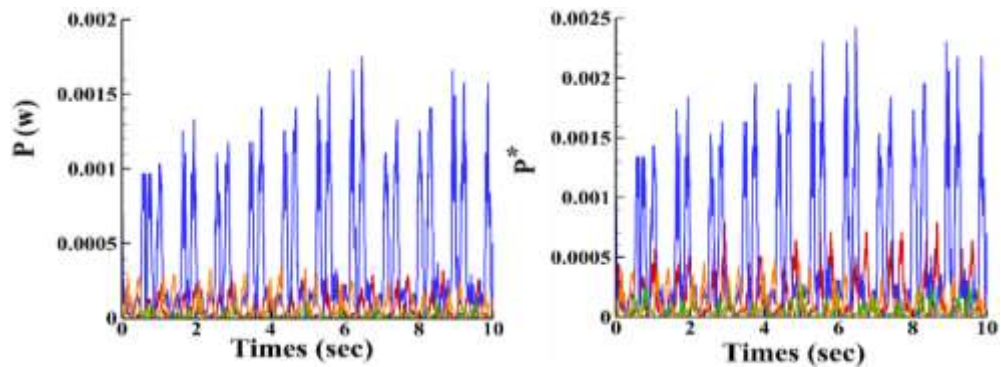
۰/۰۰۰۱۵ و ۰/۰۰۰۵۳ بوده است، یعنی برداشت انرژی بدون بعد در سطح مقطع 1 با افزایش سرعت از $2/8 \text{ m/s}$ به $3/4 \text{ m/s}$ حدود $3/5$ برابر رشد کرده است، که این به معنای افزایش راندمان کاری سیستم در سرعت‌های بالاتر خواهد بود. با این وجود مشخصاً افزایش فرکانس و شدت نوسانات باعث افزایش احتمال شکست خستگی سازه و در



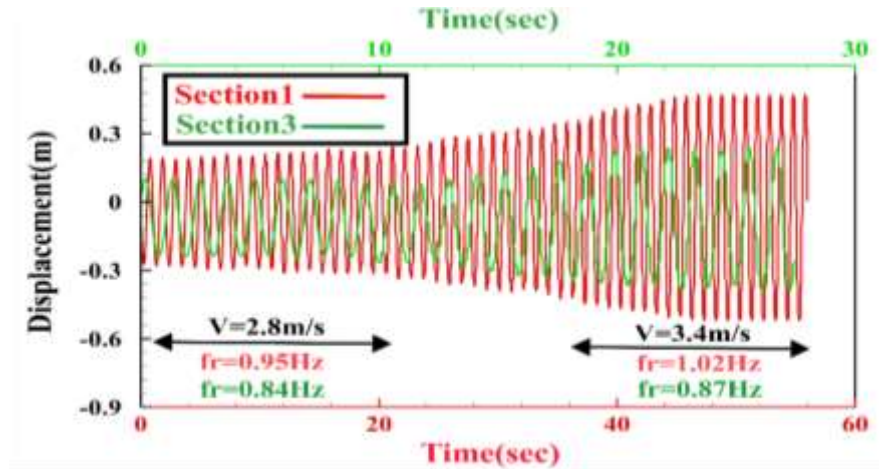
(الف)



(ب)

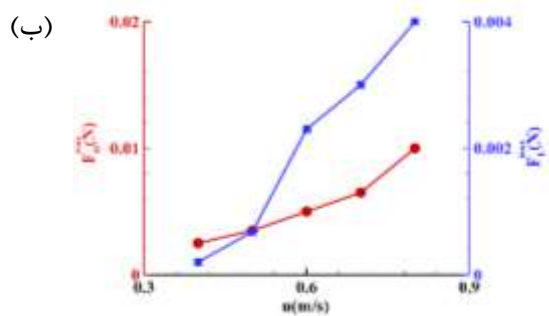
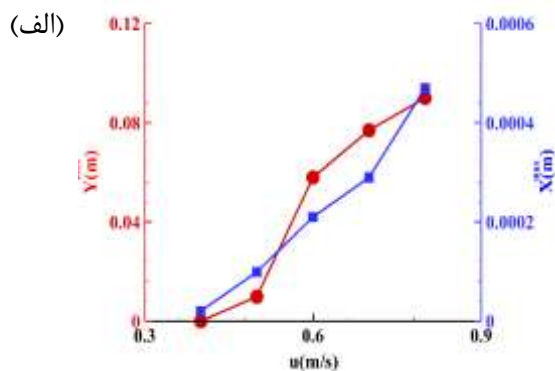


