

## شبیه سازی کنترل بازخورد نوسانات القایی تیغه

### پیزوالکتریک به عنوان حسگر و مولد انرژی الکتریکی

پژوهش حال حاضر حسگر تیغه پیزوالکتریک را از مناظر گوناگون به منظور کنترل نوسانات سیلندر دایروی حاضر در بالادست تیغه پیزوالکتریک و کنترل جریان نوسانی سیال اطراف تیغه با استفاده از نیروی برآ بر روی تیغه پیزوالکتریک را مورد مطالعه قرار داده است. چیدمان مورد نظر یک تیغه پیزوالکتریک در پایین دست یک سیلندر دایروی قرار گرفته و به کمک حد خاصی از نوسانات تیغه، ضریب سختی فنر سیلندر با فرض از مقدار  $65(N/M)$  در حالت عادی به  $100(N/M)$  در حالت لزوم اعمال کنترل کننده و همچنین در حالات دیگر نرخ میرایی با فرض از مقدار صفر به  $0.02(Nm/S)$  افزایش می یابد و از این طریق، نوسانات سیلندر کنترل می شود. به همین ترتیب با کنترل نوسانات سیلندر اثر آن بر نوسانات تیغه که در پایین دست واقع شده، تحت عنوان اثرات بازخورد مورد بررسی واقع شده است. با کنترل بازخورد نیروی وارد بر روی تیغه پیزوالکتریک در یک حلقه بسته می توان بر میزان جا به جایی نوک تیغه و نیروی برآ بر روی تیغه پیزوالکتریک نظارت داشت. در این بررسی ها مشخص شده که در حالتی که حد خاص اعمال کنترل کننده  $0.7$  میلیمتر نوسانات نوک تیغه پیزوالکتریک باشد، به دلیل اعمال زودتر کنترل کننده نسبت به حد خاص  $1$  و  $2$  میلیمتر نوسانات نوک تیغه، نوسانات سیلندر بیشتر کنترل شده و محدوده نوسانات آن کمتر است. همچنین با مقایسه حالتی که کنترل کننده وارد مدار شده است نسبت به حالت بدون کنترل کننده مشخص است نوسانات تیغه و سیلندر تا حدی تحت کنترل قرار گرفته اند.

زهرا پرنیان<sup>۱</sup>

کارشناسی ارشد

محمد کاظم مؤیدی<sup>۲</sup>

دانشیار

مهران حیدری<sup>۳</sup>

دستیار پژوهشی

واژه‌های راهنما: دینامیک سیالات محاسباتی، برداشت انرژی، تعامل سازه و سیال، ارتعاشات القایی، حسگرهای پیزوالکتریک

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، آزمایشگاه پژوهشی توربولانس و دینامیک سیالات محاسباتی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه قم، قم، ایران، [zahraparnian1225@gmail.com](mailto:zahraparnian1225@gmail.com)

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، دانشیار، آزمایشگاه پژوهشی توربولانس و دینامیک سیالات محاسباتی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه قم، قم، ایران، [moayyedi@gom.ac.ir](mailto:moayyedi@gom.ac.ir)

<sup>۳</sup> مرکز مطالعات هوافضا، دانشکده مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

<sup>۴</sup> دستیار پژوهشی، آزمایشگاه پژوهشی توربولانس و دینامیک سیالات محاسباتی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه قم، قم، ایران، [heidari.mehran96@gmail.com](mailto:heidari.mehran96@gmail.com)

## ۱- مقدمه

اثر پیزوالکتریک برای اولین بار در سال (۱۸۸۰) گزارش شد. برادران فرانسوی کوری کشف کردند که کریستال‌های خاصی مانند کوارتز هنگامی که تحت فشار مکانیکی قرار می‌گیرند به صورت الکتریکی قطبی می‌شوند. به نوبه خود، اعمال میدان الکتریکی به مواد پیزوالکتریک منجر به تغییر شکل آن ماده می‌شود. بنابراین، دو کاربرد اساسی آشکار شد: حسگرهای کرنش بر اساس اثر پیزوالکتریک مستقیم و محرک‌های مبتنی بر اثر پیزوالکتریک معکوس. از آن دوره به بعد، طیف گسترده‌ای از کاربردهای جدید مانند کاربرد در میکروفن، شتاب‌سنج، موتورهای اولتراسونیک و غیره توسعه یافتند. کاربرد تیغه‌های پیزوالکتریک تحت عنوان حسگر با در نظر گرفتن توانایی آنها در تولید ولتاژ تحت شرایط تغییر شکل و نوسان، تعریف شده و می‌توان از آنها به عنوان جزیی از یک سیستم کنترلی بهره برد [۱]. محققان زیادی در حوزه استفاده از تیغه‌های پیزوالکتریک به عنوان حسگر از طریق مرتعش شدن صفحات پیزوالکتریک فعالیت پژوهشی داشته‌اند. بالامورگان و همکاران در سال (۲۰۰۱) برای کنترل ارتعاش سازه‌ها، در طراحی سیستم‌های چند کاناله، چندین حسگر را برای ارتعاش یک سازه و چندین محرک برای تحریک منابع خارجی انرژی، مورد بررسی قرار دادند. آنها هم‌چنین کنترل ارتعاش فعال پوسته‌های هوشمند با استفاده از حسگرها و محرک‌های پیزوالکتریک را مطالعه کردند [۲]. مواد پیزوالکتریک به طور گسترده‌ای در طراحی ماشین آلات دقیق مختلف، از جمله ماشین‌های تولید نیمه هادی‌ها، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. لو و همکاران در سال (۲۰۰۲) از مواد پیزوالکتریک هوشمند برای تشخیص و کنترل ارتعاشات بدنه خودرو استفاده کردند. از مواد پیزوالکتریک با اثرات مثبت و معکوس آن می‌توان به عنوان حسگر و محرک استفاده کرد. حسگر پیزوالکتریک ارتعاشات پانل را تشخیص می‌دهد و آنها را به یک واحد کنترل هدایت کرده تا سیگنال‌های کنترل را تولید کند. از طریق محرک پیزوالکتریک تغییر شکل پانل ممکن است کنترل شود و در نتیجه ارتعاش و سر و صدا در بدنه خودرو کاهش یابد [۳]. ژانگ و همکاران در سال (۲۰۰۸) در زمینه کنترل‌کننده فعال ارتعاش پوسته استوانه‌ای، توسط یک عملگر پیزوالکتریک چند لایه پوشانده شده و شامل چندین تکه پیزو الکتریک و لایه های پیوندی می‌باشد، مطالعه کردند. آنها متوجه شدند که نیروهای کنترل عملگر را می‌توان با افزایش تعداد لایه‌های پیزوالکتریک و با ثابت نگه داشتن ولتاژ محرک به طور قابل توجهی افزایش داد [۴]. گابرت و رینگولسکی در سال (۲۰۱۰) رویکردی برای طراحی یک ساختار سبک پر از مایع با محرک‌ها و حسگرهای پیزوالکتریک، که روی سطح نصب شده بودند، ارائه دادند. این ساختارها قادر به کاهش ارتعاشات و انتشار صدا بودند. به دلیل امکان استفاده از تکه‌های پیزوالکتریک به عنوان محرک و حسگر، آنها توانستند الگوریتم‌های کنترل‌کننده‌ای را پیاده‌سازی کنند تا یک مدل حلقه بسته برای طراحی کنترل صدا و ارتعاش ارائه دهد [۵]. کائو و همکاران در سال (۲۰۱۳) استفاده از پوسته‌های استوانه‌ای چند لایه‌ای پیزوالکتریک را جهت کنترل فعال انتشار صدا به صورت نظری مورد بررسی قرار دادند. به این صورت که لایه هوشمند به تعداد زیادی تکه‌های عملگر تقسیم شده که هر یک از آنها در سطح داخلی و خارجی خود با دو الکتروود بسیار نازک پوشانده شده بودند. مطابق بررسی آنها تکه‌های عملگر کوچک به تعدادی موج ضعیف تبدیل شده و نقش مهمی در کاهش ارتعاش و قدرت انتشار صدا دارند. همچنین تأثیر مواد مختلف پیزوالکتریک بر قدرت صوتی در نتایج عددی آنها شرح داده شد [۶]. تسوشیما و سو در سال (۲۰۱۷) اثر

عملگر پیزوالکتریک و برداشت انرژی از آن را بر ویژگی‌های فلاتر بالی که بسیار انعطاف‌پذیر می‌باشد، مطالعه کردند. این پژوهش به بررسی رویکرد حذف فلاتر به صورت فعال و غیرفعال برای بال‌های بسیار انعطاف‌پذیر با استفاده از انتقال پیزوالکتریک پرداخته است. در این مطالعه از عملکرد پیزوالکتریک فعال به عنوان رویکرد اصلی برای حذف فلاتر استفاده شده است. برداشت انرژی هم به عنوان یک رویکرد ثانویه می‌باشد که همزمان فعال بوده تا نوسانات ناشی از ارتعاشات بال را کاهش دهد [۷]. سازه‌های هوشمند به طور گسترده‌ای به عنوان عملگر یا حسگر برای کنترل فعال سازه‌های ارتعاشی استفاده شده است. در میان مواد هوشمند مختلف، مواد پیزوالکتریک به دلیل سادگی مکانیکی و پاسخ فرکانس بالا در زمینه کنترل ساختار بال استفاده می‌شوند. بر همین اساس لو و همکارش طراحی آیرولاستیک بال‌های پیزو-کامپوزیتی را برای به حداقل رساندن واکنش‌های ناگهانی انجام دادند [۸]. پس از آن فرسادی و اسدی با استفاده از یک استراتژی اعمال کنترل فعال بر مواد پیزوالکتریک، پاسخ فلاتر یک سیستم موتور-پره که با تیر جداره نازک<sup>۱</sup> (TWB) با نسبت ابعادی بالا ترکیب شده است را بهبود بخشیدند [۹]. در پژوهش دیگری هاشمی‌نژاد و معصومی یک سیستم کنترلی متشکل از تیغه پیزوالکتریک و سیلندر را بررسی کردند. آن‌ها از روش کنترل فعال به منظور کنترل کردن سیلندر انعطاف‌پذیر متصل شده به یک تیغه هوشمند پیزوالکتریک استفاده کردند. سیستم مورد نظر در شرایط جریان آرام (عدد رینولدز ۱۰۰) به صورت دو بعدی و به کمک روش حجم محدود مدل‌سازی شد. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد سیستم کنترلی مورد استفاده منجر به کاهش ضریب درگ سیلندر می‌شود [۱۰].

در این پژوهش، کنترل نوسانات القایی سیلندر ناشی از گردابه‌های اطراف آن با استفاده از نیروی وارد بر تیغه پیزوالکتریک صورت می‌پذیرد. چیدمان مورد نظر تیغه پیزوالکتریک به صورت افقی در پشت یک سیلندر دایروی قرار دارد (شکل ۱) و جریان سیال اطراف تیغه و ریزش گردابه‌های ناشی از نوسانات سیلندر باعث ایجاد نیروی برآ بر روی تیغه پیزوالکتریک می‌شود. با کنترل بازخورد نیروی وارد بر روی تیغه پیزوالکتریک می‌توان نوسانات سیلندر دایروی را با تغییر در مقدار سختی فنر و میرایی آن کنترل کرد. همچنین بررسی اثر بازخوردی ناشی از کنترل نوسان سیلندر بر جابه‌جایی تیغه پیزوالکتریک نیز از دیگر موارد مطالعه شده در این پژوهش می‌باشد. لازم به ذکر است که نحوه کنترل نوسانات به این شیوه و مشخصاً ساختار مطالعه شده در این پژوهش در مطالعات قبلی انجام نگرفته و پژوهش حاضر از این نظر دارای نوآوری می‌باشد. همچنین کاربرد حسگرهای پیزوالکتریک در ساختار سیلندر و تیغه پیزوالکتریک مشابه ساختار مبدل‌های حرارتی می‌باشد. با استفاده از این ساختار می‌توان نوسانات القایی لوله‌های داخل مبدل‌های حرارتی را کنترل کرد. تا از نوسانات بیش از حد و همچنین جلوگیری از خسارات وارده بر آن‌ها جلوگیری به عمل آورد.

## ۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم، معادلات مربوط به جریان سیال تراکم‌ناپذیر شامل معادله پیوستگی و معادله بقای اندازه حرکت خطی و همچنین معادلات مربوط به نوسان تیغه‌های پیزوالکتریک می‌باشند که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

<sup>۱</sup> Thin wall beam

## ۱-۲- معادله پيوستگي و بقای اندازه حرکت خطی

معادله پيوستگي و بقای اندازه حرکت خطی یک سیال تراکم‌ناپذیر به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nabla \cdot (v_{eff} \nabla u) \quad (2)$$

در این معادلات  $u$  بردار سرعت،  $\rho$  چگالی،  $t$  زمان،  $p$  فشار و  $v_{eff}$  لزجت سینماتیکی موثر بوده که مجموع لزجت مولکولی و گردابه‌ای می‌باشد [۱۱].

## ۲-۲- معادلات شبيه‌سازی نوسانات تيغه‌های پيزوالکتریک و محاسبه ولتاژ توليدي

معادله جرم، فنر و دمپر به منظور شبيه‌سازی ارتعاش تيغه‌های پيزوالکتریک در حالی که تيغه‌ها به صورت تیر یک درجه آزادی در نظر گرفته شده‌اند با شرایط جابجایی و سرعت اولیه صفر در زمان  $t = 0$  با توجه به مرجع [۱۲] به کار می‌رود.

$$m\ddot{y}_t + c\dot{y}_t + ky_t - \theta v = F \quad (3)$$

در این معادله که تيغه را به سیستم جرم و فنر و دمپر مشابه کرده‌است،  $m$  و  $c$  و  $k$  به ترتیب جرم تيغه و ضرایب میرایی تيغه و سختی فنر هستند.  $v$  ولتاژ و  $y_t$  نیز مقدار جابجایی نوک تيغه در راستای محور عمود بر جهت جریان را نشان می‌دهد. همچنین پارامتر  $\theta$  ضریب همبستگی الکترومکانیکی می‌باشد. تمامی این مقادیر ثابت با توجه به مرجع [۱۲] مطابق جدول (۱) در نظر گرفته شده‌اند. معادله ولتاژ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\theta \dot{y}_t + C \dot{v} = -\frac{v}{R} = I \quad (4)$$

که در آن  $v$  ولتاژ،  $R$  مقاومت الکتریکی،  $C$  ظرفیت خازنی (مقدار آن در جدول (۱) موجود است.) و  $I$  شدت جریان الکتریکی می‌باشند. در حالت مدار باز می‌توان  $R = \infty$  در نظر گرفت و بدین ترتیب از معادله (۴)، معادله زیر بدست می‌آید:

$$\theta \dot{y}_t + c \dot{v} = 0 \rightarrow y_t = \frac{-C}{\theta} v_{oc} \quad (5)$$

به همین ترتیب می‌توان معادله (۳) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$m\ddot{y}_t + c\dot{y}_t + \left(k + \frac{\theta^2}{C}\right)y_t = F \quad (6)$$

با اعمال جابه‌جایی محاسبه‌شده برای نوک تیغه در هر گام زمانی به کل گره‌های موجود در طول تیغه، شکل کلی تیغه را می‌توان با استفاده از روش باقی‌مانده وزنی ریلی-ریتز را در هر گام زمانی بدست آورد [۱۱ و ۱۲] اگر فقط مود اول جابه‌جایی در نظر گرفته و از مرتبه‌های بالاتر آن صرف نظر شود، نیروی  $F$  به صورت زیر بدست می‌آید:

$$F(t) = \int_{x=0}^L \bar{p}(x, t)\phi(x)dx \quad (7)$$

به نحوی که  $L$  طول تیر و  $\bar{p}(x, t)$  نیروی فشار خالصی است که بر سطح تیر اعمال شده و  $\phi(x)$  تابع وزنی برای شکل مود اول است که به صورت زیر فرض می‌شود:

$$\phi(x) = \left[1 - \cos\left(\frac{\pi x}{2L}\right)\right] \quad (8)$$

در نهایت تغییر شکل کل تیر با توجه به میزان انحراف نوک آن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$y(x, t) = y_t(t)\phi(x) \quad (9)$$

جهت شبيه‌سازی نوسانات تیغه پیزوالکتریک در محیط نرم افزار فلونت و روش شبکه متحرک<sup>۱</sup> به صورتی که بعد از دریافت نیرو از سیال تیغه دچار نوسان شده، از یک کد اعمال شده توسط کاربر<sup>۲</sup> که با بهره‌گیری از معادلات حاکم بر نوسانات تیغه نوشته می‌شود، استفاده شده است.

