

## Numerical Simulation of Induced Vibrations of the Piezoelectric Blade and Studying the Effects of Increasing Blade Tip Mass on the Resonant Frequency and the Output Voltage

M.K Moayyedi<sup>\*1</sup>

E. Razani<sup>2</sup>

University of Qom, Qom, Iran

(Received: 2024/06/05, Revised: 2024/09/28, Accepted: 2024/11/12, Published: 2024/12/01)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1403.13.2.11.9>

### ABSTRACT

Nowadays, the issue of energy supply is one of the key challenges. In recent years, in order to search for sustainable, renewable, and low cost energy sources, energy harvesting from vibrations caused by fluid flow has great importance. In the present study, an energy-harvesting device from airflow vibrations consisting of a piezoelectric blade has been studied. The blade is exposed to fluid flow at a certain distance downstream of a circular cylinder, and its behavior is simulated using a UDF code implemented to the Fluent software. According to the results of this study, the mass of the blade containing the piezoelectric layer is one of the most important factors affecting the rate of energy harvesting and increasing it will improve the output voltage. Also, in this study, the special focus is on investigation the possibility of resonance phenomenon with a change in the mass of the blade tip. It is observed with increasing mass on the blade tip from 0.9 to 1.5 g, due to the reduction of the natural frequency of the blade, the velocity of the fluid flow required for the resonance phenomenon can be reduced by up to 20%. In this research, the effect of changes of mass which is added on the tip of the blade was investigated for 3 different values, which was not observed in the previous researches.

**Keywords:** Computational Fluid Dynamics (CFD); Energy Harvesting; Piezoelectric Blade; Resonance; Induced Vibrations

## شبیه‌سازی عددی ارتعاشات القایی تیغه پیزوالکتریک و مطالعه اثر افزایش جرم نوک تیغه بر فرکانس تشدید و میزان ولتاژ تولیدی

الهه رازانی<sup>۲</sup>

محمد کاظم مؤیدی<sup>۱\*</sup>

دانشگاه قم، قم، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۶، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۰۷، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۲، انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱)

### چکیده

امروزه موضوع تأمین انرژی یکی از چالش‌های کلیدی به شمار می‌رود. در تحقیقات سال‌های اخیر به‌منظور جستجو برای منابع انرژی پایدار، تجدیدپذیر و ارزان، برداشت انرژی از ارتعاشات ناشی از جریان سیال از اهمیت بالایی برخوردار است. در پژوهش حاضر، یک دستگاه برداشت انرژی از ارتعاشات ناشی از جریان هوا، متشکل از یک تیغه پیزوالکتریک مورد مطالعه قرار گرفته است. این تیغه با فاصله مشخصی در پایین دست یک سیلندر دایروی در معرض جریان سیال قرار دارد و شبیه‌سازی رفتار آن به کمک یک کد UDF اعمال شده در محیط نرم‌افزار فلونت انجام شده است. بر طبق نتایج به‌دست آمده از این مطالعه، جرم تیغه دربردارنده لایه پیزوالکتریک یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر میزان برداشت انرژی است و افزایش آن موجب بهبود در میزان ولتاژ خروجی خواهد شد. همچنین در این مطالعه تمرکز ویژه بر بررسی احتمال وقوع پدیده تشدید با تغییر در مقدار جرم نوک تیغه قرار دارد و مشاهده می‌شود که با افزایش جرم قرار گرفته بر نوک تیغه از ۰/۹ به ۱/۵ گرم، به دلیل کاهش فرکانس طبیعی تیغه، سرعت مورد نیاز جریان سیال برای وقوع پدیده تشدید تا ۲۰ درصد می‌تواند کاهش یابد. در این پژوهش اثر تغییرات جرم افزوده بر نوک تیغه به‌ازای ۳ مقدار مختلف بررسی شده که در تحقیقات پیشین مشاهده نمی‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** دینامیک سیالات محاسباتی، برداشت انرژی، تیغه پیزوالکتریک، پدیده تشدید، ارتعاشات القایی

۱- دانشجویار (نویسنده پاسخگو): moayyedi@qom.ac.ir

۲- دانشجویار: ranielae@gmail.com

## ۱- مقدمه

در عصر حاضر، توسعه روزافزون علوم و فناوری مهندسی پیشرفت‌های چشم‌گیری را در زمینه صنایع الکترونیکی با مقیاس کوچک رقم زده است. در این راستا فناوری برداشت انرژی به‌عنوان جایگزین امیدوارکننده‌ای برای تجهیزات تأمین انرژی الکتریکی متعارف (مانند باتری‌ها) در مقیاس کوچک شناخته شده و به شکل ویژه‌ای توجه محققان سراسر جهان را به خود جلب نموده است. از سوی دیگر، به دلیل افزایش مشکلات زیست‌محیطی، موضوع برداشت انرژی پاک و تجدیدپذیر از محیط، مانند انرژی باد و آب یک کانون تحقیقاتی حیاتی است. برداشت انرژی از نیروی باد نسبت به منابع دیگر بسیار مورد توجه می‌باشد، زیرا در دسترس بودن گسترده و ماهیت دائمی آن، امکان تأمین پیوسته انرژی مکانیکی را فراهم می‌کند. در این زمینه برداشت انرژی به‌وسیله پیزوالکتریک‌ها به‌عنوان یکی از روش‌های مهم برداشت انرژی مبتنی بر ارتعاشات، به دلیل چگالی بالای تولید توان، انعطاف‌پذیری طراحی و مکانیزم عملیات ساده مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. باتوجه‌به این‌که اکثر سیستم‌های برداشت پیزوالکتریک در مقیاس میکرو وات تا وات کار می‌کنند، رایج‌ترین کاربرد برداشت انرژی پیزوالکتریک تأمین انرژی برای لوازم الکترونیکی کم‌مصرف از جمله وسایل الکترونیکی قابل تعبیه، دستگاه‌های زیست‌پزشکی قابل کاشت در مراقبت‌های بهداشتی و پزشکی، حسگرهای بی‌سیم و لوازم الکترونیکی قابل حمل است. گسترش چنین فناوری‌هایی ساخت دنیایی هوشمندتر را از طریق تأمین انرژی دستگاه‌های الکتریکی با انرژی برداشت شده از ارتعاشات محیطی ترویج می‌کنند.

تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه برداشت انرژی از محیط به‌واسطه پیزوالکتریک‌ها انجام شده است. آکایدین و همکاران برداشت انرژی از جریان هوای ناپایا و آشفته با استفاده از مواد پیزوالکتریک را به‌صورت تئوری و تجربی، در حالت دوبعدی مورد بررسی قرار دادند. تمرکز آن‌ها بر برداشت انرژی با استفاده از یک ژنراتور پیزوالکتریک بود که در پایین دست سیلندری دایروی شکل در معرض جریان آشفته سیال با اعداد رینولدز بالا قرار می‌گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌داد که در صورت تطبیق فرکانس غالب جریان سیال با فرکانس طبیعی ژنراتور، ولتاژ خروجی

برداشت‌کننده پیزوالکتریک به حداکثر مقدار ممکن می‌رسد [۱]. هوبک و اینمن نیز به مطالعه‌ی طرحی از چمن مصنوعی پیزوالکتریک برای برداشت انرژی با استفاده از ارتعاشات ناشی از آشفته‌گی پرداختند. هدف اصلی این تحقیق توسعه یک دستگاه برداشت انرژی برای استفاده در محیط‌های دارای جریان سیال با سرعت کم و بسیار متلاطم مانند سیستم‌های تهویه بود [۲]. سپس سانگ و همکاران به‌صورت تئوری و تجربی به مطالعه‌ی برداشت انرژی به‌واسطه یک تیغه پیزوالکتریک پرداختند. این تیغه به‌منظور تبدیل انرژی گردابه‌های جریان آب به الکتریسیته، به‌صورت تیر یک‌سر گیردار، در انتها به یک سیلندر دایروی واقع در برابر جریان آب متصل شده بود. این محققان حین آزمایش تجربی توانستند به سرعتی دست یابند که در آن سیستم دچار پدیده تشدید شده و بنابراین بیشترین میزان ارتعاشات و در نتیجه بیشترین میزان توان خروجی در این حالت حاصل می‌شود [۳].

همچنین ژائو و یانگ به مدل‌سازی روش‌های برداشت انرژی باد توسط پیزوالکتریک در مقیاس کوچک پرداختند. آن‌ها در مقاله خود، مکانیزم‌ها و ویژگی‌های مختلف انواع ناپایداری‌های آیرولاستیک از جمله ارتعاشات ناشی از گردابه، گالوپینگ، گالوپینگ دنباله و فلاتر را با سه روش تحلیل و مدل‌سازی، شامل مدل‌سازی ریاضی، مدل‌سازی با مدار معادل و دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار دادند [۴]. هو و همکاران به بررسی موقعیت بهینه یک برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک با استفاده از ارتعاشات ناشی از ریزش گردابه پرداختند. بر اساس مدل ارائه شده توسط آن‌ها، با افزایش میانگین سرعت سیال، فاصله بهینه بزرگ‌تر می‌شود [۵]. در ادامه این پژوهش‌ها دینگ و همکاران به بررسی ارتعاشات ناشی از جریان و برداشت انرژی از سیلندرهایی با مقاطع مختلف پرداختند. بر اساس نتایج حاصل، سیلندرهای دایره‌ای با کنترل آشفته‌گی غیرفعال و دوزنقه‌ای نسبت به دیگر مقاطع عملکرد بهتری در برداشت انرژی از جریان سیال دارند [۶]. شان و همکاران نیز بهبود عملکرد یک برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک بر اساس ارتعاشات ناشی از جریان آب را بررسی کردند. برای این منظور دو برداشت‌کننده انرژی با پارامترهای یکسان به‌صورت سری درون جریان سیال قرار گرفتند و عملکرد آن‌ها ارزیابی شد. آن‌ها نشان دادند که کارایی سیستم‌های دوتایی در معرض جریان آب را می‌توان با تطبیق وزن

فرکانس طبیعی تیغه، تغییر مجموع جرم آن به واسطه افزودن یک جرم بر روی نوک تیغه مورد مطالعه قرار گرفته است. مشاهده می‌شود که افزایش جرم تیغه اثرات چشم‌گیری بر میزان نوسانات و ولتاژ تولیدی خواهد داشت و از سوی دیگر افزایش جرم منجر به تغییر فرکانس طبیعی تیغه شده که پیامد آن تأثیر بر احتمال وقوع پدیده تشدید است. این مسئله در تحقیقات اخیر پیرامون بهبود برداشت انرژی از پیزوالکتریک کمتر مورد توجه واقع شده و همچنین در این مطالعه ۳ مقدار مختلف جرم افزوده بر نوک تیغه بررسی شده است که در تحقیقات پیشین مشاهده نمی‌شوند.

