

# تحلیل و بهینه‌سازی هندسی تیرهای ارتعاش‌پذیر تحت اثر جریان سیال به منظور بهینه‌سازی برداشت انرژی

کارشناسی ارشد، گروه تبدیل انرژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، hadighane242@gmail.com  
 کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، asadipoorali82@gmail.com  
 استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، r\_fathi@tabrizu.ac.ir  
 استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، razavi@tabrizu.ac.ir  
 استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، morteza@tabrizu.ac.ir

**هادی قانع**  
**علی اسعدی پور**  
**رضا فتحی\***  
**سید اسماعیل رضوی**  
**مرتضی صادقی**

## چکیده

امروزه برداشت انرژی از ارتعاشات ناشی از سیال یکی از مباحث مهم در مهندسی مکانیک است. با توجه به اینکه با افزایش ارتعاشات تیر، مقدار برداشت انرژی افزایش می‌یابد، لذا هدف اصلی در این مقاله بررسی و به دست آوردن ابعاد تیر به گونه‌ای است که انتهای تیر بیشترین جابجایی را داشته باشد. همچنین باید در نظر داشت این جابجایی نباید به اندازه‌ای باشد که باعث شکستن تیر شود. بدین منظور، تیر باید در ناحیه تشدید نوسان کند ولی تعدادی از مقادیر به دست آمده برای ابعاد تیر در محدوده مناسب طراحی نیستند؛ پس حذف می‌شوند. لازم به توضیح است که برای دستیابی به ابعاد بهینه ابتدا الگوریتمی با استفاده از نرم افزار MATLAB نوشته شده است و سپس با کوپل نرم افزار مذکور با نرم افزار COMSOL، این ابعاد استخراج گردیده است. الگوریتم مذکور محاسبات را برای سطح مقطع‌های مستطیلی و بیضی انجام داده است. نهایتاً نتیجه این مطالعه به دست آوردن محدوده مناسب ابعاد تیر هم از لحاظ افزایش ارتعاش و هم از لحاظ جلوگیری از شکستن تیر می‌باشد که به صورت نمودارهایی ارائه گردیده است.

**واژه‌های کلیدی:** برداشت انرژی، تعامل سازه-سیال، بهینه‌سازی، مطالعه محاسباتی، ارتعاش ناشی از گردابه، مدل‌سازی عددی.

## Analysis and Geometric Optimization of Vibrating Beams under Fluid Flow to Maximize Energy Harvesting

**H. Ghane**  
**A. Asadipour**  
**R. Fathi**  
**S. E. Razavi**  
**M. Homayoun Sadeghi**

Department of Energy Conversion, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran  
 Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran  
 Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran  
 Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran  
 Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

### Abstract

Energy harvesting from flow-induced vibrations (FIV) using piezoelectric transducers is a significant focus in mechanical engineering. Maximizing the energy harvesting from FIV requires amplifying the vibration of a beam. The primary objective of this study is to determine the dimensions of a beam to maximize its displacement at the tip. This can be achieved by ensuring that the natural frequency of the beam aligns with the frequency of the force applied to it from the fluid side. It is essential to prevent the displacement from causing the beam to break, so the beam should oscillate within the resonance range. Any obtained dimensions for the beam that are not within the appropriate design range should be omitted. To obtain optimized dimensions, an algorithm was developed in MATLAB. Subsequently, by coupling MATLAB and COMSOL Multiphysics, these dimensions were calculated. The algorithm has performed calculations for regular rectangular and elliptical cross-sections. Ultimately, the article specifies a range of suitable beam dimensions that maximize vibration while preventing beam breakage, presented in the form of multiple figures.

**Keywords:** Energy harvesting; Fluid-Solid interaction; Optimization; Computational investigation; Vortex-Induced vibration, Numerical modeling.

و تسریع استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید برق تعیین کرده اند [۲، ۳]. انرژی‌های باد و جریان جزر و مدی دارای پتانسیل عظیمی به عنوان منابع انرژی پایدار هستند و می‌توانند به طور قابل توجهی به سیستم انرژی جهانی کمک کنند [۴، ۵]. در محیط‌های دریایی، سازه‌هایی مانند استوانه‌ها ارتعاشات ناشی از جریان را به دلیل تعامل سازه-سیال تجربه می‌کنند. این ارتعاشات

### ۱- مقدمه

انرژی به عنوان پایه‌ای حیاتی برای پیشرفت اقتصادی و اجتماعی عمل می‌کند. در سال‌های اخیر، کسری انرژی جهانی و تشدید نگرانی‌های زیست‌محیطی، دولت‌ها را بر آن داشته است که توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر را در اولویت قرار دهند و هدفشان جایگزینی منابع انرژی تجدیدناپذیری است که مقدارشان همواره رو به کاهش است [۱]. بیشتر کشورها اهدافی را برای کاهش مصرف سوخت فسیلی

