

شبیه‌سازی عددی برداشت انرژی از یک صفحه انعطاف‌پذیر پشت یک سیلندر با استفاده از ارتعاشات ناشی از جریان

مهناز پورمومنی فیروزآبادی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علی طیبی* (استادیار)

یونس شکاری (استادیار)

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه باسوج

مهندسی مکانیک شریف (پاییز ۱۴۰۲)
دوری ۳۹، شماره ۲، صص. ۶۵-۷۴، (پژوهشی)

شبیه‌سازی و بررسی برداشت انرژی از یک صفحه‌ی پیزوالکتریک که بر روی یک تیر الاستیک تعبیه شده و در پشت سیلندر قرار گرفته از طریق ارتعاشات ناشی از جریان، موضوع مورد بررسی در این مقاله می‌باشد. در ابتدا نتایج جریان اطراف یک سیلندر ساکن در رینولدز 200 با مراجع موجود در پیشینه‌ی پژوهش، مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. سپس، با قرار دادن یک تیر الاستیک و پیزوالکتریک در پشت سیلندر، جریان اطراف سیلندر و اندرکنش بین سازه‌ها و سیال بررسی شده است. در همین راستا، فرایند یافتن بهینه‌ترین حالت برداشت انرژی برای مکان قرارگیری تیر الاستیک، طول تیر و نقطه‌ی گیردار تیر الاستیک در هندسه‌های مختلف انجام می‌شود. نتیجه بررسی‌های انجام شده، حالت بهینه‌ی با طول تیر الاستیک $2D$ فاصله‌ی قرارگیری تیر از پشت سیلندر $2/5D$ و حالتی که تیر از سمت راست ثابت شده باشد است که در آنها D قطر سیلندر می‌باشد. در این مسئله، تأثیر حضور تیر بر روی کاهش ضرایب لیفت و درگ و تأثیر آن بر مقدار ولتاژ برداشت شده از لایه‌ی پیزوالکتریک مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: برداشت انرژی، پیزوالکتریک، ارتعاش ناشی از جریان، صفحه انعطاف‌پذیر.

poormomenimahnaz@gmail.com
tayebe@yu.ac.ir
shekari@yu.ac.ir

۱. مقدمه

از زمان‌های گذشته، جامعه‌ی انسانی از انرژی باد و جریان آب برای فعالیت‌های متعددی مانند آسیاب‌ها و پمپ‌های آبی استفاده می‌کرده است. اخیراً این انرژی‌ها را برای تولید برق نیز به‌کار می‌گیرند. یکی از معایب توربین‌های سنتی و آسیاب‌های آبی، نیاز آن‌ها به سیال با انرژی بالا است. به عنوان مثال در توربین‌های آبی، نیروی محرکه‌ی بالایی برای استفاده از توربین مورد نیاز است. از مزایای این سیستم‌ها این است که پدیده‌های هیدرولیکی مانند آبشار، به‌طور طبیعی رخ می‌دهند و در دسترس هستند. در دهه‌های اخیر، تحقیقات زیادی برای توسعه‌ی دانش انجام شده و فناوری‌های جدیدی در زمینه‌ی استخراج انرژی ناشی از جریان معرفی شده است.^[۱]

یکی از فناوری‌های بالقوه‌ی که ممکن است در آینده نزدیک جایگزین باتری شود، برداشت انرژی^۱ است. این فناوری از منابع طبیعی برای تولید انرژی الکتریکی مفید و

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۸/۱۷، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۱/۱۲، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۱۸.

در سال‌های اخیر، سوزاندن نفت، زغال‌سنگ و دیگر سوخت‌های فسیلی، منجر به ایجاد مشکلات زیست‌محیطی شده است و از سوی دیگر سوخت‌های فسیلی رو به اتمام است. در نتیجه، مسئله‌ی برداشت انرژی پاک و تجدیدپذیر از محیط زیست

استاد به این مقاله:

پورمومنی فیروزآبادی، مهناز، طیبی، علی، و شکاری، یونس. ۱۴۰۲. شبیه‌سازی عددی برداشت انرژی از یک صفحه انعطاف‌پذیر پشت یک سیلندر با استفاده از ارتعاشات ناشی از

جریان. مهندسی مکانیک شریف، ۳۹(۲)، صص. ۶۵-۷۴. DOI:10.24200/J40.2023.60966.1653

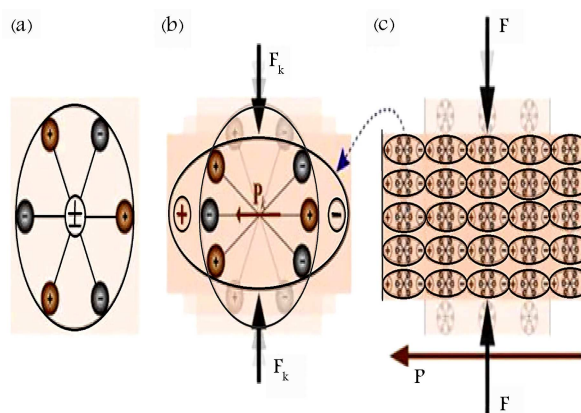
قابل شارژ استفاده کردند.^[۸] وانگ و کو^۵، در سال ۲۰۱۰ نخستین مدل‌های چندگانه را در رابطه با برداشت انرژی پیزوالکتریک در مکانیزم‌های ارتعاشی پیشنهاد کردند و ثابت شد که سیستم آن‌ها می‌تواند قدرت لحظه‌یی ۰/۲ میکرووات را در ۲۶ هرتز تولید کند.^[۹] لالارت^۶ و همکاران، در سال ۲۰۱۱ روشی برای برداشت انرژی الکترواستاتیک پیشنهاد کردند که از پیکربندی دولایه مواد با ضریب گذردهی بالا و پایین استفاده می‌کرد.^[۱۰] با توجه به تغییر گذردهی الکتریکی، نسبت ظرفیت الکتریکی ماده دولایه در مقایسه با ماده یک لایه نسبتاً گسترده‌تر است و باعث افزایش بهره‌وری می‌شود. بوزلاتا و همکاران، در سال ۲۰۱۸ یک دستگاه جدید پیزوالکتریک برای جمع‌آوری انرژی باد و سیستم تبدیل نیرو را مطالعه کردند.^[۱۱] این دستگاه قابل حمل، اقتصادی، با نصب آسان و بدون تماس بود که لایه‌های پیزوالکتریک کشسان را به آهن‌رباهای دائمی اعمال می‌کرد. علائی و همکاران، در سال ۲۰۲۰ یک رویکرد تحلیلی و دو مدل عددی برای مطالعه دستگاه برداشت انرژی برای تولید انرژی الکتریکی طراحی کردند.^[۱۲] این دستگاه با استفاده از انرژی باد به یک تیر، یک سرگیردار نوسانی، متصل به یک لایه پیزوالکتریک برای تولید انرژی الکتریکی، خروجی را برداشت می‌کند. رویکرد تحلیلی و اولین مدل عددی، پدیده برهم‌کنش سیال - سازه را در عملکرد برداشت انرژی در نظر می‌گیرد. برهم‌کنش سازه - سیال (FSI)^۷، پدیده اثر متقابل برخی از سازه‌های متحرک یا تغییر شکل دهنده با یک جریان سیال داخلی یا محیط اطراف آن است.^[۱۳] برهم‌کنش‌های سیال - سازه می‌تواند پایدار یا نوسانی باشد. در برهم‌کنش‌های نوسانی، کرنش القا شده در سازه‌ی جامد باعث حرکت و تغییر شکل آن می‌شود که به نظر می‌رسد منبعی که باعث ایجاد کرنش شده است به صورت میرا می‌باشد و سازه دوباره به شکل اولیه خود بازمی‌گردد. این پدیده در طراحی بسیاری از سیستم‌های مهندسی اهمیتی اساسی دارد. به عنوان مثال، هواپیماها، فضاپیماها، موتورهای پل‌ها. عدم در نظر گرفتن برهم‌کنش‌های نوسانی، به‌ویژه در ساختارهای متشکل از مواد مستعد خستگی می‌تواند فاجعه‌بار باشد. FSI نیز در مخازن متحرک حاوی سیالات رخ می‌دهد، جایی که نوسانات سیال به دلیل حرکت مخزن، مقادیر قابل توجهی از نیروها و گشتاورهای مستمر را به سازه‌ی مخزن تحمیل می‌کند که بر روی پایداری سیستم حمل و نقل مخزن به‌طور نامطلوبی تأثیر می‌گذارد.^[۱۴]