## ۲- معادلات حاکم

پژوهش حاضر شامل یک تیغه به صورت تیر یک‌سرگیردار می‌باشد که در پایین دست سیلندری دایروی درون یک حجم کنترل قرار گرفته است. هنگامی که جریان سیال از روی سیلندر عبور می‌کند، جدایش جریان از روی سطح آن رخ داده و گردابه‌ها در پی این جسم در مقابل جریان ظاهر می‌شوند. گردابه‌ها به دلیل اختلاف فشار ذرات سیال در داخل و خارج از دنباله، به وجود می‌آیند و با برخورد گردابه‌های مذکور به تیغه، مولفه‌ای از نیرو در جهت عمود بر جریان (نیروی برآ) ایجاد می‌شود. چون گردابه‌ها به شکل متناوب از دو طرف سیلندر عبور می‌کنند و به سمت داخل می‌چرخند این نیرو در پایین دست سیلندر نیز به طور متناوب به تیغه وارد شده و موجب ایجاد نوسان در آن می‌شود. این نوسانات در تیغه به کمک لایه پیزوالکتریک قرار گرفته بر روی آن به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شوند. معادلات حاکم بر جریان یک سیال تراکم‌ناپذیر شامل معادله پیوستگی و معادله بقای اندازه حرکت خطی است که به صورت زیر بیان می‌شوند [۱]:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu_{eff} \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

در این معادلات  $\mathbf{u}$  سرعت،  $t$  زمان،  $p$  فشار و  $\nu_{eff}$  مقدار لزجت مؤثر سیال (شامل لزجت مولکولی و گردابه‌ای متأثر از آشفتگی) می‌باشد.

مخصوص سیلندرها، سرعت آب و فاصله بین برداشت‌کننده‌ها به شکل مؤثری افزایش داد [۷]. فنگ لیو و همکاران، در یک تحقیق بهبود عملکرد برداشت‌کننده انرژی بادی با استفاده از جریان دنباله ناشی از وجود دو صفحه تخت در بالادست یک جسم قرار گرفته در مقابل جریان را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که قراردادن این صفحات دو تایی در بالادست یک برداشت‌کننده انرژی می‌تواند به طور قابل توجهی عملکرد خروجی را بهبود ببخشد [۸].

بخش مهمی از پژوهش‌های مرتبط در این حوزه به بررسی دینامیک و رفتار ارتعاشی تیغه پیزوالکتریک، به منظور برداشت انرژی مرتبط می‌باشد. در این زمینه فیروزی و همکارانش به مطالعه یک سامانه ارتعاشی غیرخطی به منظور برداشت انرژی با استفاده از تیغه‌های پیزوالکتریک پرداختند. در مطالعه آنها برای مدل کردن تیرها از تئوری تیر اویلر برنولی با شرط غیرکشسانی و همچنین فرض رابطه غیرخطی بین - انحناء و جابه‌جایی استفاده شده است [۹]. حسینی و همکارانش به مطالعه ارتعاش تیرهای یک سرگیردار مجهز به پوسته پیزوالکتریک با استفاده از یک روش تحلیلی پرداختند [۱۰]. در پژوهشی دیگر، حسینی و همکارانش ارتعاش تیرهای یک سرگیردار با پوسته پیزوالکتریک با فرم‌های مختلف به منظور بهبود فرآیند برداشت انرژی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که هندسه تیرهای پیزوالکتریک اثر قابل توجهی در جذب انرژی ناشی از ارتعاش دارد [۱۱]. حامدی و همکارانش به بررسی فرکانس تشدید ارتعاش تیرهای یک سرگیردار پیزوالکتریک مثلثی شکل به منظور برداشت انرژی پرداختند. مطالعه آنها در این مورد نیز نشان داد که هندسه تیر پیزوالکتریک اثر قابل توجهی در جذب انرژی حاصل از ارتعاش دارد [۱۲].

در این مطالعه یک تیغه دارای لایه‌ای از پیزوالکتریک با فاصله‌ای مشخص در پشت یک سیلندر دایروی قرار دارد و تحت تأثیر ارتعاشات القایی جریان هوا دچار نوسان می‌شود. در مسائل حوزه برداشت انرژی به واسطه پیزوالکتریک، همواره چالش برداشت انرژی بیشتر، مورد توجه بسیاری از محققان بوده است. در این پژوهش جهت دستیابی به بیشترین ولتاژ خروجی تمرکز بر روی افزایش احتمال وقوع پدیده تشدید به وسیله مطابقت فرکانس نوسانات تیغه با فرکانس طبیعی آن قرار دارد. برای این منظور جهت تغییر

$$y_t = \frac{-C}{\theta} v_{oc} \quad (۹)$$

و با جای گذاری این عبارت در معادله (۳)، رابطه زیر حاصل می شود [۱]:

$$m\ddot{y}_t + c\dot{y}_t + (k + \frac{\theta^2}{C})y_t = F \quad (۱۰)$$

در شرایطی که تیغه پیزوالکتریک دچار جابه جایی شود، نیروی محرک و تغییر شکل کلی تیغه را می توان با استفاده از روش باقی مانده وزنی ریلی-ریتز تقریب زد [۱]. اگر فقط مود اول جابه جایی را در نظر گرفته و از مرتبه های بالاتر آن صرف نظر شود، نیروی  $F$  به صورت زیر به دست می آید [۱]:

$$F(t) = \int_{x=0}^L \bar{p}(x,t)\phi(x)dy \quad (۱۱)$$

به طوری که،  $L$  طول تیر و  $\bar{p}(x,t)$  نیروی فشاری خالصی است که بر سطح تیر اعمال می شود.  $\phi(x)$  تابع وزنی برای شکل مود اول است که به صورت زیر فرض می شود [۱]:

$$\phi(x) = \left[ 1 - \cos\left(\frac{\pi x}{2L}\right) \right] \quad (۱۲)$$

در نهایت طبق رابطه (۱۲) شکل تیر توسط این تابع وزنی به میزان انحراف نوک تیغه مرتبط می شود [۱].

$$y(x,t) = y_t(t)\phi(x) \quad (۱۳)$$

فرکانس طبیعی تیغه پیزوالکتریک را نیز می توان با

$$I = \frac{1}{12} bH^3 \quad \text{به دست آورد.} \quad (۱۴)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

که در آن  $m$  جرم و  $k$  ضریب سختی فنر هستند. برای تحلیل این مسئله، معادلات حاکم بر تیغه پیزوالکتریک، جهت محاسبه میزان جابه جایی تیغه و ولتاژ تولید شده، توسط یک کد UDF در نرم افزار فلوئنت اعمال می شوند. این کد با بهره گیری از حل معادلات حاکم بر نوسانات تیغه عمل می کند. نحوه حل به این شکل است که در هر گام زمانی بعد از حل معادلات جریان سیال، نیرو در معادله (۱۱) محاسبه شده و سپس با جای گذاری مقدار نیرو در معادله (۱۰) مقدار جابه جایی نوک تیغه به دست می آید. با استفاده از معادله (۹) که رابطه بین جابه جایی محاسبه شده و ولتاژ را نشان می دهد، در این مرحله ولتاژ نیز محاسبه می شود. به کمک تابع وزنی ارائه شده در معادله (۱۳)،

## ۲-۱- معادلات حاکم بر نوسانات تیغه پیزوالکتریک و محاسبه ولتاژ تولیدی

در ادامه معادلات حاکم بر نوسانات تیغه پیزوالکتریک و محاسبه ولتاژ تولیدی معرفی و توضیح داده می شوند. با در نظر گرفتن تیر یک سرگیردار (تیغه پیزوالکتریک) دارای یک درجه آزادی به صورت سیستم جرم و فنر و دمپر، معادله جابه جایی و ارتعاش آن بر پایه الگوی جرم و فنر به فرم زیر خواهد بود [۱]:

$$m\ddot{y}_t + c\dot{y}_t + ky_t - \theta v = F \quad (۳)$$

در این معادله، شرط اولیه جابه جایی و سرعت صفر در  $t=0$  در نظر گرفته شده است.  $m$  بیان گر جرم،  $y$  جابه جایی تیغه در جهت محور عمود،  $c$  ضریب دمپینگ،  $k$  سختی فنر،  $\theta$  ضریب همبستگی الکترومکانیکی و  $v$  ولتاژ تولیدی هستند. پارامتر  $F$  نیز برآیند نیروهای وارد شده بر نوک تیغه است که بر این اساس مقدار جابه جایی تیغه مورد نظر محاسبه می شود. مقادیر ضریب دمپینگ و سختی فنر با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$c = 2\xi\sqrt{km} \quad (۴)$$

$$k = \frac{3EI}{L^3} \quad (۵)$$

در این معادلات  $m$  جرم،  $\xi$  نرخ دمپینگ،  $E$  مدول الاستیسیته،  $L$  طول و  $I$  ممان اینرسی تیغه هستند. ممان اینرسی برای تیغه نیز از معادله زیر به دست می آید:

$$(۶)$$

که در آن  $b$  عرض تیغه و  $H$  ضخامت آن است. همچنین معادله حاکم برای محاسبه ولتاژ تولید شده توسط تیغه پیزوالکتریک عبارت است از [۱]:

$$\theta\dot{y}_t + Cv = -\frac{v}{R} = I \quad (۷)$$

در رابطه فوق  $v$  ولتاژ تولید شده،  $C$  ظرفیت،  $R$  مقاومت الکتریکی و  $I$  جریان الکتریکی می باشند. با فرض حالت مدار باز و مقاومت برابر با بی نهایت، این معادله به شکل زیر تبدیل می شود [۱]:

$$\theta\dot{y}_t + Cv = 0 \quad (۸)$$

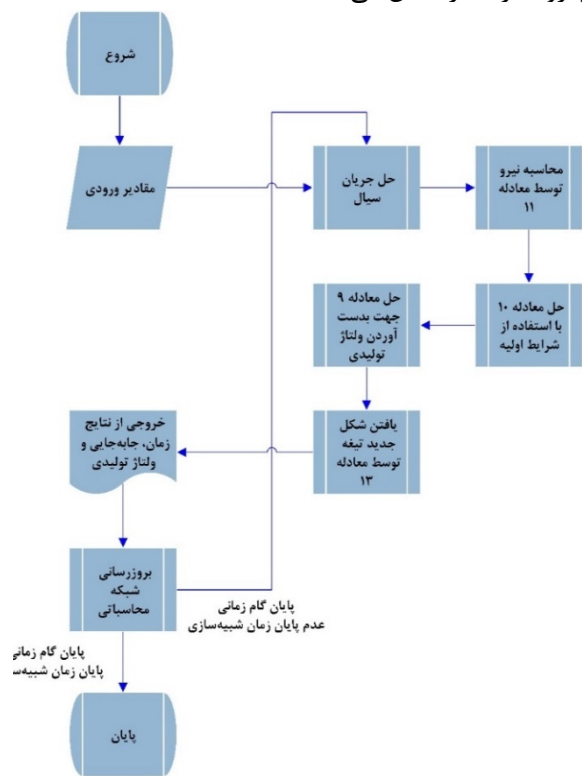
در نتیجه عبارت زیر به صورت رابطه ای بین جابه جایی نوک تیغه و ولتاژ مدار باز، به دست خواهد آمد [۱]:

محاسبه می‌کند. با استفاده از این جابه‌جایی در رابطه (۹) مقدار ولتاژ تولید شده نیز محاسبه می‌شود. ماکروی بخش دوم کد، مختصات اولیه تیغه پیزوالکتریک را ذخیره می‌کند تا در ماکروی بخش سوم برای اعمال تغییرات تیغه نسبت به شرایط اولیه، مورد استفاده قرار گیرد. در این فرآیند ذخیره‌کردن مختصات اولیه به‌وسیله ماکروی DEFINE\_ON\_DEMAND صورت می‌گیرد. بخش سوم شامل ماکرویی است که جابه‌جایی نوک تیغه را با استفاده از تابع وزنی و رابطه (۱۳) بر کلیه نودهای موجود روی تیغه اعمال می‌کند. این کار به‌وسیله ماکروی DEFINE\_GRID\_MOTION صورت می‌گیرد. در این مسئله جابه‌جایی نوک تیغه که در ماکروی اول محاسبه شده در بخش سوم به‌وسیله ماکروی DEFINE\_GRID\_MOTION و تابع وزنی  $\phi(x)$  روی تمامی نودهای موجود بر تیغه اعمال می‌شود. در این قسمت اطلاعات به‌دست آمده از رابطه (۱۳) و مختصات اولیه تیغه که توسط ماکروی دوم ذخیره شده، مورد استفاده قرار می‌گیرند و جابه‌جایی بر کل نودهای تیغه اعمال می‌شود. این فرآیند در هر گام زمانی تکرار می‌شود.