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: r\_fathi@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۴/۰۲/۰۳

تاریخ پذیرش: ۰۴/۱۰/۲۹

شامل ارتعاش ناشی از گردابه، ارتعاش ناشی از ویک<sup>۱</sup> و فلاتر<sup>۲</sup> می‌شود [۶-۹]. پدیده ارتعاش ناشی از گردابه برای اولین بار توسط لئوناردو داوینچی در سال ۱۵۰۴ مشاهده شد و مکانیزم ریزش گرداب توسط لرد رابلی در سال ۱۸۷۸ توصیف شد. با وجود قدمت آشنایی با این پدیده‌ها، به‌جز در سال‌های اخیر، تلاش زیادی برای مهار و استفاده از آن‌ها برای تولید انرژی نشده بود [۹]. انواع سازه‌ها که در معرض جریان سیال قرار می‌گیرند ممکن است ارتعاش ناشی از گردابه را تجربه کنند؛ مانند دودکش‌ها، کابل‌های معلق برای پل‌ها، خطوط انتقال برق در هوا، لوله‌ها، کابل‌های بکسل، و خطوط پهلوگیری در آب. در برخی موارد، این نوع ارتعاش باید در طراحی آنها به‌عنوان یک علت بالقوه خرابی ناشی از خستگی در نظر گرفته شود، مانند سازه‌های دریایی [۱۰]. به‌همین علت در این مطالعه نه تنها تشدید تیر برای افزایش استخراج انرژی مورد انتظار بوده است، بلکه جلوگیری از خرابی تیر نیز مدنظر قرار گرفته است.

در مطالعات سابق انجام گرفته توسط محققین تمرکز بیشتر بر روی فرکانس گردابه‌ها، کنترل ارتعاش ناشی از گردابه‌ها برای جلوگیری از تشدید و خرابی حداثی، و مطالعه ارتعاش خود استوانه و اجسام غیر باریک بوده است [۱۱-۱۶]. ثابت شده است که جریان اطراف یک استوانه دایروی ثابت تحت تأثیر تعدادی پارامتر از جمله عدد رینولدز، زبری سطح، سطح آشفتگی جریان آزاد و غیره قرار می‌گیرد، و اگرچه به‌طور دقیق مطالعه نشده است، به نظر می‌رسد که پاسخ یک سیلندر انعطاف‌پذیر به‌همین پارامترها حساس باشد [۱۱]. برنیتساس و همکاران [۱۷] یک مبدل انرژی جدید به‌نام VIVACE برای تولید انرژی پاک و تجدیدپذیر از جریان‌های آقیانوس و رود طراحی کرده‌اند. این دستگاه الزامات تعیین‌شده توسط کمیسیون انرژی را برآورده می‌کند، چگالی انرژی بالایی دارد و مقیاس‌پذیر است. طراحی این وسیله امکان استفاده از آن را برای طیف وسیعی از کاربردها فراهم می‌کند. در مقاله‌ای دیگر مطالعه‌ای بر روی ریزش گرداب لایه‌ای<sup>۳</sup> و جریان ویک در اطراف یک استوانه دایره‌ای جامد پیچیده شده در مواد متخلخل برای کنترل ریزش گرداب و نیروی پسا مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که لفاف متخلخل در مقایسه با یک استوانه جامد به‌طور قابل توجهی باعث کاهش نیروی پسا و نوسانات می‌شود. این مطالعه همچنین تأثیر ضخامت لایه متخلخل و نفوذپذیری متوسط را بر روی عدد استروهال و ضریب پسا تجزیه و تحلیل کرده است [۱۳]. ولی این مطالعه برای کاهش نوسانات نبوده و بلعکس، برای افزایش نوسان جهت به‌صرفه شدن این روش در استخراج انرژی است. برخی دیگر از مطالعات به مشخصات پیزوالکتریکی استخراج انرژی از ارتعاشات ناشی از گردابه‌های یک جسم غیرباریک پرداخته‌اند [۱۷، ۱۸]. مقاله مذکور به بررسی برداشت انرژی از یک استوانه دایروی می‌پردازد که تحت ارتعاشات ناشی از گرداب با استفاده از مبدل پیزوالکتریک قرار می‌گیرد. این شامل شبیه‌سازی عددی است که اعداد مختلف رینولدز و مقاومت‌های بار را پوشش می‌دهد. همچنین این مقاله منطقه سنکرون‌سازی را با افزایش مقاومت بار و مقدار بهینه