(ج)



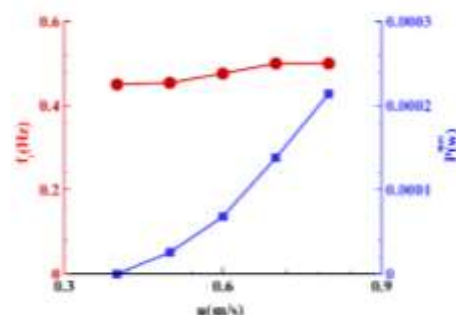
شکل ۵. تاریخچه نوسانات سطح مقطع‌های 1 و 3 در سرعت‌های ۲/۸ و ۳/۴ متر بر ثانیه بر حسب زمان. (الف) ولتاژ مدار باز و مدار بسته. (ب) توان و توان بدون برداشت شده. (ج) تاریخچه جابجایی نوک استوانه.

شد، برداشت انرژی از سطوح مربعی از منظر راندمان کاری قابل توجه‌تر از استوانه دایره‌ای خواهد بود.



در شکل ۶ نتایج حل عددی مربوط به حداکثر جابجایی در راستای طولی و عرضی، نیروهای وارده بر سیستم، فرکانس نوسانات و حداکثر توان برداشت شده در سرعت‌های مختلف آورده شده است. با توجه به شکل مشخص است که سیستم در ناحیه گلوپینگ نوسان کرده و جابجایی‌ها، نیروها و توان برداشت شده با افزایش سرعت افزایش یافته است. مشخصاً میزان جابجایی‌های عرضی در مقایسه با طولی در حدود ۲۰۰ برابر بیشتر بوده و همچنین نیروهای پسا در حدود ۲۵ برابر بیشتر از نیروهای برآ بوده است. میزان فرکانس نوسانات نیز با افزایش سرعت تنها اندکی افزایش پیدا کرده و تغییر چشم‌گیری نداشته است. همچنین دیده می‌شود که توان برداشت شده از سیستم با افزایش سرعت افزایش یافته و شیب آن نیز صعودی بوده است. با توجه به نتایج شکل زیر و همچنین نتایج [22] مشاهده می‌شود که سطح برداشت انرژی در حل عددی برای استوانه مربعی بسیار بیشتر از استوانه دایره‌ای بوده که در نتایج تجربی مربوط به شکل ۴ نیز دیده شد. بنابراین، همانگونه که از نتایج تجربی و عددی دیده

(ج)



شکل ۶. نتایج حل عدی برای استوانه با مقطع مربعی. (الف) جابجایی عرضی و طولی. (ب) نیروهای پسا و برآ. (ج) فرکانس و توان برداشت شده.

۵. نتیجه گیری

استفاده از انرژی مکانیکی جنبشی حاصل از عبور جریان روی یک استوانه نوسانی تحت عنوان توربین بدون پره یکی از روش‌های جدید و جذاب برداشت انرژی محسوب می‌شود که اخیراً توجه زیادی را در جامعه مکانیک سیالات به خود جلب کرده است. در این راستا در مقاله حاضر یک مطالعه آزمایشگاهی و عددی برهم‌کنش سیال-سازه (FSI) در تعامل با ورق پیزوالکتریک PZT بررسی شده است. در ادامه نتایج کلیدی به شرح زیر آورده شده است.