### ۳- ساختار هندسی و شبکه محاسباتی

مطابق شکل ۲ ساختار هندسی مورد مطالعه، متشکل از یک سیلندر و یک تیغه در پایین‌دست آن است. طول و عرض حجم کنترل برای این مطالعه به ترتیب ۱ و ۰/۵ متر می‌باشد. همچنین  $D$  بیان‌گر قطر سیلندر بوده که در تمام حالت‌های بررسی شده در این پژوهش دارای مقدار ۰/۰۳ متر است و فاصله لبه سیلندر تا نوک تیغه در سمت چپ (مقدار  $X$ ) نیز در همه حالت‌ها ۱/۵ برابر قطر سیلندر، یعنی ۰/۴۵ متر در نظر گرفته شده است. تیغه نیز در سمت راست مقید بوده و در سمت چپ خود به طور آزادانه می‌تواند نوسان کند. اندازه طول تیغه که با حرف  $L$  نشان داده شده است، برابر با ۰/۰۳ متر، ضخامت ( $h$ ) برابر با ۰/۰۰۲ متر و عرض ( $b$ ) آن برابر با ۰/۰۱۶ متر هستند. لازم به ذکر است که ابعاد تیغه نیز در تمامی حالت‌های مورد بررسی یکسان در نظر گرفته شده است. مطابق با مرجع [۱] تیغه دارای یک‌لایه پیزوالکتریک PVDF و یک‌لایه مایلر به‌عنوان بستر پشتیبان است. این دولایه به‌صورت یکپارچه در نظر گرفته شده‌اند و مجموع جرم

جابه‌جایی نوک تیغه برای تخمین مقدار جابه‌جایی سایر نقاط در طول تیغه پیزوالکتریک به کار می‌رود و شکل جدید تیغه مشخص می‌شود. با طی این روند در پایان هر گام زمانی به روزرسانی شبکه انجام شده و نتایج مقادیر ولتاژ و جابه‌جایی به‌عنوان خروجی ثبت می‌شوند. سپس در گام زمانی بعدی مجدداً معادلات سیال حل شده و بعد از یافتن مقدار نیروی وارد شده به تیغه، مقادیر ولتاژ و جابه‌جایی در کد محاسبه می‌شوند. این روند تا پایان زمان شبیه‌سازی ادامه پیدا می‌کند. شکل ۱ فلوچارتی از روند حل این معادلات جهت شبیه‌سازی نوسان تیغه پیزوالکتریک را نشان می‌دهد.



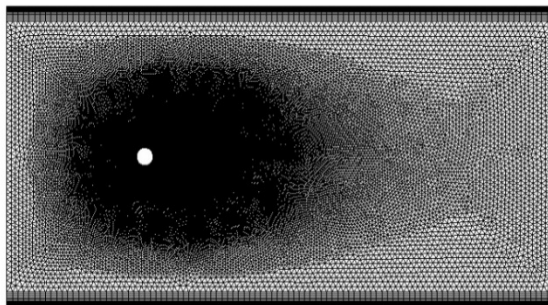
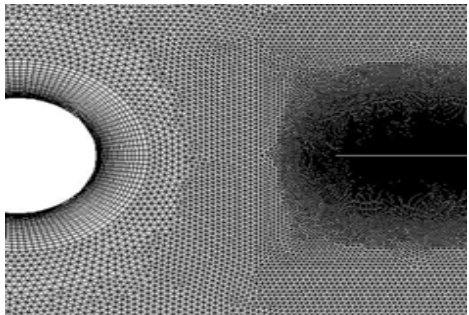
شکل (۱): روندنمای مدل شبیه‌ساز نوسانات القایی

### تیغه‌های پیزوالکتریک

کد UDF<sup>۱</sup> مذکور به زبان ++C نوشته شده و در محیط نرم‌افزار فلوئنت کامپایل می‌شود. این کد سه بخش اصلی معادلات حاکم بر تیغه پیزوالکتریک را حل می‌کند. بخش اول شامل ماکروی DEFINE\_EXECUTE\_AT\_END می‌باشد. این ماکرو نیروی وارد شده به تیغه از جانب سیال را با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه کرده و با اعمال این نیرو در رابطه (۱۰)، باتوجه به شرایط اولیه، میزان جابه‌جایی نوک تیغه را

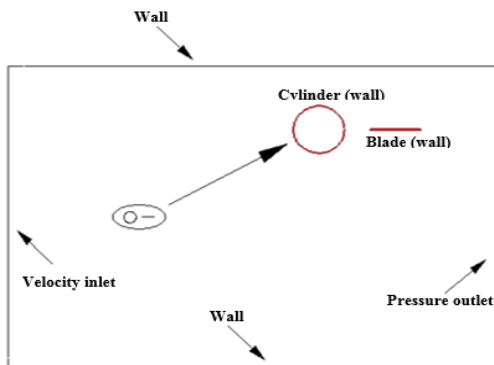
<sup>۱</sup> User Defined Function (UDF)

که نام دیگر آن تفاضل بالادست خطی است، با استفاده از سه نقطه به جای دو نقطه برای گسسته‌سازی، از دقت حل بالاتری برخوردار می‌باشد. برای مدل‌سازی اثرات آشفتگی نیز از مدل  $k-\omega$  SST استفاده شده است [۱۸].



شکل (۳): شبکه‌بندی مدل شامل تیغه و سیلندر در حجم

کنترل مفروض

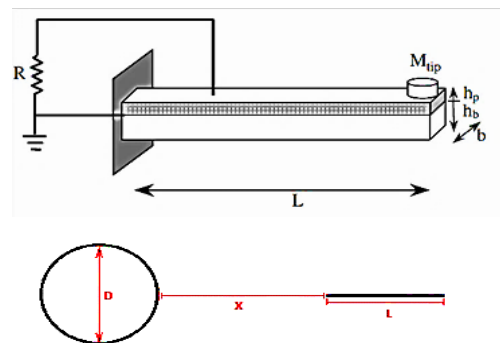


شکل (۴): هندسه حجم کنترل مسئله مدنظر و شرایط مرزی

۵- اعتبارسنجی حل عددی

آن‌ها به‌عنوان جرم خود تیغه معرفی می‌شود. همچنین یک جرم افزوده بر روی نوک تیغه ( $m_{tip}$ ) در نظر گرفته می‌شود که اثرات تغییر مقدار این جرم بر مواردی از جمله میزان جابجایی نوک تیغه، ولتاژ خروجی و احتمال وقوع پدیده تشدید، هدف مورد بررسی در این پژوهش می‌باشد. پارامترهای موجود در جدول ۱، پارامترهای ثابت مورد نیاز در روند حل مسئله هستند.

برای شبکه‌بندی این هندسه، از شبکه‌بندی ترکیبی استفاده شده و در نواحی نزدیک به دیواره‌های بالایی و پایینی و نیز دیواره سیلندر به دلیل وجود گرادیان‌های شدید، شبکه با سازمان مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین در اطراف تیغه جهت بررسی و حل دقیق‌تر، شبکه به‌صورت مثلثی و فشرده‌تر ایجاد شده است. در شکل ۳، شبکه‌بندی ایجاد شده برای این مدل قابل مشاهده است.

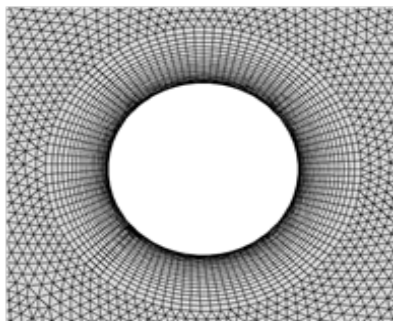


شکل (۲): ساختار هندسی مدل سیلندر و تیغه پیزوالکتریک [۱۶]

۴- شرایط مرزی و روش حل عددی

مطابق با شکل ۴، در این مدل برای مرز ورودی از شرط سرعت ورودی، در خروجی از شرط مرزی فشار خروجی و برای مرزهای بالا و پایین حجم کنترل، تیغه پیزوالکتریک و سیلندر دایروی، از شرط مرزی دیواره یا عدم لغزش استفاده شده است. همچنین جهت حل معادلات حاکم، حل عددی مبتنی بر شبیه‌سازی در بستر نرم‌افزار فلوئنت به‌کار گرفته شده و بدین منظور برای گسسته‌سازی معادلات مربوط به حرکت سیال و کوپلینگ بین فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. برای معادله فشار نیز از روش گسسته‌سازی مرتبه دوم بهره‌گیری شده که در این روش ترم‌های مربوطه، به روش تفاضل مرکزی گسسته‌سازی می‌شوند. به‌منظور جداسازی عبارتهای مشتق مکانی نیز، روش بالادست مرتبه دوم به‌کار گرفته شده است. این روش

این مطالعه را معتبر دانست. در ادامه با در نظر گرفتن و اعمال همین روند، تیغه پیزوالکتریک در پایین دست سیلندر قرار داده می‌شود.



شکل ۵: ساختار شبکه محاسباتی اطراف سیلندر دایروی

جدول (۲): اعتبارسنجی روش حل عددی برای تک سیلندر			
منبع	عدد اشتروهال	میانگین ضریب پسا	ضریب برآ
مطالعه حاضر	۰/۲	۱/۰±۴۰۹/۰۴۵	۰±/۷۲۱
Izadpanah [13]	۰/۲	۱/۰±۳۳۶/۰۴۶	۰±/۷۰۰
Mahir et al. [14]	۰/۱۹۲	۱/۰±۳۷۶/۰۴۸	۰±/۶۹۸
Liu et al. [15]	۰/۱۹۲	۱/۰±۳۱۰/۰۴۹	۰±/۶۹۰

در ادامه اعتبارسنجی برای حالت تک سیلندر با حضور تیغه پیزوالکتریک دقیقاً مشابه نتایج مقاله پیشین نویسندگان این پژوهش در مرجع [۱۷] انجام گرفته است. بدین صورت که یک تیغه پیزوالکتریک به طول ۳ سانتی‌متر در پشت سیلندر دایروی به قطر ۳ سانتی‌متر قرار داده شده است. شبکه‌بندی هندسه آن نیز همانند شبکه‌بندی بیان شده برای مطالعه حاضر در بخش ۳ در نظر گرفته شده است. به منظور اعتبارسنجی، تمامی شرایط این مسئله با مدل تجربی آکایدین و همکاران [۱] از نظر ابعاد و سایر پارامترها کاملاً یکسان بوده و صرفاً به دلیل تفاوت در جرم تیغه‌های پیزوالکتریک در دو مطالعه، اعتبارسنجی برای حالت تشدید آن‌ها انجام گرفته است. پدیده تشدید در حالتی به وقوع می‌پیوندد که فرکانس طبیعی سازه با فرکانس نوسانات تیغه ناشی از جریان سیال برابر شود. با توجه به این که تیغه‌های با ظاهر یکسان در فرکانس‌های تشدید رفتار مشابهی از نظر جابه‌جایی دارند، می‌توان گفت این مقایسه بین مطالعه حاضر و نتایج حاصل از پژوهش آکایدین و همکاران [۱] قابل اعتماد بوده و تفاوت جرم‌ها در دو مدل مقایسه شده، اثر خود را صرفاً در فرکانس تشدید و عدد رینولدز مورد نیاز جهت وقوع آن نشان می‌دهد.