مقاومت بار برای برداشت حداکثر توان مشخص می‌کند. در این مطالعه ابتدا ابعاد تیر الاستیک متصل به‌پشت یک استوانه صلب ثابت در جریان سیال لزج طوری تعیین می‌گردد که نه‌تنها تیر دارای بیشترین ارتعاشات باشد، بلکه ابعاد تیر به‌گونه‌ای باشد که تیر در مدت زمان کوتاه دچار خرابی نگردد. همچنین، ابعاد این تیر الاستیک باید به گونه‌ای نیز باشد که خیلی بزرگ نبوده و قابلیت اجرا داشته باشد. بدین منظور، قسمت‌هایی از این مطالعه به کمک نرم‌افزارهای COMSOL و MATLAB انجام شده و دقت حل عددی نیز صحت‌گذاری گردیده است. در نهایت یک بازه به‌عنوان ابعاد بهینه برای تیر مورد نظر معرفی گردیده است تا بدین وسیله بتوان بالاترین میزان انرژی را با کمترین خرابی از جریان سیال به‌دست آورد.

## ۲- مبانی و روش‌ها

مدل فیزیکی هندسه شبیه‌سازی شده در شکل ۱ قابل مشاهده است. در این شکل، طول کانال ۲/۵ متر و عرض کانال ۰/۴۱ متر است. استوانه‌ای به مرکز ۰/۲ متر از یک مرز، ۰/۲۱ متر از مرز دیگر، و از ابتدای کانال به شعاع ۵ سانتی متر قرار دارد که به پشت آن یک تیر الاستیک به ضخامت ۲ سانتی متر متصل است. هدف بررسی تأثیر طول تیر مذکور بر ارتعاشات آن در اثر نیروی وارده از طرف سیال می‌باشد. در دیواره‌ها و همچنین روی سطح تیر الاستیک شرط عدم لغزش اعمال می‌گردد. در خروجی سیال به فشار اتمسفر تخلیه می‌شود. در ورودی سیال از رابطه حاصل از ضرب تابع زبر در یک تابع شیب دارای مشتق دوم پیوسته (برای افزایش تدریجی سرعت سیال از صفر تا مقدار مورد نظر طی ۱ ثانیه) استفاده شده است:

$$V(y) = 71.386y(0.41 - y) \quad (1)$$

که در آن  $V$  نشانگر سرعت، و  $y$  نشانگر فاصله از مرز پایین است. برای فاز جامد که شامل تیر الاستیک است از دو شرط مرزی استفاده شده است. یک مورد در اتصال به استوانه است که آن قسمت کاملاً ثابت بوده و مانند تیر یک سر گیردار است. مورد بعدی یک نیروی متمرکز است که در ابتدای شبیه‌سازی به انتهای تیر وارد می‌کنیم تا هر چه سریع‌تر ارتعاش تیر شکل پایدار خود را بگیرد.



شکل ۱- هندسه شبیه‌سازی شده

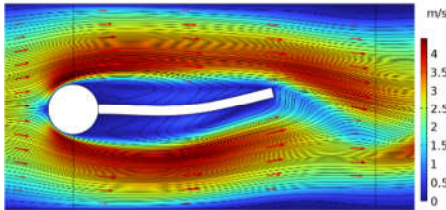
جنس سیال گلیسرین می‌باشد تا با کنترل عدد رینولدز از عبور سریع رژیم جریان از منطقه مسیر تاوهای فون کارمن<sup>۴</sup> جلوگیری شود. چگالی سیال مذکور  $1000 \text{ kg/m}^3$  و لزجت دینامیکی آن  $1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  تنظیم گردیده است. جنس تیر الاستیک نیز از پلی‌پروپیلن می‌باشد و دارای چگالی  $1000 \text{ kg/m}^3$ ، مدول یانگ  $56 \text{ MPa}$ ، و نسبت پواسون  $0.4$  می‌باشد.

چون جریان لایه‌ای، ناپایا، تراکم ناپذیر، و دو بعدی است و کانال

<sup>1</sup> wake  
<sup>2</sup> flutter  
<sup>3</sup> laminar

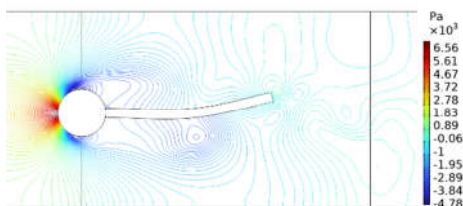
<sup>4</sup> Karman Vortex Street

است؛ چرا که این جهت بردار سرعت است که نشانگر جدایش و ایجاد گردابه بوده و باعث افت فشار نیز می‌شود. شکل ۳ کانتور سرعت را در ثانیه پنجم شبیه‌سازی برای سری استوانه‌ای و تیر مقطع مستطیلی به طول ۰٫۳۵ متر نشان می‌دهد. در پشت استوانه قسمت کم سرعت جریان سیال قرار دارد که باعث ایجاد منطقه پرفشار شده و نهایتاً جدایش و گردابه حاصل می‌شود. این گردابه‌ها با حرکت به سمت پایین دست جریان بر روی تیر باعث عدم تعادل نیرویی تیر در اثر تفاوت در فشار دو طرف آن می‌شوند که آن نیز باعث حرکت نوسانی تیر می‌گردد. سه عدد از گردابه‌های مذکور در شکل قابل مشاهده هستند.