شیاوژن^۸ و همکاران، در سال ۲۰۲۰ یک سیستم مبدل پیزوالکتریک برداشت انرژی جنبشی از امواج دریا را پیشنهاد داده‌اند.^[۱۵] سیستم مورد نظر آن‌ها شامل یک محفظه‌ی هوا، یک جسم بلاف و یک قطعه پیزوالکتریک بود که حداکثر ولتاژ خروجی ۶/۱۱ ولت تولید می‌کرد. نانوو^۹ و همکاران، در سال ۲۰۲۱ برداشت انرژی پیزوالکتریک در ارتعاشات محیطی و منابع طبیعی را مطالعه کردند و با بهره‌گیری از سازه‌ی انعطاف‌پذیر ساده‌یی افزایش نیروی الکتریکی خروجی را بررسی کردند.^[۱۶] لی و همکاران، در سال ۲۰۲۲ مکانیزم‌های برداشت انرژی از امواج را بررسی کردند و با قابلیت برداشت انرژی پیزوالکتریک، ولتاژ خروجی و توان تولید شده را با ابعاد هندسی مختلف بهبود بخشیدند.^[۱۷] وانگ و همکاران، در سال ۲۰۲۲ برداشت‌کننده‌ی انرژی را از ماشین‌های دوار با ورق پیزوالکتریک بررسی کردند و توانستند ۲۵ ولت انرژی برداشت کنند.^[۱۸]

در این پژوهش، یک سیستم برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک که بر اساس ارتعاش ناشی از جریان کار می‌کند، برای برق‌رسانی به حسگرهای کوچک مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطالعات قبلی بیشتر بر روی برداشت انرژی ارتعاشات ناشی از هوا روی تیر یک سرگیردار تمرکز داشته و حالت بهینه مشخصات هندسی قرارگیری تیر و طول تیر مورد توجه قرار نگرفته است. در حالیکه در مطالعه‌ی حاضر، با استفاده از ارتعاشات ناشی از جریان یک سیال فرضی (در رینولدز مشخص) بر روی یک

به عنوان یک کانون تحقیقاتی مهم باقی‌مانده است.^[۱۲] محققان همواره به دنبال ایده‌هایی برای برداشت انرژی از منابع تجدیدپذیر بوده‌اند. یکی از این منابع که در دسترس قرار دارد، انرژی ناشی از جریان سیالات مانند جریان باد، آب و غیره است. ارتعاشات القا شده توسط جریان (FIV)^۲ پدیده‌یی است که در آن یک جسم با جریان سیال اطراف خود تأثیر متقابل دارد. لرزش ناشی از جریان معمولاً به عنوان پدیده‌یی منفی شناخته می‌شود، زیرا در بسیاری از موارد ارتعاشات ناخواسته باعث کاهش طول عمر و آسیب سازه‌یی می‌شود. اما در حال حاضر این پدیده به عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر از انرژی سیال در نظر گرفته می‌شود. زیرا انرژی حاصل از این ارتعاشات را می‌توان از طریق برهم‌کنش بین جریان سیال با برداشت‌کننده‌های انرژی در شرایط مختلف جریان طبیعی برداشت نمود.^[۴] این پدیده را می‌توان در بسیاری از موارد مشاهده نمود. از جمله در لوله‌ی میشل‌های حرارتی، سازه‌های دریایی، پل‌ها، خطوط انتقال برق، ساختمان‌های مرتفع و غیره. فروپاشی پل تاکوما در سال ۱۹۴۰ میلادی و برج‌های خنک‌کن فوری بریج^۳ در سال ۱۹۶۵، نمونه‌های مشهوری از اثرات ارتعاشات خود القایی ناشی از جریان گردابه‌ها بر سازه‌های مهندسی است.^[۵] مکانیزم پیزوالکتریک، یکی از رایج‌ترین و بهترین تکنیک‌های تحقیق در زمینه برداشت‌کننده‌های انرژی مکانیکی است. اما دایره محدود انتخاب مواد و تکنیک‌های پیچیده‌ی ساخت، هنوز هم یکی از چالش‌های مهم برای دستگاه‌های برداشت انرژی پیزوالکتریک محسوب می‌شود.^[۶] مواد پیزوالکتریک به‌طور گسترده‌یی در کاربردهای ارتعاشی استفاده می‌شوند. عامل ارتعاشی، از طریق اعمال نیرو، مواد پیزوالکتریک را تغییر داده و به آن شکل خمشی که بار الکتریکی ایجاد می‌کند، می‌دهد. نحوه‌ی کار پیزوالکتریک با استفاده از مدل ملکولی در شکل ۱ نشان داده شده است. در قسمت a ملکول‌ها در حالت تغییر نیافته قرار دارند. اما زمانی که نیروی خارجی f_k اعمال می‌شود، تعادل مجموعه به هم می‌ریزد و منجر به ایجاد یک دوقطبی می‌شود. در قسمت c، هر کدام از دو قطبی‌های کوچک سبب ایجاد یک دوقطبی بزرگ می‌شود که این پدیده در مواد به عنوان پیزوالکتریک شناخته می‌شود.

یکی از روش‌های نوین تأمین انرژی سیستم‌های الکتریکی کم مصرف مورد استفاده در دریا، استفاده از انرژی مکانیکی امواج است. در این روش، با استفاده از مبدل پیزوالکتریک، انرژی ناشی از امواج دریا به الکتریسیته تبدیل می‌شود. مزیت این روش عدم نیاز به تعویض یا شارژ باتری سیستم مورد نظر است. ثانوی^۴ و همکاران، در سال ۲۰۱۰ از آرایه‌های کریستال پیزوالکتریک در پیاده‌روها و مناطق پرتراffیکی نظیر بزرگراه‌ها برای تولید انرژی قابل نگهداری در باتری‌ها و خازن‌های



شکل ۱. نحوه عملکرد ماده‌ی پیزوالکتریک.^[۷]

ساختار الاستومری دارد، تحت فشار هیدرواستاتیکی دچار تغییر شکل می‌شود که u بردار جابجایی، ρ_{ela} چگالی تیر، F_v نیروی حجمی و σ تنش است. برهم‌کنش هیدروالاستیسیته بر روی مرز بین سیال و سازه متمرکز است. سرعت سیال v و جابجایی سازه u با سرعت مرز با یکدیگر مرتبط هستند که در معادله شماره ۴ نشان داده شده است. تنش که توسط چرخش سیال مستقیماً بر سطح تیر اعمال می‌شود، از معادله ۵ و ۶ به دست می‌آید:

$$v = v_{bou} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4)$$

$$\sigma \cdot n = \tau \cdot n \quad (5)$$

$$\tau = -PI + \mu (\nabla v + (\nabla v)^T) \quad (6)$$

خواص سیال (سرعت و فشار) از طریق معادله‌های ۱ و ۲ و جابجایی تیر از طریق معادله ۳ بدست می‌آید. باید توجه داشت که این معادله‌ها، یک دستگاه معادلات همبسته هستند. بدین ترتیب که نیروهای اعمال شده بر سطح تیر که باعث خیز آن می‌شوند، از طریق حل سیال بدست می‌آیند (معادله‌های ۱، ۲، ۵ و ۶). از طرفی، خیز تیر باعث جابجایی سیال می‌شود که از طریق معادله ۴ بر سیال اعمال می‌شود. بدین ترتیب تأثیر دو طرفه سیال و جامد از طریق مرز بین سیال و جامد بر یکدیگر اعمال می‌گردد. بدین صورت، انرژی جنبشی سیال به انرژی مکانیکی تیر تبدیل می‌شود. تیر به خاطر تنش‌های متناوب نوسان خواهد کرد. در همین حال، تغییر شکل تیر، توزیع جریان را نیز تغییر می‌دهد.

۲.۱.۲. سیستم هم‌بسته‌ی الکترو - مکانیک

استفاده از یک لایه مواد PVDF و یک لایه مواد کشسان برای تولید تیر پیزوالکتریک مناسب هستند. تمام سازه‌ی ایجاد شده به عنوان یک تیر کشسان و پیزوالکتریک در نظر گرفته می‌شود. معادلات حاکم بر این سیستم الکترومکانیک به شرح زیر است:

$$\rho_{ela} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \nabla \cdot (K \cdot F^T) = F_v \quad (7)$$

$$\sigma = \sigma_{ad} + C^E \varepsilon - e^E \varepsilon \quad (8)$$

$$D_P = D_r + e \varepsilon + \varepsilon_r E \quad (9)$$

که معادله‌ی شماره ۷، معادله‌ی دیفرانسیلی حرکت تیر الاستومتر را بیان می‌کند. F گرادیان تغییر شکل است که معادله $I + \nabla u$ می‌باشد، K برابر با $JF^{(-1)} \cdot \sigma \cdot (F^{-1})^T$ است که $J = \det F$ به عنوان لایه‌ی پیزوالکتریک است و تنش σ توسط کرنش ε و میدان الکتریکی (E) تعیین می‌شود. در معادله‌های بالا، C^E ماتریس ضرایب کشسان، e^E ثابت تنش پیزوالکتریک و تنش اضافی است. همچنین، جابجایی الکتریکی D_P ، توسط ε و E تحت تأثیر قرار می‌گیرد، که ε_r انعطاف‌پذیری ماده‌ی پیزوالکتریک است و D_r ، جابجایی الکتریکی باقی‌مانده می‌باشد. با استفاده از فشار سیال، تیر دچار تغییر شکل کشسان می‌شود و بار الکتریکی ایجاد می‌کند. هنگامی که میدان الکتریکی وجود داشته باشد، قبل از اینکه تیر دچار تغییر شکل شود، بر تنش نیز تأثیر می‌گذارد. سیستم هم‌بسته‌ی هیدروالاستیسیته و سیستم هم‌بسته‌ی الکترومکانیکی از طریق ساختار تیر به هم متصل می‌شوند. با ریزش منظم گردابه‌ها، سطح تیر دچار اختلاف فشار متناوب می‌شود. با تکرار این فرایند، نوک آزاد تیر تحت تأثیر نیروی برای فشاری به بالا و پایین ارتعاش می‌کند.