- برای سطح مقطع 1 و در سرعت‌های حدود ۳/۴ متر بر ثانیه میزان برداشت توان حداکثر در حدود ۱/۳ mW یا به صورت بدون بعد در حدود ۰/۰۰۲ بوده است. این مقدار بدون بعد توان برداشت شده برای سطح مقطع 3 در حدود ۰/۰۰۰۶، برای سطح مقطع 5 در حدود ۰/۰۰۰۰۲۲ بوده است. بنابراین مشاهده می‌شود که طراحی سطح مقطع 1 در مقایسه با طراحی مرسوم سطح مقطع 5 در حدود بیش از ۵۰ و در مقایسه با سطح مقطع 3 در حدود ۱/۸ برابر برداشت انرژی را بهتر و بیشتر نشان داده است.

- دامنه نوسانات ولتاژ، توان و جابجایی و همچنین فرکانس برای سطح مقطع 1 بیشتر از سطح مقطع 3 بوده است. این بدان معناست که در سطح مقطع 1، منحنی‌های برداشت انرژی دارای منحنی‌هایی با اکسترمم‌های بزرگ‌تر و فشرده‌تر هستند. در این راستا توان متوسط از سطح مقطع 1 و سطح مقطع 3 در سرعت ۳/۴ m/s به ترتیب W و $۰/۰۰۰۳۹ W$ (یعنی برداشت انرژی در سطح مقطع 1، تا حدود ۶ برابر سطح مقطع 3) بوده است.

- توان بدون بعد شده بر حسب زمان برای سرعت‌های بالاتر افزایش یافته است. در این راستا، در سطح مقطع 1 با افزایش سرعت از ۲/۸ m/s به ۳/۴ m/s مشاهده می‌شود که متوسط سطح زیر نمودار توان بدون بعد بر حسب زمان به ترتیب ۰/۰۰۰۱۵ و ۰/۰۰۰۵۳ (یعنی برداشت انرژی بدون بعد در سطح مقطع 1 با افزایش سرعت از ۲/۸ m/s به ۳/۴ m/s حدود ۳/۵ برابر رشد کرده است). بوده که این به معنای افزایش راندمان کاری سیستم در سرعت‌های بالاتر است.

- افزایش فرکانس و شدت نوسانات باعث افزایش احتمال شکست خستگی سازه و در نتیجه کاهش عمر آن خواهد بود. در واقع با توجه به اینکه میزان عمر سازه و دامنه نوسانات یک رابطه توان ۳ با هم دارند، بنابراین با مقایسه سطح مقطع 1 و سطح مقطع 3 در سرعت ۳/۴ m/s مشخص است که با استفاده از سطح مقطع 1 به جای سطح مقطع 3 عمر سازه را تا در حدود ۵ برابر کاهش خواهد داد. بنابراین با وجود اینکه استفاده از سطح مقطع 1 از نظر برداشت انرژی مناسب‌تر از سایر سطح مقطع‌ها بوده و با افزایش

سرعت وزش باد، راندمان کاری آن نیز بهبود بیشتری پیدا می‌نماید، اما افزایش دامنه و فرکانس نوسانات را به منظور طراحی مناسب جهت جلوگیری از شکست خستگی باید در نظر گرفت.