شکل ۳- کانتور سرعت و خطوط جریان در نزدیکی فاز جامد در ثانیه پنجم مربوط به اولین چپش

در شکل ۴ می‌توان کانتورهای فشار را در ثانیه پنجم شبیه‌سازی در اطراف فاز جامد مشاهده کرد. این کانتورها کاملاً سازگار با فیزیک مسئله هستند. برای مثال در قسمت پیشانی استوانه می‌توان نقطه سکون را که دارای بیشترین فشار سیال است مشاهده کرد. از طرفی فشار جریان در اطراف تیر هماهنگ با گردابه‌های ایجاد شده است. همچنین باید در نظر داشت که مقادیر فشار در کنار شکل مقادیر فشار مطلق نبوده و فشار نسبی هستند.



شکل ۴- کانتور فشار و خطوط جریان در نزدیکی فاز جامد در ثانیه پنجم مربوط به اولین چپش

در اثر نیروهای برآ و پسا که به تیر الاستیک وارد می‌شود، این تیر شروع به ارتعاش می‌کند. این ارتعاش به شکل جابجایی تیر نمود پیدا می‌کند.

با استفاده از روش مورد اشاره، نتایج مربوط به ضخامت تیر به‌ازای طول‌های مختلف آن استخراج گردیده و در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل خط آبی مربوط به سطح مقطع بیضی است که  $b$  برابر با نصف قطر کوچک بیضی بوده و خط قرمز نیز مربوط به سطح مقطع مستطیلی است و  $h$  برابر ضخامت آن می‌باشد.

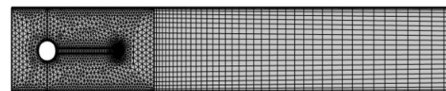
در صفحه افق می‌باشد (از شتاب جاذبه می‌توان صرف نظر کرد) معادلات حاکم پیوستگی (۲)، مومنتم (۳)، و حرکت فاز جامد (۴) به شرح زیر می‌باشد [۱۸].

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} - \mathbf{V}_m) \cdot \nabla \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho_f} \nabla p + \nu_f \nabla^2 \mathbf{V} \quad (3)$$

$$\rho_s \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{d}_s}{\partial t^2} - \nabla \sigma_s = F_s \quad (4)$$

در روابط فوق  $t$  زمان،  $\mathbf{V}$  بردار سرعت،  $\mathbf{V}_m$  بردار سرعت حرکت شبکه،  $\rho_f$  چگالی سیال،  $p$  فشار سیال،  $\nu_f$  لزجت سینماتیکی سیال،  $\rho_s$  چگالی فاز جامد،  $\mathbf{d}_s$  بردار جابجایی تیر الاستیک،  $\sigma_s$  تانسور تنش کوشی، و  $F_s$  نیروی حجمی وارد بر تیر است. شبکه محاسباتی مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده‌است.



شکل ۲- شبکه محاسباتی مورد استفاده

برای راستی آزمایی چپش اولیه مطالعه صورت گرفته، از داده‌های تجربیات سابق برای مقایسه استفاده شده و نتیجه مقایسه در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- اعتبار سنجی جابجایی بیشینه انتهای تیر در راستای  $y$  با

مرجع [۱۹]

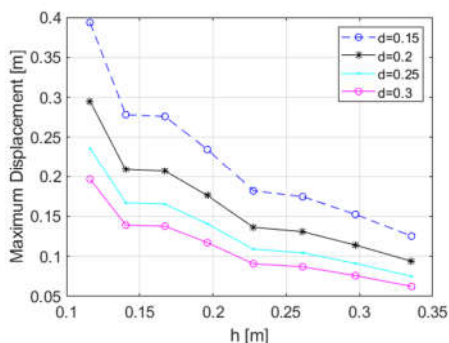
جابجایی بیشینه انتهای تیر در راستای $y$	
0.0365 [m]	پژوهش حاضر
0.03572 [m]	تورک و همکاران [۱۹]
2.18%	خطا

در ادامه با نوشتن یک الگوریتم در MATLAB و ایجاد کوپلینگ بین COMSOL و MATLAB، ابعاد تیر مدنظر در COMSOL تغییر کرده و مقدار جابجایی استخراج می‌گردد. با تغییر ابعاد تیر، فرکانس طبیعی سیستم تغییر کرده و مقدار جابجایی آن نیز تغییر می‌کند. این روال تا به دست آوردن بیشینه جابجایی برای انتهای تیر ادامه پیدا می‌کند. الگوریتم این محاسبات را برای سطح مقطع‌های مستطیلی و بیضی انجام می‌دهد. لازم به توضیح است که پس از به دست آوردن بیشینه جابجایی‌ها، محدودیت‌هایی برای بدست آوردن ناحیه بهینه طراحی اعمال شده است. با اعمال این محدودیت‌ها، محدوده مجاز طراحی بدست می‌آید.