#### جدول ۱- پارامترهای ثابت مورد نیاز برای حل معادلات [۱۲]

نماد	تعریف نماد(واحد)	مقدار
m	جرم(kg)(محاسبه بر اساس چگالی و ابعاد ذکر شده برای تیغه در مرجع [۱۱])	$1/38681 \times 10^{-4}$
K	سختی فنر(N/M)	۳/۶
$\xi$	نرخ میرایی(./) (محاسبه به صورت تجربی)	۳/۸۵
c	ضریب میرایی(Nm/s)	$1/72048 \times 10^{-3}$
C	ظرفیت(nF)	۱/۳۸
$\Theta$	ضریب همبستگی(C/m)	$3/69 \times 10^{-6}$

<sup>1</sup> Dynamic Mesh

<sup>2</sup> User defined function (UDF)

این کد بدین صورت عمل می‌کند که در ابتدا مقدار نیروی وارد بر تیغه به کمک معادله (۷) بدست آمده و این نیرو بر معادله جرم، فنر و دمپر بازنویسی شده (معادله (۶)) جایگذاری می‌شود. به این ترتیب با حل این معادله، مقدار جابه‌جایی و ولتاژ نوک تیغه پیزوالکتریک بدست می‌آید. در ادامه به کمک تابع وزنی  $f(x)$  مطابق معادله (۹)، مختصات قرارگیری تک تک نقاط تیغه پیزوالکتریک در هر زمان تعیین و از این طریق شکل کلی نوسانات تیغه پیزوالکتریک در هر گام زمانی مشخص می‌شود.

### ۲-۳- معادلات شبیه‌سازی نوسانات سیلندر دایروی

ارتعاش عرضی سیلندر دایروی نیز مطابق معادله جرم فنر و دمپر شبیه‌سازی می‌شود. در این معادله  $m_{eq}$ ،  $k_{eq}$  و  $c_{eq}$  به ترتیب جرم، ضریب میرایی و سختی فنر معادل هستند و  $f_l$  نیز نیروی برآی<sup>۱</sup> تولیدشده توسط جریان سیال، بر روی سیلندر می‌باشد. همچنین  $y$  مقدار جابه‌جایی،  $\dot{y}$  سرعت و  $\ddot{y}$  شتاب سیلندر در جهت عرضی جریان سیال می‌باشد.

$$m_{eq}\ddot{y} + c_{eq}\dot{y} + k_{eq}y = f_l(t) \quad (10)$$

نیروی برآ بر روی سیلندر با استفاده از ماژول‌های نرم‌افزار مورد استفاده برای شبیه‌سازی محاسبه می‌شود. در معادله (۱۰)، مقدار  $m_{eq}$  برای تمامی حالت‌های بررسی شده در این پژوهش برابر با ۰/۰۰۵ گرم بوده اما مقدار  $k_{eq}$  و  $c_{eq}$  با توجه به حالت‌های مختلف بررسی شده در این مطالعه (لحظه‌ای که کنترل‌کننده اعمال شده و لحظه‌ای که کنترل‌کننده عمل نمی‌کند) متفاوت است که به تفصیل در بخش تعریف مسئله و نتایج برای حالت‌های گوناگون آورده شده‌است. شبیه‌سازی نوسانات سیلندر دایروی نیز مشابه تیغه پیزوالکتریک توسط اعمال کد UDF در محیط نرم افزار فلوئنت انجام می‌گیرد. این کد بر اساس معادلات حاکم بر نوسان سیلندر دایروی نوشته شده‌است. بدین صورت که با محاسبه نیروی برآ و با اعمال آن بر معادله جرم، فنر و دمپر (معادله (۱۰)) و در نظر گرفتن شرایط اولیه، مقدار جابه‌جایی مرکز ثقل سیلندر به عنوان جسم صلب در هر گام زمانی بدست می‌آید. همچنین با استفاده از روش مش متحرک در نرم افزار فلوئنت این مقدار جابه‌جایی در هر گام زمانی بر سیلندر دایروی اعمال می‌شود. تنها نکته قابل ذکر در این کد این است که مقادیر  $k_{eq}$  و  $c_{eq}$  براساس یک دستور شرطی، مقادیر مختلفی را مطابق ولتاژ بدست آمده از تیغه پیزوالکتریک خواهند داشت تا نقش خود را به منظور کنترل نوسانات سیلندر ایفا کنند (لحظه‌ای که کنترل‌کننده اعمال شده و لحظه‌ای که نیاز نیست کنترل‌کننده عمل کند).

### ۳- تعریف مسئله

در پژوهش حاضر که در دو حالت کلی بررسی شده، یک تیغه پیزوالکتریک به فاصله ۰/۰۴۵ متر در پشت یک سیلندر قرار گرفته است. به منظور شبیه‌سازی نوسانات تیغه پیزوالکتریک و سیلندر از معادلات ذکر شده در بخش معادلات حاکم بهره برده شده‌است. همچنین با استفاده از مقدار متغیر ضریب سختی فنر سیلندر

<sup>۱</sup> Lift

(حالت کلی اول شامل A1, A2, A3) و ضریب میرایی سیلندر (حالت کلی دوم شامل B1, B2, B3) به عنوان یک دستور شرطی نوسانات سیلندر و به تبع آن نوسانات تیغه کنترل می‌شود. حالت کلی بررسی شده بدین صورت است که در حالت عادی کنترل‌کننده اعمال نشده و اگر ولتاژ تولیدی تیغه که معادل مقدار جابه‌جایی نوک تیغه به عنوان معیار اعمال کنترل‌کننده است، کمتر از عدد مشخصی (به عنوان فرض مسئله در نظر گرفته شده که دارای مقادیر مشخص برای هر حالت است) باشد، مقدار سختی فنر سیلندر برابر عدد فرضی در این مسئله  $k = 65$  خواهد بود. اگر ولتاژ تولیدی بیشتر از مقدار مشخصی شود، کنترل‌کننده اعمال شده و سختی فنر جهت کنترل نوسانات سیلندر و تیغه به عدد فرضی  $k = 100$  خواهد رسید. لازم به ذکر است در حالت مذکور ضریب میرایی برابر صفر در نظر گرفته شده است. در مدل بعدی حالت استاندارد بدین صورت تعریف شده که میزان سختی فنر معادل مقدار  $k = 65$  ثابت مانده و کنترل نوسانات صرفاً با ضریب میرایی متغیر سیلندر انجام می‌گیرد. بدین ترتیب با توجه به معادله  $\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}}$  که رابطه بین نرخ میرایی و ضریب میرایی را نشان می‌دهد، اگر ولتاژ تولیدی توسط تیغه پیزوالکتریک کمتر از مقدار مشخصی باشد مقدار نرخ میرایی برابر صفر فرض شده (ضریب میرایی صفر) و با افزایش آن از مقدار مشخصی، نرخ میرایی به مقدار فرضی  $0.2$  (ضریب میرایی  $0.228$ ) تغییر خواهد یافت. برای هر حالت کلی، نتایج در سه مقدار فرض شده ولتاژ تولیدی تیغه به عنوان معیار اعمال کنترل‌کننده بررسی شده است. لازم به ذکر است که مقدار ولتاژی که به عنوان معیار اعمال کنترل‌کننده در نظر گرفته می‌شود در اصل معادل مقدار مشخص از جابه‌جایی نوک تیغه است که با در نظر گرفتن آن به نوعی می‌توان بر جابه‌جایی نوک تیغه نیز نظارت داشت (بررسی اثر نوسانات سیلندر بر بازخورد بدست آمده از تیغه پیزوالکتریک).

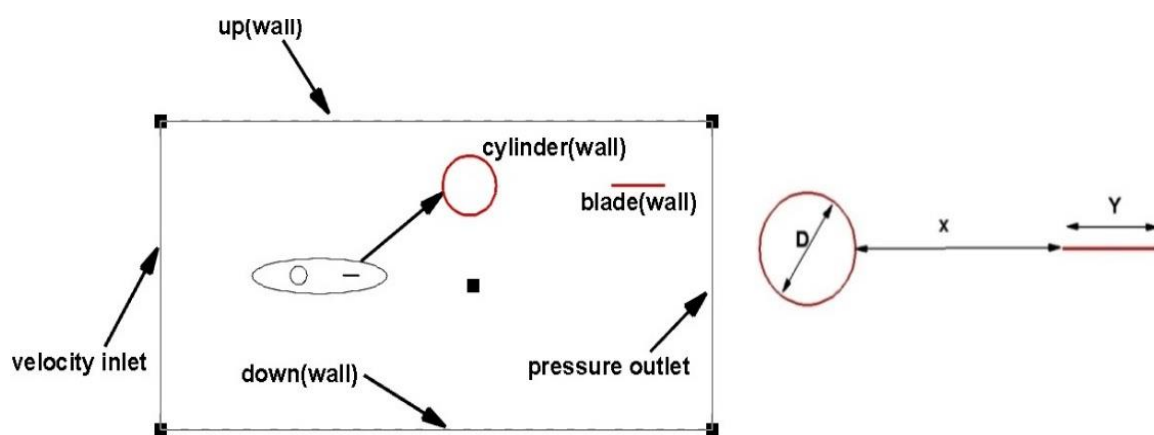
**جدول ۲ -** تمامی حالت‌های بررسی شده در این پژوهش و مشخصات هر یک از آنها

حالت‌های بررسی شده	مقدار معیار کنترل‌کننده (جابه‌جایی تیغه)	مقدار معیار کنترل‌کننده (ولتاژ معادل جابه‌جایی تیغه)	متغیر کنترل‌کننده	مقدار ضریب میرایی سیلندر در لحظه عادی	مقدار ضریب میرایی سیلندر در لحظه اعمال کنترل‌کننده	مقدار سختی فنر سیلندر در لحظه عادی	مقدار سختی فنر سیلندر در لحظه اعمال کنترل‌کننده
A1	0.7 میلی‌متر	1/87 ولت	سختی فنر سیلندر	0	0	65	100
A2	1 میلی‌متر	2/67 ولت	سختی فنر سیلندر	0	0	65	100
A3	2 میلی‌متر	5/34 ولت	سختی فنر سیلندر	0	0	65	100
B1	0.7 میلی‌متر	1/87 ولت	ضریب میرایی سیلندر	0	0.228	65	65
B2	1 میلی‌متر	2/67 ولت	ضریب میرایی سیلندر	0	0.228	65	65
B3	2 میلی‌متر	5/34 ولت	ضریب میرایی سیلندر	0	0.228	65	65

همچنین در آخر حالت‌هایی که کنترل‌کننده اعمال شده است با حالتی که کنترل‌کننده در مدار وجود ندارد و مقدار سختی فنر و ضریب میرایی ثابت باقی می‌ماند مقایسه شده است، نشان می‌دهد کنترل‌کننده توانسته نوسانات سیلندر و تیغه را کاهش دهد. جدول (۲) توضیحات کامل و اختصارات مربوط به هر حالت فرضی بررسی شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. گام زمانی در تمامی حالات مورد بررسی مانند مقاله مشابه مطالعه حاضر، پژوهش حیدری و همکاران،  $0.0005$  بوده و عدد رینولدز جریان نیز برابر  $4000$  در نظر گرفته شده است [۱۳].

#### ۴- ساختار هندسی، شبکه محاسباتی، شرایط مرزی و روش حل عددی

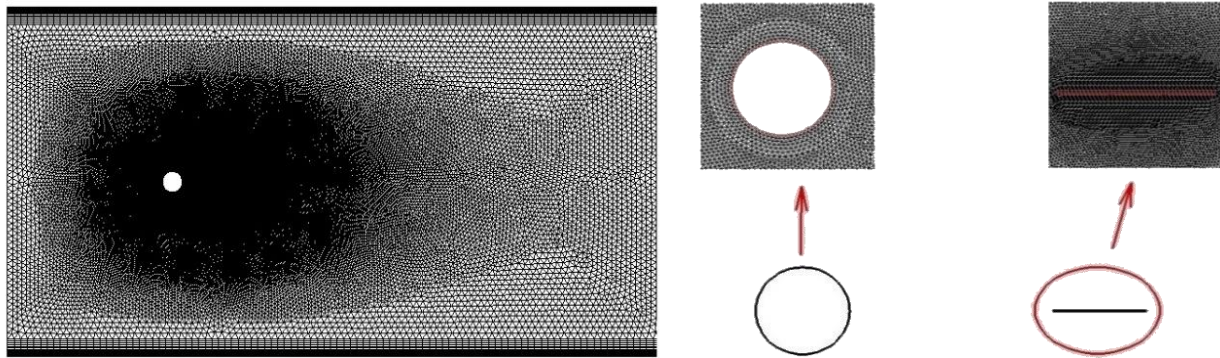
موضوع مورد بحث در این مطالعه، کنترل نوسانات القایی ناشی از ریزش گردابه اطراف سیلندر می‌باشد. به همین منظور مدل شبیه‌سازی شده برای حالت ناپایا و جریان سیال با فرض تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است. به منظور مدل‌سازی صحیح مسئله مورد نظر نیاز به بهره‌گیری از شرایط مرزی مناسب می‌باشد. بدین منظور برای مسئله مورد نظر در مرز سمت چپ حجم کنترل، از شرط مرزی سرعت ورودی و در مرز سمت راست آن از شرط مرزی فشار خروجی استفاده شده است. برای مرزهای بالا و پایین از شرط مرزی دیوار (عدم لغزش) بهره برده شده و سیلندر و تیغه هم نیز با شرط مرزی دیوار (عدم لغزش) مطابق شکل (۱) تعریف شده‌اند. جدول (۳) مقدار پارامترهای  $D$ ،  $X$  و  $Y$  را برای تعریف هندسه مورد نظر نشان می‌دهد. برای تحلیل دقیق‌تر و کارآمدتر مسئله مورد بحث، مطابق شکل (۲)، از شبکه‌بندی ترکیبی استفاده شده است. به علت وجود گرادیان‌های شدید در نواحی نزدیک دیواره و نیاز به استخراج داده‌های دقیق، در اطراف دیواره بالا و پایین شبکه به صورت با سازمان به کار گرفته شده است. تنظیم شبکه در ناحیه لایه مرزی اطراف تیغه و سیلندر، به نحوی صورت گرفته که مطابق ابعاد هندسی بخش مورد نظر، کیفیت المان‌های شبکه حفظ شود.