تیر کشسان پیزوالکتریک که در نقطه‌ی خاصی ثابت شده است، شرایط متفاوت تیر برای بهینه‌سازی برداشت انرژی بررسی می‌گردد. برای تبدیل انرژی جریان آب به برق، سیستم تولید انرژی پیزوالکتریک بر اساس جریان اطراف یک جسم بلاف^{۱۰} مورد بررسی قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی میدان سیال از یک کانال استفاده شده است. یک استوانه در بالادست جریان به عنوان جسم بلاف قرار دارد. یک صفحه‌ی پیزوالکتریک در امتداد خط مرکزی روبروی جریان قرار گرفته و وظیفه برداشت انرژی را به عهده دارد.

۲. روش عددی

در این پژوهش، شبیه‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار کامسول^{۱۱} انجام شده است. نرم‌افزار کامسول، یک نرم‌افزار تجاری المان محدود^{۱۲} است که برای رسیدگی به طیف وسیعی از پدیده‌های فیزیکی و معادلات دیفرانسیل جزئی (PDE)^{۱۳} طراحی شده است. این نرم‌افزار قابلیت کویل یک مسئله چند فیزیکی و یا چند PDEs را برای کاربران فراهم کرده است. همچنین، تقریباً از تمامی نسخه‌ها (ویندوز، مک، لینوکس و یونیکس) پشتیبانی می‌کند. در این پژوهش، معادلات مسئله به صورت ترکیبی از معادلات اثرات جریان روی سیال - سازه و برداشت ولتاژ از لایه پیزوالکتریک مورد بررسی قرار گرفته است.

۲.۱.۲. تئوری سیستم و معادلات حاکم

در یک عدد رینولدز معین، گردابه‌ها از دو طرف استوانه به طور متناوب ریزش کرده و با عنوان خیابان گردابه‌ی کارمن^{۱۴} به طور متناوب شروع به چرخش می‌کنند. فشار متناوبی که از طریق گردابه‌های ناشی از جریان تولید شده‌اند، باعث تغییر شکل در تیر می‌شود. بر اساس اثر مستقیم پیزوالکتریک، تغییر شکل لایه‌ی PVDF منجر به تولید برق می‌شود. در نهایت، انرژی الکتریکی تولید شده قبل از عرضه به دستگاه‌های الکترونیکی، معمولاً ذخیره می‌شود. انرژی سیال به وسیله‌ی برهم‌کنش‌های متقابل میان میدان سیال، کشش میله و میدان الکتریکی که توسط مواد PVDF تولید شده است، به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود.

۲.۱.۲.۱. سیستم هم‌بسته‌ی هیدرو - الاستیسیته

در سیستم هم‌بسته‌ی هیدرو - الاستیسیته، میدان سیال و ساختار کشسانی تیر بر روی یکدیگر اثر می‌کنند. با توجه به گردابه‌های متحرک تولید شده، انرژی جنبشی سیال به فشار متناوب تبدیل شده و به تیر اعمال می‌شود. از طرفی، تغییر کشسانی تیر بر روی جریان سیال در نزدیکی آن تأثیر می‌گذارد. در مطالعات صورت گرفته، مبدل پیزوالکتریک به عنوان تیر یک‌سرگردار مورد مطالعه قرار گرفته است، اما در این تحقیق به عنوان یک الاستومر در نظر گرفته می‌شود که از نقاط مختلف پین شده و امکان تغییر شکل را دارد. معادلات حاکم بر این سیستم هم‌بسته‌ی جامد - مایع به صورت زیر می‌باشد:

$$F_{Flu} + \nabla \cdot [-PI + \mu (\nabla v + (\nabla v)^T)] = \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho (v \cdot \nabla) v \quad (1)$$

$$\rho \nabla \cdot v = 0 \quad (2)$$

$$\rho_{ela} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \nabla \cdot \sigma = F_v \quad (3)$$

در معادله‌های فوق، F_{Flu} نیروی جرمی سیال، p فشار میدان، v بردار سرعت، μ لزجت دینامیکی و ρ چگالی سیال است. از طرفی، میله‌ی پیزوالکتریک که

۳. اعتبار‌سنجی و نتایج

۱.۳. دامنه‌ی محاسباتی و شرایط مرزی

در این بخش، سیستم برداشت انرژی پیزوالکتریک از طریق جریان در اطراف یک جسم بلاف، برای جمع‌آوری و تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به منظور انتخاب یک دامنه‌ی محاسباتی مناسب برای تنظیم دنباله و ارتعاش ناشی از گردابه، براساس پژوهش‌های پیشین، گستره‌ی طول کانال در جهت جریان $10D \leq x \leq D$ و در جهت عمود بر جریان $10D \leq y \leq -10D$ در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که از شکل ۲ مشخص است، فاصله‌ی مرز ورودی کانال تا مرکز استوانه $10D$ و از مرکز استوانه تا مرز خروجی $35D$ ، همچنین از دیواره پایین تا بالای کانال $20D$ انتخاب می‌گردد. [۱۹-۲۲]

ساختار سیستم برداشت انرژی و شرایط مرزی آن در شکل ۳ نشان داده شده است. یک استوانه در قسمت بالادست جریان به‌عنوان جسم بلاف قرار می‌گیرد. یک تیر پیزوالکتریک در امتداد خط مرکزی استوانه قرار داده می‌شود و به‌عنوان تیر یک‌سرگردار در جهت جریان ثابت می‌شود. برای به دست آوردن انرژی جنبشی بیشتر از گردابه‌ها، فاصله بین نوک آزاد تیر و سطح پشت استوانه طبق نتایج به‌دست آمده که در بخش‌های بعد ارائه می‌گردد و طبق نتایج پژوهش‌های صورت گرفته، $2/5D$ در نظر گرفته شده که در آن $D = 0.02m$ قطر استوانه است. الکترودها به سطوح لایه PVDF متصل می‌شوند که به مدار برداشت انرژی متصل است. [۲۳]

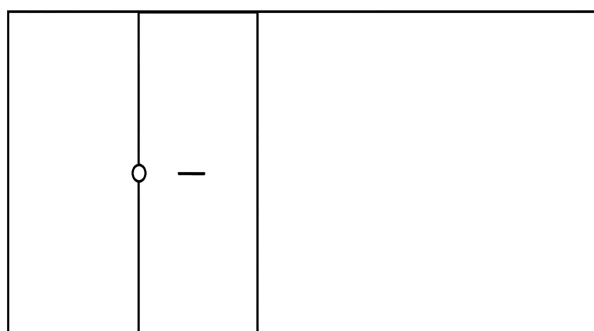
شرایط مرزی، برای مرز سمت چپ کانال شرط سرعت ورودی، مرز سمت راست شرط فشار خروجی، دیواره‌ها شرط متقارن و برای سطح استوانه شرط دیوار یا عدم لغزش تعیین شده است. تیر پشت استوانه یک تیر اولر - برنولی فرض شده است.

ابعاد تیرکشسان مورد نظر بصورت مستطیل شکل با طول $2 * D$ و عرض $D/10$ و لایه پیزوالکتریک به طول $2 * D$ و عرض $D/60$ در نظر گرفته شده است. خواص تیرکشسان با مدول یانگ $E = 5.6 [MPa]$ ، ضریب پواسون $\nu = 0.4$ و $\rho = 1000 [kg/m^3]$ تعریف شده‌اند. لایه پیزوالکتریک با $\rho = 1780 [kg/m^3]$ که بر روی تیرکشسان گسترده شده نیز PVDF در نظر گرفته می‌شود.