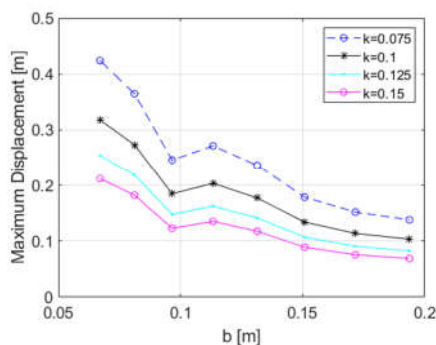
### ۳- نتایج

اولین موردی که در این پژوهش باید بررسی شود کانتور سرعت

آن جابجایی امن نیست و حذف گردیده است. با انجام مراحل مذکور، نمودارهای موجود در شکل‌های ۷ و ۸ به دست می‌آیند که محدوده مجاز طراحی در آن‌ها به ترتیب به‌ازای ضخامت مستطیل ( $h$ ) و عرض مستطیل ( $d$ ) و نصف قطر کوچک بیضی ( $b$ ) و نصف قطر بزرگ بیضی ( $k$ ) قابل مشاهده است.

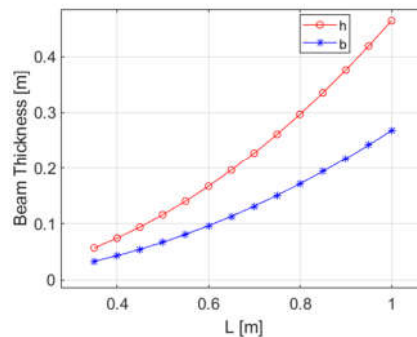


شکل ۷- بیشینه جابجایی به ازای ضخامت مستطیل ( $h$ ) و عرض مستطیل ( $d$ )



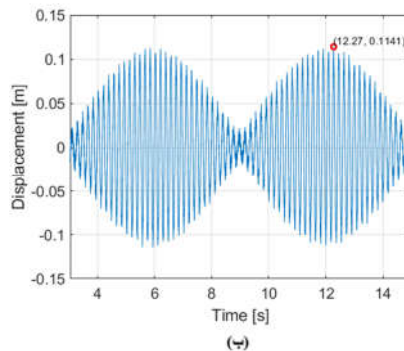
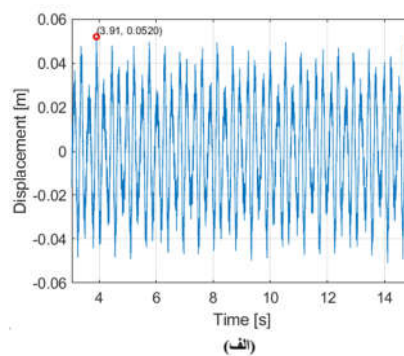
شکل ۸- بیشینه جابجایی به ازای نصف قطر کوچک بیضی ( $b$ ) و نصف قطر بزرگ تیر ( $k$ )

در ادامه برای درک درست نیروهای وارد از سمت سیال به تیر تحلیل گردابه‌های رها شده در جریان انجام پذیرفت. در بازه زمانی ۲ تا ۵ ثانیه، اندرکنش هم‌زمان دیواره‌های محصورکننده کانال و تیر انعطاف‌پذیر متصل به سیلندر، منجر به شکل‌گیری رژیم جریان پیچیده و به‌شدت وابسته به پدیده سیال-سازه می‌گردد. در مراحل اولیه، الگوی جریان نسبتاً متقارن است؛ اما از حدود ۲/۹ ثانیه به بعد، ارتعاش تیر انعطاف‌پذیر موجب شکست تقارن و انحراف محور ناحیه ویک می‌شود. دیواره‌های بالا و پایین کانال با محدودسازی گسترش عرضی گردابه‌ها، باعث فشردگی خیابان کارمن شده و در نتیجه، عدد اشتروهل را به‌طور محسوس افزایش می‌دهند. این افزایش عمدتاً ناشی از تقویت مکانیسم بازخورد گردابه در محیط محصور است که فرکانس ریزش گردابه را بالا می‌برد. در حدود ۳/۶ ثانیه، گردابه‌های ریخته‌شده به‌صورت غیرفاز ظاهر می‌شوند که نشانه‌ای آشکار از تشدید اندرکنش فعال سیال-سازه است. در بازه ۴ تا ۵ ثانیه، میدان گردابه به رژیم شبه‌تناوبی وارد می‌شود؛ حالتی که از برهم‌کنش هم‌زمان گردابه‌های ناشی از سیلندر استوانه‌ای و نوسان‌های تیر انعطاف‌پذیر نشأت می‌گیرد.