شکل ۱- هندسه و شرایط مرزی حاکم بر مسئله (چپ) و اندازه‌های مورد نیاز برای تعریف مسئله (راست)

جدول ۳- مقدار پارامترهای به کار رفته برای تعریف هندسه مورد نظر (مطابق شکل (۱))

Y(m)	X(m)	D(m)
$0.03$	$0.045$	$0.03$



**شکل ۲-** شبکه بندی اطراف تیغه و سیلندر (راست) و نمایش مشخص تر شبکه بندی از نوع لایه مرزی در اطراف دیواره بالا و پایین (چپ)

در پژوهش حاضر، جهت حل معادلات حاکم بر سیال و تیغه پیزوالکتریک، از حل عددی مبتنی بر شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار فلوئنت بهره برده شده‌است. در این مطالعه، به منظور گسسته‌سازی معادلات مربوط به حرکت سیال از الگوریتم سیمپل استفاده شده‌است. برای معادله فشار نیز از روش گسسته‌سازی مرتبه دوم بهره برده شده‌است. در این روش که دقت آن از مرتبه دوم می‌باشد، ترم‌های مربوطه، به روش تفاضل مرکزی گسسته‌سازی می‌شوند. به منظور جداسازی عبارت‌های مشتق مکانی در معادله اندازه حرکت خطی، روش بالا دست مرتبه دوم به کار گرفته شده‌است. این روش 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. گسسته‌سازی زمانی نیز به روش ضمنی مرتبه اول انجام گرفته‌است. همچنین برای حالت‌هایی که جریان در اعداد رینولدز بالا قرار دارد برای مدل‌سازی اثرات آشفتگی از مدل  $k-\omega SST$  استفاده شده‌است.

## ۵- بررسی استقلال حل از شبکه و اعتبارسنجی

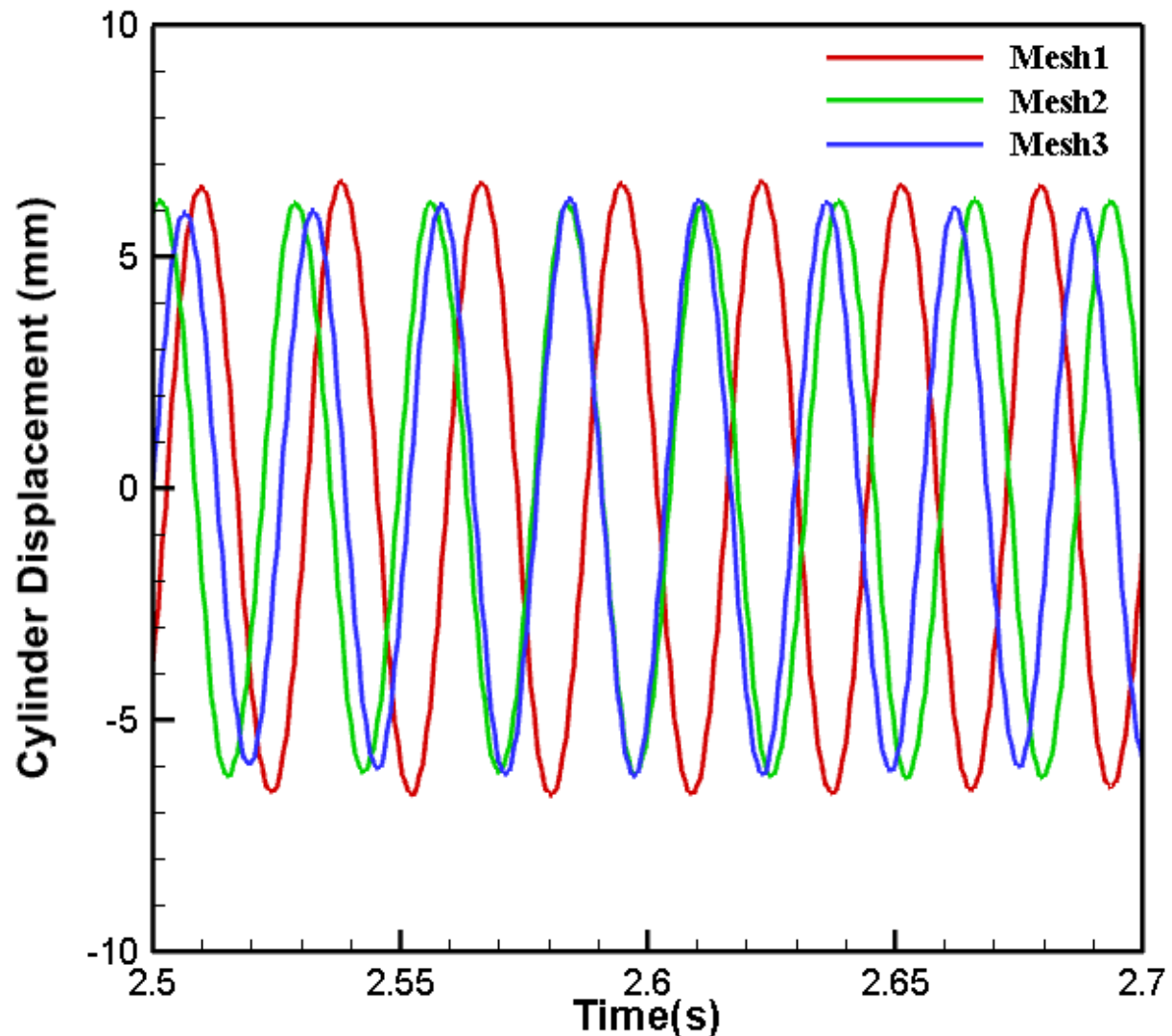
استقلال حل از شبکه و همچنین اعتبارسنجی از مهمترین ملزومات یک مطالعه عددی همچون پژوهش حاضر می‌باشد. از طریق آن می‌توان از صحت شبکه‌بندی و روش حل مورد استفاده اطمینان حاصل کرد. در این بخش به ترتیب به بررسی استقلال حل از شبکه و اعتبارسنجی یکی از نتایج موجود با نتایج محققان پیشین پرداخته می‌شود.

### ۵-۱- استقلال حل از شبکه

یکی از ملزومات مطالعاتی که در آن‌ها از روش‌های حل عددی مبتنی بر شبیه‌سازی بهره برده می‌شود، بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی می‌باشد. در این بخش نیز، برای حالتی که تیغه پیزوالکتریک در پشت سیلندر قرار گرفته، استقلال حل از شبکه ارائه می‌شود. از مشخصات این شبکه استقلال یافته اعم از نوع شبکه، تعداد نقاط روی شبکه بهره برده می‌شود. به منظور بررسی این موضوع، سه شبکه با مشخصات جدول (۴) در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی آن برای هر سه شبکه در عدد رینولدز ۴۰۰۰ انجام شده‌است. در تمام این سه شبکه‌بندی تعداد گره‌های اطراف تیغه برابر با ۸۰ و ۱۰۰ و ۱۲۰ در نظر گرفته شده و همچنین برای نواحی اطراف سیلندر و مرزهای ورودی و بالا و پایین تغییرات مانند اطراف تیغه صورت گرفته است.

جدول ۴- استقلال حل از شبکه، معتبر برای تمامی حالات بررسی شده

نام شبکه	تعداد نود روی تیغه	تعداد نود روی سیلندر	تعداد کل نودها
شبکه شماره ۱	۸۰	۸۰	۵۰۷۶۰
شبکه شماره ۲	۱۰۰	۱۰۰	۶۲۲۸۴
شبکه شماره ۳	۱۲۰	۱۲۰	۷۳۳۳۹



شکل ۳- مقایسه جابه‌جایی برای سه شبکه مورد بررسی برای جابه‌جایی سیلندر

بدین ترتیب استقلال حل از شبکه به کمک مقایسه جابه‌جایی نوسانات سیلندر در عدد رینولدز ۴۰۰۰ مطابق شکل (۳) می‌باشد. با بررسی جابه‌جایی صورت گرفته برای سیلندر، میزان جابه‌جایی و فرکانس نوسانات آن برای شبکه‌های دوم و سوم به یکدیگر نزدیک‌تر بوده و جهت صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌های سخت‌افزاری، شبکه دوم به عنوان شبکه محاسباتی مناسب برای شبیه‌سازی مسائل مورد بحث در این پژوهش در نظر گرفته شده‌است.

## ۵-۲- اعتبارسنجی مدل محاسباتی

اعتبارسنجی برای حالت تک سیلندر با حضور تيغه پيزوالکتریک دقیقاً مشابه نتایج مقاله پیشین نویسندگان این پژوهش در مرجع [۱۳] انجام گرفته است. بدین صورت که، یک تيغه پيزوالکتریک به طول ۳ سانتی‌متر در پشت سیلندر دایروی به قطر ۳ سانتی‌متر قرار داده شده است. به منظور اعتبارسنجی، تمامی شرایط این مسئله با مدل تجربی آکایدین و همکاران [۱۱] از نظر ابعاد و سایر پارامترها کاملاً یکسان بوده ولی با توجه به اینکه مقادیر پارامترها از جمله جرم تيغه از مرجع [۱۲] بدست آمده و همچنین از روش های آکایدین و همکاران نیز در این مسئله استفاده شده است به همین دلیل تلفیقی از این دو مرجع در اعتبارسنجی به کار برده شده است و صرفاً به دلیل تفاوت در جرم تيغه‌های پيزوالکتریک 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 تيغه ناشی از جریان سیال برابر شود. با توجه به اینکه تيغه‌ها از نظر ظاهری یکسان می‌باشند در نتیجه

در فرکانس‌های تشدید رفتار مشابهی از نظر جابه‌جایی دارند می‌توان گفت این مقایسه بین مطالعه حاضر و نتایج حاصل از پژوهش آکایدین و همکاران [۱۱] 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. مشخصات مطالعه حاضر و مطالعه صورت گرفته در مرجع مورد نظر و همچنین عدد رینولدزی که در آن فرکانس نوسانات تيغه پيزوالکتریک بسیار نزدیک به فرکانس طبیعی تيغه پيزوالکتریک می‌شود، مطابق جدول (۵) می‌باشد.

نتایج جابه‌جایی تيغه پيزوالکتریک و ولتاژ تولیدی بدست آمده از شبيه‌سازی در مطالعه حاضر و نتایج تجربی آکایدین و همکاران [۱۱] در حالت تشدید مطابق جدول (۶) است.

مطابق این جدول، نتایج مقدار بیشینه جابه‌جایی و ولتاژ تولیدی در حالت تشدید حاصل از مطالعه حاضر و مرجع مورد نظر خطایی کمتر از ۳/۵ درصد داشته و نشان دهنده دقت قابل قبول مدل مورد استفاده در مطالعه حاضر می‌باشد.

### جدول ۵- مشخصات مطالعه حاضر و پژوهش صورت گرفته توسط آکایدین و همکاران [۱۱ و ۱۳]

پژوهش مورد نظر	فرکانس طبیعی تيغه پيزوالکتریک (Hz)	سختی تيغه پيزوالکتریک (N/m)	جرم تيغه پيزوالکتریک (Kg)	عدد رینولدز
مطالعه حاضر	۹/۳۷	۳/۶	۰/۰۰۱۰۳۸	۳۵۰۰
آکایدین و همکاران [۱۲]	۴۸/۵۴	۳/۶	۰/۰۰۰۰۳۸۷	۱۴۶۴۰

### جدول ۶- اعتبارسنجی مطالعه حاضر با پژوهش صورت گرفته توسط آکایدین و همکاران [۱۱ و ۱۳]

پژوهش مورد نظر	جابه‌جایی نوک تيغه پيزوالکتریک (mm)	ولتاژ تولیدی توسط تيغه پيزوالکتریک (V)
مطالعه حاضر	۲/۹±	۶/۲۴±
آکایدین و همکاران [۸]	۹/۸±	۷۹/۲۳±

## ۶- نتایج

در این بخش نتایج هر یک از حالت‌ها اعم از مقادیر جابه‌جایی سیلندر و تیغه پیزوالکتریک و نمودار ولتاژ تولیدی تیغه ارائه خواهد شد. همچنین ساختار میدان جریان با نمایش خطوط همتراز شدت ورتیسیته<sup>۱</sup> در گام‌های زمانی متفاوت برای هر یک از مسائل مورد بحث آورده شده‌است. در ابتدا نتایج مربوط به حالت‌هایی که در آن پارامتر کنترل‌کننده سختی فنر سیلندر می‌باشد، بیان شده سپس به بیان نتایج مربوط به حالاتی که نوسانات با ضریب میرایی سیلندر کنترل می‌شود، پرداخته می‌شود.

