



شبیه‌سازی عددی ارتعاشات القایی ناشی از نوسانات فرکانس پایین جریان سیال اطراف تیغه‌های پیزوالکتریک جهت یافتن ساختار بهینه به منظور برداشت انرژی

مهران حیدری، محمد کاظم مویدی*

آزمایشگاه پژوهشی توربولانس دینامیک سیالات محاسباتی و احتراق، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه قم، قم، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۰
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۲۴
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۵
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۳/۰۵

کلمات کلیدی:

دینامیک سیالات محاسباتی
برداشت انرژی
تعامل سازه و سیال
تیغه‌های پیزوالکتریک
نوسانات فرکانس پایین

خلاصه: یکی از مهمترین مسائل پیش روی جامعه امروزی موضوع تولید انرژی و چالش‌های پیرامون آن می‌باشد. به همین دلیل پرداختن به مسئله برداشت انرژی از روش‌های گوناگون بسیار حائز اهمیت است. یکی از همین روش‌ها، برداشت انرژی از ارتعاشات ناشی از جریان سیال می‌باشد. ارتعاشات به وجود آمده از جریان تراکم‌ناپذیر سیال هوا اطراف یک سیلندر که در پشت آن سه تیغه از جنس پیزوالکتریک در ساختارهای مختلف قرار دارد می‌تواند یکی از بهترین گزینه‌ها برای بررسی و ارزیابی مقدار نیروی الکتریکی بدست آمده از ارتعاشات تیغه پیزوالکتریک باشد. مطابق این پژوهش، حالتی که در آن تیغه پیزوالکتریک میانی به اندازه نصف طول تیغه به سمت راست تغییر مکان داده و جهت گیره نگهدارنده آن مخالف جهت گیره نگهدارنده تیغه‌های بالا و پایین است، هم از نظر میزان تولید ولتاژ و هم از نظر کاهش احتمال برخورد تیغه‌ها با یکدیگر بهترین ساختار معرفی می‌شود. با توجه به کاهش احتمال برخورد تیغه‌ها با یکدیگر در این حالت بهینه، بیشترین عدد رینولدز بدون برخورد تیغه‌ها از ۲۴۰۰ در ساختارهای غیر بهینه به ۲۶۰۰ در ساختار بهینه رسیده و همین موضوع موجب افزایش ۱۲ درصدی تولید ولتاژ در تیغه میانی و حدوداً ۱۴ درصدی در تیغه‌های بالا و پایین شده است.

۱- مقدمه

شده است. در این میان یافتن روشی که از طریق آن بتوان انرژی الکتریکی را به صورت مداوم در اختیار داشته و نیازی به شارژ دوره‌ای و یا جایگزین کردن نداشته باشد، بسیار مطلوب است. یکی از این روش‌ها، جذب انرژی از طریق ارتعاشات و به کمک صفحاتی از جنس پیزوالکتریک می‌باشد. این ارتعاش می‌تواند ناشی از جریان نوسانی یک سیال باشد. در این روش سیالی مانند هوا در اطراف یک یا چند صفحه پیزوالکتریک جریان یافته و ارتعاشات ناشی از جریان سیال موجب به حرکت درآمدن صفحه می‌شود. این صفحات قابلیت تبدیل نیروهای مکانیکی به الکتریسیته را داشته و از این نظر یکی از روش‌های نوین برداشت انرژی محسوب می‌گردند. محققان زیادی در حوزه استحصال انرژی از طریق مرتعش شدن صفحات پیزوالکتریک فعالیت پژوهشی داشته‌اند. تیلور و همکاران [۱] یک ساختار مارماهی از پلیمر پیزوالکتریک برای تبدیل انرژی جریان مکانیکی به نیروی الکتریکی را توسعه دادند. آن‌ها بر روی توصیف و بهینه‌سازی سیستم مارماهی با تولید واحدهای ذخیره سازی در مخزن موج متمرکز شدند و نتایج خود را جهت پیشبرد تحقیقات آینده گزارش کردند. تلاشی به منظور تحلیل

با رشد روزافزون جمعیت و پیشرفت صنایع مختلف، احتیاج به تأمین انرژی مورد نیاز آن‌ها بیش از پیش نمایان شده است. با توجه به آنکه منابع نفت و گاز و همچنین انواع دیگر سوخت‌های فسیلی نیز در حال اتمام هستند، یافتن روش‌های گوناگون و بدیع بدست آوردن انرژی، چالش پیش روی جهان می‌باشد. امروزه روش‌هایی مانند تأمین و برداشت انرژی^۱ از خورشید، باد، ارتعاشات ناشی از جریان سیال و مانند آن‌ها مورد توجه پژوهشگران در سطح جهان قرار گرفته است و توجهاتشان را به خود معطوف کرده است. در جهان حاضر، وقتی صحبت از انرژی به میان آورده می‌شود، یکی از مهمترین مصداق‌های آن، انرژی الکتریسیته بوده که نیاز تمامی سیستم‌ها و دستگاه‌های موجود می‌باشد. امروزه با توجه به احتمال اتمام منابع تولید انرژی مرسوم، مانند سوخت‌های فسیلی و غیره در آینده‌ای نزدیک، تلاش‌های محققان به منظور یافتن روشی جایگزین به منظور تولید الکتریسیته دوجندان

1 Energy harvesting

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: moayyedi@qom.ac.ir



میانگین توان برداشت شده را برای سرعت آب موجود بهبود بخشید. در این پژوهش، به بررسی میزان جابه‌جایی و ولتاژ خروجی از ارتعاشات القایی ناشی از جریان سیال اطراف سه تیغه‌ی پیزوالکتریک که در ساختارهای گوناگون در پشت سیلندر ساکن واقع شده‌اند، پرداخته می‌شود. همچنین یافتن بهترین و مناسب‌ترین چیدمان به منظور استحصال انرژی از نوسانات فرکانس پایین جریان و ارتعاش تیغه‌های پیزوالکتریک موضوعی است که مدنظر این مطالعه می‌باشد. در این مطالعه استفاده از ترکیب‌بندی چند تیغه پیزوالکتریک تحت تأثیر جریان سیال با فرکانس پایین مورد توجه قرار گرفته‌است. چنین مبحثی در پژوهش‌های پیشین کمتر پرداخته شده و مشخصاً ساختار مطالعه حاضر مطرح نبوده‌است. با توجه به آنکه فرکانس پایین نوسانات نمی‌تواند محدوده نیروی مناسب را جهت ارتعاش و برداشت انرژی را فراهم آورد، به همین دلیل تیغه‌های پیزوالکتریک به گونه‌ای در نظر گرفته شده‌اند که بتوانند در فرکانس پایین نوسانات مرتعش شده و در نهایت بررسی ساختار بهینه جهت برداشت انرژی و تولید ولتاژ موضوع دیگری است که در این مطالعه به آن پرداخته شده‌است.

۲- معادلات حاکم بر جریان سیال

معادلات حاکم بر جریان سیال تراکم ناپذیر شامل معادله پیوستگی و معادله بقای اندازه حرکت خطی بوده که به صورت زیر می‌باشند:

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

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

در این معادلات u سرعت، t زمان، p فشار و ν_{eff} لزجت سینماتیکی مؤثر بوده که مجموع لزجت مولکولی و گردابه‌ای می‌باشد.

ضرایب نیروی برآ، پسا و عدد اشتروهل به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho A U^2} \quad (3)$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho A U^2} \quad (4)$$

گردابه‌هایی که به دنبال اجسام ایجاد می‌شوند، توسط پابرینگ و شوستینگر [۲] انجام شد تا توانایی جذب و برداشت انرژی ناشی از ارتعاشات گردابه‌ها را در اطراف تیرهای منعطف پیزوالکتریک نشان دهند. رابینز و همکاران [۳] کارایی ورقه‌های پیزوالکتریک در داخل جریان هوا را با بهره‌گیری از یک مدار سوئیچینگ هماهنگ برای بهبود روند تبدیل انرژی الکتریکی بررسی کرده‌اند. چنگ و ژو [۴] نتایج‌شان را پیرامون آزمایش‌ها و تحقیقات خود درباره بررسی یک تیر که از دو لایه یکی به عنوان پایه و دیگری از جنس پیزوالکتریک که بر روی آن واقع شده بود، ارائه دادند. گویگان و همکاران [۵] دستگاهی آزمایشگاهی ارائه کردند که انرژی ارتعاشاتی را از یک ساختار انعطاف‌پذیر پیزوالکتریک تحت تأثیر قطره آب برداشت می‌کند. دستگاه آنها توانست تحت تأثیر سرعت ۴/۵ متر بر ثانیه از قطر خروجی ۳ میلی‌متر، توان ۷۳ میکرو وات را فراهم کند. واکاراسیندهو و کوان [۶] با در نظر گرفتن سیستمی توانستند با استفاده از لایه‌های پیزوالکتریک و آهن‌ربا، انرژی حاصل از ارتعاش بر روی صفحه کلید کامپیوتر حین تایپ را برداشت کنند. تحقیقی که توسط جونپور و همکاران [۷] صورت پذیرفت، در مورد تهیه یک مدل پیزوآیروالاستیکی برای یک ساختار بال مانند تحت تأثیر جریان هوا بود. آن‌ها در این مطالعه به بررسی اثر الکترودهای متوالی در برداشت انرژی از آن مدل پرداختند. اکایدین و همکاران [۸] به بررسی میزان ولتاژ خروجی از ارتعاشات ناشی از گردابه حول یک تیر پیزوالکتریک بر پایه مواد پلاستیک مانند پلی وینیلیدین فلوراید، که با فاصله در پشت یک سیلندر دایروی در حالت دو بعدی قرار گرفته است، پرداختند. آن‌ها به منظور حل عددی و شبیه‌سازی مورد نظر از نرم افزار انسیس فلونتت بهره برده و در نهایت مقادیر مختلف جابجایی یک سر تیر و ولتاژ حاصل از آن را با مقادیر تجربی بدست آمده از تونل باد مقایسه کردند. در پژوهش دیگری که توسط ماتسودا و همکاران [۹] به صورت تجربی صورت گرفت، یک صفحه پیزوالکتریک که از لایه‌های گوناگون تشکیل شده بود، به صورت عمودی در داخل محفظه‌ای که سیال آب در آن جریان داشت قرار گرفت. نتایج حاصل برای تیر در ضخامت‌های مختلف بدست آمد و در میزان ولتاژ خروجی تطبیق خوبی را با نتایج شبیه‌سازی نشان می‌داد. همچنین مین لیو و همکاران [۱۰] مطالعه تجربی را به منظور برداشت انرژی در زیر آب توسط مکانیزم ارتعاشات القایی را ترتیب دادند و به این نتیجه رسیدند که فرکانس ارتعاش، دامنه و توان متوسط با سرعت محدود آب افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نشان داده شده‌است که انتخاب مناسب جرم سازه و مقاومت می‌تواند