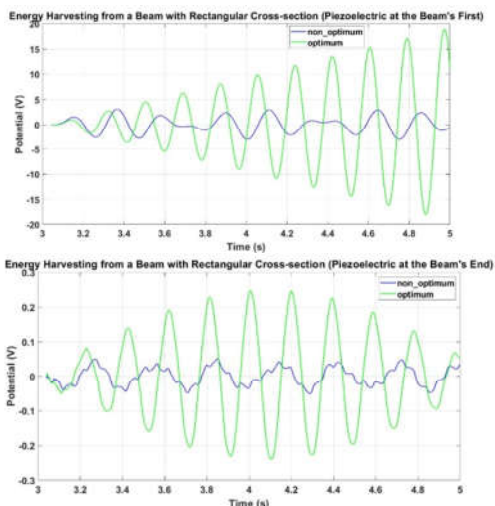
شکل ۵- نمودار طول-ضخامت تیر جهت حصول بیشینه ارتعاش در انتهای تیر

در ادامه برای اطمینان از نتایج، پاسخ ارتعاشی انتهای تیر به‌ازای دو حالت بهینه و غیربهینه استخراج گردید. همانطور که از شکل ۶ مشاهده می‌شود با انتخاب ضخامت تیر در محدوده بهینه (شکل ۶-ب) میزان ارتعاش تیر نسبت به ابعاد غیر بهینه (شکل ۶-الف) بیشتر است. نکته جالب دیگر این است که در حالت بهینه با توجه به پاسخ ارتعاشی تیر دچار تشدید شده است.

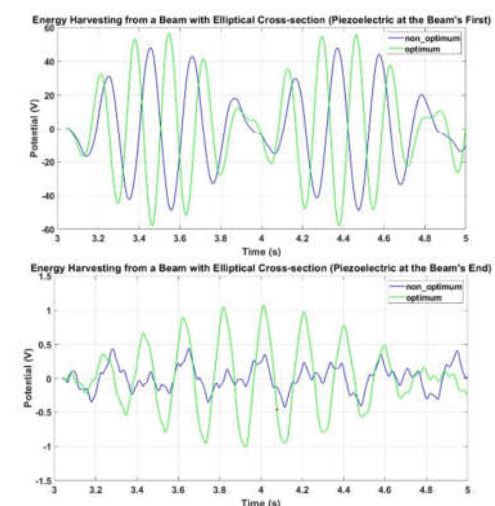


شکل ۶- جابجایی در دو حالت (الف) غیر بهینه و (ب) بهینه

پس از استخراج پارامترهای بهینه لازم است برای جلوگیری از خرابی تیر برخی از مقادیر حذف گردد. بدین منظور دو مورد از خطوط را که نشان دهنده بزرگترین جابجایی‌ها هستند و اختلاف بالایی با میانگین بزرگترین جابجایی دارند را از نمودار کنار می‌گذاریم تا محدوده مجاز طراحی به‌دست بیاید. معیار ما برای جابجایی‌های بزرگ بدین صورت است که اگر نسبت جابجایی به طول بیشتر از ۰/۸ باشد،



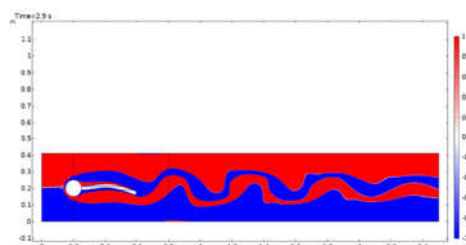
شکل ۱۰- نمودار تغییرات ولتاژ موثر به ترتیب در اتصال به ابتدا و انتهای تیر مستطیلی



شکل ۱۱- نمودار تغییرات ولتاژ موثر به ترتیب در اتصال به ابتدا و انتهای تیر بیضوی

در ادامه برای مقایسه دقیق‌تر، مقدار موثر ولتاژ خروجی محاسبه و در شکل ۱۲ ارائه شده است. حالت تیر با مقطع بیضوی با پیزو در ابتدا با تولید ولتاژ در حالت بهینه، بیشترین بازدهی انرژی را در میان تمامی حالات ثبت کرد. چشمگیرترین تأثیر بهینه‌سازی در این سناریو در تیر با مقطع مستطیلی در ابتدا مشاهده می‌شود؛ جایی که ولتاژ از ۱/۵۶ ولت (غیر بهینه) به ۷/۹ ولت (بهینه) جهش یافته است. این افزایش چند برابری نشان‌دهنده حساسیت بالای هندسه مستطیلی به پارامترهای ابعادی و موفقیت الگوریتم در یافتن ابعاد موثر است. در هر دو هندسه، قرارگیری پیزو در انتهای تیر منجر به افت شدید ولتاژ خروجی شده است که با توجه به ماهیت توزیع کرنش در تیرهای طره‌ای، که کرنش در سر آزاد صفر است، قابل توجیه است.