۶. منابع

- [۱]. هاشمی نژاد، سید محمود؛ هانیه نعیمی، "کنترل پاسخ دینامیکی پوسته‌ای استوانه‌ای پیزوالکتریک مدفون تحت اثر بارگذاری متحرک"، *مجله صوت و ارتعاش*، دوره ۱۲، شماره ۲۴، ۱۴۰۲، صفحه ۱۲۰-۱۴۲.
- [۲]. پناهی، امیر؛ علیرضا حسن‌زاده؛ "علی مولوی مدل‌سازی تأثیر نوفه صدا بر روی یک تیرک پیزوالکتریک برای جمع‌آوری انرژی"، *مجله صوت و ارتعاش*، دوره ۹، شماره ۱۷، ۱۳۹۹، صفحه ۱۰-۲۳.
- [3]. Lian, Jijian, Xiang Yan, Fang Liu, and Jun Zhang. "Analysis on flow induced motion of cylinders with different cross sections and the potential capacity of energy transference from the flow." *Shock and vibration* 2017, no. 1 (2017): 4356367.
- [4]. Asre, Chaitanya M., Vijay K. Kurkute, and Nand Jee Kanu. "Power generation with the application of vortex wind turbine." *Materials Today: Proceedings* 56 (2022): 2428-2436.
- [5]. Balakrishnan, S. P., R. Arun, and N. Vinoth Babu. "Design Analysis and Prototype of Vortex Bladeless Wind Turbine." *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* 6, no. 3 (2019): 2395-0072.
- [6]. Dehghan Manshadi, Mahsa, Majid Ghassemi, Seyed Milad Mousavi, Amir H. Mosavi, and Levente Kovacs. "Predicting the parameters of vortex bladeless wind turbine using deep learning method of long short-term memory." *Energies* 14, no. 16 (2021): 4867.
- [7]. Villarreal, DJ Yáñez, and Vortex Bladeless SL. "VIV resonant wind generators." *Vortex Bladeless SL* (2018).
- [8]. 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* 41 (2015): S768-S773.
- [9]. Dai, Hu Liang, A. Abdelkefi, Y. Yang, and L. Wang. "Orientation of bluff body for designing efficient energy harvesters from vortex-induced vibrations." *Applied Physics Letters* 108, no. 5 (2016).
- [10]. Zhang, L. B., H. L. Dai, A. Abdelkefi, and L. Wang. "Improving the performance of aeroelastic energy harvesters by an interference cylinder." *Applied Physics Letters* 111, no. 7 (2017).
- [11]. Song, Jie, Gang Hu, K. T. Tse, S. W. Li, and K. C. S. Kwok. "Performance of a circular cylinder piezoelectric wind energy harvester fitted with a splitter plate." *Applied Physics Letters* 111, no. 22 (2017).
- [12]. Jia, Jinda, Xiaobiao Shan, Deepesh Upadrashta, Tao Xie, Yaowen Yang, and Rujun Song. "Modeling and analysis of upright piezoelectric energy harvester under aerodynamic vortex-induced vibration." *Micromachines* 9, no. 12 (2018): 667.

- [13]. Thomai, Micha Premkumar, Lasoodawanki Kharsati, Nakandhrakumar Rama Samy, Seralathan Sivamani, and Hariram Venkatesan. "Experimental analysis of vortex induced vibration in the bladeless small wind turbine." In *Gas Turbine India Conference*, vol. 83532, p. V002T06A009. American Society of Mechanical Engineers, 2019.
- [14]. Francis, Sigil, V. Umesh, and S. Shivakumar. "Design and analysis of vortex bladeless wind turbine." *Materials Today: Proceedings* 47 (2021): 5584-5588.
- [15]. Maftouni, Negin, Mahsa Dehghan Manshadi, and Seyed Milad Mousavi. "The effect of drag force on the body frequencies and the power spectrum of a bladeless wind turbine." *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering* 45, no. 4 (2021): 604-611.
- [16]. Sabab, Muhammad Wafi, and Sofian Mohd. "Aerodynamic Characteristic Of Vortex Bladeless Wind Turbine: A Short Review." *Research Progress in Mechanical and Manufacturing Engineering* 2, no. 1 (2021): 177-186.
- [17]. Ramadhany, Muhammad Farhan, Theo Aden Kusuma, Yessika Natalia Chelsie, and Gandha Satria Adi. "Optimization of Mechanical Design Bladeless Wind Turbine for Electricity Fulfilment in Nusa Tenggara Timur, Indonesia." *arXiv preprint arXiv:2205.02786* (2022).
- [18]. Younis, Adel, Zuomin Dong, Mohamed ElBadawy, Abeer AlAnazi, Hayder Salem, and Abdullah AlAwadhi. "Design and development of bladeless vibration-based piezoelectric energy–harvesting wind turbine." *Applied Sciences* 12, no. 15 (2022): 7769.
- [19]. Zheng, Xiaotian, Lipeng He, Shuangjian Wang, Xuejin Liu, Renwen Liu, and Guangming Cheng. "A review of piezoelectric energy harvesters for harvesting wind energy." *Sensors and Actuators A: Physical* 352 (2023): 114190.
- [20]. Zhang, Dan, Shu Zheng, Yaping Dou, Zhilong Xing, Rujun Song, and Wentao Sui. "Design and experimental investigation of magnetically coupling piezoelectric energy harvesting system based on galloping and vortex induced vibration." *Ferroelectrics* 606, no. 1 (2023): 61-72.
- [21]. Hasheminejad, Seyyed M., and Yasin Masoumi. "Dual-functional synergetic energy harvesting and flow-induced vibration control of an electromagnetic-based square cylinder integrated with a flexible bimorph piezoelectric wake splitter plate." *Renewable Energy* 216 (2023): 119133.
- [22]. Hasheminejad, Seyed Mahmoud. "Optimum design and numerical modeling of a bladeless wind turbine." *Journal of Marine Engineering* 19, no. 40 (2023): 16-29.
- [23]. Masoumi, Y., F. Taheri-Behrooz, and Seyyed M. Hasheminejad. "Numerical study of a synergistic hybrid energy harvesting system for bladeless wind turbines." *Energy Conversion and Management* 307 (2024): 118342.
- [24]. Wang, Huakun, Qiu Zhai, and Jisheng Zhang. "Numerical study of flow-induced vibration of a flexible plate behind a circular cylinder." *Ocean Engineering* 163 (2018): 419-430.
- [25]. Wang, Huakun, Wenyu Yang, Kim Dan Nguyen, and Guoliang Yu. "Wake-induced vibrations of an elastically mounted cylinder located downstream of a stationary larger cylinder at low Reynolds numbers." *Journal of Fluids and Structures* 50 (2014): 479-496.