قطر هیدرولیکی^۱ و شدت آشفتگی^۲ و در خروجی نیز از قطر هیدرولیکی و شدت آشفتگی جریان بازگشتی^۳ برای محاسبه مقدار انرژی جنبشی آشفتگی و فرکانس اتلاف ویژه استفاده شده است. همچنین روی مرزهای جامد (دیواره‌های غیرقابل نفوذ) مقدار انرژی جنبشی آشفتگی برابر با صفر و فرکانس اتلاف ویژه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\omega_p = \frac{6\nu}{\beta_1 y_p^2} \quad (۹)$$

۴- معادلات شبیه‌سازی نوسانات تیغه‌های پیزوالکتریک و محاسبه ولتاژ تولیدی

معادله جرم، فنر و دمپر به منظور شبیه‌سازی ارتعاش تیغه‌های پیزوالکتریک در حالتی که تیغه‌ها به صورت تیر یک درجه آزادی در نظر گرفته شده‌اند با شرایط جابجایی و سرعت اولیه صفر در زمان $t = 0$ به کار می‌رود:

$$m\ddot{y}_t + c\dot{y}_t + ky_t - \theta v = F \quad (۱۰)$$

در این معادله، که تیغه را به سیستم جرم و فنر و دمپر مشابه کرده، m و c و k به ترتیب جرم تیغه و ضرایب دمپینگ تیغه و سختی فنر هستند و y نیز جابجایی نوک تیغه در راستای محور عمود بر جهت جریان را نشان می‌دهد که به کمک تابع وزنی $\phi(x)$ (معادله (۱۵)) برای محاسبه جابجایی کل تیغه بکار می‌رود. همچنین پارامتر θ ضریب همبستگی الکترومکانیکی می‌باشد. تمامی این مقادیر ثابت با توجه به داده‌های موجود در مرجع [۱۱] در نظر گرفته شده و در جدول ۱ لیست شده‌اند. معادله تغییرات ولتاژ تیغه پیزوالکتریک به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\theta\dot{y}_t + C\dot{v} = -\frac{v}{R} = I \quad (۱۱)$$

که در آن v ولتاژ، R مقاومت الکتریکی، C ظرفیت (مقدار آن در جدول ۱ موجود است) و I شدت جریان الکتریکی می‌باشند. در حالت مدار

$$St = \frac{fL}{U} \quad (۵)$$

که در آن F_L نیروی برآ، F_D نیروی پسا، A مساحت مرجع، U سرعت جریان آزاد، ρ چگالی سیال، L طول مشخصه که برابر با قطر سیلندر بوده و f فرکانس نوسانات جریان می‌باشند.

۳- معادلات مدل آشفتگی $k-\omega-SST$

این مدل یکی از بهترین مدل‌های دو معادله‌ای بوده که ترکیبی از دو مدل $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ می‌باشد. به گونه‌ای که اطراف دیواره‌ها از مدل $k-\omega$ و در نواحی دورتر از مدل $k-\varepsilon$ بهره می‌برد. معادلات مربوط به این مدل به صورت دو معادله کلی انرژی جنبشی آشفتگی (معادله (۶)) و معادله فرکانس اتلاف ویژه w (معادله (۷)) می‌باشد.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k\omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_k \nu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (۶)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_\omega \nu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (۷)$$

لزجت سینماتیکی آشفتگی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\nu_T = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)} \quad (۸)$$

ν نیز لزجت سینماتیکی مولکولی می‌باشد. شرایط مرزی برای متغیرهای آشفتگی بدین صورت است که در ورودی حجم کنترل با استفاده از اندازه

1 Hydraulic diameter
2 Turbulent intensity
3 Backflow

از یک کد اعمال شده توسط کاربر^۲ استفاده شده است. کد مذکور با بهره‌گیری از حل عددی معادلات حاکم بر نوسانات تیغه عمل می‌کند. نیرویی که بر روی تیغه‌های پیزوالکتریک وارد شده از معادله (۱۴) محاسبه می‌شود. با جایگذاری این نیرو در معادله (۱۳) و حل آن، مقدار جابه‌جایی و از معادله (۱۲) ولتاژ تولیدی تیغه پیزوالکتریک بدست می‌آید. در مرحله بعد به کمک تابع وزنی $\phi(x)$ ، مطابق معادله (۱۶)، جابه‌جایی نوک تیغه برای تخمین مقدار جابجایی سایر نقاط در طول تیغه پیزوالکتریک بکار می‌رود. شکل ۱ فلوچارتی از روند حل این معادلات جهت شبیه‌سازی نوسان تیغه‌های پیزوالکتریک را نشان می‌دهد.

۵- تعریف مسئله

پژوهش حاضر در دو حالت کلی (حالت‌های A و B) ارزیابی می‌شود. اول حالت سیلندر ساکن بدون حضور تیغه‌های پیزوالکتریک و دیگری حالتی که در پشت سیلندر ساکن، سه تیغه پیزوالکتریک قرار گرفته‌اند. حالتی که در آن تیغه‌های پیزوالکتریک حضور دارند، از دو حالت دیگر تشکیل شده که در آن‌ها تغییر مکان در جایگیری اولیه تیغه‌ها و همچنین جهت گیره نگهدارنده تیغه‌ها (حالت‌های B_۱ و B_۲) بررسی شده است. حالت‌های دو گانه نیز به دو بخش دیگر تقسیم شده‌اند و بررسی‌ها و نتایج پیرامون آن‌ها ارائه می‌شود. عدد رینولدز تمامی حالت‌های دارای سه تیغه پیزوالکتریک ۲۳۵۰ بوده و در انتهای بخش نتایج، یک حالت بهینه در عدد رینولدز بحرانی ۲۶۰۰ مطالعه می‌شود. گام زمانی در تمامی حالات مورد بررسی مانند مقاله مشابه مطالعه حاضر یعنی پژوهش آکایدین و همکاران [۸]، ۰/۰۰۰۵ در نظر گرفته شده است. به منظور سهولت کار و جلوگیری از ابهام، مطابق جدول ۲ برای تمامی حالت‌های این مطالعه نام‌گذاری صورت گرفته است.

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

این پژوهش در ابتدا برای سیلندر ساکن بدون حضور تیغه‌های پیزوالکتریک مورد ارزیابی واقع شده (حالت A) و پس از اعتبارسنجی‌های لازم، سه تیغه پیزوالکتریک در پشت سیلندر قرار گرفته‌اند که در دو حالت کلی B_۱ و B_۲ مطالعه شده‌اند. همچنین هر کدام از این حالت‌های کلی دو مورد خاص را بررسی کرده (حالات B_{۱۱} و B_{۱۲}، B_{۲۱} و B_{۲۲}) که در بخش مربوط به خود به طور واضح شرح داده می‌شوند. در نهایت نیز به منظور یافتن ساختار بهینه، حالت B_{۲۱} در عدد رینولدز بحرانی بررسی

باز می‌توان $R = \infty$ در نظر گرفت و بدین ترتیب از معادله (۱۱)، معادله زیر بدست می‌آید:

$$\theta \dot{y}_t + C \dot{v} = 0 \Rightarrow y_t = \frac{-C}{\theta} v_{oc} \quad (12)$$

به همین ترتیب می‌توان معادله (۱۰) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$m \ddot{y}_t + c \dot{y}_t + \left(k + \frac{\theta^2}{C}\right) y_t = F \quad (13)$$

در شرایطی که تیغه پیزوالکتریک دچار جابه‌جایی می‌شود، نیروی محرک و تغییر شکل کلی تیغه را می‌توان با استفاده از روش باقی‌مانده وزنی ریلی-ریتز^۱ تقریب زد [۱۱]. اگر فقط مود اول جابه‌جایی را در نظر گرفته و از مرتبه‌های بالاتر آن صرف نظر شود، نیروی F به صورت زیر بدست می‌آید:

$$F(t) = \int_{x=0}^L \bar{p}(x,t) \phi(x) dy \quad (14)$$

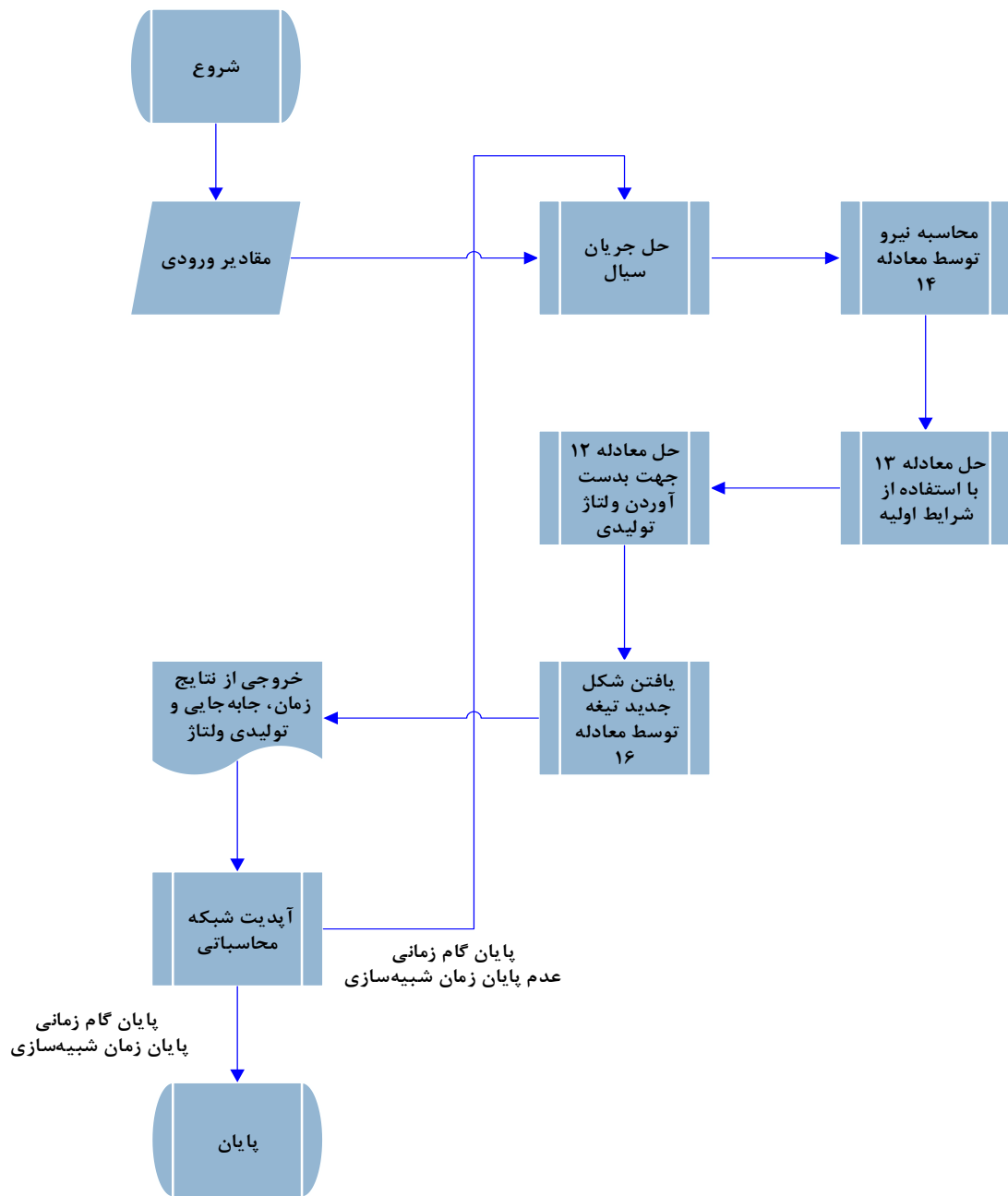
به طوری که، L طول تیر و $\bar{p}(x,t)$ نیروی فشاری خالصی است که بر سطح تیر اعمال می‌شود. $\phi(x)$ تابع وزنی برای شکل مود اول است که به صورت زیر فرض می‌شود:

$$\phi(x) = \left[1 - \cos\left(\frac{\pi x}{2L}\right) \right] \quad (15)$$

که شکل کل تیر را به میزان انحراف نوک آن به صورت زیر مربوط می‌کند:

$$y(x,t) = y_t(t) \phi(x) \quad (16)$$

جهت شبیه‌سازی نوسانات تیغه پیزوالکتریک در محیط نرم افزار فلوئنت



شکل ۱. فلوچارت مدل شبیه‌ساز نوسانات القایی تیغه‌های پیزوالکتریک

Fig. 1. Flowchart of induce vibration model of piezoelectric blades.

جدول ۱. پارامترهای ثابت مورد نیاز برای حل معادلات [۱۱]

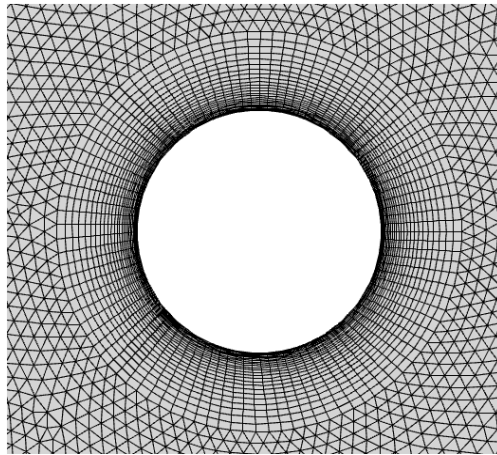
Table 1. Required parameters for solution of the governing equations [11].

مقدار	تعریف نماد(واحد)	نماد
$1/38681 \times 10^{-4}$	جرم (kg) (محاسبه بر اساس چگالی و ابعاد ذکر شده برای تیغه در مرجع [۱۱])	m
۳/۶	سختی فنر (N/m)	k
۲۵/۶۴	فرکانس طبیعی بر واحد هرتز ($f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}$)	f
۳/۱۸۵	نرخ دمپینگ (درصد) (محاسبه به صورت تجربی)	ξ
$1/72048 \times 10^{-3}$	ضریب دمپینگ (Nm/s)	c
۱/۳۸	ظرفیت (nF)	C
$3/69 \times 10^{-6}$	ضریب همبستگی الکترومکانیکی (C/m)	θ

جدول ۲. نام‌گذاری حالت‌های متفاوت بررسی شده در این پژوهش

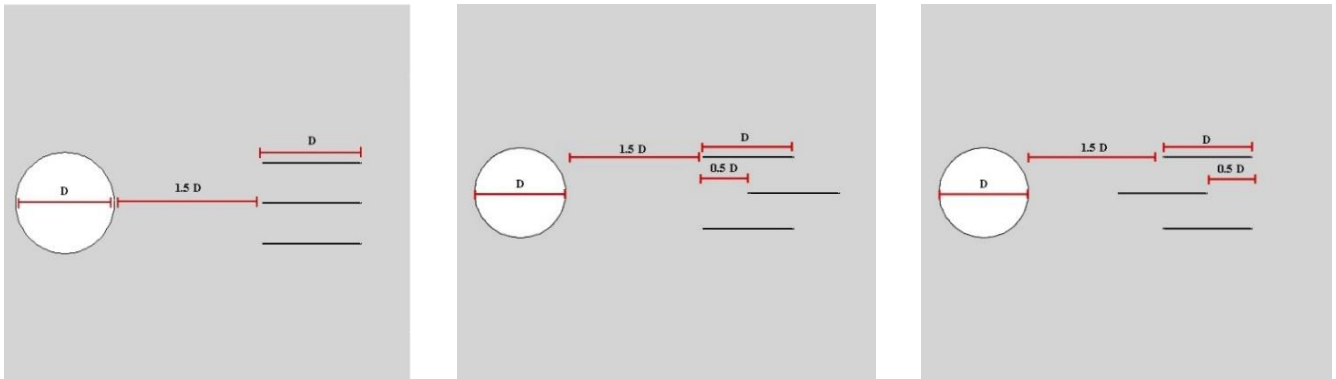
Table 2. The nomination of different cases studied in this research.

حالت B		حالت A	
سیلندر ساکن با حضور سه تیغه پیزوالکتریک		سیلندر ساکن بدون حضور تیغه‌های پیزوالکتریک	
حالت B			
حالت B۲		حالت B۱	
سیلندر ساکن و سه تیغه پیزوالکتریک با تغییر مکان تیغه وسط		سیلندر ساکن و سه تیغه پیزوالکتریک با فواصل یکسان نسبت به سیلندر	
حالت B۱			
حالت B۱۲		حالت B۱۱	
جهت گیره نگهدارنده سه تیغه پیزوالکتریک در سمت چپ		جهت گیره نگهدارنده سه تیغه پیزوالکتریک در سمت راست	
حالت B۲			
حالت B۲۳	حالت B۲۲	حالت B۲۱	
حالت B۲۱ در عدد رینولدز بحرانی	تغییر مکان تیغه وسط به سمت چپ و جهت گیره نگهدارنده تیغه وسط در سمت راست مخالف جهت تیغه‌های بالا و پایین	تغییر مکان تیغه وسط به سمت راست و جهت گیره نگهدارنده تیغه وسط در سمت چپ مخالف جهت تیغه‌های بالا و پایین	



شکل ۲. ساختار شبکه محاسباتی اطراف سیلندر دایروی برای حالت A

Fig. 2. Computational mesh around a circular cylinder for case A.



شکل ۳. ساختار هندسی حالت‌های B11 و B12 (چپ)، حالت B21 (وسط) و حالت B22 (راست)

Fig. 3. Geometry of cases B11 and B12 (left), case B21 (middle), and case B22 (right).

در پشت آن واقع شده‌اند. برای حالت B1 ساختار هندسی یکی بوده و صرفاً جهت گیره نگهدارنده تیغه‌های پیزوالکتریک یکبار سمت راست (حالت B11) و بار دیگر سمت چپ (حالت B12) می‌باشد. اما برای حالت B2 با توجه به اینکه تیغه وسط یکبار در سمت راست (حالت B21) و یکبار در سمت چپ (حالت B22) قرار می‌گیرد، ساختار هندسی متفاوت است. شبکه‌بندی برای تمامی این حالات نیز از نوع ترکیبی بوده و در اطراف نواحی دیواره به جز اطراف تیغه‌ها (به دلیل موارد مربوط به مش متحرک) از ساختار شبکه با سازمان بهره برده شده‌است. به منظور افزایش دقت حل در اطراف تیغه‌ها، شبکه‌بندی در آن نواحی به صورت فشرده و مثلثی شکل می‌باشند. شکل ۳ ساختار هندسی اطراف این حالات را نشان می‌دهد. برای تمامی حالات به

می‌شود. ساختار هندسی حالت A به صورت یک حجم کنترل مستطیلی شکل به طول b و عرض a بوده که در آن یک سیلندر دایروی به قطر D قرار گرفته‌است. فاصله طولی مرکز سیلندر از ورودی $b/4$ و فاصله عرضی از مرزهای بالا و پایین $a/2$ می‌باشد. به دلیل وجود گرادیان‌های شدید اطراف دیواره‌ها، در این نواحی، شبکه‌بندی به صورت با سازمان لحاظ شده‌است. شکل ۲ ساختار شبکه اطراف سیلندر را نشان می‌دهد که از یک ساختار با سازمان بهره برده‌است. همچنین مقادیر a ، b و D به ترتیب برابر $0/5$ ، 1 و $0/3$ متر می‌باشند.

برای دو حالت کلی B1 و B2 ساختار و مکان قرارگیری سیلندر و اندازه‌ها کاملاً مشابه حالت A بوده و صرفاً تیغه‌هایی به طول سه سانتی‌متر

جدول ۳. استقلال حل از شبکه برای حالت A

Table 3. Grid Independent Study for case A.