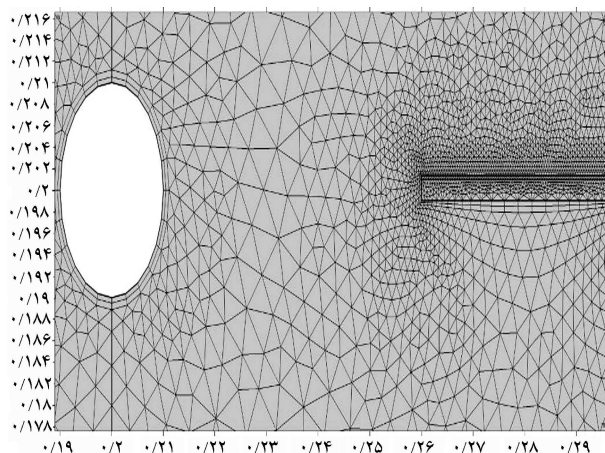
۲.۳. شبکه‌بندی

تولید شبکه مناسب و با کیفیت یکی از مهم‌ترین عواملی است که باید برای اطمینان از دقت شبیه‌سازی مورد توجه قرار بگیرد. هر چه شبکه‌بندی با جزئیات بیش‌تری ارائه شود، مسئله دقیق‌تر خواهد بود. در شماتیک دامنه محاسباتی در شکل ۴، در اطراف استوانه یک ناحیه مستطیل شکل مشخص گردیده که بیانگر ناحیه‌ی دارای شبکه متحرک است. با استفاده از شبکه متحرک و کد FSI، نیروی وارد شده از طرف سیال ورودی بر استوانه و تیرکشسان محاسبه می‌گردد. مدل المان محدود سیال - سازه در این پژوهش طبق شکل ۴ به دو بخش تقسیم می‌شود: ۱) ناحیه نزدیک به استوانه و سطح تیرکشسان که در آن گرادیان سرعت زیاد است و لذا شبکه‌ی ریزتر و چهارضلعی برای آن انتخاب شده تا دقت حل عددی را بهبود ببخشد. ۲) ناحیه بیرونی و دورتر از استوانه و تیر که از شبکه‌ی مثلثی درشت‌تری استفاده شده است. نحوه‌ی شبکه‌بندی در مرزهای مشترک اطراف استوانه، تیر و سیال در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

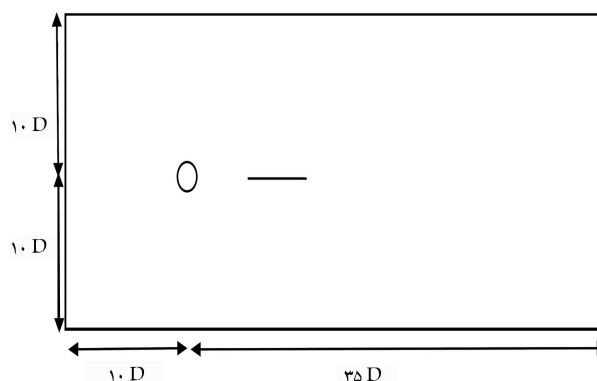
در این مطالعه، استقلال از شبکه برای هندسه‌ی استوانه ساکن و تیرکشسان بررسی می‌شود. در جدول ۱ ضریب پسا برای سه شبکه‌بندی مختلف مورد مقایسه



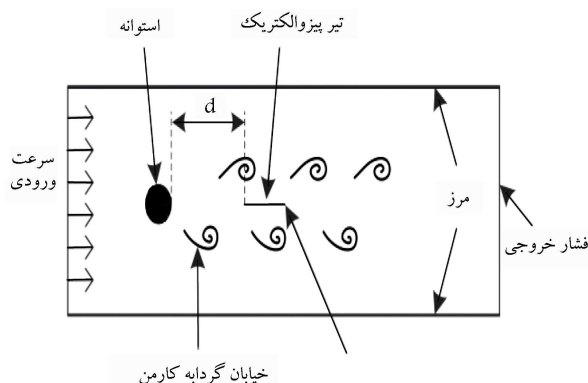
شکل ۴. نواحی مختلف شبکه (ناحیه وسط شامل شبکه متحرک می‌باشد).



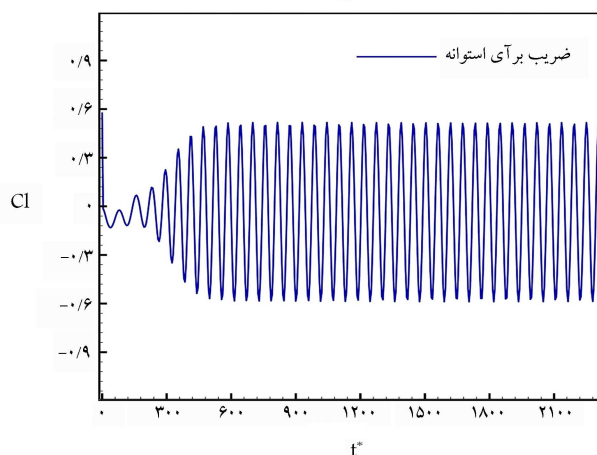
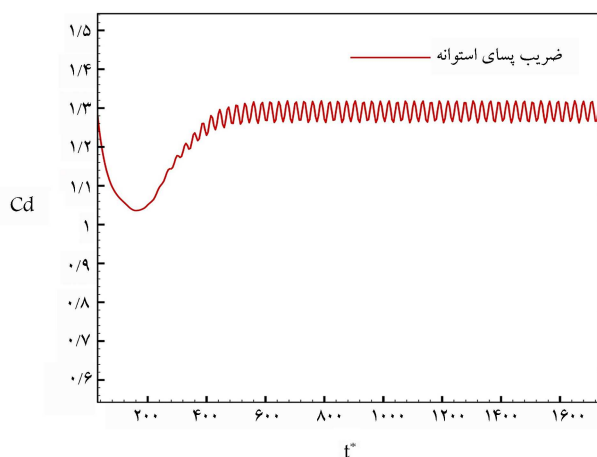
شکل ۵. جزئیات شبکه در مرز مشترک بین دیواره تیر، استوانه و حوزه سیال.



شکل ۲. دامنه‌ی محاسباتی.



شکل ۳. هندسه مورد بررسی و شرایط مرزی. [۲۳]



شکل ۷. تغییرات ضریب پسا (سمت راست) و ضریب برآ (سمت چپ) بر حسب زمان برای استوانه ساکن تنها در رینولدز ۲۰۰.

ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها می‌باشد. بکارگیری این روش‌ها موجب به تعویق افتادن تشکیل گردابه‌ها روی سازه اصلی می‌شود. همچنین، میزان نیروی برآ و پسا وارد شده بر سازه کاهش می‌یابد.

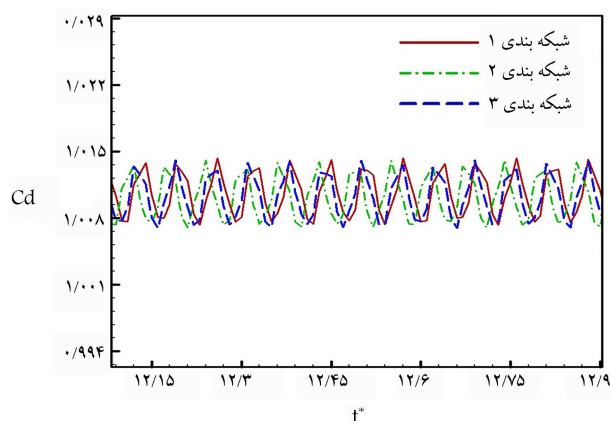
۱.۴.۳. استوانه ساکن در حضور تیرکشان

کاهش پسا روی استوانه با استفاده از تیر یک سرگردار، بصورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. پژوهش برای رینولدز ۲۰۰ و در حالت‌های مختلف: نحوه قرارگیری تیرکشان نسبت به استوانه، ابعاد مختلف تیر و ... بررسی شده است. در ابتدا، حالت استوانه‌ای بدون تیر با حالت استوانه در حضور تیر مقایسه می‌شود که از کاهش پسا استوانه در حضور تیر اطمینان حاصل شود. همان‌گونه که در شکل ۸ نشان داده شده است، ضریب پسا در حضور تیر به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. با حضور تیر در پشت سیلندر، فرایند ریزش گردابه در دنباله‌ی سیلندر سرکوب شده و در نتیجه فشار پشت سیلندر افزایش یافته که نتیجه آن کاهش ضریب پسا روی استوانه است. قابل ذکر است که استفاده از جداکننده ۱۵، یک روش شناخته شده در کاهش ضریب درگ استوانه می‌باشد. [۳۰، ۲۹]

ضرایب برآ نیز برای دو حالت استوانه‌ی تنها و استوانه با حضور تیر در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که ضرایب برآ بر حسب زمان برای استوانه تنها کاملاً متناوب و سینوسی می‌باشد. در حالیکه توزیع متغیرها برای استوانه با حضور تیر، بر روی دو سیکل متوالی کاملاً متناوب نیست، اما تناوب را بر روی چند سیکل متوالی می‌توان مشاهده کرد. بدین ترتیب، مفهوم جدیدی تحت عنوان رفتار

جدول ۱. بررسی هندسه با سه شبکه‌بندی متفاوت.