- [26]. Ramegowda, Prakasha Chigahalli, Daisuke Ishihara, Rei Takata, Tomoya Niho, and Tomoyoshi Horie. "Hierarchically decomposed finite element method for a triply coupled piezoelectric, structure, and fluid fields of a thin piezoelectric bimorph in fluid." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 365 (2020): 113006.
- [27]. Kohnke, Peter. "Theory reference for the mechanical APDL and mechanical applications." *Ansys Inc, release 12* (2009).
- [28]. Subbaraj, K., and MA1017986 Dokainish. "A survey of direct time-integration methods in computational structural dynamics—II. Implicit methods." *Computers & structures* 32, no. 6 (1989): 1387-1401.
- [29]. Jacob, Breno Pinheiro, and Nelson Francisco Favilla Ebecken. "An optimized implementation of the Newmark/Newton-Raphson algorithm for the time integration of non-linear problems." *Communications in Numerical Methods in Engineering* 10, no. 12 (1994): 983-992.
- [30]. Kaneko, Shigeaki, Giwon Hong, Naoto Mitsume, Tomonori Yamada, and Shinobu Yoshimura. "Numerical study of active control by piezoelectric materials for fluid–structure interaction problems." *Journal of Sound and Vibration* 435 (2018): 23-35.
- [31]. Jean-Mark, V., DeVincenzo Pascal, Hirsch Charles, and Leonard Benoit. "Strong coupling algorithm to solve fluid-structure interaction problems with a staggered approach." *Report, Open Engineering SA* (2009).
- [32]. Richter, Thomas. "Numerical methods for fluid-structure interaction problems." *Institute for Applied Mathematics, University of Heidelberg, Germany* (2010).
- [33]. Hou, Gene, Jin Wang, and Anita Layton. "Numerical methods for fluid-structure interaction—a review." *Communications in Computational Physics* 12, no. 2 (2012): 337-377.

پی نوشت

-
- ¹ Flow-Induced Vibration, FIV
² Deep Learning
³ Vortex Induced Vibration, VIV
⁴ Galloping
⁵ Spring steel
⁶ Bimorph
⁷ Eddy
⁸ Tracker
⁹ Arbitrary Lagrangian-Eulerian
¹⁰ Mesh velocity
¹¹ Stress–equilibrium (momentum conservation)
¹² Maxwell's equation
¹³ Fully coupled nonlinear Newmark time integration
¹⁴ The partitioned weak coupling strategy
¹⁵ Computational structural dynamic
¹⁶ Computational fluid dynamic
¹⁷ Fluid structure Interaction