شماره شبکه	تعداد کل نودها	عدد اشتروهال	میانگین ضریب پسا	ضریب برآ
شبکه شماره ۱	۱۴۷۹۲	۰/۲	۱/۰±۳۹۵۷/۰۴	۰±/۷۰۸
شبکه شماره ۲	۲۳۴۳۱	۰/۲	۱/۰±۴۰۲۷/۰۴	۰±/۷۱۶
شبکه شماره ۳	۳۳۲۷۸	۰/۲	۱/۰±۴۰۱۶/۰۴	۰±/۷۱۸

حالت‌هایی که تیغه پیزوالکتریک در پشت سیلندر قرار گفته، استقلال حل از شبکه ارائه می‌شود.

۷-۱- استقلال حل از شبکه و اعتبارسنجی حالت A

در این بخش به بررسی جریان اطراف سیلندر بدون حضور تیغه‌های پیزوالکتریک پرداخته می‌شود. همچنین نتایج حاصل از این حالت به منظور تأیید صحت روند حل با مقالات دیگر مورد بررسی قرار گرفته‌است. در این مقایسه، ضرایب نیروهای آیرودینامیکی برآ و پسا مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. بدین منظور استقلال حل از شبکه به ازای عدد رینولدز ۲۰۰ در جدول ۳ آورده شده‌است. مطابق نتایج بدست آمده، شبکه شماره ۲ به عنوان شبکه مناسب برای حل عددی انتخاب شده‌است. بدین ترتیب با بررسی نتایج ضرایب نیروهای آیرودینامیکی و عدد اشتروهال، اعتبارسنجی برای حالت تک سیلندر بدون حضور تیغه‌های پیزوالکتریک مطابق جدول ۴ صورت گرفته‌است.

داده‌های حاصل، نشان از همخوانی بسیار خوبی بین مطالعه حاضر برای سیلندر ساکن بدون حضور تیغه پیزوالکتریک می‌دهد که برای ادامه کار به منظور افزودن تیغه‌های مورد نظر در پشت سیلندر مربوطه، نتایج مناسبی می‌باشد.

۷-۲- اعتبارسنجی مطالعه برای حالت سیلندر و یک تیغه پیزوالکتریک

برای اعتبارسنجی روش حل شبیه‌سازی صورت گرفته در این پژوهش، یک تیغه پیزوالکتریک به طول ۳ سانتی‌متر در پشت سیلندر دایروی به قطر ۳ سانتی‌متر قرار داده شده‌است. به منظور اعتبارسنجی، تمامی شرایط این مسئله با مدل تجربی آکایدین و همکاران [۸] از نظر ابعاد و سایر پارامترها

منظور حل معادلات، تعیین شرایط مرزی لازم است. بر این اساس برای مرز ورودی از شرط سرعت ورودی، در خروجی از شرط مرزی فشار خروجی و برای مرزهای بالا و پایین، تیغه‌های پیزوالکتریک و سیلندر دایروی، شرط مرزی دیواره لزج، استفاده شده‌است.

در پژوهش حاضر، جهت حل معادلات حاکم بر سیال و تیغه‌های 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، روش بالا دست مرتبه دوم بکار گرفته شده‌است. این روش که نام دیگر آن تفاضل بالادست خطی^۱ 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^۲ انجام گرفته‌است. همچنین برای حالت‌هایی که جریان در اعداد رینولدز بالا قرار دارد برای مدل‌سازی اثرات آشفتگی از مدل $k-\omega$ SST استفاده شده‌است.

۷-۳- استقلال حل از شبکه و اعتبارسنجی

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 به تفکیک، هم برای حالت سیلندر ساکن و هم

- 1 Linear Upwind Differencing (LUD)
- 2 First order implicit

جدول ۴. اعتبارسنجی مطالعه حاضر برای حالت A

Table 4. Comparison between Results of the Present study and Some other References for case A.

پژوهش مورد نظر	عدد اشتهروال	میانگین ضریب پسا	ضریب برآ
مطالعه حاضر	۰/۲	۱/۰±۴۰۲۷/۰۴	۰±/۷۱۶
ایزدپناه و همکاران [۱۲]	۰/۲	۱/۰±۳۳۶/۰۴۶	۰±/۷۰۰
ماهیر و همکاران [۱۳]	۰/۱۹۲	۱/۰±۳۷۶/۰۴۸	۰±/۶۹۸
لیو و همکاران [۱۴]	۰/۱۹۲	۱/۰±۳۱/۰۴۹	۰±/۶۹۰

جدول ۵. مشخصات مطالعه حاضر و پژوهش صورت گرفته توسط آکایدین و همکاران [۸]

Table 5. Problem Constants of the present study and research conducted by Akaydin et al. [8].

پژوهش مورد نظر	فرکانس طبیعی تیغه پیزوالکتریک (Hz)	سختی تیغه پیزوالکتریک (N/m)	جرم تیغه پیزوالکتریک (kg)	عدد رینولدز
مطالعه حاضر	۹/۳۷	۳/۶	۰/۰۰۱۰۳۸	۳۵۰۰ (سرعت ۱/۷ m/s)
آکایدین و همکاران [۸]	۴۸/۵۴	۳/۶	۰/۰۰۰۰۳۸۷	۱۴۶۴۰ (سرعت ۷/۱۲۵ m/s)

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.

۷-۳- استقلال حل از شبکه حالت B1، معتبر برای تمامی حالات بررسی شده

به منظور بررسی استقلال حل از شبکه، با توجه به عدم تغییر اندازه‌های سیلندر و تیغه‌ها و صرفاً جابه‌جایی محدود آن‌ها نسبت به یکدیگر، برای حالتی که تیغه‌های پیزوالکتریک با فاصله یکسان در پشت سر سیلندر قرار گرفته‌اند (حالت B1)، استقلال حل از شبکه انجام گرفته‌است. برای سایر حالات، که در آن‌ها تیغه‌ها نسبت به یکدیگر جابه‌جا می‌شوند، نیز از مشخصات این شبکه استقلال یافته اعم از نوع شبکه، فشردگی‌های اطراف تیغه‌های پیزوالکتریک و همچنین تعداد نقاط روی شبکه بهره برده می‌شود. به منظور بررسی این موضوع، ۳ شبکه با مشخصات جدول ۷ در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی آن برای هر سه شبکه در عدد رینولدز ۲۰۰۰ انجام شده‌است. در

کاملاً یکسان بوده و صرفاً به دلیل تفاوت در جرم تیغه‌های پیزوالکتریک در دو مطالعه، اعتبارسنجی برای حالت تشدید آن‌ها انجام گرفته‌است. پدیده تشدید در حالتی به وقوع می‌پیوندد که فرکانس طبیعی سازه با فرکانس نوسانات تیغه ناشی از جریان سیال برابر شود. با توجه به اینکه تیغه‌های از نظر ظاهری 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 [۸] 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 تیغه پیزوالکتریک بسیار نزدیک به فرکانس طبیعی تیغه پیزوالکتریک می‌شود، مطابق جدول ۵ می‌باشد.

نتایج جابه‌جایی تیغه پیزوالکتریک و ولتاژ تولیدی بدست آمده از شبیه‌سازی در مطالعه حاضر و نتایج تجربی آکایدین و همکاران [۸] در حالت تشدید مطابق جدول ۶ است. مطابق این جدول، نتایج مقدار بیشینه

جدول ۶. اعتبارسنجی مطالعه حاضر با پژوهش صورت گرفته توسط آکایدین و همکاران [۸]

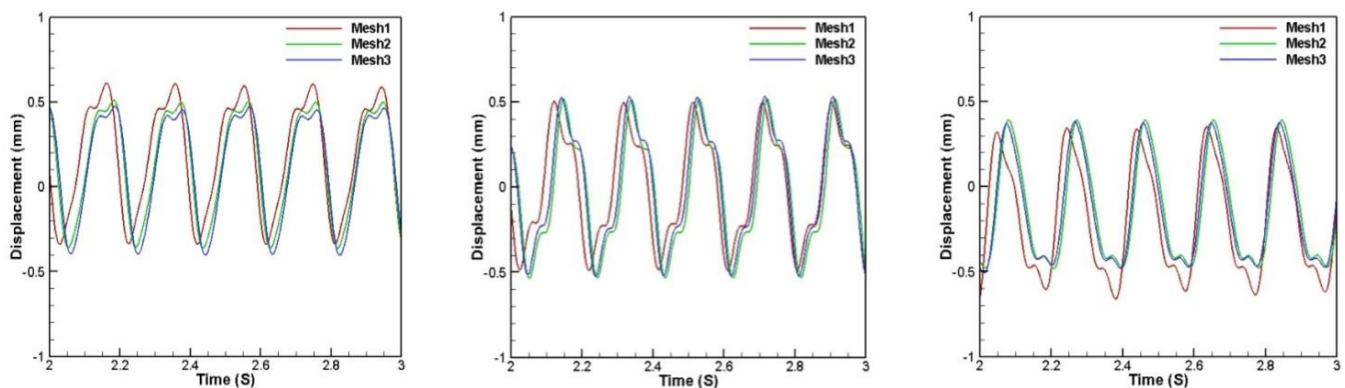
Table 6. Comparison between the results of the present study and research conducted by Akaydin et al. [8].

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

جدول ۷. استقلال حل از شبکه حالت B11، معتبر برای تمامی حالات بررسی شده

Table 7. Grid independent study for the case B11, it is valid for all other cases.