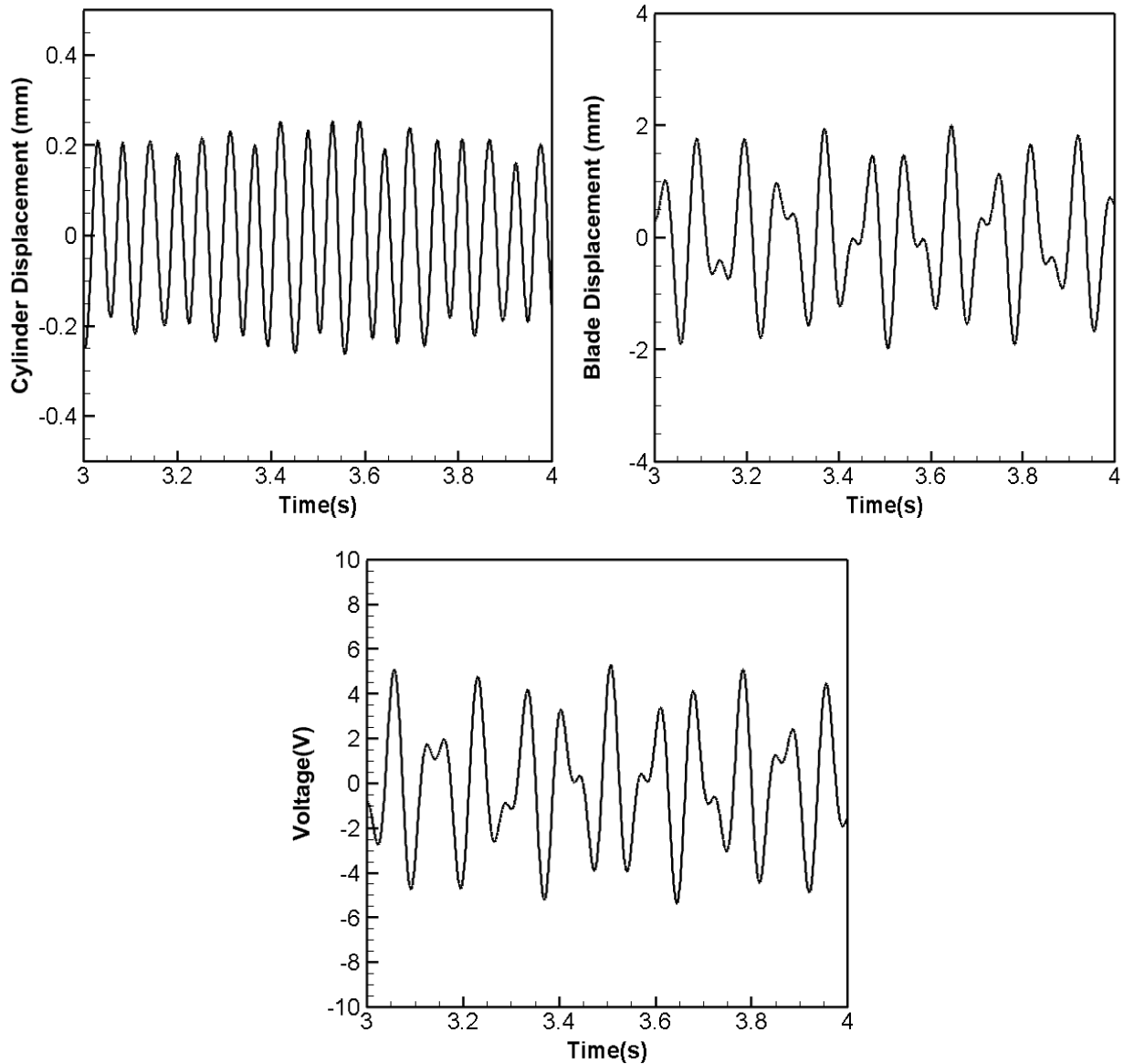
### ۶-۱- نتایج حالت A1

در این بخش نتایج مربوط به حالت A1 که در آن معیار کنترل نوسانات سیلندر که یکی از سه مقداری می‌باشد به عنوان فرض در نظر گرفته شده است، برابر با جابه‌جایی مقدار  $0/7$  میلی‌متر (ولتاژ معادل  $1/87$  ولت) نوک تیغه پیزوالکتریک می‌باشد، ارائه شده‌است. بدین معنا که اگر جابه‌جایی تیغه پیزوالکتریک کمتر از مقدار  $0/7$  میلی‌متر باشد، نیازی به اعمال کنترل‌کننده نبوده و در صورتی که جابه‌جایی تیغه از  $0/7$  میلی‌متر فراتر رود، کنترل‌کننده اعمال می‌شود. پارامتر کنترل‌کننده در این بخش، سختی فنر سیلندر بوده که از مقدار  $65$  در زمان عدم اعمال کنترل‌کننده به مقدار  $100$  در لحظه لزوم اعمال آن، تغییر کرده و این تغییر به صورت مداوم با توجه به شرط مربوطه در نظر گرفته می‌شود. شکل (۴) مقادیر جابه‌جایی سیلندر، جابه‌جایی تیغه پیزوالکتریک و همچنین ولتاژ تولیدی توسط تیغه پیزوالکتریک را در گام زمانی  $3$  تا  $4$  ثانیه نمایش می‌دهد. مطابق نتایج مندرج در این شکل، تیغه پیزوالکتریک از  $2$  تا  $2$  میلی‌متر جابه‌جا شده و ولتاژ تولیدی توسط آن نیز از  $5/5$  تا  $5/5$  ولت تغییر می‌کند. همچنین با توجه به شروط مربوط به اعمال کنترل‌کننده، سیلندر دایروی نیز از تقریباً  $0/25$  تا  $0/25$  جابه‌جا می‌شود. شکل (۵) خطوط همتراز شدت ورتیسیته را اطراف تیغه پیزوالکتریک و سیلندر را در چهار گام زمانی نشان می‌دهد. مطابق این شکل، ریزش گردابه‌های اطراف سیلندر و اعمال آن بر تیغه پیزوالکتریک مشهود بوده که موجب نوسان پی‌درپی سیلندر و تیغه پیزوالکتریک می‌شود.

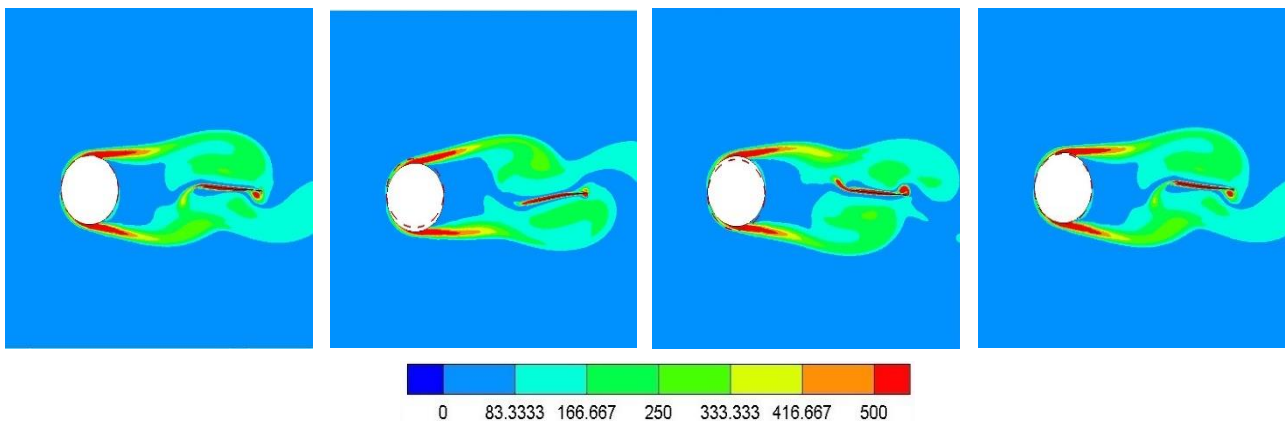
### ۶-۲- نتایج حالت A2

حالت دوم بررسی شده در این پژوهش، حالت A2 بوده و معیار اعمال کنترل‌کننده در آن جابه‌جایی  $1$  میلی‌متر (ولتاژ معادل  $2/67$  ولت) نوک تیغه پیزوالکتریک می‌باشد. منظور از معیار  $1$  میلی‌متر جابه‌جایی نوک تیغه پیزوالکتریک برای اعمال کنترل‌کننده آن است که اگر جابه‌جایی نوک تیغه پیزوالکتریک زیر  $1$  میلی‌متر باشد، کنترل‌کننده در نظر گرفته شده و مقدار سختی فنر سیلندر همان مقدار اولیه  $65$  می‌باشد. همچنین با افزایش جابه‌جایی تیغه پیزوالکتریک به بیش از  $1$  میلی‌متر، کنترل‌کننده برای کنترل نوسانات سیلندر وارد عمل شده و مقدار سختی فنر آن به  $100$  افزایش می‌یابد. مقادیر جابه‌جایی سیلندر، تیغه پیزوالکتریک و ولتاژ بدست آمده از آن در شکل (۶) برای گام زمانی  $3$  تا  $4$  ثانیه نشان داده شده‌است.

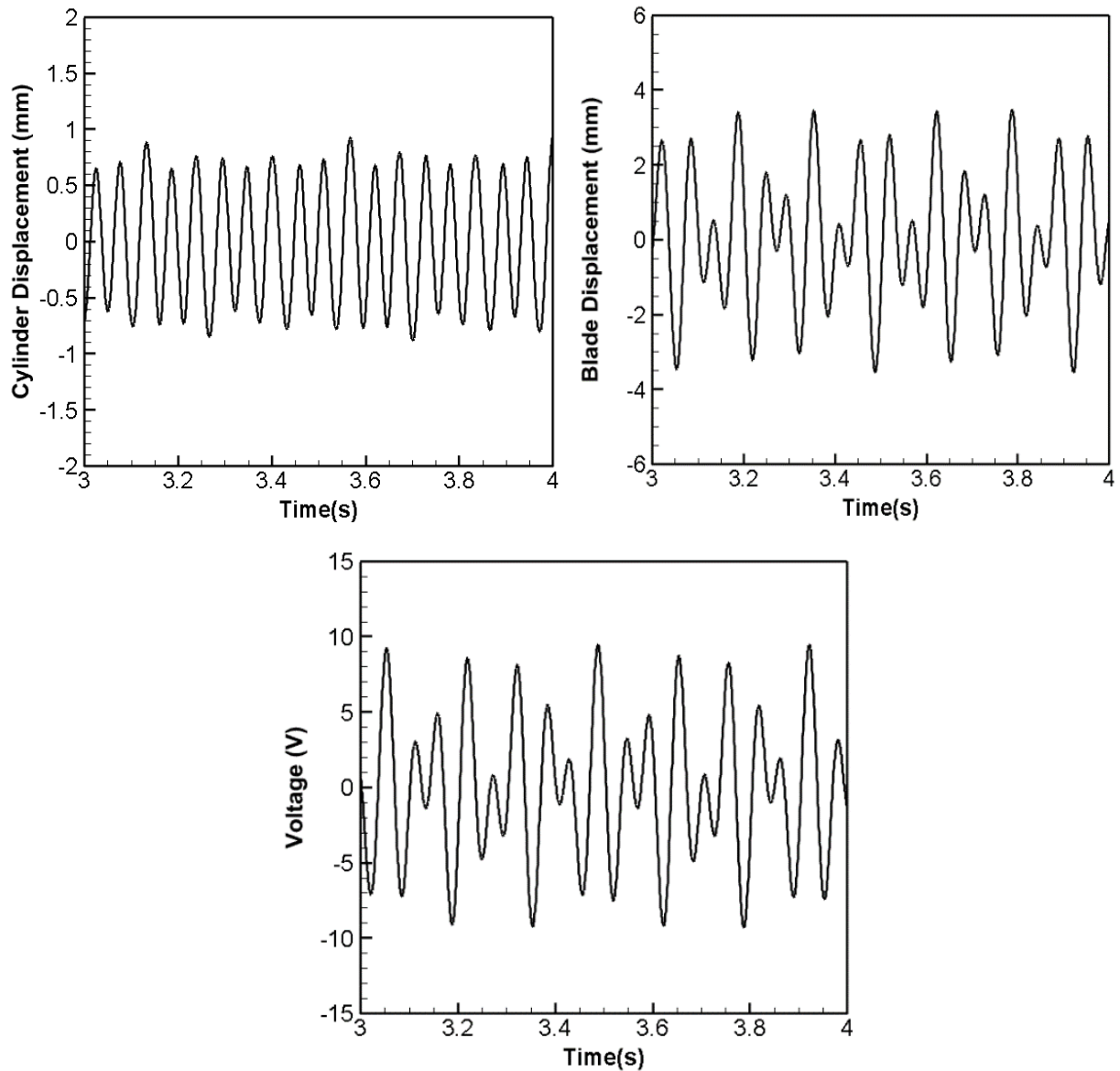
<sup>1</sup> Vorticity intensity



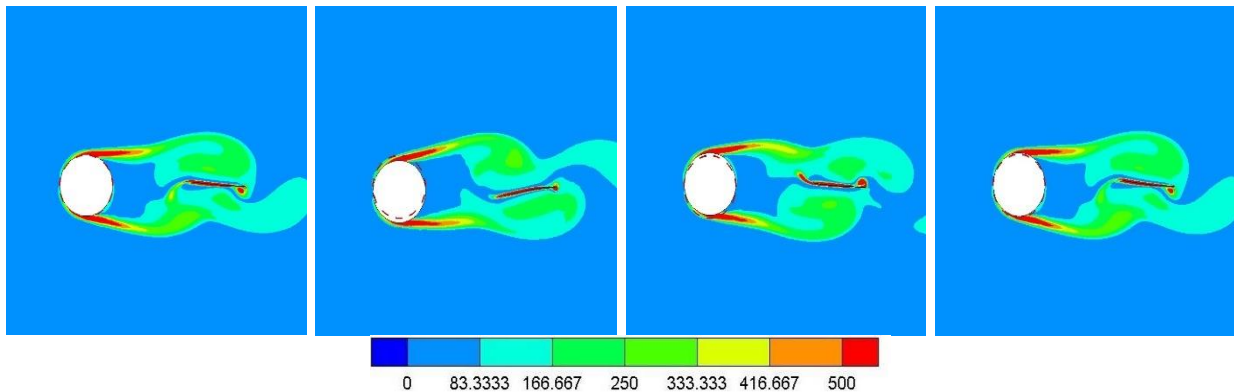
شکل ۴- نمودار جابه‌جایی سیلندر (بالا چپ)، جابه‌جایی نوک تیغه پیزوالکتریک (بالا راست) و میزان ولتاژ تولید شده توسط تیغه پیزوالکتریک (پایین) در بازه زمانی ۳ تا ۴ ثانیه برای حالت A1



شکل ۵- خطوط همتراز شدت ورتیسیتی اطراف تیغه و سیلندر در گام‌های زمانی ۳، ۳/۰۲ و ۳/۰۴ و ۳/۰۶ ثانیه (به ترتیب از راست به چپ) برای حالت A1



شکل ۶- نمودار جابه‌جایی سیلندر (بالا چپ)، جابه‌جایی نوک تیغه پیزوالکتریک (بالا راست) و میزان ولتاژ تولید شده توسط تیغه پیزوالکتریک (پایین) در بازه زمانی ۳ تا ۴ ثانیه برای حالت A2

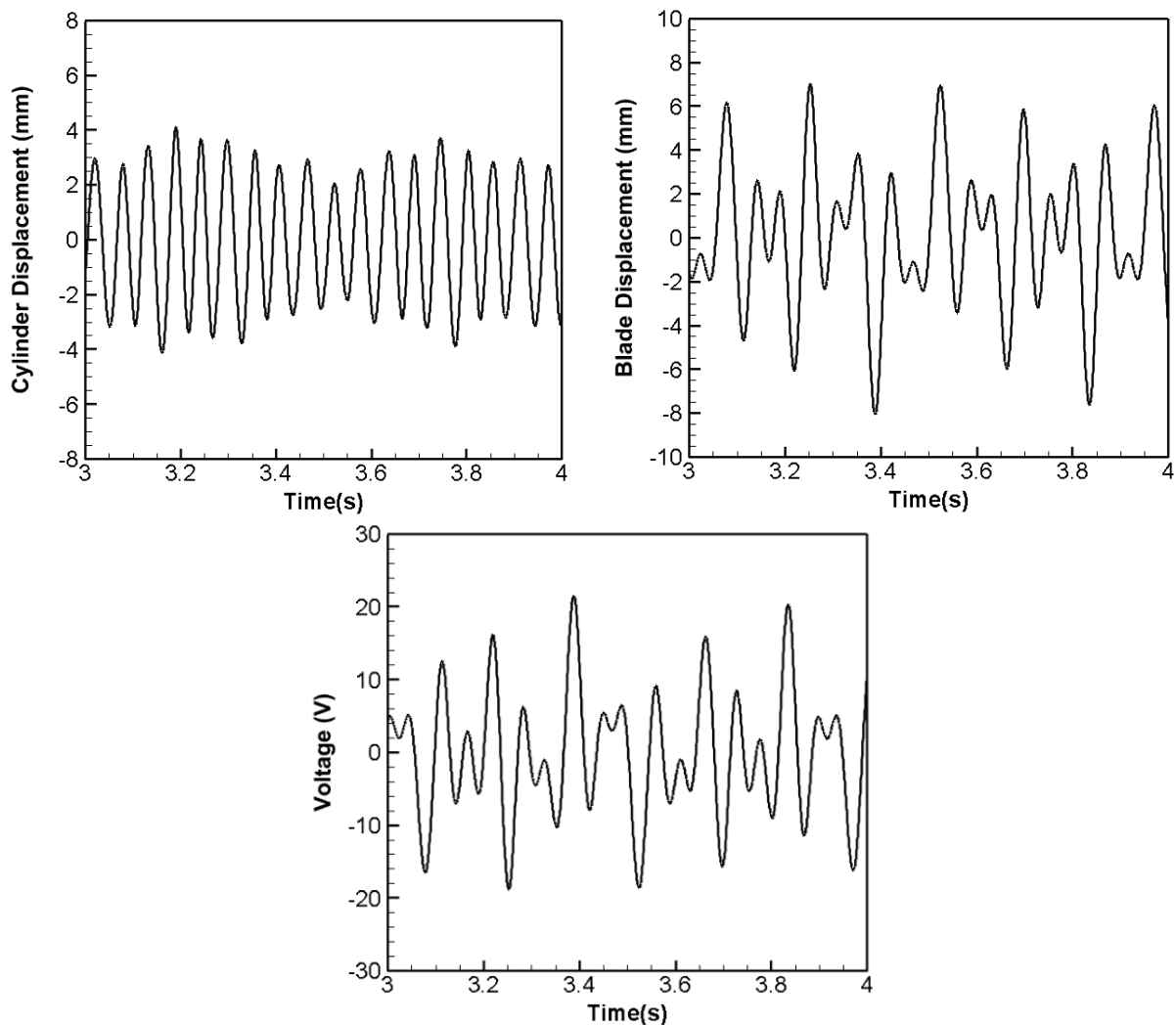


شکل ۷- خطوط همتراز شدت ورتیسیتی اطراف تیغه و سیلندر در گام‌های زمانی ۳، ۳/۰۲ و ۳/۰۴ و ۳/۰۶ ثانیه (به ترتیب از راست به چپ) برای حالت A2