به منظور سنجش اعتبار روش حل عددی و اطمینان از صحیح بودن روند آن، ابتدا یک سیلندر بدون حضور تیغه پیزوالکتریک مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این بررسی تنها یک سیلندر درون حجم کنترل قرار گرفته و ابعاد کاملاً مشابه با ابعاد هندسه مورد مطالعه است که در بخش ۳ بیان شده‌اند. همچنین شبکه‌بندی با روشی مشابه با آنچه در بخش ۳ آمده است، به شکل ترکیبی اعمال شده و به دلیل وجود گرادیان‌های شدید اطراف دیواره‌ها، در این نواحی به صورت با سازمان لحاظ شده است. شکل ۵ ساختار شبکه اطراف سیلندر را نشان می‌دهد.

جدول (۱): پارامترهای ثابت مورد نیاز برای حل معادلات [۱۶]		
نماد	تعریف نماد (واحد)	مقدار
L	طول تیغه (m)	۰/۰۳
b	عرض تیغه (m)	۰/۰۱۶
$h_p$	ضخامت لایه پیزوالکتریک (m)	$28 \times 10^{-6}$
$h_b$	ضخامت لایه پشتیبان (m)	$172 \times 10^{-6}$
$\rho_p$	چگالی لایه پیزوالکتریک ( $kg m^{-3}$ )	۱۷۸۰
$\rho_b$	چگالی لایه پشتیبان ( $kg m^{-3}$ )	۱۳۹۰
$\xi$	نرخ دمپینگ (/)	۳/۸۵
C	ظرفیت (mF)	۱/۳۸
$\Theta$	ضریب همبستگی الکترومکانیکی ( $C m^{-1}$ )	$3/69 \times 10^{-6}$

سپس جهت مقایسه با مراجع دیگر، در عدد رینولدز ۲۰۰ حل بر روی آن انجام شده و نتایج به دست آمده به صورت مقادیر ضرایب نیروهای پسا و برآ در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین در این جدول مقادیر اعلام شده برای ضرایب مذکور موجود در سه مقاله دیگر، ارائه شده است و همان‌طور که مشاهده می‌شود، درصد خطای عدد اشتروهال در بهترین حالت (نزدیک‌ترین عدد گزارش شده در مراجع) صفر درصد و در بدترین حالت (دورترین عدد گزارش شده در مراجع) ۴/۱۶ درصد، درصد خطای ضریب پسا در بهترین حالت ۲/۱۷ درصد و در بدترین حالت ۷ درصد و در درصد خطای ضریب برآ در بهترین حالت ۳ درصد و در بدترین حالت ۴/۴۹ درصد می‌باشد. این نتایج حاکی از مطابقت معقول بین نتیجه گزارش حاضر و مراجع مدنظر بوده و بنابراین می‌توان روش مدل‌سازی و حل موجود در

همکاران [۱] در حالت تشدید مطابق جدول ۴ است. باتوجه به این جدول، نتایج مقدار بیشینه جابه‌جایی و ولتاژ تولیدی در حالت تشدید حاصل از مطالعه حاضر و مرجع مدنظر خطایی کمتر از ۳/۵ درصد داشته که نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل مورد استفاده در مطالعه حاضر می‌باشد.

مشخصات مطالعه حاضر و مطالعه صورت گرفته در مرجع مدنظر و همچنین عدد رینولدزی که در آن فرکانس نوسانات تیغه پیزوالکتریک بسیار نزدیک به فرکانس طبیعی این تیغه می‌شود، در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج جابه‌جایی تیغه پیزوالکتریک و ولتاژ تولیدی به دست آمده از شبیه‌سازی در مطالعه حاضر و نتایج تجربی آکایدین و

پژوهش مدنظر	فرکانس طبیعی تیغه پیزوالکتریک (Hz)	سختی تیغه پیزوالکتریک (N/m)	جرم تیغه پیزوالکتریک (Kg)	عدد رینولدز
مطالعه حاضر	۹/۳۷	۳/۶	۰/۰۰۱۰۳۸۶ (جرم خود تیغه ۰/۰۰۰۱۳۸۶ کیلوگرم + جرم افزوده ۰/۹ گرمی)	۳۵۰۰ (سرعت ۱/۷ m/s)
آکایدین و همکاران [۱]	۴۸/۵۴	۳/۶	۰/۰۰۰۰۳۸۷	۱۴۶۴۰ (سرعت ۷/۱۲۵ m/s)

پژوهش مدنظر	جابه‌جایی نوک تیغه پیزوالکتریک (mm)	ولتاژ تولیدی توسط تیغه پیزوالکتریک (V)
مطالعه حاضر	۲/۹±	۶/۲۴±
آکایدین و همکاران [۱]	۹/۸±	۷۹/۲۳±

تعداد کل نودها	تعداد نود روی تیغه‌ها	تعداد نود روی سیلندر	نام شبکه
۳۹۰۴۵	۹۰	۹۰	شبکه شماره ۱
۶۳۷۴۰	۱۱۰	۱۱۰	شبکه شماره ۲
۸۷۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	شبکه شماره ۳

نماد	تعریف نماد (واحد)	مقدار
$L$	طول تیغه (m)	۰/۰۳
$m$	جرم تیغه (kg)	$۱/۳۸۶ \times 10^{-۴}$
$m_{tip}$	جرم افزوده بر روی نوک تیغه (kg)	$۱/۲ \times 10^{-۳}$
$m_y$	جرم کل تیغه (kg)	$۱/۳۳۸ \times 10^{-۳}$
$k$	سختی فنر $N M^{-1}$	۳/۶

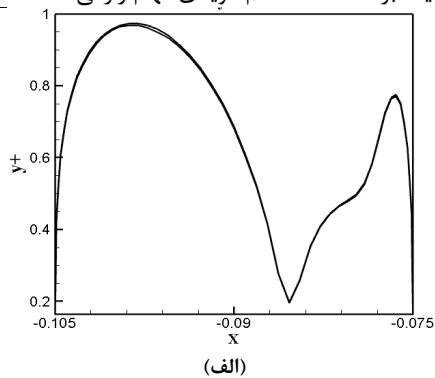
در شکل ۶ نتایج مربوط به شبیه‌سازی سه شبکه در قالب نمودارهای جابجایی و ولتاژ آورده شده است. با بررسی و مقایسه نمودارهای موجود در شکل برای هر سه شبکه،

## ۶- استقلال حل از شبکه

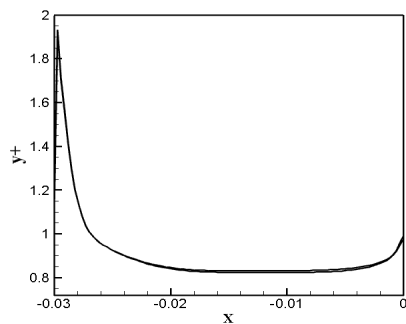
جهت بررسی استقلال حل از شبکه برای مدل مورد مطالعه، از سه شبکه با تعداد نودهای مختلف بهره‌گیری شده است. نوع و روش اعمال شبکه بر هندسه، در هر سه شبکه بندی کاملاً یکسان بوده و تنها تعداد نودها متغیر است که در جدول ۵ قابل مشاهده می‌باشند. به منظور مقایسه آن‌ها، شبیه‌سازی برای هر سه شبکه در شرایط کاملاً مشابه به مدت ۵ ثانیه و با گام زمانی ۰/۰۰۰۵ ثانیه در عدد رینولدز ۲۵۰۰ صورت گرفته است. در این حالت باتوجه به ابعاد تیغه و چگالی لایه‌های سازنده آن، جرم خود تیغه محاسبه شده و با احتساب جرم افزوده بر نوک تیغه به مقدار ۱/۲ گرم به صورت ثابت برای هر سه شبیه‌سازی، جرم کل برای تیغه در نظر گرفته می‌شود. مقادیر محاسبه شده این پارامترها در جدول ۶ قرار دارد.

جدول (۵): استقلال حل از شبکه برای مدل با تیغه





(الف)



(ب)

شکل (۷): نمودار  $y+$  سیلندر (الف) و تیغه

پیزوالکتریک (ب) شبکه شماره ۲

### ۷- نتایج و بحث

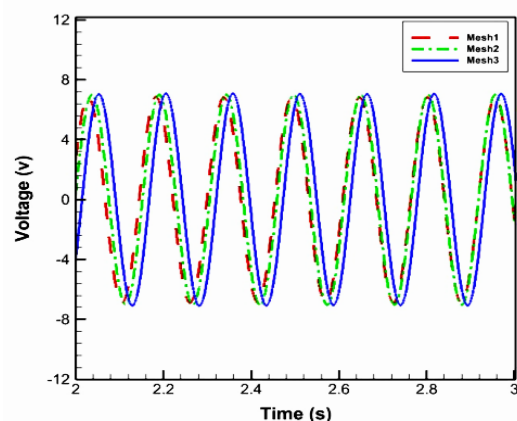
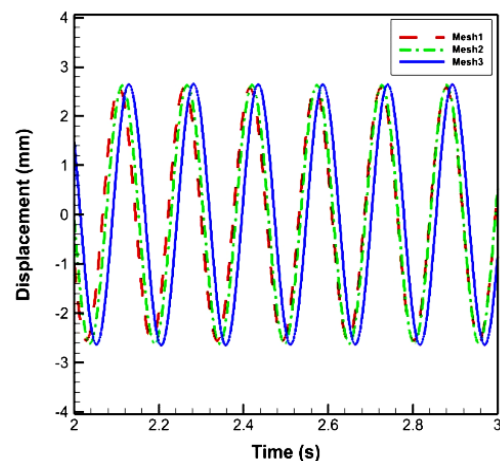
در این مطالعه به بررسی اثر تغییر جرم تیغه بر روند برداشت انرژی به واسطه تیغه پیزوالکتریک پرداخته شده است و این تغییر جرم با در نظر گرفتن یک جرم افزوده ( $m_{tip}$ ) بر نوک تیغه ایجاد می‌شود (مطابق شکل ۲). در قسمت نتایج، چگونگی اثرگذاری جرم تیغه بر مقادیر ولتاژ خروجی و جابجایی نوک تیغه در بخش نخست و سپس تاثیر مقدار جرم افزوده بر فرکانس طبیعی تیغه و احتمال وقوع پدیده تشدید در بخش دوم مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

#### ۷-۱- تاثیر جرم تیغه بر مقادیر ولتاژ خروجی و جابجایی

##### نوک تیغه

جهت مشاهده تاثیر میزان جرم نوک تیغه بر مقادیر جابه جایی آن و ولتاژ خروجی، سه حالت مختلف برای جرم تیغه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مقایسه از تیغه با طول  $0.03$  متر برای همه حالت‌ها استفاده شده است، ولی جرم آن با در نظر گرفتن یک جرم افزوده بر روی نوک تیغه، متغیر خواهد بود. جرم خود تیغه با ابعاد  $0.03$  متر مطابق با جدول ۶ برابر با  $0.0001386$  کیلوگرم است و در هر حالت این مقدار با میزان جرم افزوده شده بر نوک تیغه جمع