تعداد کل نودها	تعداد نود روی سیلندر	تعداد نود روی تیغه‌ها	نام شبکه
۴۴۳۸۶	۷۰	۱۰۰	شبکه شماره ۱
۶۱۴۱۶	۱۰۰	۱۰۰	شبکه شماره ۲
۸۲۷۱۹	۱۳۰	۱۰۰	شبکه شماره ۳



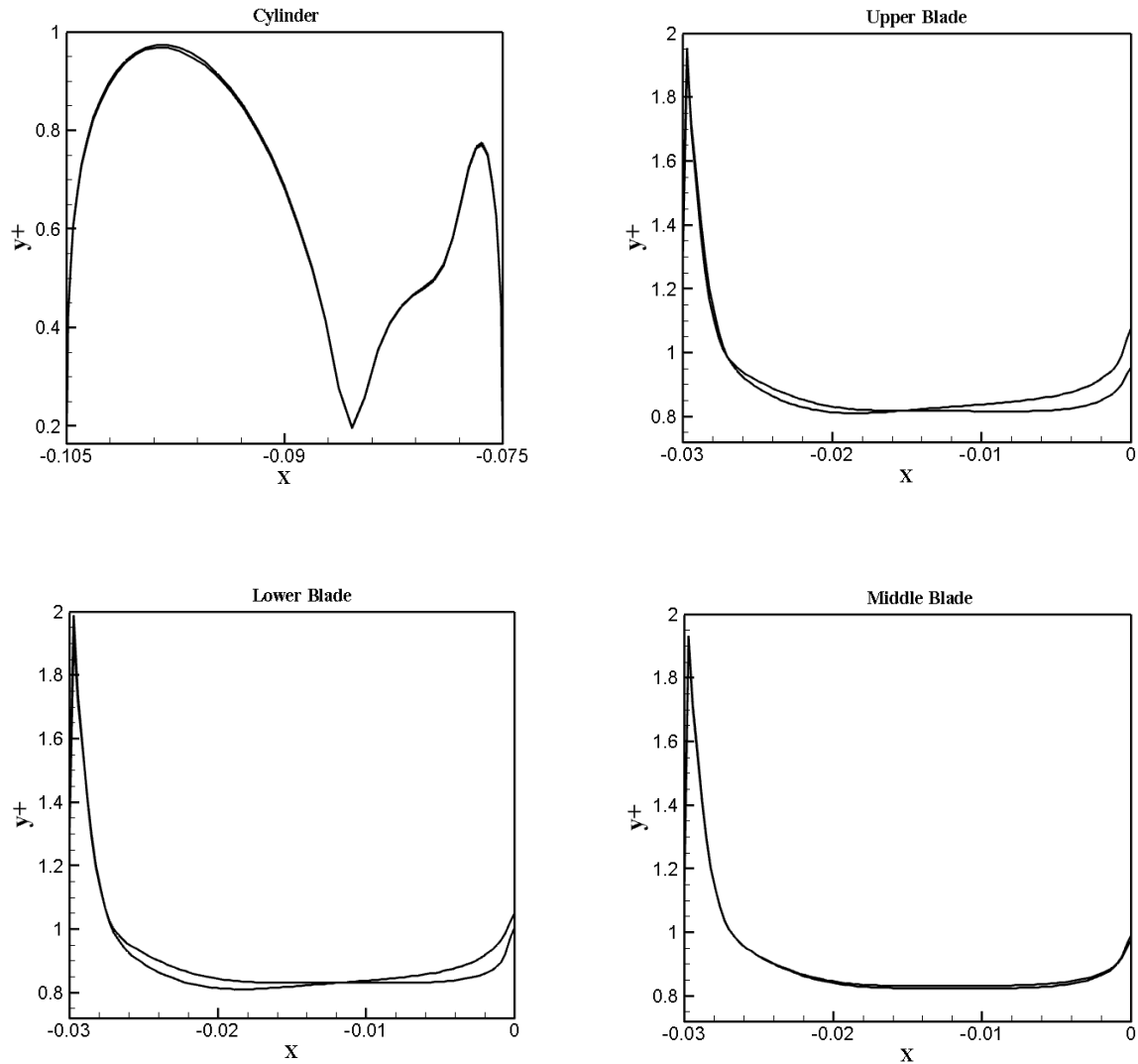
شکل ۴. مقایسه جابه‌جایی برای سه شبکه مورد بررسی برای تیغه پایین (چپ)، وسط (وسط)، بالا (راست) حالت B11

Fig. 4. Comparison of displacement for the three computational grid configurations examined for lower (left), middle (middle), and upper (right) blade case B11

گرفته برای هر سه تیغه پیزوالکتریک، 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 معیار استقلال حل از شبکه در نظر گرفته شده است.

مطابق شکل ۵، مقادیر γ شبکه شماره ۲ برای حالت B11 اطراف سیلندر کمتر از ۱ و برای تمامی تیغه‌های پیزوالکتریک، در بیشتر مساحت تیغه زیر ۱ و برای نواحی نزدیک به نوک تیغه زیر ۲ بوده که در کل نسبت

تمام این سه شبکه‌بندی تعداد گره‌های اطراف تیغه ثابت و برابر ۱۰۰ در نظر گرفته شده و با توجه به فشردگی‌سازی صورت گرفته در اطراف تیغه‌ها، این مقدار ثابت مناسب تشخیص داده شده است. اما برای نواحی اطراف سیلندر و مرزهای ورودی و بالا و پایین تغییرات صورت گرفته و با نسبت ۱ این تغییرات برای تمامی این مرزها اعمال می‌شود. بدین ترتیب استقلال حل از شبکه به کمک مقایسه جابه‌جایی نوسانات تیغه‌های پشت سیلندر ساکن در عدد رینولدز ۲۰۰۰ مطابق شکل ۴ می‌باشد. با بررسی جابه‌جایی صورت



شکل ۵. نمودار y^+ سیلندر و تیغه‌های پیزوالکتریک شبکه شماره ۲ برای حالت B11

Fig. 5. Distribution of y^+ of the cylinder and piezoelectric blades of mesh number 2 for case B11.

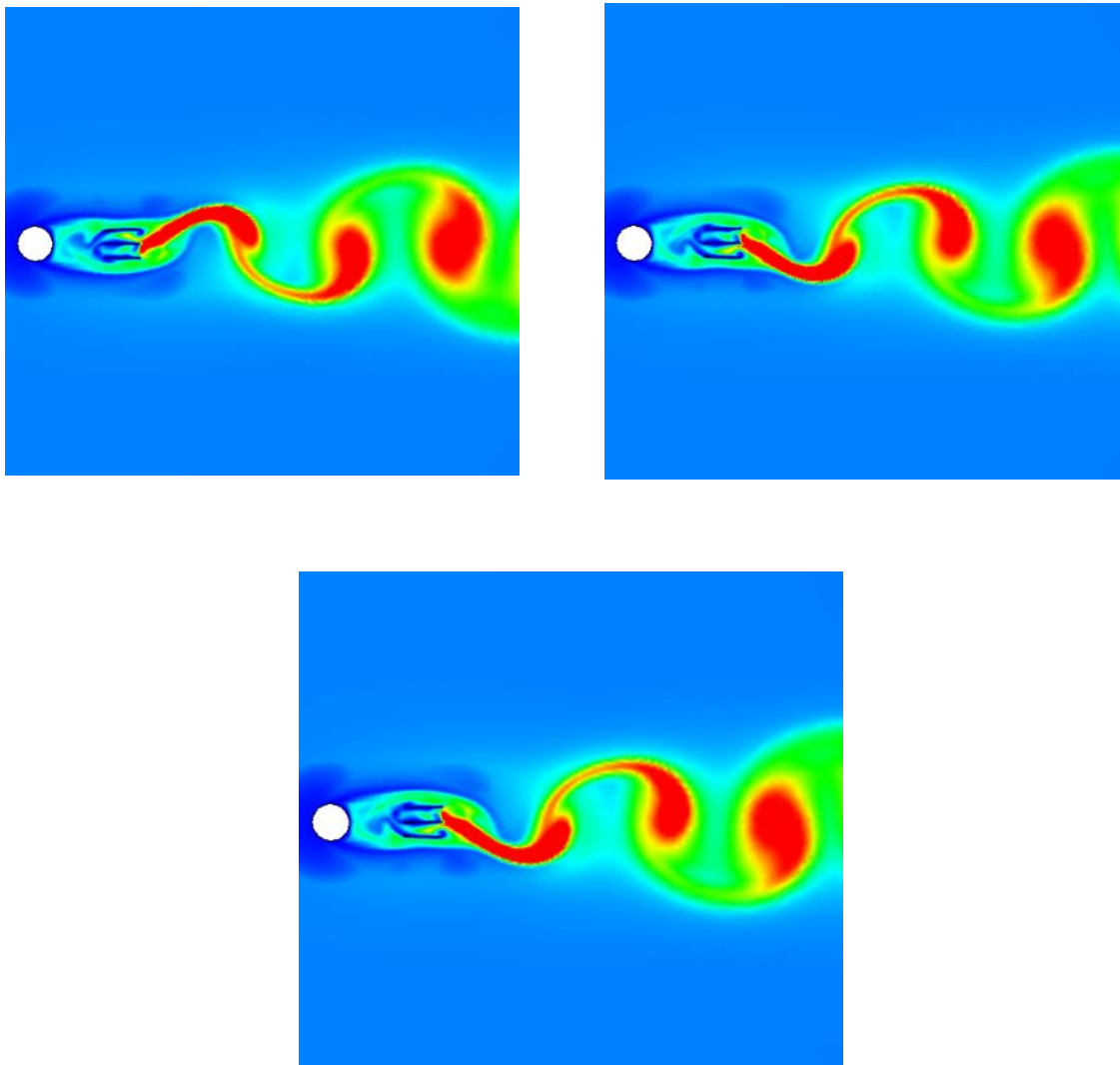
۸- نتایج

نتایج بدست آمده از حالات مورد بررسی در این بخش به تفکیک ارائه می‌شود. بدین صورت که برای هر یک از حالت‌هایی که در آنها تیغه پیزوالکتریک حضور دارد، به تفصیل نتایج گزارش شده است.

۸-۱- نتایج حالت B11

در این بخش نتایج مربوط به حالت سیلندر و سه تیغه پیزوالکتریک که

مناسبی برای این مسئله بررسی شده می‌باشد. شکل ۶ خطوط همتراز لزجت آشفتگی شبکه شماره ۲ برای حالت B11 را در موقعیت زمانی $1/76$ ، $1/68$ و $1/84$ نشان می‌دهد. مطابق شکل، لزجت آشفتگی در ناحیه پایین دست سیلندر و تیغه‌ها بیشتر بوده که دلیل آن جدایش جریان و تشکیل گردابه‌ها در آن نواحی می‌باشد. بنابراین لزجت آشفتگی در نواحی با میزان ناپایداری بیشتر جریان، بیشتر بوده که این موضوع در این نتایج حاصل به طور کامل مشخص است.