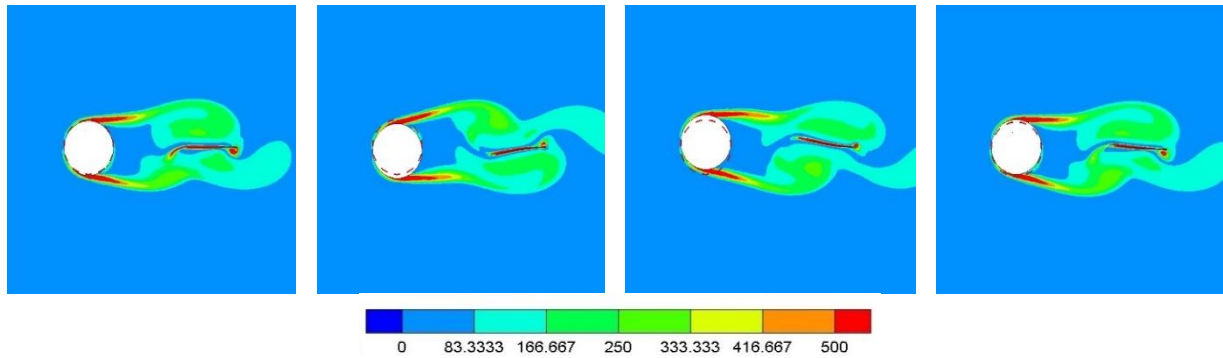
مطابق این شکل، نوک تیغه پیزوالکتریک از  $3/5$  تا  $3/5$  میلی‌متر جابه‌جا شده و ولتاژ تولید شده آن بین  $9$  تا  $9$  ولت در نوسان است. با توجه به نتایج حاصل از تیغه پیزوالکتریک و با در نظر گرفتن شرط اعمال کنترل‌کننده، سیلندر بین  $0/9$  تا  $0/9$  میلی‌متر نوسان می‌کند. همچنین شکل (۷) برای نشان دادن ساختار جریان سیال اطراف سیلندر و تیغه پیزوالکتریک در نظر گرفته شده که در آن خطوط همتراز شدت ورتیسیتی در چهار گام زمانی آورده شده‌است. در این شکل نیز نوسان پی‌درپی تیغه و سیلندر کاملاً مشهود بوده که عامل این نوسان را می‌توان نیروی بدست آمده از ریزش متناوب گردابه‌ها در نظر گرفت.

### ۳-۶- نتایج حالت A3

حالت سوم بررسی شده در مطالعه حاضر، حالتی است که در آن معیار کنترل‌کننده، جابه‌جایی  $2$  میلی‌متر (ولت  $5/34$ ) نوک تیغه پیزوالکتریک می‌باشد. براساس آن اگر مقدار جابه‌جایی تیغه پیزوالکتریک فراتر از  $2$  میلی‌متر برود، کنترل‌کننده وارد عمل شده و مقدار سختی فنر سیلندر را از  $65$  به  $100$  افزایش می‌دهد و همین امر موجب کنترل نوسان سیلندر و به تبع آن اثرش بر نوسان تیغه پیزوالکتریک می‌شود.



**شکل ۸-** نمودار جابه‌جایی سیلندر (بالا چپ)، جابه‌جایی نوک تیغه پیزوالکتریک (بالا راست) و میزان ولتاژ تولید شده توسط تیغه پیزوالکتریک (پایین) در بازه زمانی ۳ تا ۴ ثانیه برای حالت A3

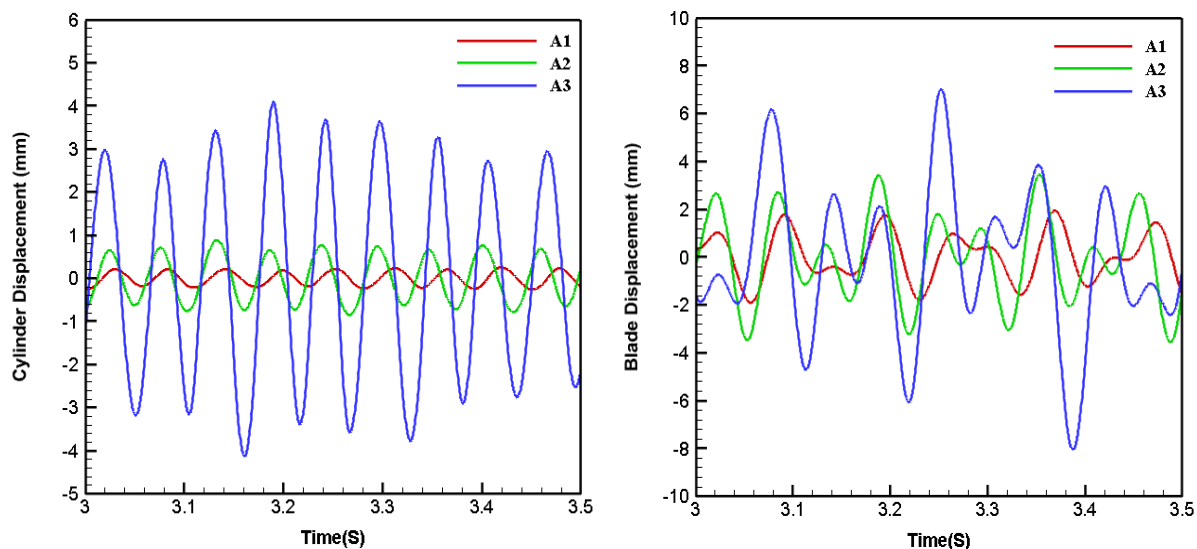


شکل ۹- خطوط همتراز شدت ورتیسیتی اطراف تیغه و سیلندر در گام‌های زمانی ۳، ۳/۰۲ و ۳/۰۴ و ۳/۰۶ ثانیه (به ترتیب از راست به چپ) برای حالت .

بر اساس شبیه‌سازی صورت گرفته در این حالت، مقدار جابه‌جایی نوک تیغه پیزوالکتریک از ۸- تا ۸ میلی‌متر و ولتاژ تولیدی آن ۲۰- تا ۲۲ ولت در نوسان است که در شکل (۸) آورده شده‌است. مطابق این شکل جابه‌جایی سیلندر نیز از ۴- تا ۴ میلی‌متر تغییر کرده است. همچنین خطوط همتراز شدت ورتیسیتی در چهار گام زمانی در شکل (۹) آورده شده که نوسانات سیلندر و تیغه پیزوالکتریک را به خوبی نمایش می‌دهد. طبق این شکل ریزش گردابه‌هایی که در اثر حضور سیلندر دایروی از پشت سیلندر جدا می‌شود، بر روی تیغه پیزوالکتریک اثر کرده و باعث نوسان آن به عنوان کنترل‌کننده نوسانات می‌شود.

#### ۶-۴- مقایسه نتایج مربوط به حالت‌های A1، A2 و A3

در این قسمت نتایج بدست آمده از حالت‌های A1، A2 و A3 مقایسه شده‌است. هدف از مقایسه جابه‌جایی‌های سیلندر و تیغه این سه حالت با یکدیگر، بررسی اثر معیار اعمال کنترل‌کننده یعنی مقدار جابه‌جایی ۰/۷، ۱ و ۲ میلی‌متر بر جابه‌جایی سیلندر و همچنین اثر بازخورد آن بر خود تیغه پیزوالکتریک می‌باشد.

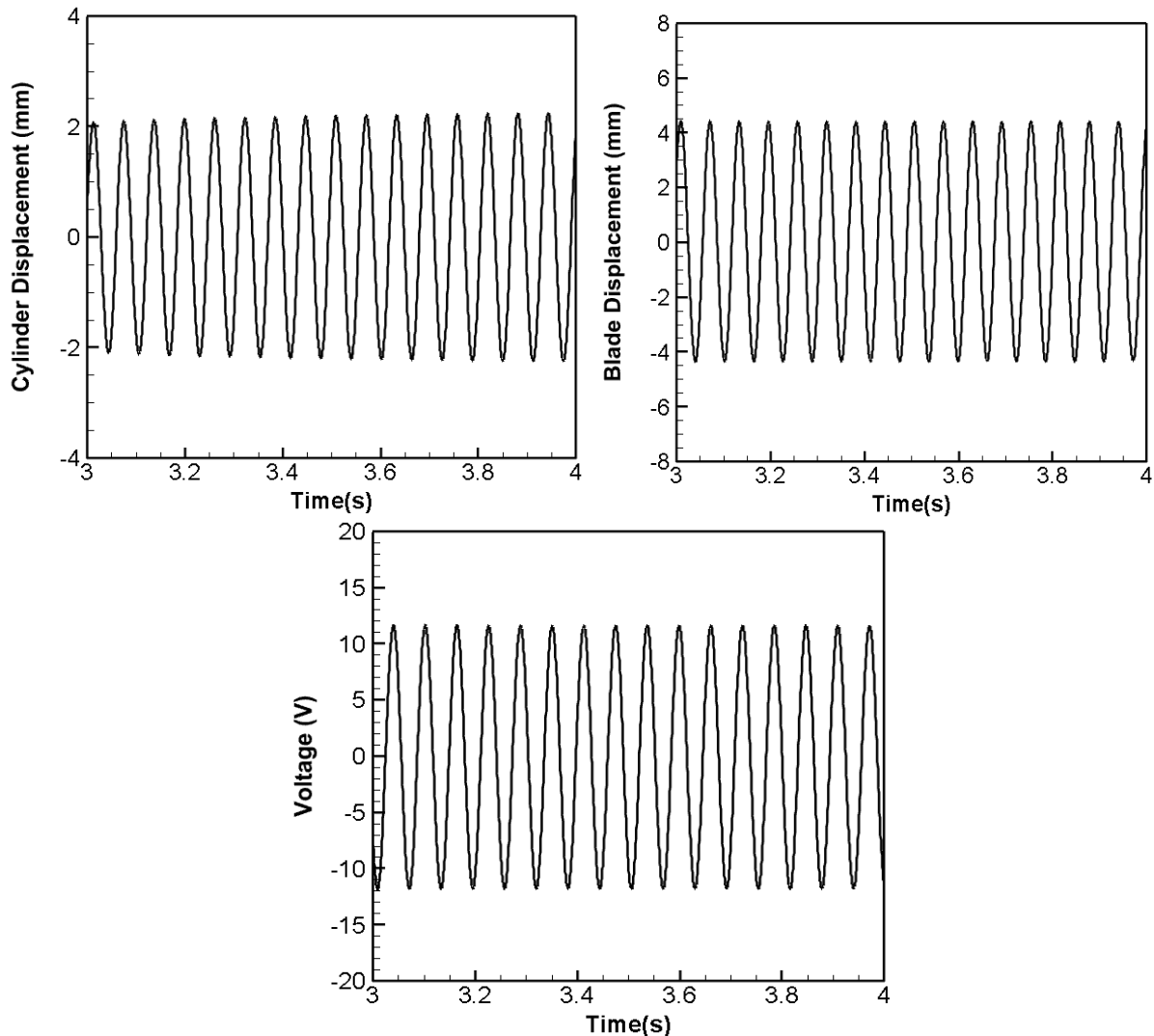


شکل ۱۰- مقایسه جابه‌جایی سیلندر (چپ) و جابه‌جایی نوک تیغه پیزوالکتریک (راست) برای سه حالت A1، A2 و A3

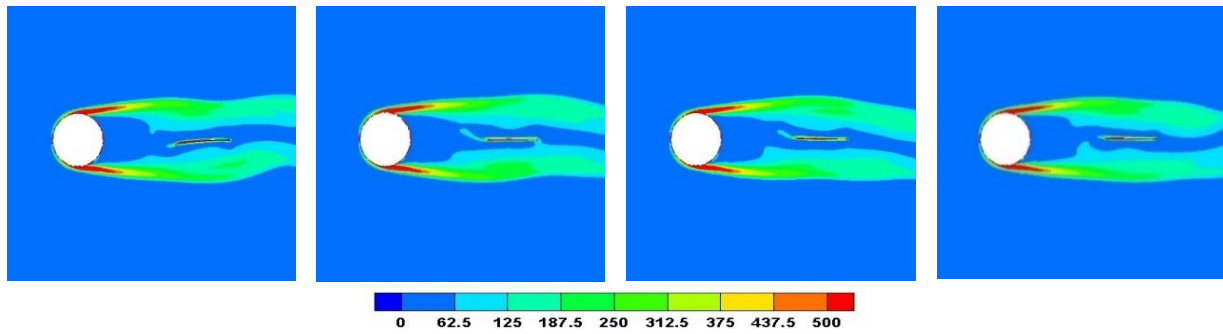
## ۵-۶- نتایج حالت B1

نتایج مربوط به اولین حالتی که در آن پارامتر کنترل‌کننده ضریب میرایی سیلندر می‌باشد، در این بخش ارائه شده‌است. این حالت، چهارمین حالت از مجموع شش حالت بررسی شده در این مطالعه می‌باشد. در این مسئله اگر جابه‌جایی نوک تیغه پیزوالکتریک به عنوان معیار کنترل‌کننده از  $0.7$  میلی‌متر فراتر برود، ضریب میرایی سیلندر از مقدار صفر به  $0.228$  افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که در هر دو لحظه‌ای که کنترل‌کننده اعمال شود یا عدم اعمال آن، مقدار سختی سیلندر ثابت و برابر عدد  $65$  بوده و پارامتر کنترل‌کننده صرفاً ضریب میرایی سیلندر می‌باشد.

مطابق شکل (۱۱) نوسانات نوک تیغه پیزوالکتریک در بازه زمانی مشخص شده از  $4/5$  تا  $4/5$  میلی‌متر تغییر کرده و ولتاژ تولیدی آن از  $12$  تا  $12$  ولت در نوسان است. همچنین بنابر معیار کنترل‌کننده و دستورات مربوط به آن، جابه‌جایی سیلندر از  $2$  تا  $2$  میلی‌متر تغییر می‌کند. همچنین خطوط هم‌تراز شدت ورتیسیتی در چهار گام زمانی در شکل (۱۲) آورده شده که نشان دهنده نوسان سیلندر و تیغه پیزوالکتریک و همچنین موید اثر گردابه‌های جدا شده از سیلندر در نوسان آن‌ها می‌باشد.