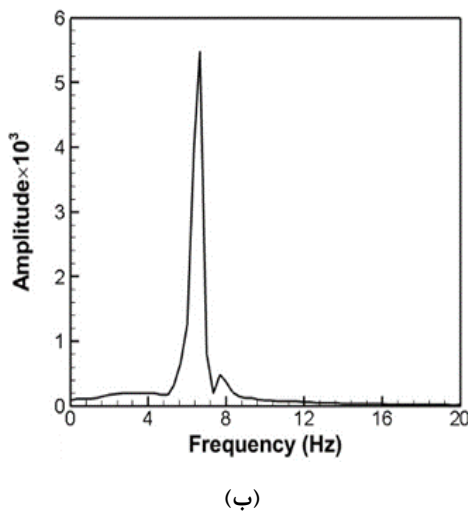
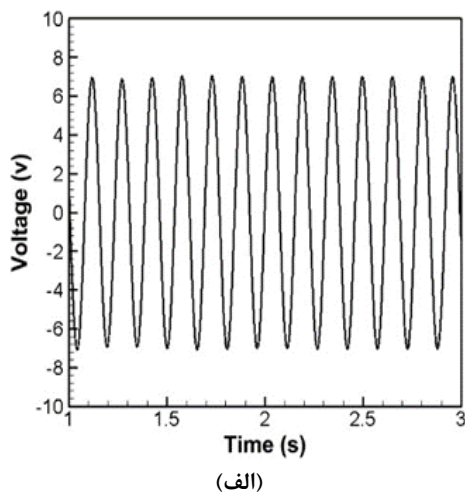
مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از شبیه‌سازی آن‌ها به یکدیگر نزدیک می‌باشد. همچنین فرکانس نوسانات تیغه در این شبیه‌سازی‌ها برای شبکه‌های اول، دوم و سوم به ترتیب دارای مقادیر  $6/46$ ،  $6/51$  و  $6/53$  هرتز هستند که در این مورد نیز مطابقت قابل قبولی برای نتایج این سه شبکه قابل مشاهده است. بنابراین در ادامه روند این پژوهش جهت بهینه‌سازی زمان و هزینه سخت‌افزاری، از مشخصات شبکه شماره دو برای شبکه‌بندی هندسه در ادامه کار استفاده شده است. مطابق شکل ۷، مقادیر  $y+$  شبکه شماره ۲ برای اطراف سیلندر کمتر از ۱ و برای تیغه پیزوالکتریک، در بیشتر مساحت تیغه زیر ۱ و برای نواحی نزدیک به نوک تیغه زیر ۲ بوده که در کل نسبت مناسبی برای این مسئله بررسی شده می‌باشد.



شکل (۶): مقایسه نمودارهای جابجایی و ولتاژ در هر سه شبکه‌بندی

### ۷-۱-۲- تاثیر افزایش جرم ۱/۲ گرم بر مقادیر ولتاژ خروجی و جابجایی نوک تیغه

در حالت شماره ۲، جرم افزوده بر نوک تیغه با مقدار ۱/۲ گرم بر جرم خود تیغه اضافه شده و مجموع جرم آن‌ها مطابق با ۰/۰۰۱۳۳۸۶ در شبیه‌سازی مدنظر قرار داده شده‌است. مشابه سایر حالت‌های این بخش، در این حالت نیز طول تیغه برابر با ۰/۰۳ متر و عدد رینولدز ۲۵۰۰ است. در این حالت میزان جابجایی نوک تیغه بین مقادیر ۲/۶ تا ۲/۶ میلی متر بوده و در شکل ۹ نمودار نتایج مربوط به ولتاژ خروجی و طیف توان نوسانات تیغه در بازه زمانی ۱ تا ۳ ثانیه قابل مشاهده است. طبق نتایج به دست آمده مقدار ولتاژ خروجی نیز بین مقادیر ۷ تا ۷- ولت به طور نوسانی تغییر می‌کند. فرکانس غالب نوسانات تیغه نیز در این حالت در حدود ۶/۵۲ هرتز می‌باشد.

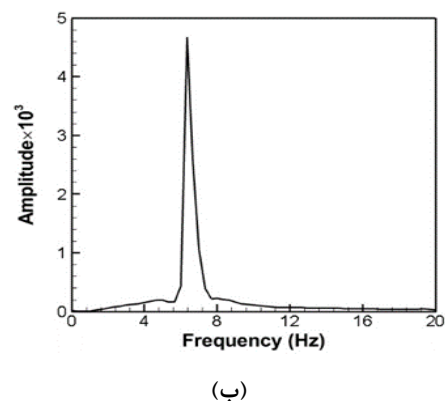
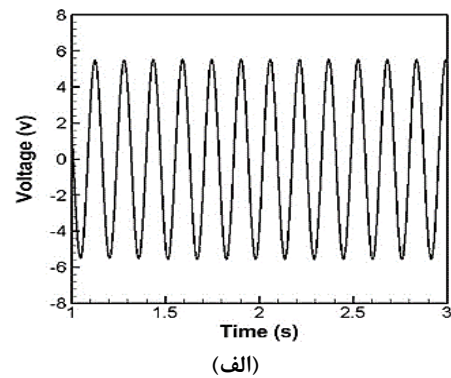


شکل (۹): تغییرات زمانی ولتاژ (الف) و نمودار طیف توان نوسانات تیغه پیزوالکتریک (ب) در حالت شماره ۲ بخش A

خواهد شد و به عنوان جرم کل تیغه در محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقادیر ۰/۹، ۱/۲ و ۱/۵ گرم برای جرم نوک تیغه به ترتیب در حالت‌های اول، دوم و سوم در نظر گرفته شده‌اند. در نهایت برای هر سه حالت، در عدد رینولدز ثابت ۲۵۰۰ (سرعت ۱/۲۱ متر بر ثانیه) شبیه‌سازی صورت گرفته و نتایج آن ارائه شده‌است. لازم به توضیح است که جهت اختصار در نام‌گذاری اشکال و جداول، نتایج این قسمت با حرف A مشخص شده‌اند.

### ۷-۱-۱- تاثیر افزایش جرم ۰/۹ گرم بر مقادیر ولتاژ خروجی و جابجایی نوک تیغه

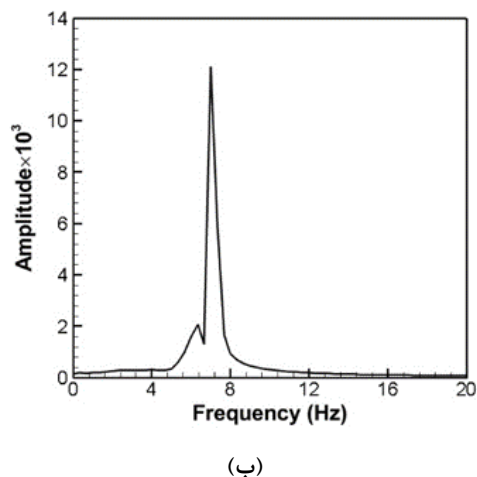
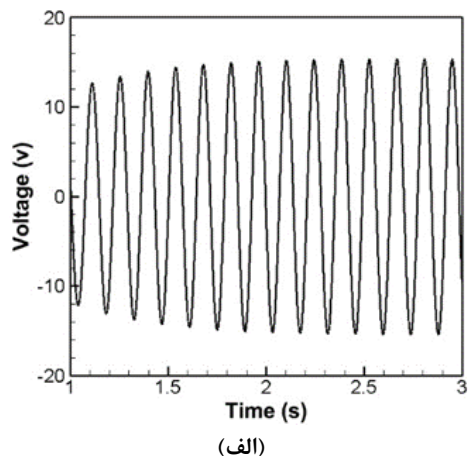
در حالت شماره ۱، جرم افزوده بر نوک تیغه با مقدار ۰/۹ گرم، بر جرم خود تیغه اضافه شده و مجموع جرم آن‌ها برابر با ۰/۰۰۱۰۳۸۶ کیلوگرم در شبیه‌سازی مدنظر قرار داده شده‌است. طول تیغه برابر با ۰/۰۳ متر و عدد رینولدز ۲۵۰۰ است. در این حالت میزان جابجایی نوک تیغه بین مقادیر ۲/۱ تا ۲/۱ میلی‌متر بوده و بر اساس نمودارهای منطبق بر نتایج حاصل که در شکل ۸ مشاهده می‌شوند، مقدار ولتاژ خروجی بین مقادیر ۵/۵ تا ۵/۵- ولت به طور نوسانی تغییر می‌کند. همچنین فرکانس غالب نوسانات تیغه در این حالت در حدود ۶/۴۱ هرتز می‌باشد.



شکل (۸): تغییرات زمانی ولتاژ (الف) و نمودار طیف توان نوسانات تیغه پیزوالکتریک (ب) در حالت شماره ۱ بخش A

### ۱-۳-۷- تاثیر افزایش جرم ۱/۵ گرم بر مقادیر ولتاژ خروجی و جابجایی نوک تیغه

در حالت شماره ۳، جرم افزوده شده بر نوک تیغه مقدار ۱/۵ گرم فرض شده و مجموع جرم کل تیغه برابر با مقدار ۰/۰۰۱۶۳۸۶ کیلوگرم در شبیه‌سازی مدنظر قرار داده شده است. همانند سایر حالت‌های مورد بررسی در این قسمت، طول تیغه برابر با ۰/۰۳ متر و عدد رینولدز ۲۵۰۰ است. در این حالت میزان جابجایی نوک تیغه بین مقادیر ۵/۹ تا ۵/۹- میلی‌متر بوده و بر اساس نمودارهای به‌دست آمده در شکل ۱۰، مقدار ولتاژ خروجی بین مقادیر ۱۵/۵ تا ۱۵/۵- ولت به‌طور نوسانی تغییر می‌کند. همچنین فرکانس غالب نوسانات تیغه در حالت سوم در حدود ۷/۱ هرتز می‌باشد.