در این مرحله، خیابان کارمن اصلاح‌شده با محوری موجی شکل مشاهده می‌گردد. دیواره‌های کناری با متمرکزسازی ساختارهای هم‌ذات گردابه‌ای در ناحیه مرکزی کانال، نرخ تبادل انرژی میان لایه‌های برشی را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌دهند. در ادامه این فرآیند دینامیکی، تیر الاستیک به‌مثابه یک نوسان‌گر فعال عمل می‌کند و با تغییر فاز محلی جریان، میزان نظم یا بی‌نظمی الگوهای گردابه‌ای را تعدیل می‌نماید. به‌طور کلی، محصورشدگی ناشی از حضور دیواره‌ها در کنار تحریک دینامیکی تیر الاستیک متصل، منجر به تشکیل محور موجی شکل در ناحیه بیدار و انتقال رژیم جریان به حالتی کاملاً پیچیده و وابسته به اندرکنش سیال-سازه می‌شود. این رژیم، ویژگی‌های متمایزی نظیر فرکانس بالاتر ریزش گردابه، فازبندی غیرخطی و انتقال انرژی تقویت‌شده را از خود بروز می‌دهد. در لحظه ۲/۹ ثانیه، شکست اولیه تقارن شکل می‌گیرد. تیر انعطاف‌پذیر با نوسان ملایم خود باعث تغییر زاویه خروج جریان از لبه جدایش شده و جریان را وارد مسیر موجی کرده است.



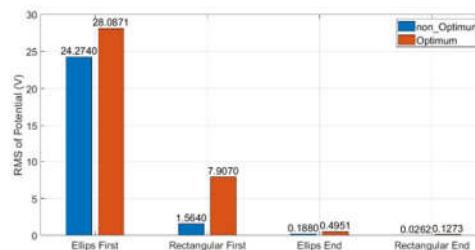
شکل ۹- میدان گردابه در ثانیه ۲/۹

در ادامه برای اطمینان از اینکه ابعاد به دست آمده سبب برداشت بیشینه انرژی می‌گردد، در سیستم قبلی با اتصال یک وصله پیزوالکتریک PZT-2 و با استفاده از شبیه‌سازی در نرم افزار COMSOL مقدار ولتاژ تولیدی به ازای ابعاد بهینه و غیر بهینه استخراج شده و باهم مقایسه می‌گردد. تحلیل‌ها برای دو هندسه سطح مقطع مستطیلی و بیضوی و در دو پیکربندی مختلف قرارگیری پیزو انجام شد: اتصال ماده پیزوالکتریک PZT-2 در ابتدای تیر و اتصال پیزو در انتهای تیر. همانطور که از شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود برای تمامی حالات، نمونه‌های بهینه نسبت به نمونه‌های غیر بهینه دامنه ولتاژ خروجی بالاتری دارند.

$\rho_s$  چگالی جامد ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\sigma_s$  تانسور تنش کوشی (Pa)