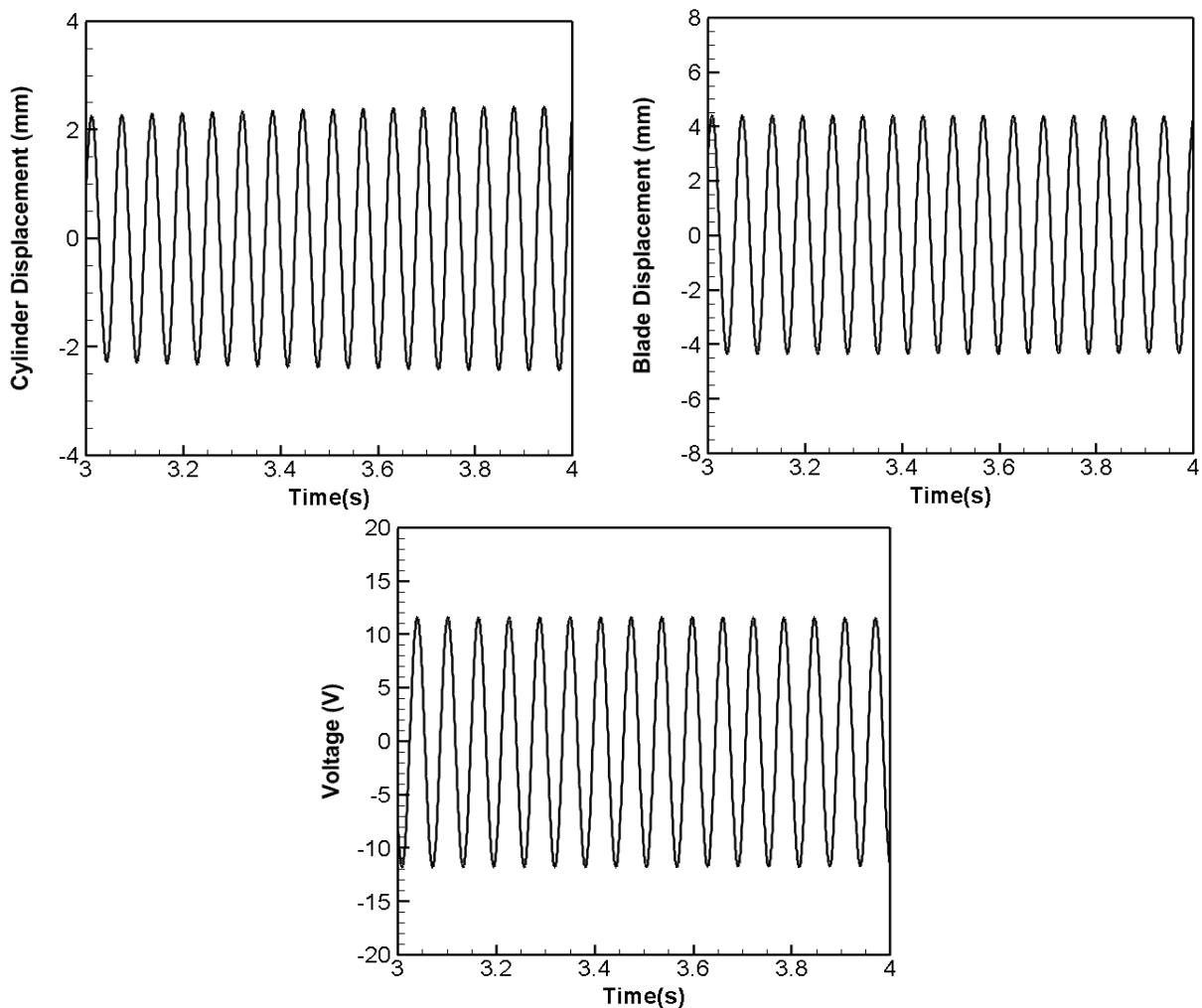
شکل ۱۱- نمودار جابه‌جایی سیلندر (بالا چپ)، جابه‌جایی نوک تیغه پیزوالکتریک (بالا راست) و میزان ولتاژ تولید شده توسط تیغه پیزوالکتریک (پایین) در بازه زمانی ۳ تا ۴ ثانیه برای حالت B1



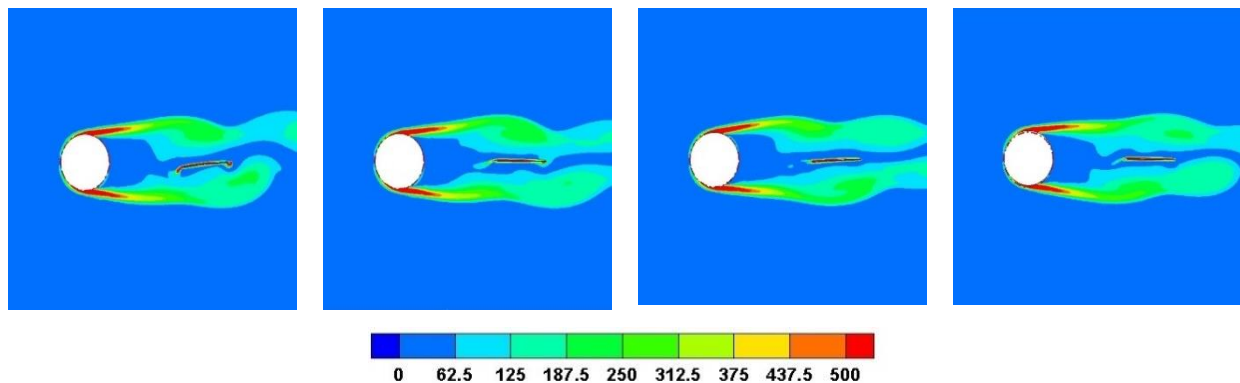
شکل ۱۲- خطوط همتراز شدت ورتیسیتی اطراف تیغه و درگام‌های زمانی ۰.۴، ۰.۲/۴ و ۰.۴/۴ و ۰.۶/۴ ثانیه (به ترتیب از راست به چپ) برای حالت B1

### ۶-۶- نتایج حالت B2

حالت B2 مسئله دیگری است که در آن پارامتر کنترل‌کننده ضریب میرایی سیلندر است. معیار اعمال کنترل‌کننده در این حالت جابه‌جایی ۱ میلیمتری برای نوک تیغه بوده و به این معنا است که در صورت نوسان نوک تیغه پیزوالکتریک بیشتر از ۱ میلیمتر، کنترل‌کننده وارد عمل شده و ضریب میرایی سیلندر از صفر به ۰.۰۲۲۸ افزایش می‌یابد.



شکل ۱۳- نمودار جابه‌جایی سیلندر (بالا چپ)، جابه‌جایی نوک تیغه پیزوالکتریک (بالا راست) و میزان ولتاژ تولید شده توسط تیغه پیزوالکتریک (پایین) در بازه زمانی ۳ تا ۴ ثانیه برای حالت B2

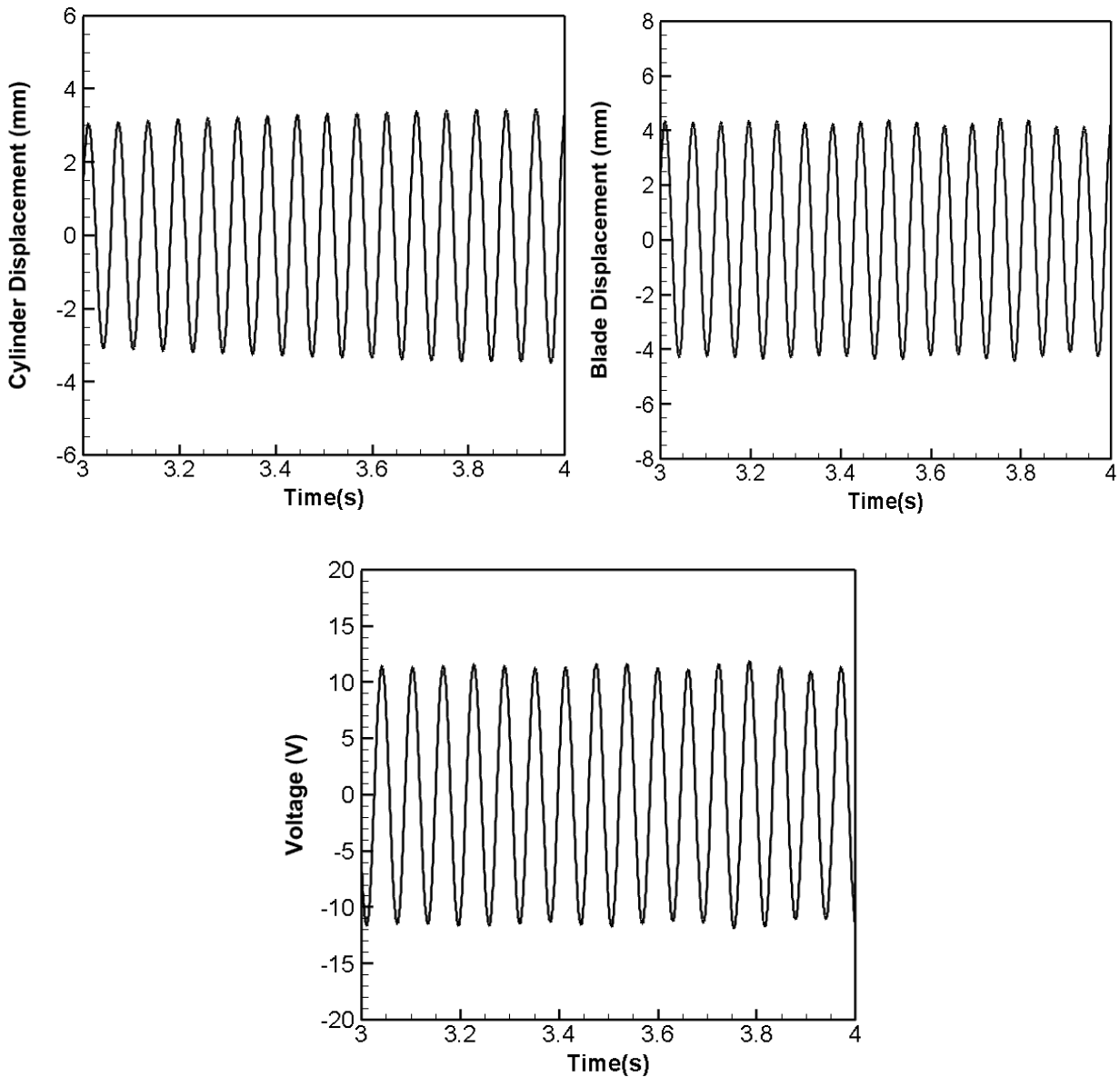


شکل ۱۴- خطوط همتراز شدت ورتیسیتی اطراف تیغه و در گام‌های زمانی ۴، ۴/۰۲ و ۴/۰۴ و ۴/۰۶ ثانیه (به ترتیب از راست به چپ) برای حالت B2

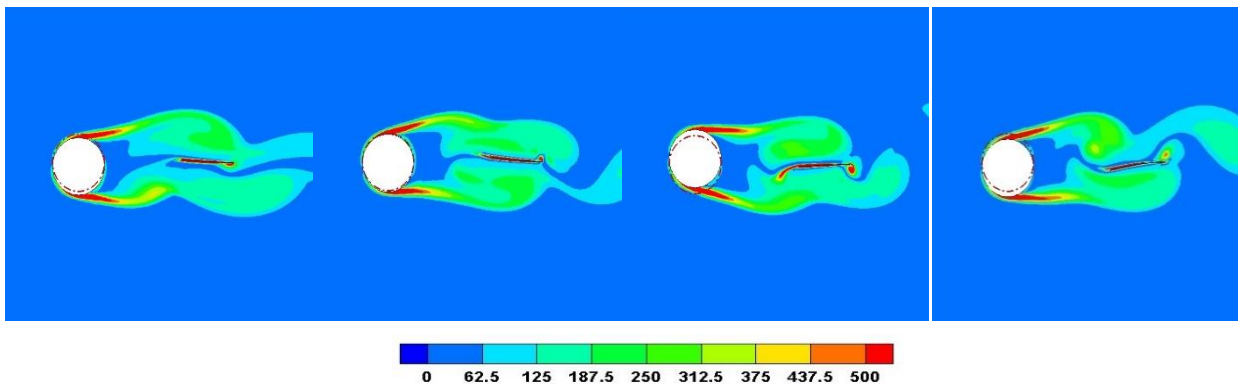
معیار اعمال کنترل‌کننده در این حالت جابه‌جایی ۱ میلیمتری برای نوک تیغه بوده و به این معنا است که در صورت نوسان نوک تیغه پیزوالکتریک بیشتر از ۱ میلیمتر، کنترل‌کننده وارد عمل شده و ضریب میرایی سیلندر از صفر به ۰/۰۲۲۸ افزایش می‌یابد. در این حالت نیز مشابه حالت B1، سختی فنر سیلندر همواره مقدار ثابت ۶۵ در نظر گرفته می‌شود. بنابر اطلاعات بدست آمده از شبیه‌سازی این حالت، مطابق شکل (۱۳) جابه‌جایی نوک تیغه پیزوالکتریک از ۴/۵- تا ۴/۵ میلیمتر تغییر کرده و ولتاژ تولیدی آن بین ۱۲- تا ۱۲ ولت در نوسان است. همچنین سیلندر نیز از ۲/۵- تا ۲/۵ میلیمتر جابه‌جا می‌شود. شکل (۱۴) نیز خطوط همتراز شدت ورتیسیتی را در چهار گام زمانی متفاوت نشان داده‌است. مطابق این شکل، ساختار جریان اطراف سیلندر و تیغه و اثر آن بر نوسان آن دو مشهود است.

#### ۶-۷- نتایج حالت B3

حالت B3، ششمین حالت بررسی شده در این پژوهش و سومین حالتی است که پارامتر کنترل‌کننده، ضریب میرایی سیلندر می‌باشد. بر این اساس، اگر مقدار جابه‌جایی نوک تیغه پیزوالکتریک از ۲ میلیمتر بیشتر شود، ضریب میرایی ۰/۰۲۲۸ شده در غیر این صورت مقدار آن صفر باقی می‌ماند. همچنین سختی فنر سیلندر برابر مقدار ثابت ۶۵ بوده و عملاً عامل کنترل‌کننده فقط مقدار ضریب میرایی سیلندر است. شکل (۱۵) نمودار جابه‌جایی نوک تیغه پیزوالکتریک، جابه‌جایی سیلندر و ولتاژ تولید شده توسط تیغه پیزوالکتریک را نشان می‌دهد. مطابق این شکل در گام زمانی مشخص شده، نوک تیغه پیزوالکتریک از ۴/۵- تا ۴/۵ میلیمتر جابه‌جا شده و ولتاژ تولیدی آن بین ۱۲- تا ۱۲ ولت در نوسان است. همچنین بر اساس این شکل، با توجه به معیار اعمال کنترل‌کننده، سیلندر دایروی بین ۳/۴- تا ۳/۴ میلیمتر جابه‌جا می‌شود. خطوط همتراز شدت ورتیسیتی برای جریان اطراف سیلندر و تیغه پیزوالکتریک در شکل (۱۶) به نمایش درآمده‌است. مطابق این شکل، گردابه‌های جدا شده از سیلندر باعث ایجاد اختلاف متناوب اطراف تیغه پیزوالکتریک شده و باعث نوسان آن می‌شود. همچنین به دلیل خاصیت نوسانی جریان اطراف سیلندر دایروی، جابه‌جایی سیلندر نیز رخ می‌دهد که در شکل کاملاً مشهود است.