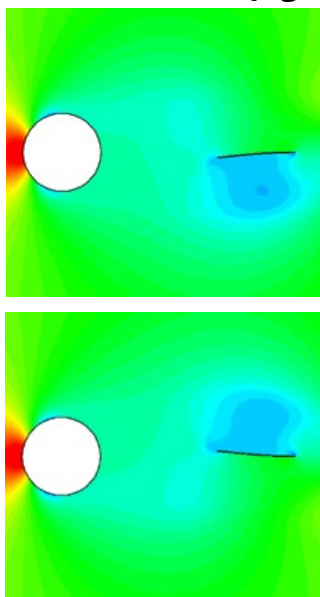


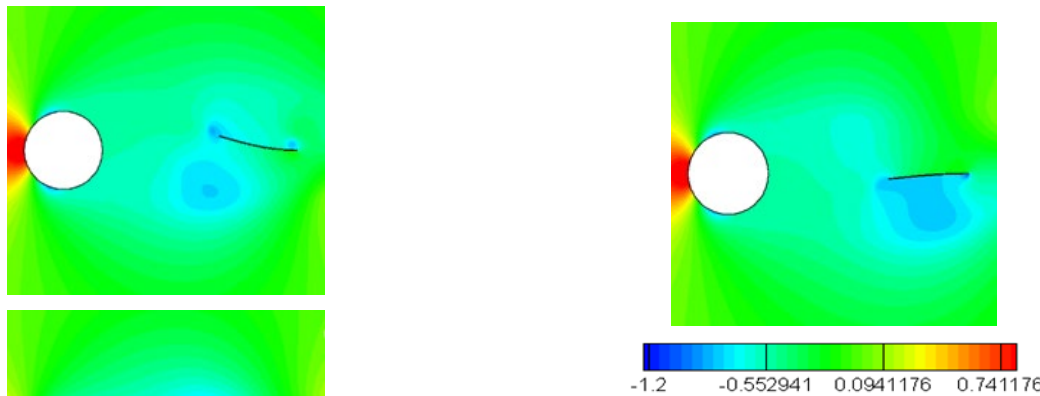
شکل (۱۰): تغییرات زمانی ولتاژ (الف) و نمودار طیف توان نوسانات تیغه پیزوالکتریک (ب) در حالت شماره ۲ بخش A

خطوط هم‌تراز فشار نسبی برای حالت‌های اول تا سوم در بخش نخست نتایج، در شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ برای سه

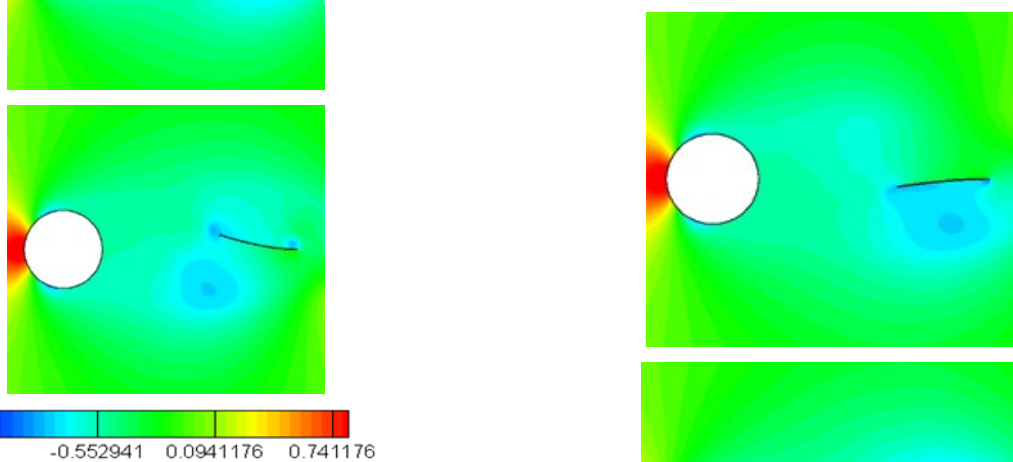
زمان مشخص به ترتیب از بالا به پایین مرتب شده‌اند. مطابق با خطوط فشار نسبی برای هر کدام از حالت‌ها مشخص است که همواره در هر گام زمانی یک گرادیان فشار اطراف تیغه وجود دارد. حضور این گرادیان فشار اطراف تیغه موجب حرکت تیغه از فشار بیشتر به فشار کمتر در گام‌های زمانی بعدی شده که در نهایت باعث حرکت نوسانی تیغه پیزوالکتریک می‌شود. همچنین به دلیل ثابت بودن مقدار سرعت ورودی در این سه حالت، میزان گرادیان فشار اطراف تیغه برای هر سه حالت تقریباً مشابه یکدیگر است.

با مقایسه نتایج حالت‌های ۱ تا ۳ مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار جرم نوک تیغه از ۰/۹ تا ۱/۵ گرم، مقادیر جابجایی تیغه و به تبع آن ولتاژ خروجی، رشد قابل ملاحظه‌ای داشته‌اند. نکته قابل توجه دیگر در این نمودارها افزایش چشم‌گیر مقدار ولتاژ در حالت شماره ۳ با جرم افزوده ۱/۵ گرم، نسبت به دو حالت دیگر است. به‌عنوان دلیل رخ دادن این اتفاق می‌توان به این مورد اشاره کرد که در حالت شماره ۳، فرکانس نوسانات تیغه در رینولدز ۲۵۰۰، حدوداً برابر با ۷/۱ هرتز است. در حالی که فرکانس طبیعی تیغه در این حالت ۷/۴۵ هرتز محاسبه شده است. بنابراین در حالت شماره ۳ به دلیل نزدیک شدن فرکانس نوسانات تیغه به فرکانس طبیعی آن و در واقع نزدیک شدن به فرکانس تشدید، این افزایش قابل ملاحظه در نتایج دیده می‌شود. ولی در سایر حالت‌ها فرکانس نوسان تیغه، فاصله زیادی با فرکانس طبیعی آن دارد. در جدول ۷ مقادیر فرکانس طبیعی و فرکانس نوسانات تیغه برای هر حالت مشاهده می‌شود.





شکل (۱۱): خطوط هم‌تراز فشار نسبی در زمان‌های ۲/۰۶، ۲/۱۴ و ۲/۲۲ ثانیه برای حالت شماره ۱ بخش A



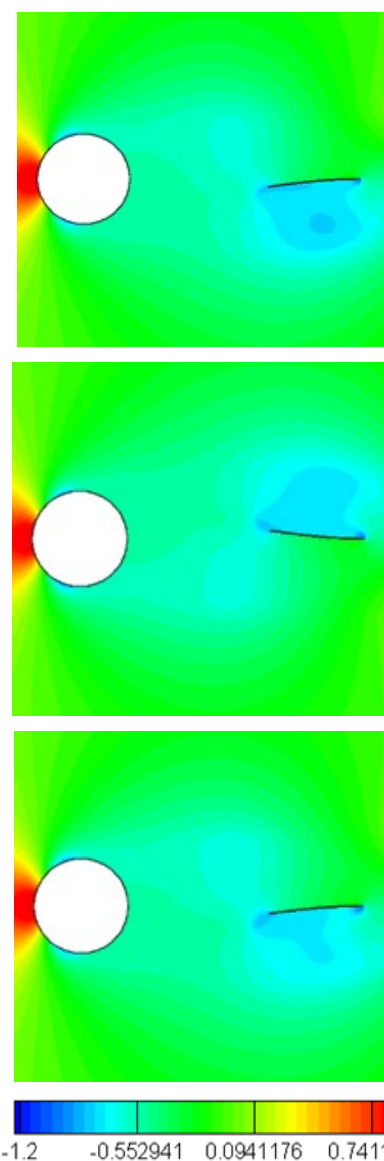
شکل (۱۳): خطوط هم‌تراز فشار نسبی در زمان‌های ۲/۰۴، ۲/۱ و ۲/۱۸ ثانیه برای حالت شماره ۳ بخش A

جدول (۷): مقادیر فرکانس طبیعی و فرکانس نوسانات تیغه در سه حالت مورد بررسی در بخش A

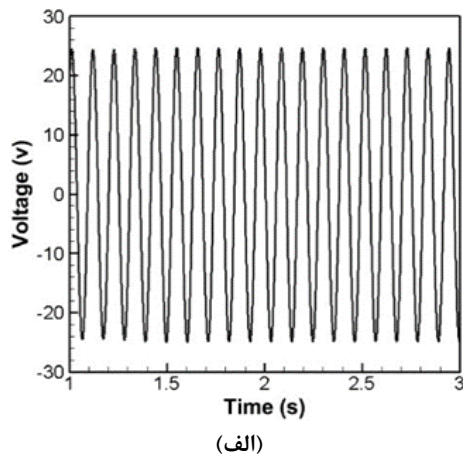
حالت مورد بررسی	شماره شکل	جرم افزوده (گرم)	فرکانس طبیعی تیغه (هرتز)	فرکانس نوسانات تیغه (هرتز)
حالت ۱	۷	۰/۹	۹/۳۷	۶/۴۱
حالت ۲	۸	۱/۲	۸/۲۵	۶/۵۲
حالت ۳	۹	۱/۵	۷/۴۵	۷/۱

۷-۲- تاثیر افزایش جرم ۱/۵ گرم بر مقادیر ولتاژ خروجی و جابجایی نوک تیغه

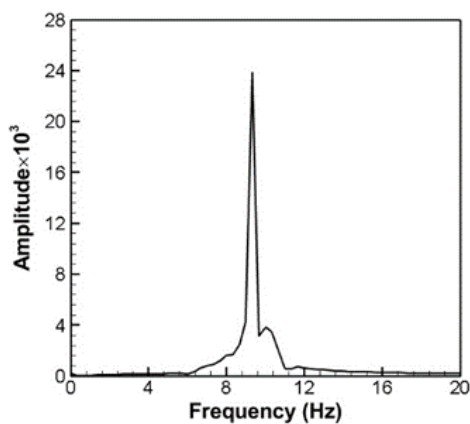
در بخش A به چگونگی تأثیر اضافه کردن یک جرم افزوده بر روی تیغه پرداخته و نشان داده شد که این جرم می‌تواند برای افزایش میزان ولتاژ خروجی مؤثر واقع شود. در ادامه بررسی اثرات افزایش جرم، تأثیر آن بر تغییرات فرکانس طبیعی تیغه و احتمال وقوع پدیده



شکل (۱۲): خطوط هم‌تراز فشار نسبی در زمان‌های ۲/۰۴، ۲/۱۲ و ۲/۲ ثانیه برای حالت شماره ۲ بخش A



(الف)



(ب)

شکل (۱۴): تغییرات زمانی ولتاژ (راست) و نمودار طیف

توان نوسانات تیغه پیزوالکتریک (چپ) در حالت شماره

۱ بخش B

#### ۷-۲-۲- تاثیر افزایش جرم ۱/۲ گرم بر فرکانس طبیعی

تیغه و احتمال وقوع پدیده تشدید

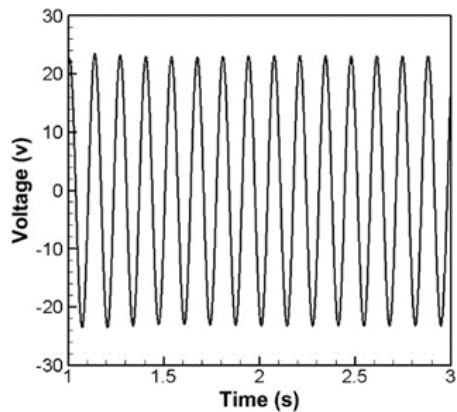
در حالت شماره ۲ نیز تیغه با طول ۰/۰۳ متر مورد استفاده قرار گرفته است ولی مقدار جرم افزوده بر نوک تیغه افزایش یافته و برابر با ۱/۲ گرم در نظر گرفته می‌شود. فرکانس طبیعی تیغه در این حالت حدوداً ۸/۲۵ هرتز خواهد بود. پس از بررسی‌های متعدد جهت دست‌یابی به این فرکانس برای نوسانات تیغه، مشخص شد که در سرعت ۱/۵۱ متر بر ثانیه و عدد رینولدز ۳۱۰۱، فرکانس نوسانات تیغه و فرکانس طبیعی آن با یکدیگر تطابق دارند. بنابراین می‌توان گفت که در سرعت مذکور برای این حالت پدیده تشدید رخ می‌دهد. مقدار جابجایی نوک تیغه بین ۹ تا ۹- میلی‌متر است و بر اساس اطلاعات به دست آمده از نمودارهای شکل ۱۵، ولتاژ خروجی بین مقادیر  $\pm 24$  ولت تغییر می‌کند.