پارامترهای مورد بررسی	شبکه		
	۳	۲	۱
Cd max	۱/۰۱۴۰	۱/۰۱۴۰	۱/۰۱۴۱
Δt	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
کیفیت کوچکترین المان	۰/۳۹۹۷	۰/۴۰۲۵	۰/۲۹۱۵
متوسط کیفیت المان‌ها	۰/۸۸۸۹	۰/۸۷۱۸	۰/۸۶۳۴
تعداد سلول محاسباتی	۱۵۳۳۲	۱۰۴۷۸	۹۴۸۷



شکل ۶. ضرایب پسا در سه شبکه‌بندی مختلف.

جدول ۲. جدول ۲. اعتبارسنجی کار حاضر برای استوانه ساکن بدون حضور تیر کشسان در رینولدز ۲۰۰.

پارامتر	C_D	C_L
مطالعه حاضر	1 ± 0.318	± 0.517
مرجع [۲۴]	$1/19 \pm 0.042$	± 0.64
مرجع [۲۵]	$1/23 \pm 0.05$	± 0.65
مرجع [۲۶]	146 ± 0.04	± 0.7
مرجع [۲۷]	$1/46 \pm 0.05$	± 0.69
مرجع [۲۸]	$1/31$	± 0.431

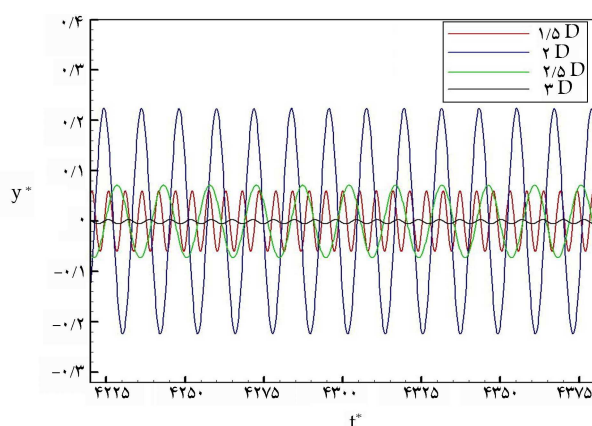
قرار گرفته است. طبق شکل ۶ و با توجه به نزدیک بودن نتایج شبکه‌بندی‌های مختلف، برای کاهش زمان محاسبات در این پژوهش از شبکه‌ی ۲ استفاده می‌گردد.

۳.۳. استوانه‌ی تنها

قبل از اضافه کردن تیر کشسان به مسئله، ضرایب برآ و پسا استوانه‌ی تنها در رینولدز ۲۰۰، تحت تأثیر نیروی جریان وارد شده بر استوانه اعتبارسنجی می‌شود. این نتایج در شکل ۷ نشان داده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بعد از گذشت چند ثانیه از آغاز حل، تغییرات ضرایب برآ و پسا بصورت تناوبی منظم می‌شوند. این نتیجه برای اطمینان از صحت حل با پژوهش‌های پیشین در رینولدز ۲۰۰، در جدول ۲ مورد مقایسه قرار گرفته و نتیجه‌ی قابل قبولی به‌دست آمده است.

۴.۳. تأثیر تیرکشان بر برداشت انرژی جریان حول استوانه

استفاده از استوانه کنترل‌ی و تیرهای یک‌سرگردار یکی از روش‌های تأثیرگذار بر کنترل



شکل ۱۰. جابجایی انتهای آزاد تیر در ابعاد مختلف تیر کشسان.

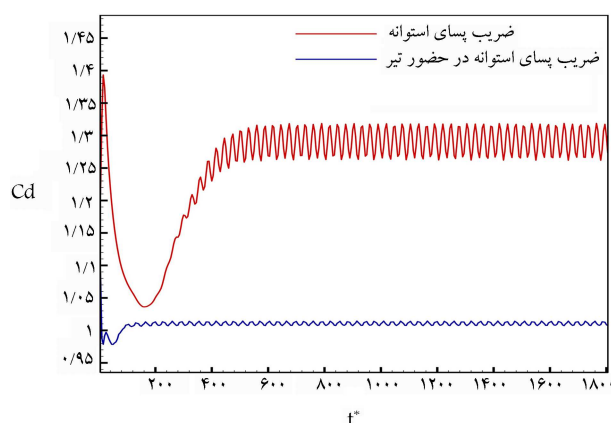
از بکارگیری تیر متفاوت بوده و بر مقدار انرژی برداشت شده از آن تمرکز می‌شود. بنابراین، جهت دستیابی به بهترین حالت برداشت انرژی می‌بایست پارامترهای طول، تعداد و نحوه قرارگیری تیر نسبت به استوانه که از عوامل تأثیرگذار بر این معیار است، مورد بهینه‌سازی قرار بگیرد.

۴. بهینه‌سازی هندسه‌های مختلف استوانه و تیر

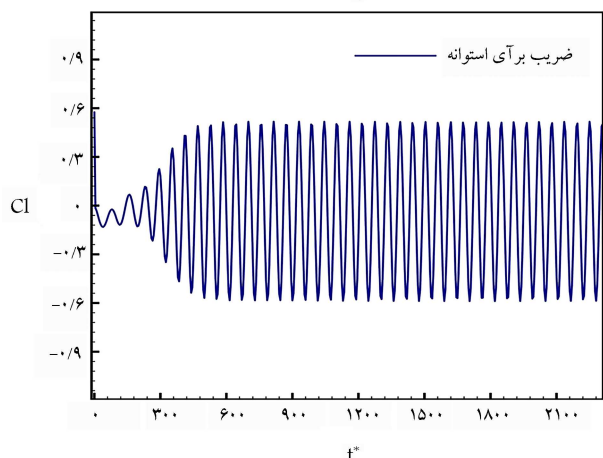
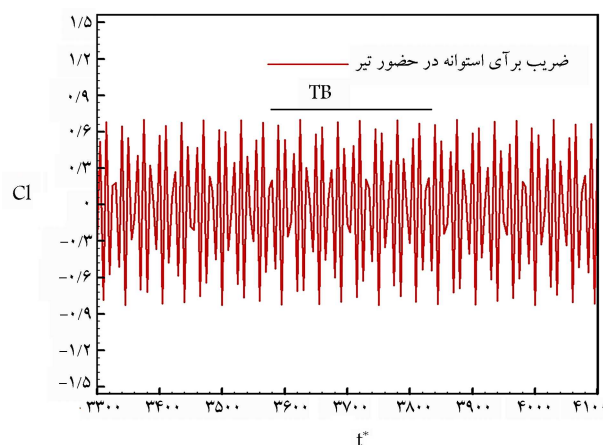
۴.۱. بهینه‌سازی طول تیر

مسئله حاضر، در مرحله اول برای طول تیر به عنوان متغیر مستقل بهینه‌سازی شده است. هدف این پژوهش، یافتن طولی از تیر است که تحت تأثیر جریان ورودی، متحمل جابجایی بیشتری شود و به دنبال این جابجایی، ولتاژ خروجی نیز بیشتر شود. با گذر جریان سیال از روی استوانه و با گذشت زمان، گردابه‌های منظمی از بالا و پایین استوانه جدا می‌شوند و به صورت الگوی تکرار شونده‌ی ادامه می‌یابد. در اثر برخورد گردابه‌های ایجاد شده با تیر کشسان، تیر دچار ارتعاش می‌شود و در پی این ارتعاشات لایه پیزوالکتریک نیروی مکانیکی ورودی را به نیروی الکتریکی تبدیل می‌کند. در این قسمت طول‌های مختلفی برای تیر در نظر گرفته شده و جابجایی تیر و ولتاژ خروجی مورد بررسی قرار گرفته است.

بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل ۱۰، بر اثر نیروی وارد شده از طرف جریان سیال، انتهای آزاد تیر کشسان با طول ۲D بیشترین جابجایی را داشته است. ضمن این که هدف در اینجا برداشت انرژی بیشتر می‌باشد. بنابراین، طولی از تیر مورد تأیید قرار خواهد گرفت که ولتاژ خروجی بیشتری داشته باشد. چنانچه از نتایج شکل ۱۱ مشخص است، ولتاژ خروجی از لایه پیزوالکتریک نصب شده بر تیر کشسان در حالتی که طول تیر ۲D باشد، حداکثر مقدار است. با افزایش طول تیر کشسان از یک مقدار به بعد، میرایی سیستم افزایش می‌یابد که این موضوع سبب کمتر شدن کرنش و در نتیجه کاهش توان خروجی می‌شود. طبق بررسی‌های انجام شده در این قسمت، طول تیر در شبیه‌سازی‌های انجام شده در ادامه‌ی پژوهش به اندازه ۲D در نظر گرفته می‌شود. به نظر می‌رسد شکستگی‌های موجود در نمودارهای ولتاژ به دلیل خطای عددی اتفاق می‌افتد. چنانچه گام زمانی حل مسئله کوچکتر انتخاب شود، جواب‌های هموارتری حاصل خواهد شد. البته قابل ذکر است که هرچند مقادیر ولتاژ بدست آمده دارای شکستگی هستند اما رفتار کلی جواب‌ها صحیح بوده و برداشت درستی از مسئله به ما می‌دهند.



شکل ۸. مقایسه‌ی ضریب پسا در حالت‌های استوانه تنها و استوانه با حضور تیر در رینولدز ۲۰۰.

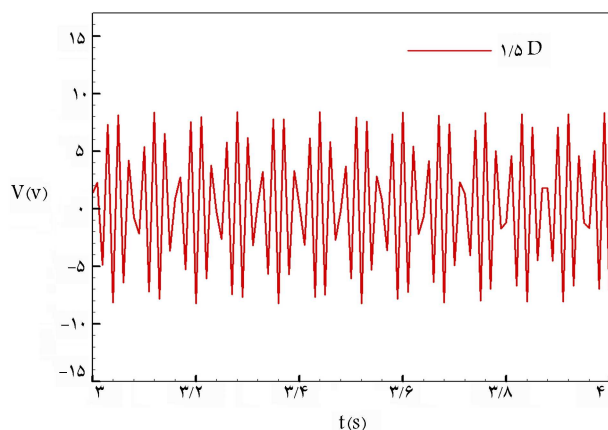


شکل ۹. مقایسه‌ی ضریب برآی استوانه در رینولدز ۲۰۰ در حالت استوانه با حضور تیر (سمت راست) و استوانه‌ی تنها (سمت چپ).

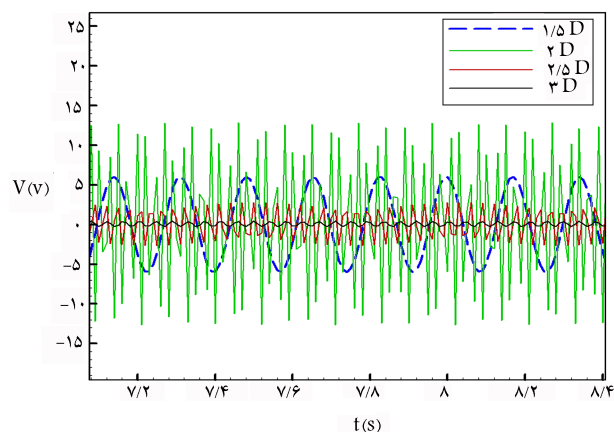
تنفسی^{۱۶} تعریف می‌شود و بدین معنی است که نوسانات سیگنال‌ها همیشه کاملاً سینوسی نیستند و یک رفتار شبه تناوبی دارند. دوره تناوب تنفسی در شکل ۹ مشخص شده است.

۳.۲.۴. برداشت انرژی از استوانه و تیر کشسان

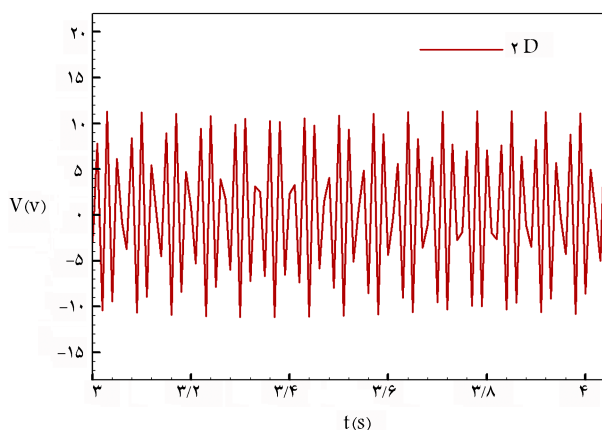
همان‌گونه که ذکر شد، استفاده از تیرهای یک‌سرگیردار یکی از روش‌های تأثیرگذار و غیرفعال جهت کنترل ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها می‌باشد، اما در این پژوهش، هدف



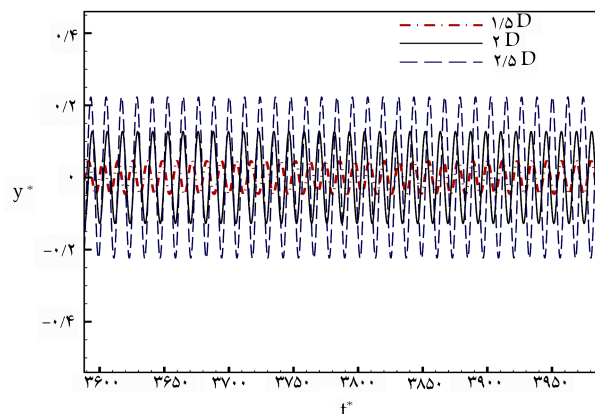
شکل ۱۳. ولتاژ خروجی تیر کشسان در مکان قرارگیری $1/5D$ از پشت استوانه.



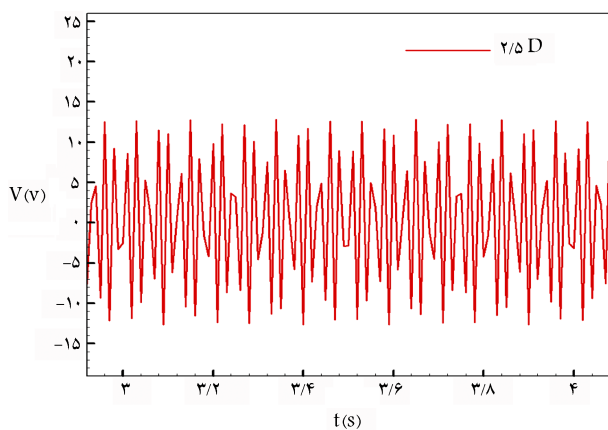
شکل ۱۱. ولتاژهای خروجی لایه پیزوالکتریک در ابعاد مختلف تیر کشسان.



شکل ۱۴. ولتاژ خروجی تیر کشسان در مکان قرارگیری $2D$ از پشت استوانه.



شکل ۱۲. جابجایی انتهای آزاد تیر کشسان در سه مکان مختلف نسبت به استوانه.



شکل ۱۵. ولتاژ خروجی تیر کشسان در مکان قرارگیری $2/5D$ از پشت استوانه.

هم برای تکیه‌گاه لایه‌ی پیزوالکتریک با هدف برداشت انرژی در نظر گرفته شده است، از دو نقطه‌ی سمت چپ و راست ثابت شده و در هر حالت نتایج حاصل بررسی گردید. جابجایی انتهای آزاد تیر کشسان که از دو نقطه متفاوت ثابت شده بود، در شکل ۱۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زمانی که تیر از سمت راست ثابت شده است جابجایی بیشتری از خود نشان داده است. ولتاژهای خروجی از دو هندسه ذکر شده با نقطه‌ی ثابت متفاوت نیز در شکل ۱۷ قابل مقایسه می‌باشند. همان‌گونه که از شکل ب مشخص

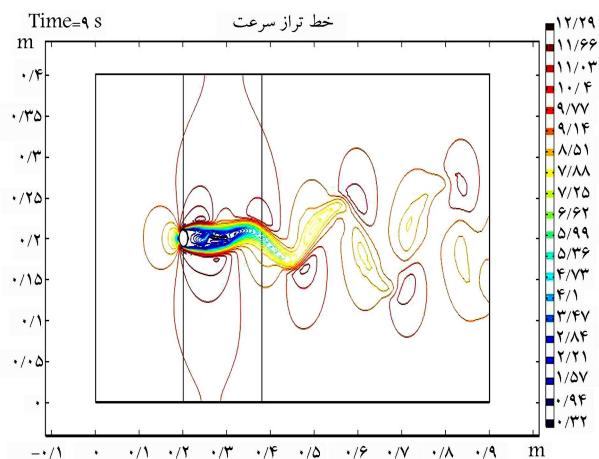
۲.۴. انتخاب مناسب‌ترین مکان قرارگیری تیر کشسان پشت استوانه

در اثر جریان سیال اطراف تیر و پیدایش خیابان گردابه فن‌کارمن، نیروهای وارد شده به تیر کشسان در مکان‌های مختلف قرارگیری آن متفاوت است. همچنین، میزان جابجایی انتهای آزاد تیر کشسان بر اثر نیروی سیال مقدارهای متفاوتی بدست می‌آید. طبق شکل ۱۲، این جابجایی در هندسه‌ی که فاصله‌ی پشت استوانه تا ابتدای تیر به اندازه‌ی $2/5D$ انتخاب شده است به حداکثر مقدار رسیده و شبیه‌سازی مسئله برای فاصله‌های $3D$ به بعد منجر به مقادیر غیرنوسانی و واگرایی سیستم شده که از هدف این پژوهش دور می‌گردد.