شکل ۱۵- نمودار جابه‌جایی سیلندر (بالا چپ)، جابه‌جایی نوک تیغه پیزوالکتریک (بالا راست) و میزان ولتاژ تولید شده توسط تیغه پیزوالکتریک (پایین) در بازه زمانی ۳ تا ۴ ثانیه برای حالت B3



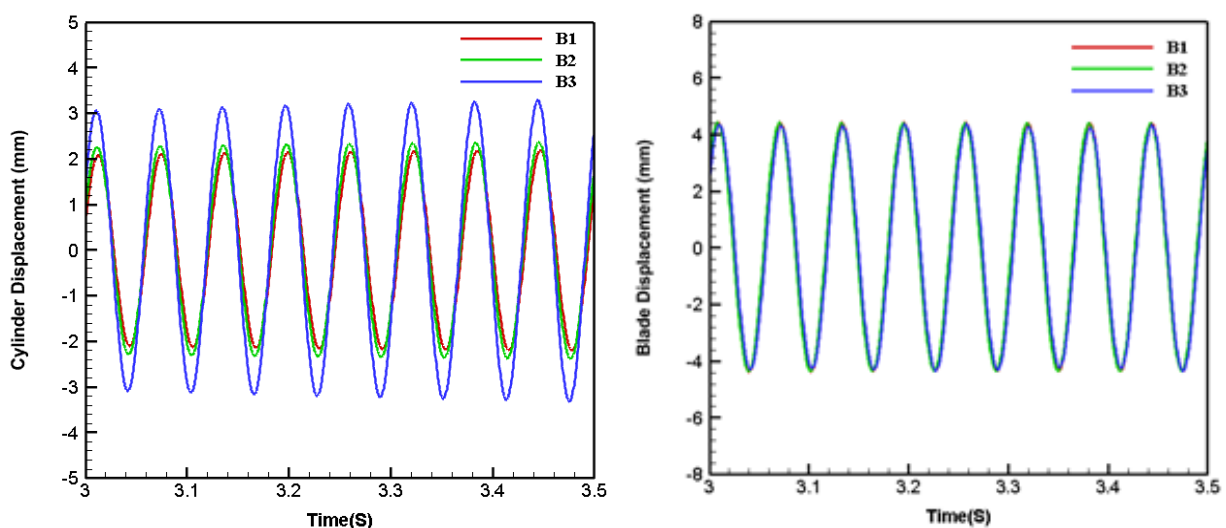
شکل ۱۶- خطوط هم‌تراز شدت ورتیسیتی اطراف تیغه و سیلندر در گام‌های زمانی ۴، ۴/۰۲ و ۴/۰۴ و ۴/۰۶ ثانیه (به ترتیب از راست به چپ) برای حالت B3

### ۶-۸- مقایسه نتایج مربوط به حالت‌های B1, B2 و B3

به منظور بررسی اثر معیار کنترل کننده تیغه پیزوالکتریک بر نوسانات سیلندر دایروی و همچنین بازخورد آن یعنی اثر آن بر خود تیغه پیزوالکتریک، نتایج مربوط به حالت‌های B1, B2 و B3 با یکدیگر مقایسه شده‌اند. بر اساس شکل (۱۷) در حالت B1 با توجه به آن که معیار کنترل کننده یعنی جابه‌جایی تیغه پیزوالکتریک ۰/۷ میلی‌متر می‌باشد، کنترل کننده سریع‌تر وارد عمل شده و زودتر از سایر حالت‌ها پارامتر کنترل کننده یعنی ضریب میرایی سیلندر را از صفر به ۰/۰۲۲۸ افزایش می‌دهد. پس از آن، حالت B2 با معیار ۱ میلی‌متر، نوسانات سیلندر کمتری داشته و بیشترین نوسانات سیلندر مربوط به حالت B3 می‌باشد. همان‌طور که در پیشتر ذکر شد، معیار کنترل کننده خود را در لحظه اعمال کنترل کننده نشان می‌دهد و مشخص است که در حالت B3 با معیار کنترل کننده ۲ میلی‌متر، کنترل کننده نسبت به باقی حالت‌ها دیرتر وارد عمل می‌شود. همچنین بررسی اثر بازخورد نوسانات سیلندر بر جابه‌جایی تیغه پیزوالکتریک مؤید آن است که بر خلاف مقایسه صورت گرفته در حالت‌های A1 تا A3، برای حالت‌های B1 تا B3 تفاوت خاصی در جابه‌جایی تیغه پیزوالکتریک مشخص نیست و جابه‌جایی تیغه در هر سه کاملاً منطبق است. دلیل این رفتار را می‌توان در قابل توجه نبودن جابه‌جایی سیلندر با یکدیگر نسبت به حالت‌های A1 تا A3 قلمداد کرد. به این معنا که در حالت‌های A، اختلاف نوسانات سیلندر و به تبع آن اثر متقابل بر جابه‌جایی تیغه پیزوالکتریک در پایین دست، بیشتر از اختلاف نوسانات سیلندر و اثر متقابل آن بر تیغه پایین دست در حالت‌های B می‌باشد.

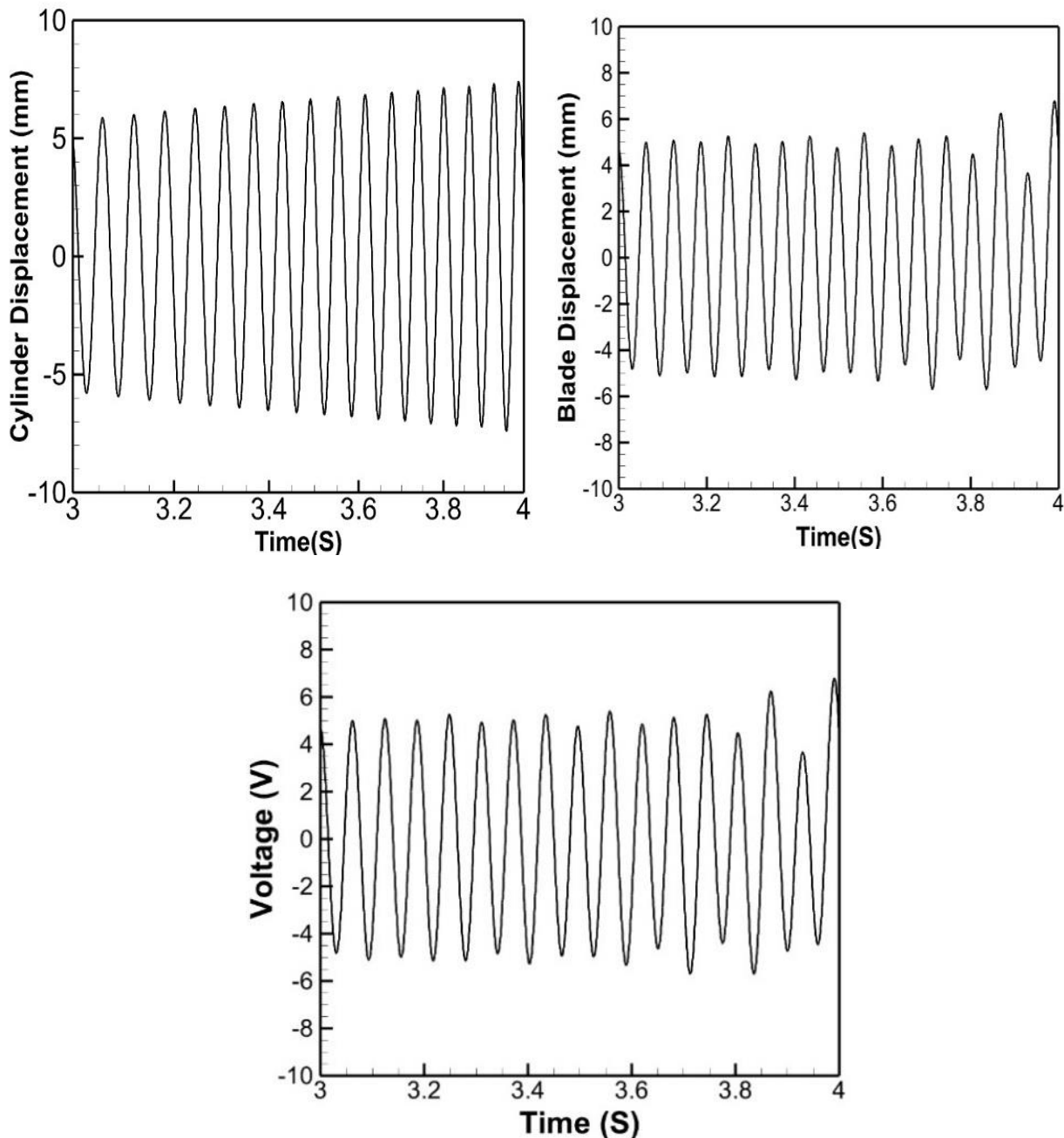
### ۶-۹- نتایج حالت C3

نتایج حالت C3 مربوط به حالتی است که کنترل کننده وجود ندارد. در این حالت سیلندر و تیغه پیزوالکتریک بدون اعمال کنترل کننده نوسان می‌کنند. در تمامی لحظات حالت مذکور مقدار سختی فنر سیلندر ثابت و برابر عدد ۶۵ می‌باشد. همچنین مقدار ضریب میرایی سیلندر نیز ثابت و برابر عدد صفر خواهد بود. همان‌طور که در شکل (۱۸) مشاهده می‌شود سیلندر در یک بازه زمانی مشخص شده به صورت تقریبی از ۶- میلی‌متر تا ۶+ میلی‌متر به صورت یکنواخت نوسان می‌کند.

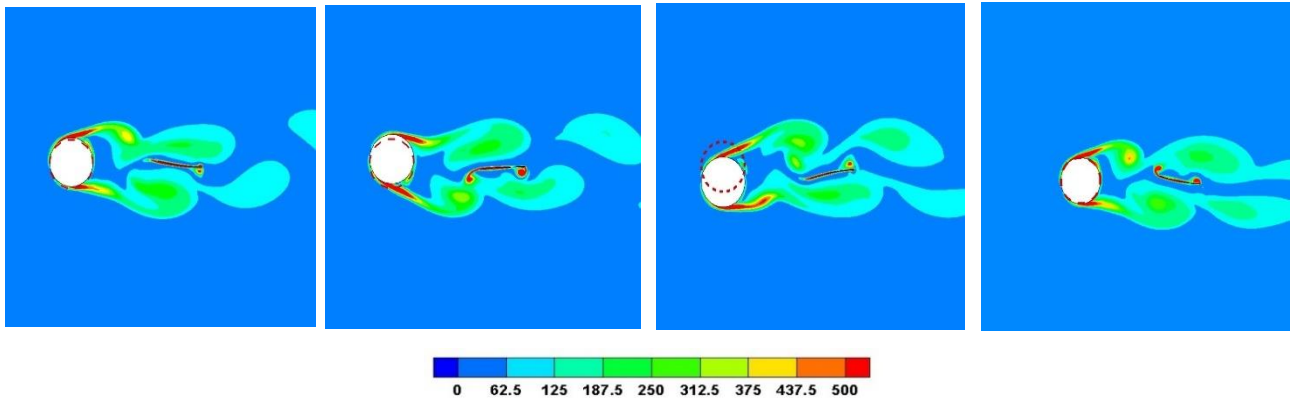


شکل ۱۷- مقایسه جابه‌جایی سیلندر (چپ) و جابه‌جایی نوک تیغه پیزوالکتریک (راست) برای سه حالت B1, B2 و B3

بیشترین جابجایی تیغه پیزوالکتریک مربوط به نوک تیغه و تقریباً از  $-6$  میلی‌متر تا  $+6$  میلی‌متر می‌باشد. در این محدوده مقدار ولتاژ تولیدی تیغه از  $-5$  تا  $+5$  ولت در نوسان است. بنابر نتایج بدست آمده جابه‌جایی سیلندر و نوک تیغه پیزوالکتریک به طور کلی بیشتر از زمانی است که کنترل‌کننده اعمال شده است. در شکل (۱۹) خطوط هم‌تراز شدت و رتیسیتی در چهار گام زمانی به نمایش گذاشته شده است. همان‌طور که مشخص است گردابه‌های اطراف سیلندر گردابه باعث نوسان تیغه پیزوالکتریک می‌شود. همچنین جابه‌جایی سیلندر در حالتی که کنترل‌کننده وجود ندارد نسبت به حالتی که کنترل‌کننده اعمال شده است، نوسانات بیشتری نسبت به موقعیت اولیه هندسی خود دارد.



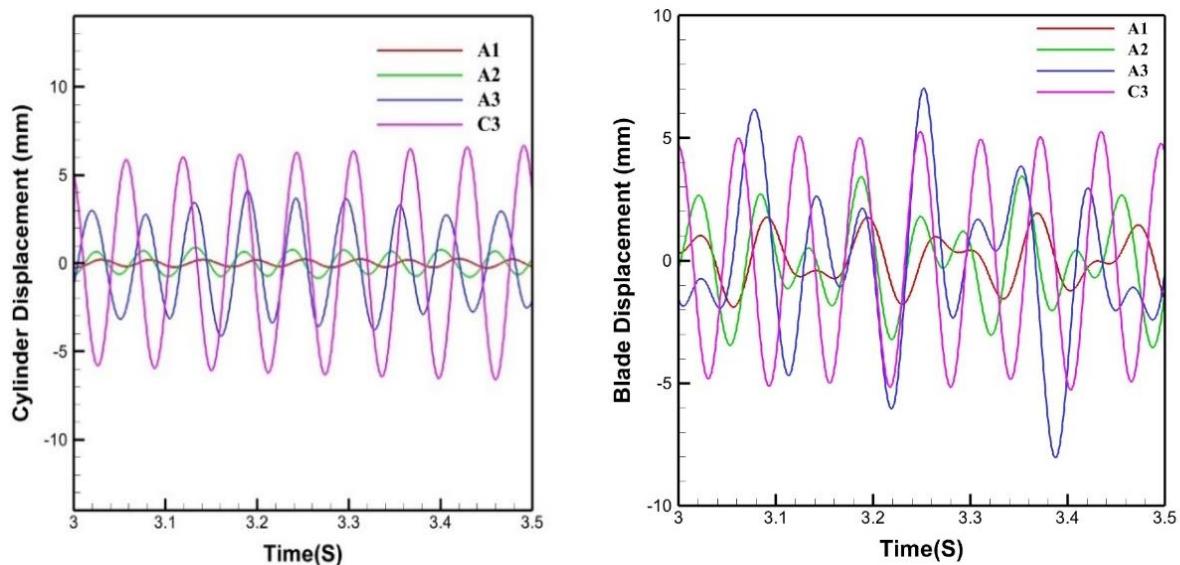
شکل ۱۸- نمودار جابه‌جایی سیلندر (بالا چپ)، جابه‌جایی نوک تیغه پیزوالکتریک (بالا راست) و میزان ولتاژ تولید شده توسط تیغه پیزوالکتریک (پایین) در بازه زمانی ۳ تا ۴ ثانیه برای حالت C3