## ۶- مراجع

- [1] Wang Q, Zhan L. Assessing the sustainability of renewable energy: An empirical analysis of selected 18 European countries. *Science of The Total Environment*. 2019;692:529–45.
- [2] Zhao J, Dong K, Dong X, Shahbaz M. How renewable energy alleviate energy poverty? A global analysis. *Renewable Energy*. 2022;186:299–311.
- [3] Zheng F, Zhou X, Rahat B, Rubbiani G. Carbon neutrality target for leading exporting countries: On the role of economic complexity index and renewable energy electricity. *Journal of Environmental Management*. 2021;299:113558.
- [4] Li C, Mogollón JM, Tukker A, Dong J, von Terzi D, Zhang C, et al. Future material requirements for global sustainable offshore wind energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;164:112603.
- [5] Li M, Luo H, Zhou S, Senthil Kumar GM, Guo X, Law TC, et al. State-of-the-art review of the flexibility and feasibility of emerging offshore and coastal ocean energy technologies in East and Southeast Asia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;162.
- [6] Barrero-Gil A, Pindado S, Avila S. Extracting energy from Vortex-Induced Vibrations: A parametric study. *Applied Mathematical Modelling*. 2012;36(7):3153–60.
- [7] Hémon P, Amandolese X, Andrienne T. Energy harvesting from galloping of prisms: A wind tunnel experiment. *Journal of Fluids and Structures*. 2017;70:390–402.
- [8] Zhao D, Zhou J, Tan T, Yan Z, Sun W, Yin J, et al. Hydrokinetic piezoelectric energy harvesting by wake induced vibration. *Energy*. 2021;220:119722.
- [9] Lee JH, Xiros N, Bernitsas MM. Virtual damper-spring system for VIV experiments and hydrokinetic energy conversion. *Ocean Engineering*. 2011;38(5):732–47.
- [10] Facchinetti ML, de Langre E, Biotley F. Coupling of structure and wake oscillators in vortex-induced vibrations. *Journal of Fluids and Structures*. 2004;19(2):123–40.
- [11] Bearman PW. Circular cylinder wakes and vortex-induced vibrations. *Journal of Fluids and Structures*. 2011;27(5):648–58.
- [12] Bernitsas MM, Raghavan K, Ben-Simon Y, Garcia EMH. VIVACE (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy): A New Concept in Generation of Clean and Renewable Energy From Fluid Flow. Volume 2: Ocean Engineering and Polar and Arctic Sciences and Technology 2006. p. 619–37.
- [13] Bhattacharyya S, Singh AK. Reduction in drag and vortex shedding frequency through porous sheath around a circular cylinder. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 2011;65(6):683–98.
- [14] Brika D, Laneville A. Vortex-induced vibrations of a long flexible circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*. 1993.
- [15] Gabbai RD, Benaroya H. An overview of modeling and experiments of vortex-induced vibration of circular cylinders. *Journal of Sound and Vibration*. 2005;282(3):575–616.
- [16] Amiri Y, Zahed I, Mahini M, Izadpanah E. Effects of mass ratio and rotation speed on flow induced vibration of a rotating cylinder with two degrees of freedom. *Physics of Fluids*. 2024;36.
- [17] Mehmood A, Abdelkefi A, Hajj MR, Nayfeh AH, Akhtar I, Nuhait AO. Piezoelectric energy harvesting from vortex-induced vibrations of circular cylinder. *Journal of Sound and Vibration*. 2013;332(19):4656–67.
- [18] Sabbar WA, Ismael MA, Almudhaffar M. Fluid-structure interaction of mixed convection in a cavity-channel assembly



شکل ۱۲- نمودار تغییرات ولتاژ موثر

## ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، پتانسیل برداشت انرژی از یک تیر یک‌سر گیردار با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود و ماده پیزوالکتریک PZT-2 مورد ارزیابی قرار گرفت. تمرکز اصلی بر بهینه‌سازی ابعادی تیر با هدف بیشینه‌سازی جایجایی سر آزاد جهت برداشت بیشینه انرژی خروجی بود. بر اساس نتایج بدست آمده، موارد زیر استنتاج می‌گردد:

- نتایج شبیه‌سازی نشان داد که الگوریتم بهینه‌سازی با موفقیت ابعادی را تعیین کرده است که منجر به افزایش دامنه نوسانات می‌شود. این افزایش دامنه در مدل‌های بهینه، مستقیماً به افزایش قابل‌توجه ولتاژ نسبت به مدل‌های اولیه منجر شده است.
- مقایسه بین دو سطح مقطع نشان داد که هندسه بیضوی قابلیت بالاتری در تبدیل انرژی دارد. تیر بیضوی بهینه با تولید ولتاژ موثر برابر با ۲۸/۰۸ ولت، عملکردی حدود ۳/۵ برابر بهتر از تیر مستطیلی بهینه (۷/۹ ولت) از خود نشان داد.
- یک یافته کلیدی در این پژوهش، بیشترین ولتاژ خروجی از پیزوالکتریک متصل به ابتدای تیر دریافت می‌شود. در حالی که انتهای تیر به دلیل کرنش ناچیز، فاقد پتانسیل برداشت انرژی است.
- در نهایت، ترکیب تیر با مقطع بیضوی و اتصال پیزوالکتریک در ناحیه تکیه‌گاه، به عنوان کارآمدترین چیدمان برای برداشت بیشینه انرژی معرفی می‌گردد.

## ۵- نمادها

b	نصف قطر کوچک سطح مقطع بیضوی (m)
d	عرض سطح مقطع مستطیلی (m)
$d_s$	بردار جابه‌جایی تیر الاستیک (m)
$F_s$	نیروی حجمی ( $\text{N/m}^3$ )
h	طول سطح مقطع مستطیلی (m)
k	نصف قطر بزرگ سطح مقطع بیضوی (m)
L	طول تیر (m)
p	فشار (Pa)
t	زمان (s)
V	بردار سرعت (m/s)
$V_m$	بردار سرعت حرکت شبکه (m/s)
$v_f$	لزجت سینماتیکی سیال ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$\rho_f$	چگالی سیال ( $\text{kg/m}^3$ )

- of flexible wall. International Journal of Mechanical Sciences. 2018;149:73-83.
- [19] Turek S, Hron J, editors. Proposal for Numerical Benchmarking of Fluid-Structure Interaction between an Elastic Object and Laminar Incompressible Flow. Fluid-Structure Interaction; 2006; Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.