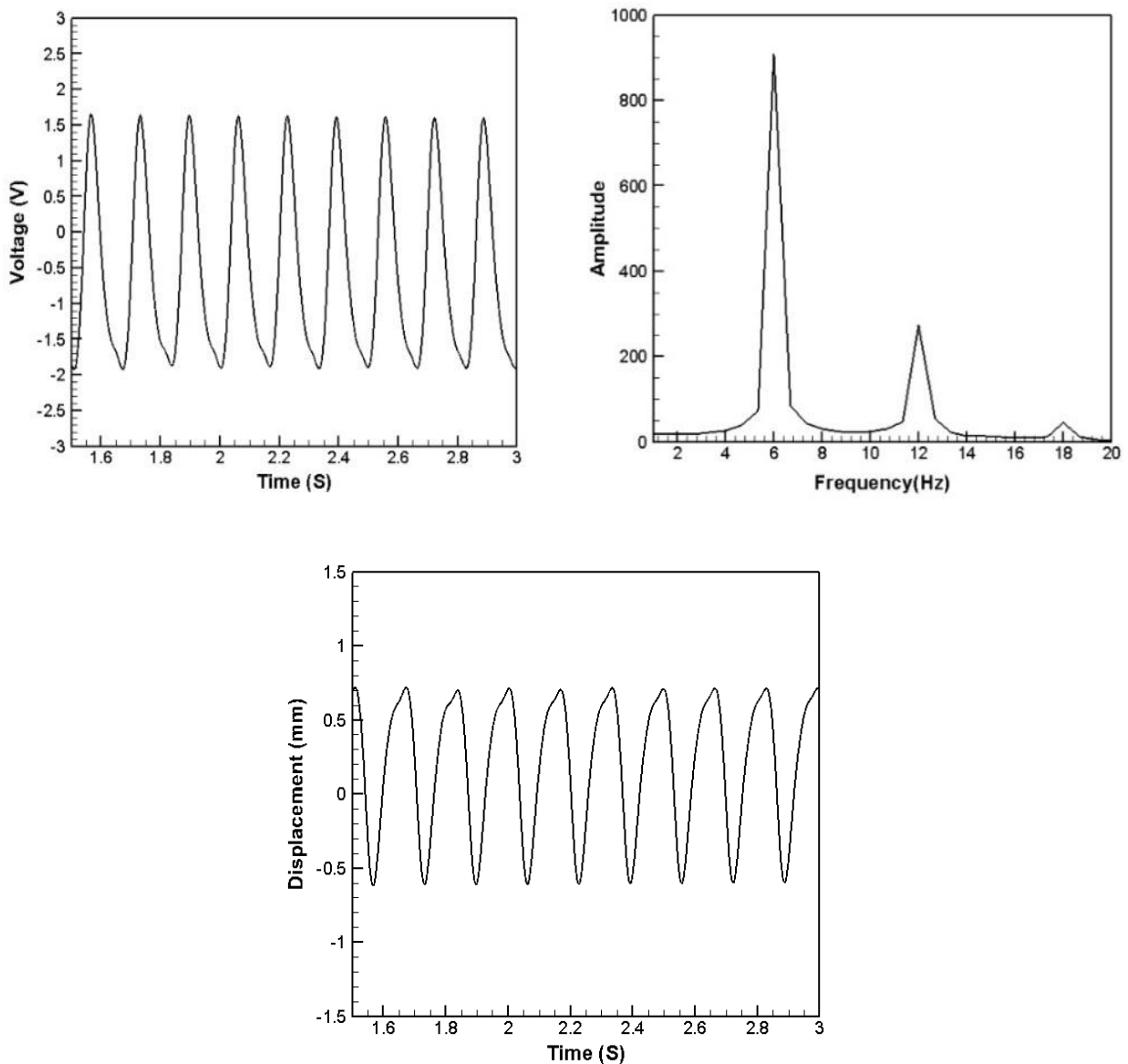


شکل ۶. خطوط همتراز لزجت آشفتگی برای حالت B11 در سه زمان‌های ۱/۶۸، ۱/۷۶ و ۱/۸۴ ثانیه

Fig. 6. Contours of turbulent viscosity for case B11 at three time steps of 1.68, 1.76 and 1.84 second

± 2 ولت می‌باشد. فرکانس غالب این تیغه نیز در محدوده ۶ هرتز قرار گرفته است. برای تیغه بالا مقادیر جابه‌جایی و ولتاژ به ترتیب $0/7-$ تا $0/6$ میلی‌متر و $1/5-$ تا ۲ ولت هستند که در شکل ۹ نشان داده شده‌است. لازم به ذکر است که نمودار طیف توان نوسانات تیغه بالا کاملاً مشابه تیغه پایین می‌باشد. با دقت در نمودار طیف توان برای هر سه تیغه، مشخص است که نوسانات آن‌ها در فرکانس‌های مختلفی صورت می‌گیرد اما فرکانس قالب نوسانات در محدوده فرکانس پایین نسبت به فرکانس طبیعی سازه (تیغه‌ها) می‌باشد. شکل ۱۰ خطوط همتراز شدت ورتیسیته را برای این حالت در سه بازه زمانی نزدیک به هم ۱/۶۸، ۱/۷۶ و ۱/۸۴ از چپ به راست نمایش می‌دهد.

با فواصل یکسان نسبت به سیلندر قرار گرفته و جهت گیره نگهدارنده در سمت راست می‌باشد، در عدد رینولدز ۲۳۵۰ ارائه می‌شود. شکل ۷ نمودار میزان جابه‌جایی نوک و میزان ولتاژ تولیدی را برای پیزوالکتریک پایین در بازه زمانی $1/5$ تا ۳ ثانیه نشان می‌دهد. میزان حداکثر جابه‌جایی این تیغه از $0/6-$ میلی‌متر تا $0/7-$ میلی‌متر متغیر است. همانطور که مشخص است مقدار ولتاژ تولیدی آن بین $2-$ ولت تا $1/5$ ولت بوده و مطابق نمودار طیف توان نوسانات در این حالت، تیغه پایین دارای یک فرکانس غالب در محدوده ۶ هرتز می‌باشد. این مقادیر برای تیغه وسط در شکل ۸ آمده‌است. مطابق این شکل دامنه نوسانات جابه‌جایی بین $0/7 \pm$ میلی‌متر و ولتاژ تولیدی بین



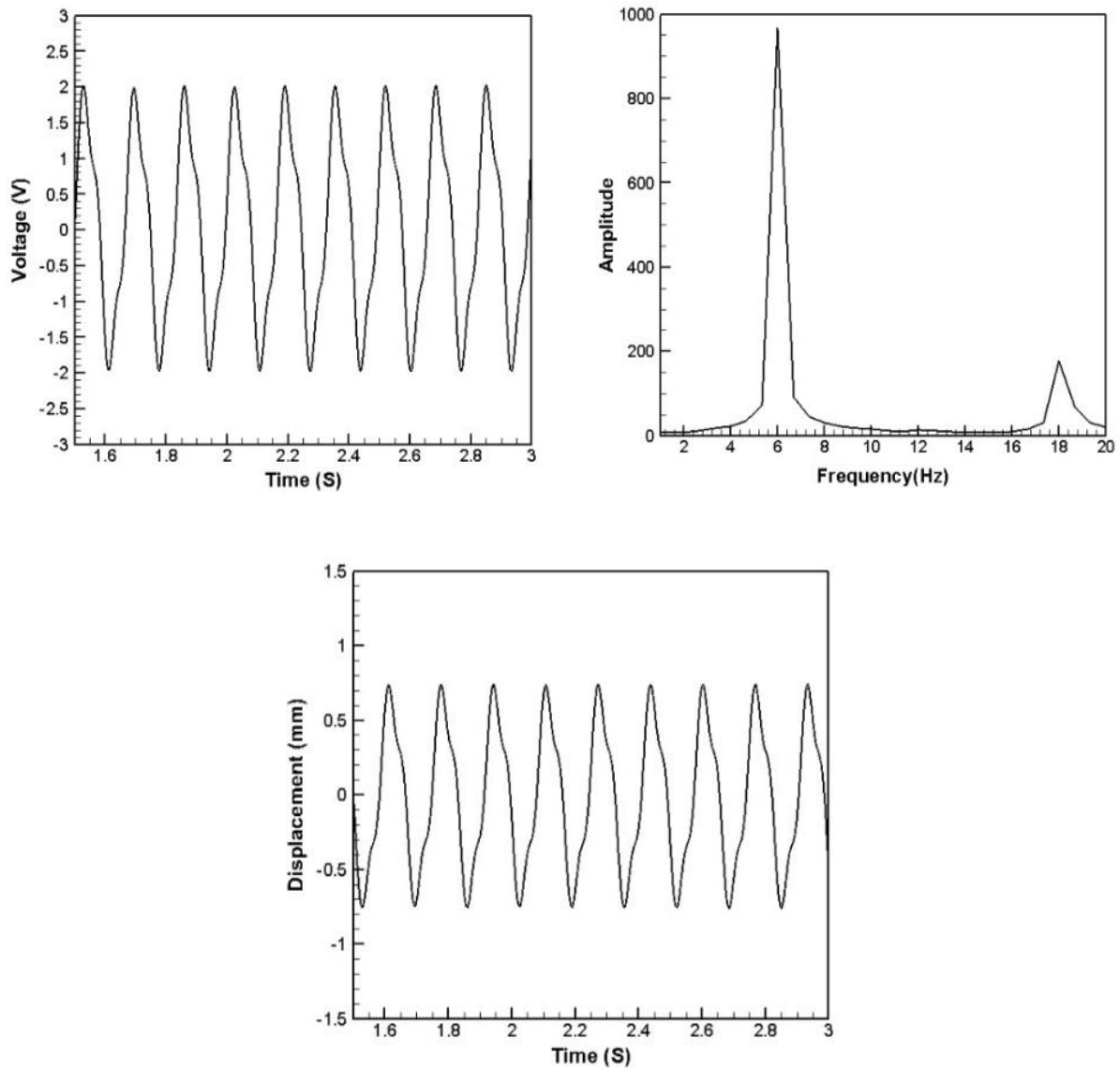
شکل ۷. نمودار جابه‌جایی، ولتاژ و طیف توان نوسانات تیغه پیزوالکتریک پایین برای حالت B۱۱

Fig. 7. Time history of displacement, voltage, and FFT of lower piezoelectric blade vibration for the case B11.