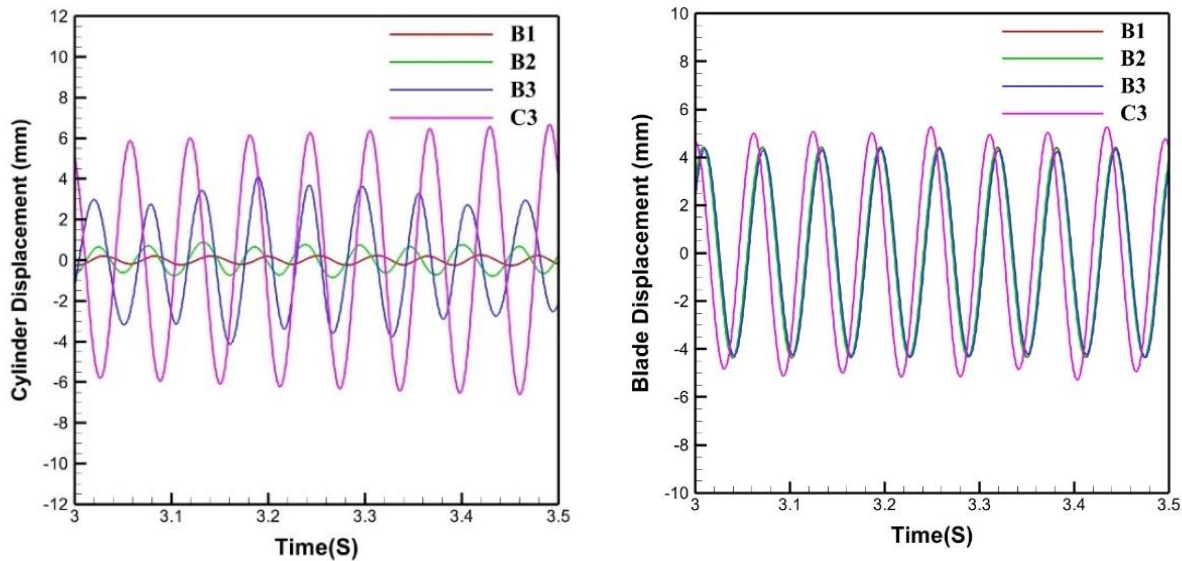
شکل ۱۹- خطوط هم‌تراز شدت و رتیبیتی اطراف تیغه و سیلندر در گام‌های زمانی ۴، ۴/۰۲ و ۴/۰۴ و ۴/۰۶ ثانیه (به ترتیب از راست به چپ) برای حالت C3

#### ۶-۱۰- مقایسه نتایج مربوط به حالت های A1، A2، A3 و C3

در این بخش سه حالت A1، A2، A3 و C3 با یکدیگر مقایسه شده است. بر اساس شکل (۲۰) در حالت C3 با توجه به اینکه کنترل‌کننده فعال نشده است و مقدار سختی فنر سیلندر ثابت بوده و برابر عدد ۶۵ می‌باشد، در مقایسه با حالت های A1 تا A3 که در این سه حالت بر اساس جابه‌جایی نوک تیغه پیزوالکتریک کنترل‌کننده فعال شده و سختی فنر را از مقدار ۶۵ به ۱۰۰ افزایش می‌دهد، نوسانات سیلندر بیشتر می‌باشد. بدین صورت بر اساس نتایج به دست آمده کنترل‌کننده اثرات مطلوبی بر نوسانات سیلندر داشته است. نوسانات نوک تیغه پیزوالکتریک در حالت بدون کنترل‌کننده از دو حالت A1 و A2 بیشتر است. در حالت A3 کنترل‌کننده نسبت به دو حالت قبل دیرتر وارد مدار شده تا سختی فنر را از مقدار ۶۵ به ۱۰۰ افزایش دهد، بنابراین کیفیت کمتری نسبت به دو حالت دیگر دارد. به همین دلیل نوسانات سیلندر در حالت C3 در بعضی از لحظات کمتر از حالت A3 و در لحظاتی دیگر بیشتر می‌باشد.



شکل ۲۰- مقایسه جابه‌جایی سیلندر (چپ) و نوک تیغه پیزوالکتریک (راست) برای حالات A1، A2، A3 و C3



شکل ۲۱- مقایسه جابه‌جایی سیلندر (چپ) و نوک تیغه پیزوالکتریک (راست) برای حالات B1, B2, B3 و C3

#### ۶-۱۱- مقایسه نتایج مربوط به حالت‌های B1، B2، B3 و C3

در این قسمت حالتی که پارامتر کنترل‌کننده یعنی ضریب میرایی سیلندر در سه حالت B1 تا B3 با اعمال کنترل‌کننده بر اساس جابه‌جایی تیغه از مقدار ۰/۰۲۲۸ به ۰/۰۲۲۸ افزایش پیدا می‌کند، با حالت C3 که در این حالت کنترل‌کننده فعال نشده و مقدار ضریب میرایی برابر صفر می‌باشد، مقایسه شده است. مطابق شکل (۲۱) نوسانات سیلندر در حالت C3 بیشتر از حالت‌های B1 تا B3 است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد اثر پارامتر کنترل‌کننده بر نوسانات سیلندر موثر بوده و باعث کاهش جابه‌جایی سیلندر شده‌است. میزان جابه‌جایی نوک تیغه پیزوالکتریک نیز در حالت C3 از  $+5$  تا  $-5$  میلی‌متر می‌باشد. در صورتی که جابه‌جایی نوک تیغه در سه حالت B1 تا B3 تقریباً از  $+4/5$  تا  $-4/5$  نوسان می‌کند. همان‌طور که در نمودار به دست آمده مشاهده می‌شود، نوسانات تیغه پیزوالکتریک با افزایش پارامتر کنترل‌کننده، ضریب میرایی کاهش پیدا کرده‌است.

#### ۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به مطالعه ارتعاشات القایی تیغه پیزوالکتریک مولد انرژی الکتریکی که به عنوان حسگر کنترل نوسانات تیغه نیز به کار رفته، پرداخته شده‌است. در ابتدا به اعتبارسنجی نتایج جابه‌جایی و ولتاژ مربوط به حضور تیغه پیزوالکتریک در پایین دست سیلندر با نتایج تحقیق آکایدین و همکاران پرداخته شد که نتایج بدست آمده از آن حاکی از همخوانی مناسبی بوده است. بعد از اطمینان از صحیح بودن روند کار، مطالعه برای اعمال کنترل‌کننده بر روی سیلندر دایروی صورت پذیرفت. اعمال کنترل‌کننده برای دو حالت کلی انجام گرفت که شرط اعمال کنترل‌کننده، مقدار خاصی از نوسان تیغه پیزوالکتریک بوده که در یکی از آن‌ها اعمال کنترل‌کننده با استفاده از تغییرات سختی فنر سیلندر انجام شده و در حالت بعدی ضریب میرایی سیلندر پارامتر کنترل‌کننده می‌باشد. هر کدام از این دو حالت کلی برای سه شرط محدوده نوسان تیغه پیزوالکتریک یعنی  $0/7$ ،  $1$  و  $2$  میلی‌متر صورت پذیرفته است. برای حالت کلی اول در حالتی که

کنترل‌کننده عمل نمی‌کند سختی فنر ۶۵ بوده و بعد از اعمال کنترل‌کننده مقدار آن به ۱۰۰ افزایش می‌یابد. بنابر نتایج بدست آمده ناشی از حل عددی مبتنی بر شبیه‌سازی، برای حالتی که شرط اعمال کنترل‌کننده نوسانات ۰/۷ میلیمتری نوک تیغه پیزوالکتریک باشد، میزان نوسانات سیلندر بیشتر از بقیه حالت‌ها کنترل شده که علت آن اعمال سریع‌تر کنترل‌کننده می‌باشد زیرا رسیدن نوسانات تیغه پیزوالکتریک به مقدار ۰/۷ میلیمتر زودتر از ۱ و ۲ میلیمتر بوده و افزایش سختی فنر از ۶۵ به ۱۰۰ زودتر روی می‌دهد. همچنین اثر کنترل نوسانات سیلندر بر نوسانات تیغه پیزوالکتریک در پایین دست آن نیز کاملاً مشهود بوده و نوسانات تیغه نیز در حالت ۰/۷ میلیمتر نسبت به حالت‌های دیگر کمتر شده‌است. به این معنا که با کاهش نوسانات سیلندر در بالادست، به نوعی نوسانات تیغه پیزوالکتریک در پایین دست نیز کنترل شده‌است. برای حالت کلی بعدی که اعمال کنترل‌کننده توسط تغییر در ضریب میرایی صورت می‌پذیرد، سختی فنر چه در حالت اعمال کنترل‌کننده و چه حالت غیر از آن مقدار ثابت ۶۵ بوده و صرفاً در حالت اعمال کنترل‌کننده مقدار ضریب میرایی از صفر به ۰/۰۲۲۸ افزایش می‌یابد. اثر این افزایش در حالت اعمال کنترل‌کننده برای شرط ۰/۷ میلیمتر نوسانات تیغه پیزوالکتریک نسبت به حالت‌های دیگر بیشتر بوده و سیلندر دایروی بیشتر از باقی حالت‌ها کنترل می‌شود اما اثر کاهش نوسانات سیلندر بر تیغه پیزوالکتریک در این حالت مشهود نیست. یعنی اگرچه افزایش ضریب میرایی سیلندر از صفر به ۰/۰۲۲۸ موجب کاهش نوسانات سیلندر شده اما مقدار این کاهش به قدری نیست که اثر آن بر نوسانات تیغه پیزوالکتریک در پایین دست قابل تشخیص باشد. همچنین در حالت C3 حالتی که کنترل‌کننده وجود ندارد، سیلندر و تیغه نسبت به حالت‌هایی که کنترل‌کننده وجود دارد به صورت کلی نوسانات بیشتری دارند. می‌توان دریافت با وارد شدن کنترل‌کننده در مدار نوسانات سیلندر و تیغه تا حدی کنترل شده‌است.

## مراجع

- [1] P. Spies, M. Pollak, and L. Mateu, "Handbook of Energy Harvesting Power Supplies and Applications," 1st Edition, CRC Press, 2015, <https://doi.org/10.1109/MIE.2016.2554721>.
- [2] V. Balamurugan, and S. Narayanan, "Active Vibration Control of Smart Shells using Distributed Piezoelectric Sensors and Actuators," *Smart Materials and Structures*, Vol. 10, No. 2, P. 173, 2001, [https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(00\)00070-6](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(00)00070-6).
- [3] S. Lau, K. W. Kwok, H. Chan, and C. Choy, "Piezoelectric Composite Hydrophone Array," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 96, No. 1, PP. 14-20, 2002, [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(01\)00757-9](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(01)00757-9).
- [4] Y. Zhang, H. Niu, S. Xie, and X. Zhang, "Numerical and Experimental Investigation of Active Vibration Control in a Cylindrical Shell Partially Covered by a Laminated PVDF Actuator," *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, No. 3, P. 035024, 2008, <https://doi.org/10.1088/0964-1726/17/3/035024>.
- [5] S. Ringwelski, and U. Gabbert, "Modeling of a Fluid-loaded Smart Shell Structure for Active Noise and Vibration Control using a Coupled Finite Element-boundary Element

Approach," *Smart Materials and Structures*, Vol. 19, No. 10, P. 105009, 2010, <https://doi.org/10.1088/0964-1726/19/10/105009>.

[6] X. Cao, L. Shi, X. Zhang, and G. Jiang, "Active Control of Acoustic Radiation from Laminated Cylindrical Shells Integrated with a Piezoelectric Layer," *Smart Materials and Structures*, Vol. 22, No. 6, P. 065003, 2013, <https://doi.org/10.1088/0964-1726/22/6/065003>.

[7] N. Tsushima, and W. Su, "Flutter Suppression for Highly Flexible Wings using Passive and Active Piezoelectric Effects," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 65, PP. 78-89, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.02.013>.

[8] H. Liu, and X. Wang, "Aeroservoelastic Design of Piezo-composite Wings for Gust Load Alleviation," *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 88, PP. 83-99, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2019.04.010>.

[9] D. Asadi, and T. Farsadi, "Active Flutter Control of Thin Walled Wing-engine System using Piezoelectric Actuators," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 102, P. 105853, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.105853>.

[10] S. M. Hasheminejad, and Y. Masoumi, "Hybrid Active Flow Induced Vibration Control of a Circular Cylinder Equipped with a Wake-mounted Smart Piezoelectric Bimorph Splitter Plate," *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 110, P. 103531, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2022.103531>.

[11] H. D. Akaydin, N. Elvin, and Y. Andreopoulos, "Energy Harvesting from Highly Unsteady Fluid Flows using Piezoelectric Materials," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 21, No. 13, PP. 1263-1278, 2010, <https://doi.org/10.1177/1045389X10366317>.

[12] N. G. Elvin, N. Lajnef, and A. A. Elvin, "Feasibility of Structural Monitoring with Vibration Powered Sensors," *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, No. 4, P. 977, 2006, <https://doi.org/10.1088/0964-1726/15/4/011>.

[13] M. Heidari, and M. K. Moayyedi, "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*, Vol. 54, No. 9, pp. 2009-2040, 2022, <https://doi.org/10.22060/MEJ.2022.21049.7367>.

## Feedback Control Simulation of Induced Vibration of Piezoelectric Blade as a Sensor and Electrical Energy Generator

**Zahra Parnian**

M.Sc., CFD and Turbulence Research Lab, Department of Mechanical Engineering, University of Qom, Qom, Iran

Institute of Aerospace Studies, University of Qom, Qom, Iran

[zahraparnian1225@gmail.com](mailto:zahraparnian1225@gmail.com)

\*Corresponding author: **Mohammad Kazem Moayyedi**

Associate Professor, CFD and Turbulence Research Lab, Department of Mechanical Engineering, University of Qom, Qom, Iran

Institute of Aerospace Studies, University of Qom, Qom, Iran

[moayyedi@qom.ac.ir](mailto:moayyedi@qom.ac.ir)

**Mehran Heidari**

Research Assistant, CFD and Turbulence Research Lab, Department of Mechanical Engineering, University of Qom, Qom, Iran

Institute of Aerospace Studies, University of Qom, Qom, Iran

[heidari.mehran96@gmail.com](mailto:heidari.mehran96@gmail.com)

### Abstract

The current research has studied the piezoelectric blade sensor from different views in order to control the oscillations of the circular cylinder present upstream of the piezoelectric blade and to control the fluctuating fluid flow around the blade using the force on the piezoelectric blade. The desired arrangement of a piezoelectric blade is placed downstream of a circular cylinder and with the help of a certain limit of blade oscillations, the hardness coefficient of the cylinder spring is applied from 65 (N/M) in normal condition to 100 (N/M) in the necessary condition. The controller as well as in other cases, the damping rate increases from zero to 0.02 (Nm/S) and in this way, the oscillations of the cylinder are controlled. In the same way, by controlling the oscillations of the cylinder, its effect on the oscillations of the blade, which is located downstream, has been investigated under the title of feedback effects. By controlling the feedback of the force on the piezoelectric blade in a closed loop, it is possible to monitor the displacement of the tip of the blade and the force on the piezoelectric blade. In these studies, it has been determined that in the case where the specific limit of the controller is 0.7 mm of the oscillations of the piezoelectric blade tip, due to the earlier application of the controller compared to the specific limit of 1 and 2 mm of the oscillations of the blade tip, the oscillations of the cylinder are Also, by comparing the state where the controller is included in the circuit compared to the state without the controller, it is clear that the oscillations of the blade and cylinder have been controlled to some extent.

*Keywords:* Computational fluid dynamics, Energy harvesting, Fluid-structure interaction, Induced vibrations, Piezoelectric sensors