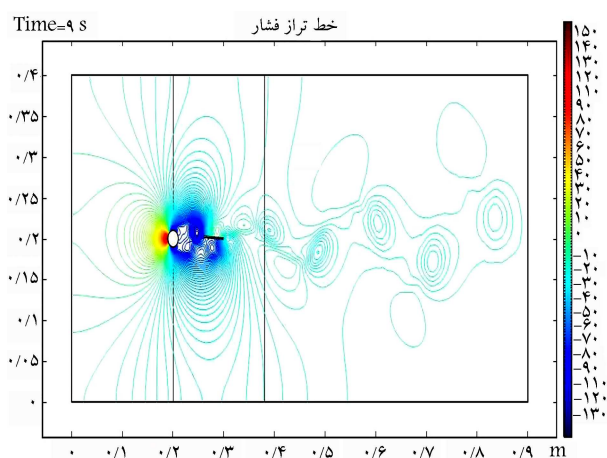
مقادیر مختلف جابجایی سبب ایجاد دامنه نوسانی متفاوتی در انتهای آزاد تیر می‌شود. به همین دلیل، مقادیر ولتاژ ایجاد شده نیز برای سه حالت فوق بررسی شد و نتایج حاصل از آن در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ به نمایش گذاشته شده است. براساس نتایج بدست آمده، حداکثر مقدار ولتاژ تولید شده نیز برای حالت تیر در فاصله‌ی $2/5D$ از پشت استوانه بوده است. همان‌طور که نتایج بررسی هندسه‌های مختلف نشان می‌دهد، مناسب‌ترین حالت برای تعبیه‌ی تیر کشسان، قرار دادن آن در فاصله‌ی $2/5D$ از پشت استوانه تا لبه ابتدای تیر می‌باشد. با توجه به نتایج بهینه‌سازی‌های انجام شده، در ادامه از اندازه‌ی تیر $2D$ و مکان قرارگیری $2/5D$ استفاده خواهد شد.

۳.۴. انتخاب نقطه مناسب برای گیردار کردن تیر کشسان

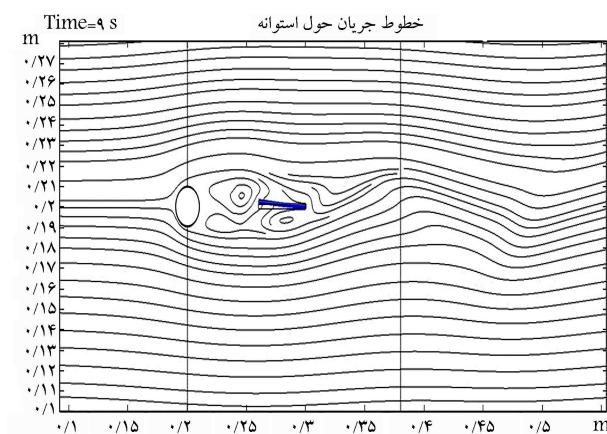
تیر کشسان که هم به‌عنوان کاهش‌دهنده‌ی نیروی برآ و پسای وارد بر استوانه و



شکل ۱۸. خط تراز سرعت حول استوانه و تشکیل خیابان گردابه فن کارمن در رینولدز 200 در حالت هندسه بهینه.

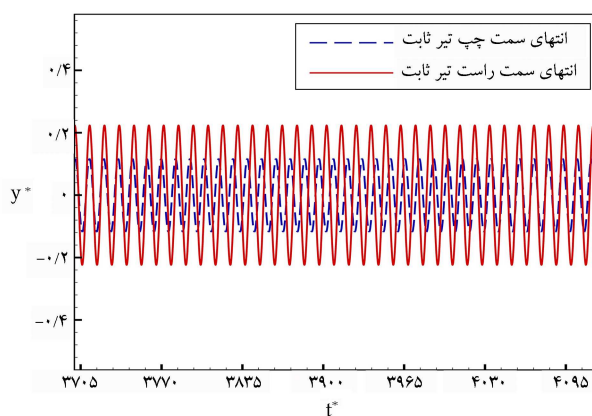


شکل ۱۹. خط تراز فشار حول استوانه و تشکیل خیابان گردابه فن کارمن در رینولدز 200 در حالت هندسه بهینه.

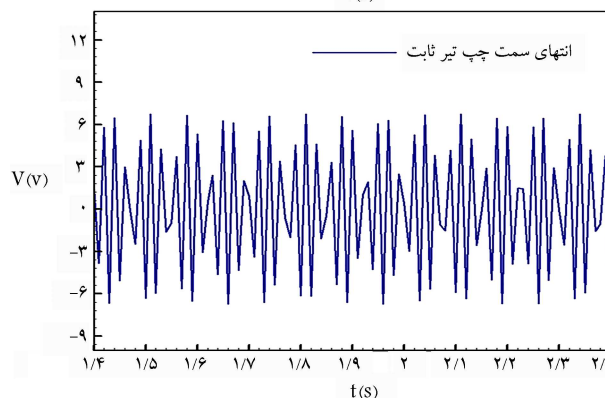
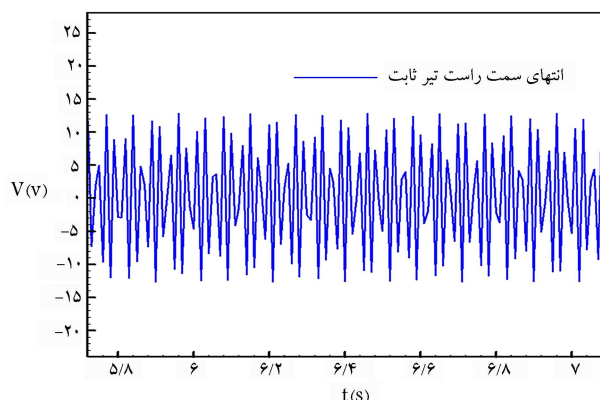


شکل ۲۰. خطوط جریان حول استوانه و تشکیل خیابان گردابه فن کارمن در رینولدز 200 در حالت هندسه بهینه.

است. مشاهده می‌شود که حضور تیر در پشت سیلندر مکانیزم ریزش گردابه را تغییر داده به نحوی که گردابه‌هایی که بلافاصله در دنباله‌ی سیلندر تشکیل شده‌اند (شکل ۲۰) را سرکوب کرده و اجازه تداوم و رها شدن آن‌ها در ادامه جریان را نمی‌دهد. این



شکل ۱۶. جابجایی انتهای آزاد تیر کشسان در دو حالت نقطه سمت چپ ثابت و نقطه سمت راست ثابت.



شکل ۱۷. مقایسه ولتاژ خروجی برای دو حالت تیر کشسان با نقاط ثابت متفاوت: سمت راست تیر ثابت باشد (شکل سمت راست) و سمت چپ تیر ثابت باشد (شکل سمت چپ).

است، خروجی ولتاژ در هندسه‌یی که سمت راست آن ثابت شده است بیشتر می‌باشد.

از مقایسه‌ی نتایج ارائه شده در این بخش می‌توان دریافت که با ثابت نگه داشتن انتهای سمت راست تیر، جابجایی انتهای آزاد آن و ولتاژ خروجی به مقادیر بیشتری می‌رسند. در شکل ۱۸ خط تراز سرعت، در شکل ۱۹ خط تراز فشار و در شکل ۲۰ خطوط جریان در حالت نهایی طول تیر $2D$ ، مکان قرارگیری تیر $2/5D$ و همچنین نقطه‌ی ثابت سمت راست تیر در رینولدز 200 ارائه گردیده است. تشکیل خیابان گردابه فن کارمن و چگونگی توزیع فشار و توزیع گردابه‌ها در این شکل‌ها بخوبی مشخص

ثابت با حضور و عدم حضور تیرکشان پرداخته شده است. در همین راستا، یک استوانه و تیرکشان در معرض جریان سیال قرار داده شده‌اند که تیرکشان با لایه‌ی پیزوالکتریک پوشیده شده است. به واسطه‌ی جریان سیال که به تیر برخورد می‌کند، انرژی مکانیکی جریان به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. ابتدا نتایج جریان اطراف استوانه‌ی ساکن تنها با توجه به نتایج پژوهش‌های پیشین صحت‌سنجی شد. سپس، پارامترهایی نظیر استقلال از شبکه و هندسه‌های مختلف همچون طول تیر، مکان قرارگیری تیر و نقطه‌ی ثابت تیر برای حالت استوانه ساکن بررسی شد و بهینه‌ترین حالت برای برداشت انرژی انتخاب گردید. در بررسی‌های صورت گرفته مشخص شد که بهینه‌ترین حالت ممکن در رینولدز 2×10^4 ، استوانه ساکن با هندسه‌ی شامل طول تیر $2D$ ، مکان قرارگیری تیر $2/5D$ و نقطه‌ی ثابت سمت راست تیر می‌باشد.