۸-۲- نتایج حالت B۱۲

مشابه حالت قبل، در این بخش نیز مقادیر جابه‌جایی و ولتاژ تولیدی و همچنین ساختار جریان حالت سیلندر و تیغه‌های پیزوالکتریک که در فواصل یکسان نسبت به سیلندر واقع شده‌اند، در عدد رینولدز ۲۳۵۰ بیان می‌شود. با این تفاوت که در این حالت جهت گیره نگهدارنده تیغه‌ها در سمت چپ آن‌ها می‌باشد. شکل ۱۱ که جابه‌جایی نوک و ولتاژ تولیدی تیغه پایین را نشان می‌دهد، بیانگر این است که جابه‌جایی تیغه پایین بین $-۰/۲۵$ میلی‌متر و $۱/۲$ میلی‌متر در نوسان بوده و ولتاژ تولید شده نیز بین $-۳/۱$ و $۰/۵$ ولت بدست

در این شکل ریزش گردابه‌های پشت سیلندر و تیغه‌های پیزوالکتریک مشهود است. با جدایش جریانی که پس از گذر سیال از روی سیلندر روی می‌دهد، گردابه ایجاد می‌شود. گردابه‌های ایجاد شده به صورت پی در پی با تیغه‌های پیزوالکتریک برخورد کرده و همین موضوع باعث حرکت تناوبی آن‌ها می‌شود. در هر لحظه، حرکت نوسانی گردابه‌ها اطراف تیغه‌های پیزوالکتریک نواحی کم‌فشار و پرفشار را به طور همزمان اطراف تیغه‌ها ایجاد می‌کند که این موضوع موجب حرکت تیغه از ناحیه پرفشار به ناحیه کم‌فشار شده و عامل حرکت تناوبی آنها خواهد بود.

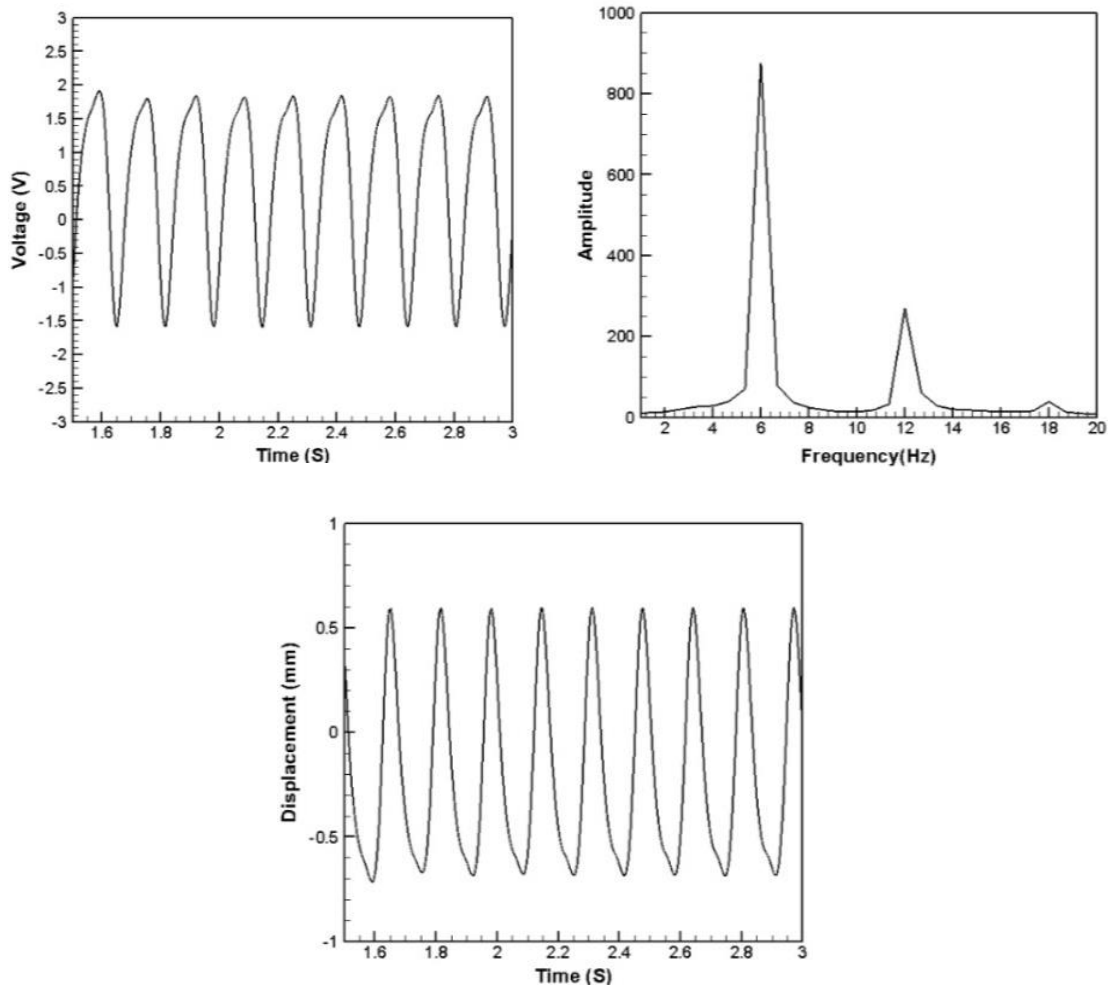


شکل ۸. نمودار جابه‌جایی، ولتاژ و طیف توان نوسانات تیغه پیزوالکتریک وسط برای حالت B11

Fig. 8. Time history of displacement, voltage, and FFT of middle piezoelectric blade vibration for case B11.

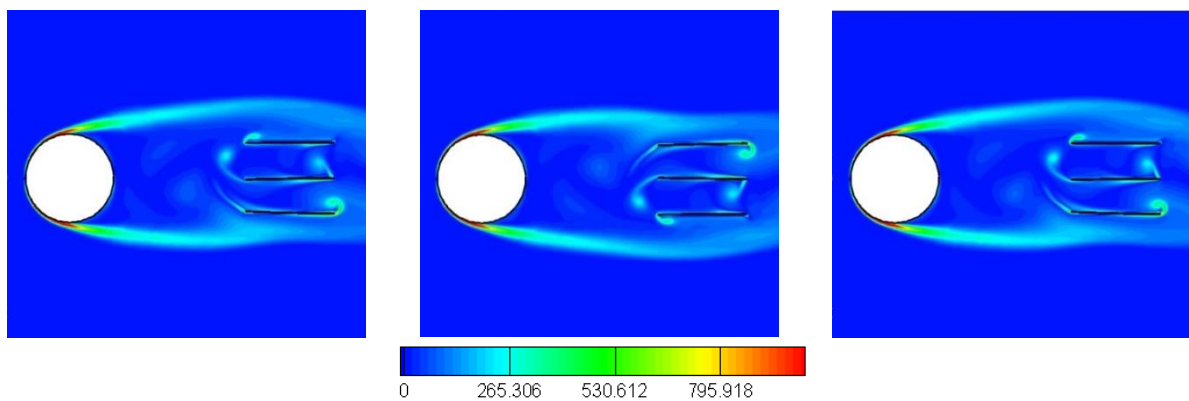
نیز میزان جابه‌جایی در بازه $1/2$ تا $0/25$ میلی‌متر متغیر بوده و میزان ولتاژ آن از $0/5$ تا $3/1$ نوسان می‌کند. همچنین نمودار طیف توان نوسانات آن نیز کاملاً مشابه تیغه پایین بوده و دقیقاً فرکانس غالب تیغه پایین و وسط که برابر ۶ هرتز می‌باشد، بدست آمده‌است. مطابق نمودارهای طیف توان نوسانات اگر چه تحرک تیغه‌ها در فرکانس‌های متفاوتی صورت می‌گیرد، اما محدوده فرکانس غالب نوسانات همواره در محدوده فرکانس پایین می‌باشد.

آمده‌است. مطابق نمودار طیف توان نوسانات برای این تیغه، مشخص است که فرکانس غالب آن در محدوده ۶ هرتز قرار دارد. میزان جابه‌جایی نوک و ولتاژ تولیدی برای تیغه وسط به ترتیب بین $1/6$ میلی‌متر و $4/2$ ولت در نوسان است که در شکل ۱۲ آورده شده‌است. نمودار طیف توان نوسانات تیغه میانی در همین شکل، مویده آن است که فرکانس غالب این تیغه مشابه تیغه پایین در محدوده ۶ هرتز قرار گرفته است. مطابق شکل ۱۳ برای تیغه بالایی



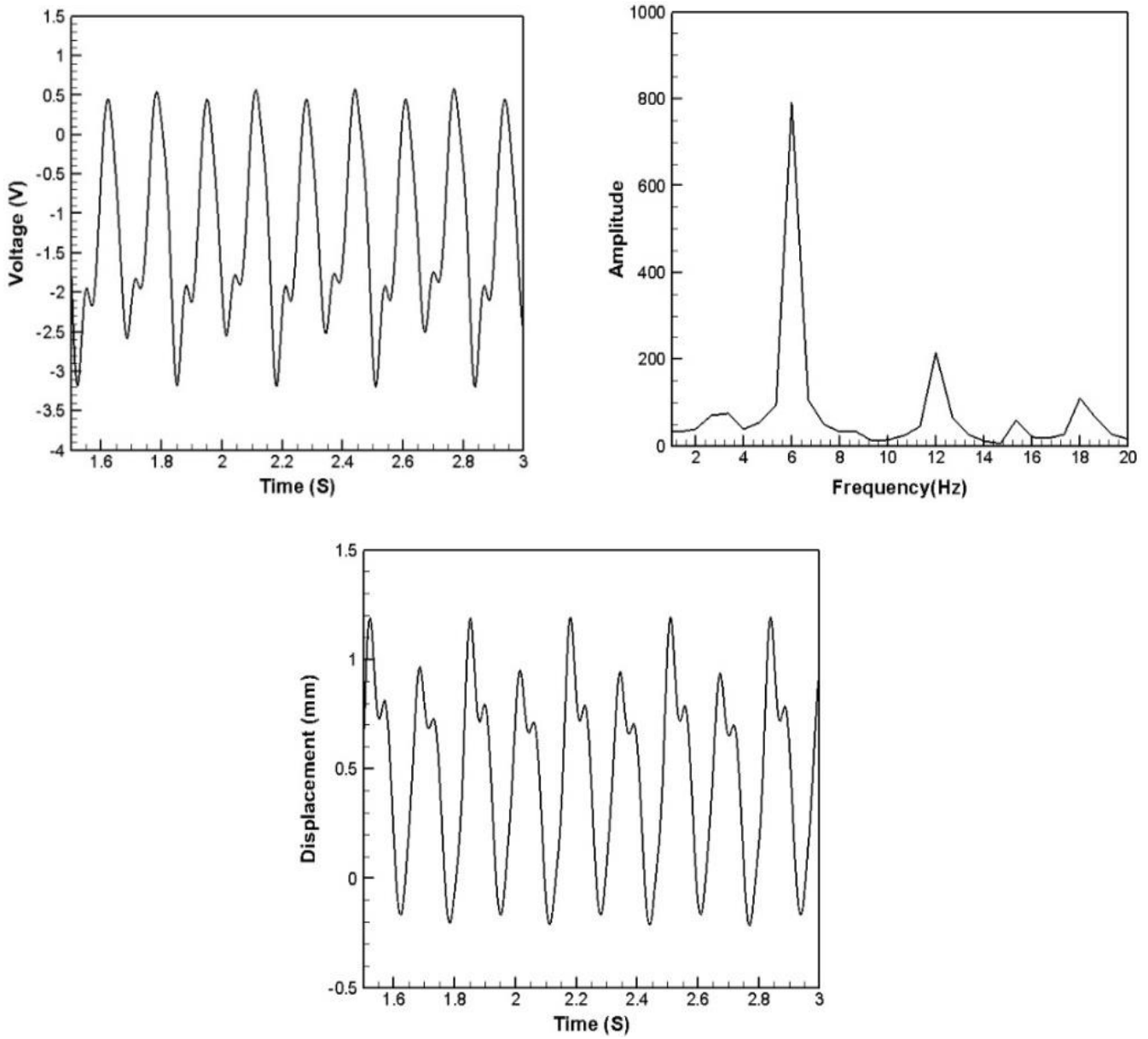
شکل ۹. نمودار جابه‌جایی، ولتاژ و طیف توان نوسانات تیغه پیزوالکتریک بالا برای حالت B11