تشدید مطرح می‌شود. در حالت کلی طبق معادله فرکانس طبیعی با افزایش جرم تیغه، فرکانس طبیعی آن کاهش می‌یابد و این مسئله می‌تواند تا حد زیادی به برداشت بیشترین مقدار انرژی ممکن در اعداد رینولدز پایین کمک کند. چرا که در صورت رخداد پدیده تشدید، بیشترین مقادیر جابه‌جایی تیغه و در نتیجه ولتاژ را می‌توان مشاهده کرد. به طور مثال فرکانس طبیعی تیغه با طول ۰/۰۳ متر بدون جرم افزوده برابر با ۲۵/۶۵ هرتز خواهد بود که احتمال مطابقت فرکانس نوسانات تیغه با آن در سرعت‌های بالا امکان‌پذیر است. اما با افزایش جرم بر روی نوک تیغه مشاهده می‌شود که فرکانس طبیعی آن تا حد زیادی کاهش یافته و در سرعت‌های بسیار پایین‌تر می‌توان پدیده تشدید را مشاهده کرد. در این بخش برای تیغه با ابعاد ۰/۰۳ متر و جرم ۰/۰۰۱۳۸۶ کیلوگرم، در سه حالت جرم‌های افزوده ۰/۰۹، ۱/۲ و ۱/۵ گرم بر روی نوک تیغه در نظر گرفته شده است. در هر حالت با توجه به فرکانس طبیعی موجود در جدول ۷ برای هر کدام از تیغه‌ها، سعی شده است که با تنظیم سرعت جریان سیال و عدد رینولدز، فرکانس نوسانات تیغه با فرکانس طبیعی آن مطابق باشد و پدیده تشدید برای هر حالت مورد بررسی قرار گیرد. ذکر این نکته ضروری است که جهت اختصار در نام‌گذاری اشکال و جداول، نتایج این قسمت با حرف B مشخص شده‌اند.

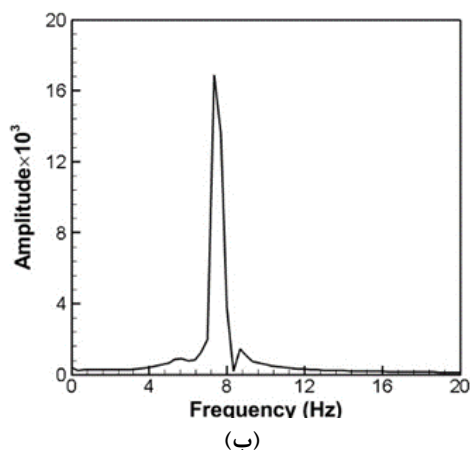
#### ۷-۲-۱- تاثیر افزایش جرم ۰/۹ گرم بر فرکانس طبیعی تیغه و احتمال وقوع پدیده تشدید

در این حالت تیغه با طول ۰/۰۳ متر مورد استفاده قرار گرفته و با فرض افزایش ۰/۹ گرم به‌عنوان جرم افزوده بر نوک تیغه، فرکانس طبیعی آن حدوداً ۹/۳۷ هرتز خواهد بود. به‌منظور دست‌یابی به این فرکانس برای نوسانات تیغه، شبیه‌سازی و بررسی‌های متعددی صورت گرفته است و طی آن مشخص شد که در سرعت ۱/۷ متر بر ثانیه و عدد رینولدز ۳۵۰۰، فرکانس نوسانات تیغه و فرکانس طبیعی آن با یکدیگر تطابق دارند. بنابراین می‌توان گفت که در سرعت مذکور برای این حالت پدیده تشدید رخ می‌دهد. مقدار جابجایی نوک تیغه در حالت تشدید بین مقادیر ۹/۲ تا ۹/۲- میلی‌متر و بر طبق آن‌چه در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، مقدار ولتاژ بین  $\pm 24/6$  ولت در نوسان است.

این بخش، نزدیک هستند. بدین ترتیب در این حالت نیز با قرار دادن جرم افزوده بیشتر، در سرعت ورودی کمتر، مقدار ولتاژ تولیدی تقریباً مشابه با دو حالت پیشین به دست آمده است.



(الف)



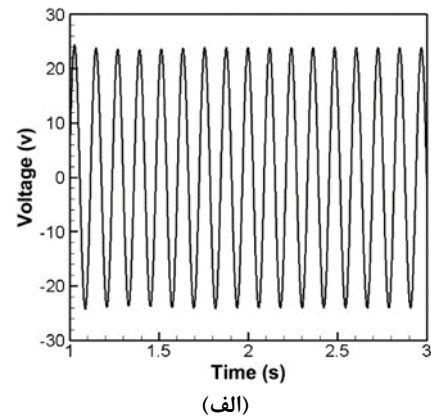
(ب)

شکل ۱۶: تغییرات زمانی ولتاژ (راست) و نمودار طیف توان

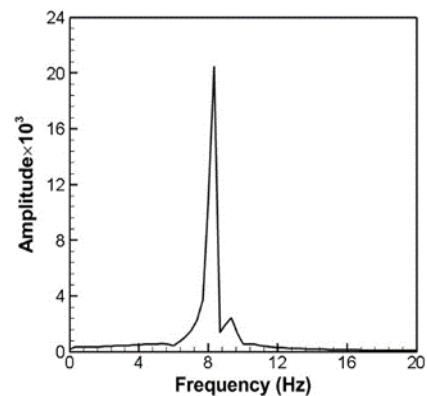
نوسانات تیغه پیزوالکتریک (چپ) در حالت شماره ۳ بخش B

خطوط هم تراز فشار نسبی برای حالت های ۱ تا ۳ در بخش B، در شکل های ۱۷، ۱۸ و ۱۹ برای سه زمان مشخص از چپ به راست مرتب شده اند. مطابق تمامی این شکل ها در تمامی گام های زمانی، گرادیان فشار در دو سمت تیغه مشخص است. در حقیقت همین گرادیان فشار در دو سمت تیغه می باشد که موجب نوسان تیغه در هر گام زمانی می شود. به این صورت که هر بار تیغه پیزوالکتریک از ناحیه با گرادیان فشار بیشتر به سمت ناحیه با گرادیان فشار کمتر حرکت می کند. با مقایسه هر سه شکل نیز اختلاف گرادیان فشار اطراف تیغه مشهود است. در حالت شماره ۱ به علت بیشتر بودن سرعت ورودی، این گرادیان بیشتر از حالات ۲ و ۳ و در حالت ۲ بیشتر از حالت ۳ می باشد.

همان طور که مشاهده می شود این مقادیر به نتایج حالت شماره ۱ در این بخش نزدیک هستند. بدین ترتیب در این حالت در سرعت ورودی کمتر مقدار ولتاژ تولیدی تقریباً مشابه با حالت شماره ۱ در این بخش به دست آمده است.



(الف)



(ب)

شکل (۱۵): تغییرات زمانی ولتاژ (راست) و نمودار طیف

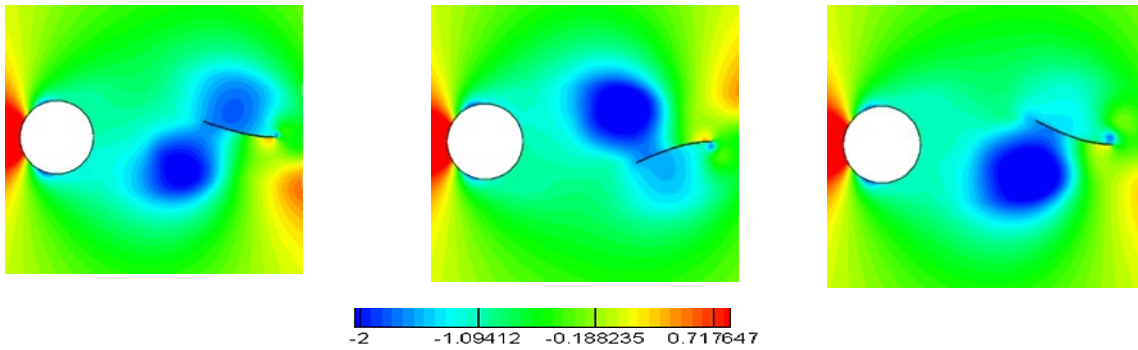
توان نوسانات تیغه پیزوالکتریک (چپ) در حالت شماره

۲ بخش B

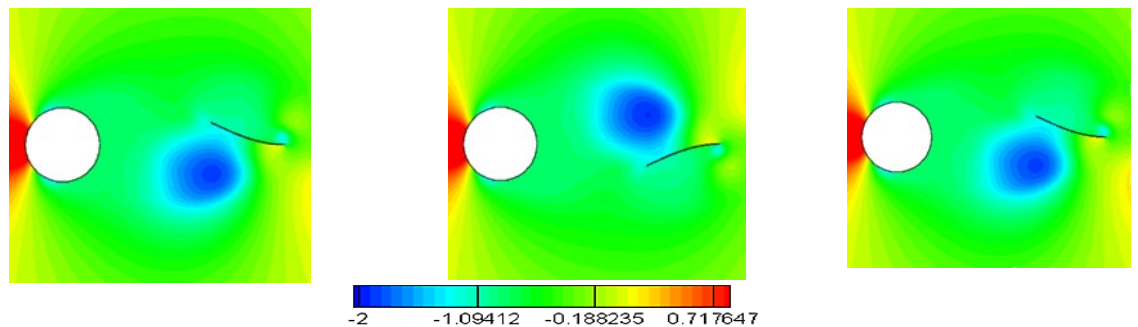
۷-۲-۳- تاثیر افزایش جرم ۱/۵ گرم بر فرکانس طبیعی

تیغه و احتمال وقوع پدیده تشدید

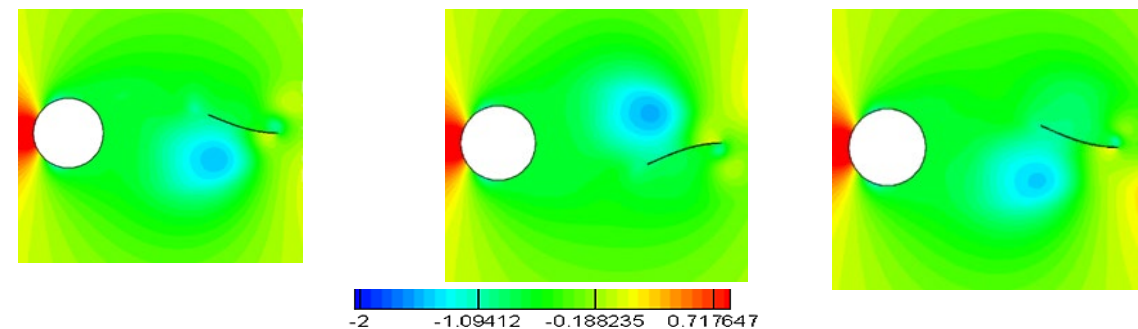
در حالت شماره ۳، تیغه با طول ۰/۰۳ متر با جرم افزوده ۱/۵ گرم استفاده شده است. با توجه به جدول ۷، فرکانس طبیعی تیغه در این حالت برابر با ۷/۴۵ هرتز خواهد بود. در بررسی ها برای مطابقت فرکانس نوسانات تیغه و فرکانس طبیعی آن، مشخص شد که در سرعت ۱/۳۶ متر بر ثانیه و عدد رینولدز ۲۸۰۰، تطابق فرکانس ها و در نتیجه تشدید رخ خواهد داد. در حالت ۳ مقدار جایجایی نوک تیغه بین ۸/۷ تا -۸/۷ میلی متر بوده و طبق شکل ۱۶، مقدار ولتاژ خروجی بین مقادیر  $\pm 23/1$  ولت تغییر می کند. در این حالت نیز نتایج به خروجی دو حالت دیگر بررسی شده در