مسئله، همان‌طور که قبلاً هم توضیح داده شد، از طرفی باعث کاهش ضریب پسای استوانه شده و از طرفی نیروهای تناوبی تولید شده توسط برخورد گردابه‌ها به تیر باعث نوسان آن و در نتیجه برداشت انرژی می‌گردد. در واقع، خیابان گردابه تشکیل شده در میدان بعد از محل قرارگیری تیر قابل مشاهده است و بدین معنی است که ترکیب سیلندر و تیر همانند یک جسم بلافاصله عمل کرده و سبب تشکیل خیابان گردابه در دنباله می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به بررسی پدیده‌ی FSI و برداشت انرژی در جریان حول یک استوانه

پانویس‌ها

1. Energy Harvesting
2. Flow Induced Vibration (FIV)
3. Ferrybridge Power Stations
4. Tanvi
5. Wang and Ko
6. Lallrt
7. FLUID-SOLID INTERACTION (FSI)
8. Du Xiaozhen
9. Nan Wu
10. Bloff Body
11. Comsol Multiphysics
12. Finite Element
13. PDEs (Partial Differential Equations)
14. Karman Vortex Street
15. Splitter
16. Beating

منابع (References)

1. Rostami, A.B. and Armandei, M., 2017. Renewable energy harvesting by vortex-induced motions: Review and benchmarking of technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, pp.193-214. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.202>.
2. Thomas, J.P., Qidwai, M.A. and Kellogg, J.C. 2006. Energy scavenging for small-scale unmanned systems. *Journal of Power Sources*, 159(2), pp.1494-1509. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.12.084>.
3. Ehsanul Kabira., Pawan Kumar., Sandeep Kumar., Adejeji A. Adelodund. and Ki-Hyun Kime., 2018. Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, pp.894-900. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>.
4. Xiang, J., Yan, Y. and Li, D., 2014. Recent advance in nonlinear aeroelastic analysis and control of the aircraft. *Chinese Journal of Aeronautics*, 27(1), pp.12-22. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2013.12.009>.
5. Farshidiyanfar, A. and Naranjani, Y., 2011. Extraction of clean and unlimited energy from self-excited vibrations caused by vortices. *Mechanical Engineering*, 77, pp.73-85. [In Persian]. <https://sid.ir/paper/450706/fa>.
6. Dhakar, L., 2017. *Triboelectric Devices For Power Generation and Self-powered Sensing Applications*. Springer.
7. Ikeda, T., 1996. *Fundamentals of Piezoelectricity. Illustrated ed.* Oxford University Press.
8. Dikshit, T., Shrivastava, D., Gorey, A., Gupta, A., Parandkar, P. and Katiyal, S., 2010. Energy harvesting via piezoelectricity. *BVICAM's International Journal of Information Technology*, 2(2), pp.265-270.
9. Wang, D.A. and Ko, H.H., 2010. Piezoelectric energy harvesting from flow-induced vibration. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20(2), p.025019. DOI:10.1088/0960-1317/20/2/025019.
10. Lallart, M., Pruvost, S. and Guyomar, D., 2011. Electrostatic energy harvesting enhancement using variable equivalent permittivity. *Physics Letters A*, 375(45), pp.3921-3924. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2011.09.043>.
11. Bouzelata, Y., Kurt, E., Uzun, Y. and Chenni, R., 2018. Mitigation of high harmonicity and design of a battery charger for a new piezoelectric wind energy harvester. *Sensors and Actuators A: Physical*, 273, pp.72-83. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.02.023>.
12. Alaei, E., Afrasiab, H. and Dardel, M., 2020. Analytical and numerical fluid-structure interaction study of a microscale piezoelectric wind energy harvester. *Wind Energy*, 23(6), pp.1444-1460. <https://doi.org/10.1002/we.2502>.
13. Bungartz, H.J. and Schafer, M., 2006. Fluid-structure interaction: Modelling. *Simulation, Optimisation*, 53, Springer Science & Business Media.
14. Singh, K., Sadeghi, F., Russell, T., Lorenz, S., Peterson, W., Villarreal, J. and Jinmon, T., 2021. Fluid-structure interaction modeling of elastohydrodynamically lubricated line contacts. *Journal of Tribology*, 143(9). <https://doi.org/10.1115/1.4049260>.

15. Du, X., Zhao, Y., Liu, G., Zheng, M., Wang, Y., and Yu, H., 2020. Enhancement of the piezoelectric cantilever beam performance via vortex-induced vibration to harvest ocean wave energy. *Shock and Vibration*, 2020, pp.1-11. <https://doi.org/10.1155/2020/8858529>.
16. Wu, N., Bao, B. and Wang, Q., 2021. Review on engineering structural designs for efficient piezoelectric energy harvesting to obtain high power output. *Engineering Structures*, 235, p.112068. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112068>.
17. Lee, G., Lee, D., Park, J., Jang, Y., Kim, M. and Rho, J., 2022. Piezoelectric energy harvesting using mechanical metamaterials and phononic crystals. *Communications Physics*, 5(1), p.94. <http://dx.doi.org/10.1038/s42005-022-00869-4>.
18. Zhang, L., Zhang, F., Qin, Z., Han, Q., Wang, T. and Chu, F., 2020. Piezoelectric energy harvester for rolling bearings with capability of self-powered condition monitoring. *Energy*, 238, p.121770. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121770>.
19. Zhu, H. and wang, K., 2019. Wake adjustment and vortex-induced vibration of a circular cylinder with a C-shaped plate at a low Reynolds number of 100, *Physics of Fluids*, 31(10). <https://doi.org/10.1063/1.5124818>.
20. Esmaeili, M., Rabiee, A.H. and Bayandar, P., 2020. Numerical simulation of fluid-structure interaction and vortex induced vibration of the circular and truncated cylinders. *Journal of Hydraulics*. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2020.219014.1438>.
21. Wang, J., Zhao, W., Su, Z., Zhang, G., Li, P. and Yurchenko, D., 2020. Enhancing vortex-induced vibrations of a cylinder with rod attachments for hydrokinetic power generation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106912>.
22. Amiraslarpour, M., Ghazanfarian, J. and S.E. Razavi., 2017. Drag suppression for 2D oscillating cylinder with various arrangement of splitters at $Re = 100$: A high-amplitude study with OpenFOAM. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 164, pp.128-137. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.02.018>.
23. Pan, F., Xu, Z., Jin, L., Pan, P. and Gao, X., 2017. Designed simulation and experiment of a piezoelectric energy harvesting system based on vortex-induced vibration. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(4), pp.3890-3897. <https://doi.org/10.1109/tia.2017.2687401>.
24. Belov, A., Martinelli, L. and Jameson, A., 1995. A new implicit algorithm with multigrid for unsteady incompressible flow calculations. In 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.
25. Rogers, S.E. and Kwak, D., 1990. Upwind differencing scheme for the time-accurate incompressible Navier-Stokes equations. *AIAA Journal*, 28(2), pp.253-262. <https://doi.org/10.2514/3.10382>.
26. Lecoint, Y. and Piquet, J., 1984. On the use of several compact methods for the study of unsteady incompressible viscous flow round a circular cylinder. *Computers & Fluids*, 12(4), 255-280. [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(84\)90009-4](https://doi.org/10.1016/0045-7930(84)90009-4).
27. Rosenfeld, M., Kwak, D. and Vinokur, M., 1988. A solution method for the unsteady incompressible Navier-Stokes equations in generalized coordinate systems. In 26th Aerospace Sciences Meeting.
28. Ajiliyan Momtaz, A. and Farshidiyanfar, A., 2012. Numerical simulation of the effect of using a control object on the system response in the lock-in range in the vibrations induced by the vortex flow current behind a cylinder placed on the elastic bed. *2nd International Conference on Acoustics and Vibration*, Sharif University of Technology, Tehran, Iran [In Persian].
29. Hwang, J. Y. and Yang, K.S., 2007. Drag reduction on a circular cylinder using dual detached splitter plates. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95(7), pp.551-564. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2006.11.003>.
30. Ogunremi, A. and Sumner, D., 2015. The effect of a splitter plate on the flow around a finite prism. *Journal of Fluids and Structures*, 59, pp.1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2015.09.001>.