شکل (۱۷): خطوط هم‌تراز فشار نسبی در زمان‌های ۲/۰۲، ۲/۰۸ و ۲/۱۴ ثانیه برای حالت شماره ۱ بخش B



شکل (۱۸): خطوط هم‌تراز فشار نسبی در زمان‌های ۲/۰۶، ۲/۱۲ و ۲/۱۸ ثانیه برای حالت شماره ۲ بخش B



شکل (۱۹): خطوط هم‌تراز فشار نسبی در زمان‌های ۲/۰۲، ۲/۰۸ و ۲/۱۴ ثانیه برای حالت شماره ۳ بخش B

**جدول (۸): مقادیر فرکانس طبیعی و فرکانس نوسانات تیغه در سه حالت مورد بررسی در بخش B**

حالت مورد بررسی	شماره شکل	جرم افزوده (گرم)	فرکانس طبیعی تیغه (هرتز)	فرکانس نوسانات تیغه (هرتز)
حالت ۱	۱۳	۰/۹	۹/۳۷	۹/۳۵
حالت ۲	۱۴	۱/۲	۸/۲۵	۸/۲۳
حالت ۳	۱۵	۱/۵	۷/۴۵	۷/۴۴

**جدول (۹): جمع‌بندی کلی نتایج حالت‌های بررسی شده در بخش‌های A و B**

نتایج	جرم افزوده بر نوک تیغه (گرم)	عدد رینولدز	فرکانس طبیعی تیغه (هرتز)	فرکانس نوسانات تیغه (هرتز)	جابه‌جایی (میلی‌متر)	ولتاژ (ولت)
تأثیر مقدار جرم افزوده بر مقادیر ولتاژ خروجی و جابه‌جایی نوک تیغه (بخش A)	۰/۹	۲۵۰۰	۹/۳۷	۶/۴۱	± ۲/۱	± ۵/۵
	۱/۲	۲۵۰۰	۸/۲۵	۶/۵۲	± ۲/۶	± ۷
	۱/۵	۲۵۰۰	۷/۴۵	۷/۱	± ۵/۹	± ۱۵/۵
تأثیر مقدار جرم افزوده بر فرکانس طبیعی تیغه و احتمال وقوع پدیده تشدید (بخش B)	۰/۹	۳۵۰۰	۹/۳۷	۹/۳۵	± ۹/۲	± ۲۴/۶
	۱/۲	۳۱۰۱	۸/۲۵	۸/۲۳	± ۹	± ۲۴
	۱/۵	۲۸۰۰	۷/۴۵	۷/۴۴	± ۸/۷	± ۲۳/۱

می توان یکی از عوامل تأثیرگذار برای بهینه سازی برداشت انرژی به واسطه یک تیغه پیزوالکتریک دانست.

#### ۸- تشکر و قدردانی

نویسندگان از مسئولین مرکز محاسبات پیشرفته و ابری دانشگاه قم به خاطر فراهم آوردن امکانات لازم برای این پژوهش، تشکر و قدردانی می کنند.

#### ۹- مراجع

- [1] Akaydin H, Elvin N, Andreopoulos Y, Energy Harvesting from Highly Unsteady Fluid Flows using Piezoelectric Materials”, Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2010; 21(13):1263-1278. DOI 10.1177/1045389X10366317.
- [2] J. Hobeck, D. Inman, Artificial piezoelectric grass for energy harvesting from turbulence-induced vibration. Smart Materials and Structures. 2012; 21(10), DOI 10.1088/0964-1726/21/10/105024.
- [3] Song R., Shan X., F. Lv, T. Xie, A study of vortex-induced energy harvesting from water using PZT piezoelectric cantilever, 41 S768-S773, (2015).
- [4] L. Zhao, Y. Yang. On the modeling methods of small-scale piezoelectric wind energy harvesting. Smart Structures and Systems. 2017; 19(1), pp. 67-90, DOI 10.12989/sss.2017.19.1.067.
- [5] Y. Hu, B. Yang, X. Chen, X. Wang, J. Liu, Modeling and experimental study of a piezoelectric energy harvester from vortex shedding-induced vibration. Energy Conversion and Management. 2018; 162, pp.145-158, DOI 10.1016/j.enconman.2018.02.026.
- [6] L. Ding, L. Zhang, C. Wu, X. Mao, D. Jiang. Flow induced motion and energy harvesting of bluff bodies with different cross sections. Energy Conversion and Management, 2015; 91, pp. 416-426, DOI 10.1016/j.enconman.2014.12.039
- [7] X. Shan, H. Li, Y. Yang, J. Feng, Y. Wang, T. Xie. Enhancing the performance of an underwater piezoelectric energy harvester based on flow-induced vibration Energy. 2019; 172(1), pp.134-140, DOI 10.1016/j.energy.2019.01.120
- [8] F.-R. Liu, W.M. Zhang, L.C. Zhao, H.X. Zou, T. Tan, Z.-K. Peng, G. Meng. Performance enhancement of wind energy harvester utilizing wake flow induced by double upstream flat-plates. Applied Energy. 2020; 257, 114034, DOI 10.1016/j.apenergy.2019.114034.
- [9] Firouzi P, Ebrahimi A., and Hosseini R. Energy Harvesting from Nonlinear Vibrating System Using Two Impacting Cantilever Beam. Aerospace Mechanics Journal. 2019; 15,(1), pp.75-88, DOI 20.1001.1.26455323.1398.15.1.7.4
- [10] Hosseini, R., M. Hamed. Analytical and experimental investigation of partially covered piezoelectric cantilever energy harvester. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2017; 18(3), pp.415-424, DOI 10.1007/s12541-017-0050-3
- [11] Hosseini R, Hamed M. Improvements in energy harvesting capabilities by using different shapes of piezoelectric bimorphs, Journal of Micromechanics and Microengineering. 2015; 25(12): 1-14 DOI 10.1088/0960-1317/25/12/125008

بر اساس نتایج مقادیر جابه جایی و ولتاژ تولید شده در هر سه حالت بخش B، با افزایش جرم نوک تیغه، فرکانس طبیعی آن کاهش یافته و در نتیجه تشدید در سرعت کمتری رخ خواهد داد. با این وصف برای یک تیغه با ابعاد مشخص، با افزایش مقدار جرم اضافه شده بر نوک تیغه، احتمال وقوع تشدید در اعداد رینولدز کمتر، تقویت شده و در سرعت کمتر می توان شاهد حصول بیشترین مقدار جابه جایی و ولتاژ بود. با توجه به نتایج، مشاهده می شود که بازه مقادیر ولتاژ تولید شده در هر سه حالت نزدیک به یکدیگر بوده و اضافه شدن جرم افزوده، بیشتر بر کاهش سرعت تشدید اثرگذار است. در جدول ۸ مقادیر فرکانس طبیعی و فرکانس نوسانات تیغه برای هر حالت مشاهده می شود.

#### ۵- نتیجه گیری

در این مطالعه یک تیغه دارای لایه ای از پیزوالکتریک با فاصله ای مشخص در پشت یک سیلندر دایروی قرار دارد و تحت تأثیر ارتعاشات القایی جریان هوا دچار نوسان می شود. هدف این مطالعه افزایش نوسانات تیغه و در نتیجه افزایش میزان ولتاژ خروجی به واسطه تنظیم مقدار جرم تیغه است. همچنین با افزایش احتمال وقوع تشدید به وسیله مطابقت فرکانس نوسانات تیغه با فرکانس طبیعی آن نیز احتمال دست یابی به بیشترین ولتاژ خروجی، بالا می رود. با استناد به نتایج به دست آمده در بخش های A و B، به طور کلی می توان نتیجه گرفت که افزایش جرم تیغه به واسطه افزودن یک جرم بر نوک آن، از یک سو موجب افزایش مقادیر جابه جایی تیغه و ولتاژ خروجی و از سوی دیگر سبب کاهش فرکانس طبیعی آن شده و در نتیجه سرعت مورد نیاز برای رسیدن به پدیده تشدید کاهش یافته است. به طوری که عدد رینولدز تشدید برای جرم افزوده ۰/۹ گرم برابر با ۳۵۰۰، برای جرم افزوده ۱/۲ گرم برابر با ۳۱۰۱ و برای جرم افزوده ۱/۵ گرم برابر با ۲۸۰۰ خواهد بود. همچنین مشاهده می شود که در صورت وقوع پدیده تشدید، یک تیغه پیزوالکتریک با طول ۰/۰۳ متر، به طور میانگین در حدود ۲۴ ولت می تواند ولتاژ خروجی داشته باشد. مطابق با نتایج بخش B با افزایش جرم نوک تیغه از ۰/۹ به ۱/۵ گرم، سرعت جریان مورد نیاز برای رخداد پدیده تشدید حدوداً ۲۰ درصد کاهش می یابد؛ بنابراین تغییر جرم تیغه را



- Reynolds number. *Journal of Fluids and Structures*, 2014; 48, pp.235-259, DOI 10.1016/j.jfluidstructs.2014.03.006.
- [16] Elvin, N., Lajnef, N. and Elvin, A. Feasibility of Structural Monitoring with Vibration Powered Sensors. *Smart Materials and Structures*. 2006; 15(4), pp.977-986, DOI 10.1088/0964-1726/15/4/011.
- [17] Heidari M , Moayyedi M.K, Numerical Simulation of Induced Vibrations Due to Low-Frequency Flow Oscillations Around Piezoelectric Blades to Design the Best Configuration for Energy Harvesting. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 2022; 54(9): pp.2009-2040, DOI 10.22060/mej.2022.21049.7367
- [18] E. Razani, Numerical Simulation of the Unsteady Flow and Induced Vibrations of Piezoelectric Energy Harvesting Blades and Studying the Effect of Resonance on Variations of Electrical Energy. M.Sc. Thesis in Mechanical Engineering, University of Qom, 2022.
- [12] Hosseini R., Hamed M. An investigation into resonant frequency of triangular V-shaped cantilever piezoelectric vibration energy harvester. *Journal of Solid Mechanics*, 2016; 8(3), pp.560-567, DOI 20.1001.1.20083505.2016.8.3.7.9
- [13] E. Izadpanah, Y. Amini, A. Ashouri. A comprehensive investigation of vortex induced vibration effects on the heat transfer from a circular cylinder. *International Journal of Thermal Sciences*, 2018; 125, pp. 405-418, DOI 10.1016/j.ijthermalsci.2017.12.011.
- [14] N. Mahir, Z. Altaç. Numerical investigation of convective heat transfer in unsteady flow past two cylinders in tandem arrangements. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2008; 29(5), pp.1309-1318, DOI 10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.05.001.
- [15] L. Lu, M.-m. Liu, B. Teng, Z.-d. Cui, G.-q. Tang, M. Zhao, L. Cheng. Numerical investigation of fluid flow past circular cylinder with multiple control rods at low