Fig. 9. Time history of displacement, voltage, and FFT of upper piezoelectric blade vibration for case B11.



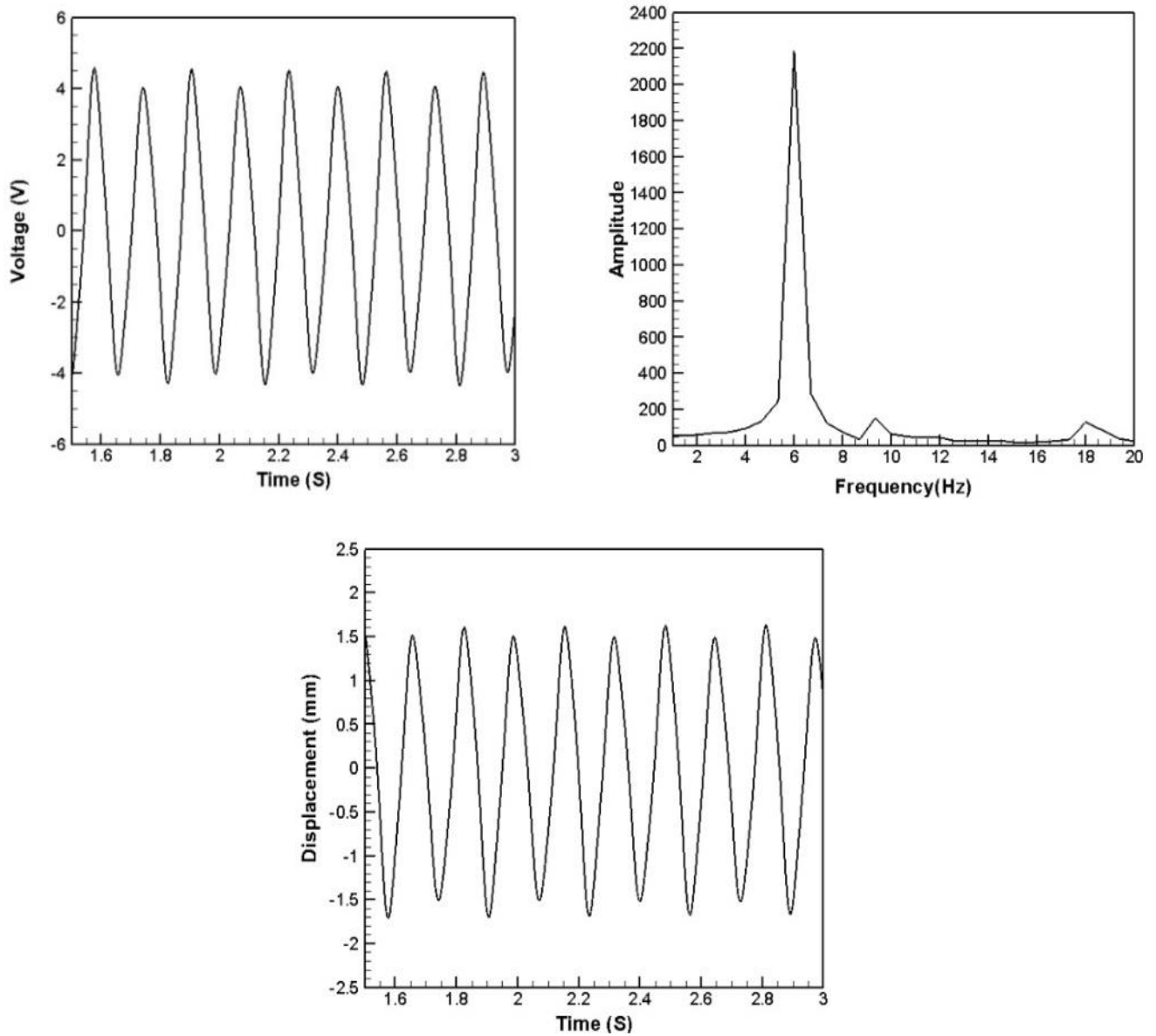
شکل ۱۰. خطوط هم‌تراز شدت ورتیسیته در سه گام زمانی ۱/۶۸، ۱/۷۶ و ۱/۸۴ (از چپ به راست) برای حالت B11

Fig. 10. Contour of vorticity at three time-steps of 1.68, 1.76, and 1.84 (from left to right) for case B11.



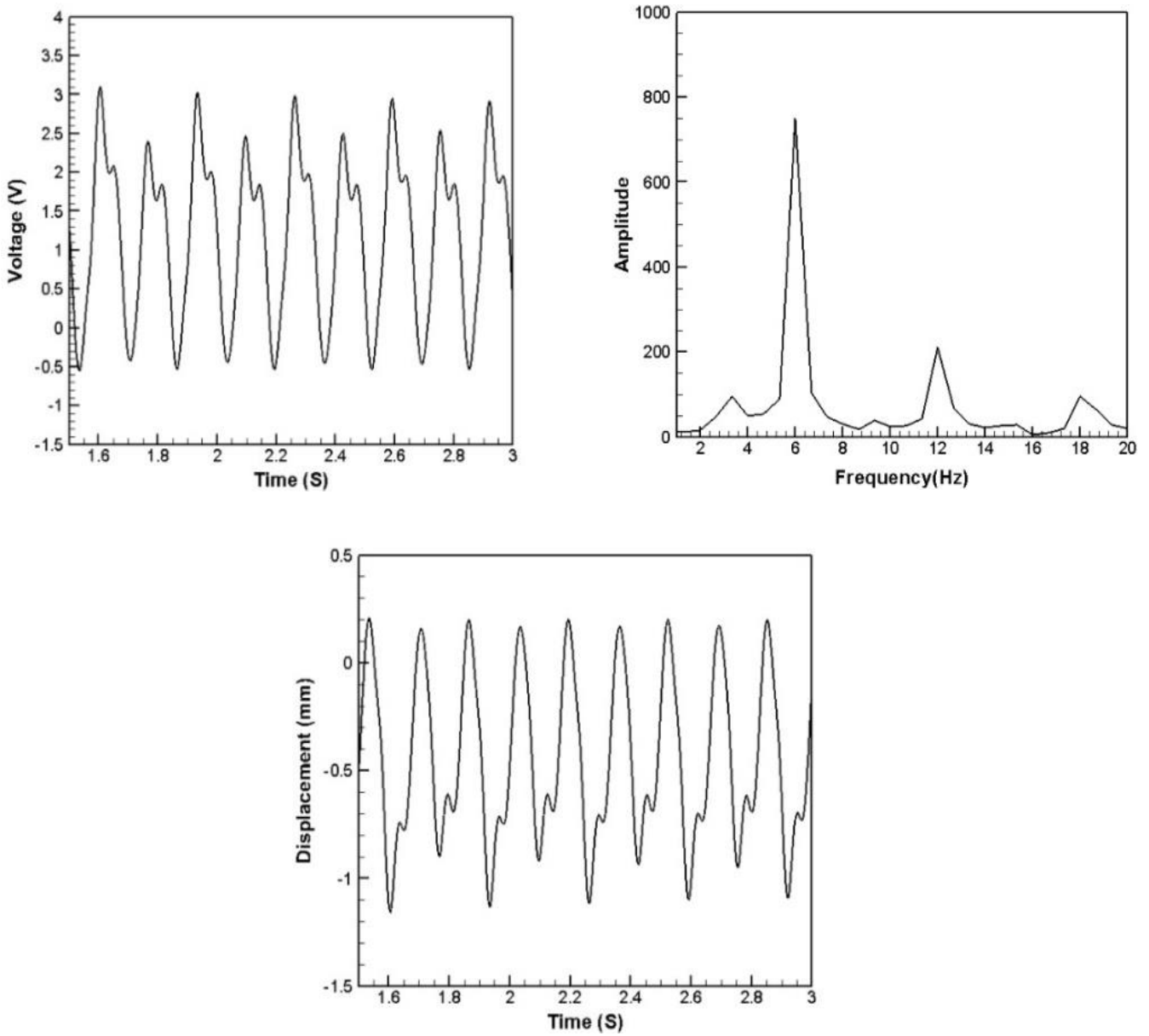
شکل ۱۱. نمودار جابه‌جایی، ولتاژ و طیف توان نوسانات تیغه پیزوالکتریک پایین برای حالت B۱

Fig. 11. Time history of displacement, voltage, and FFT of lower piezoelectric blade vibration for case B12.



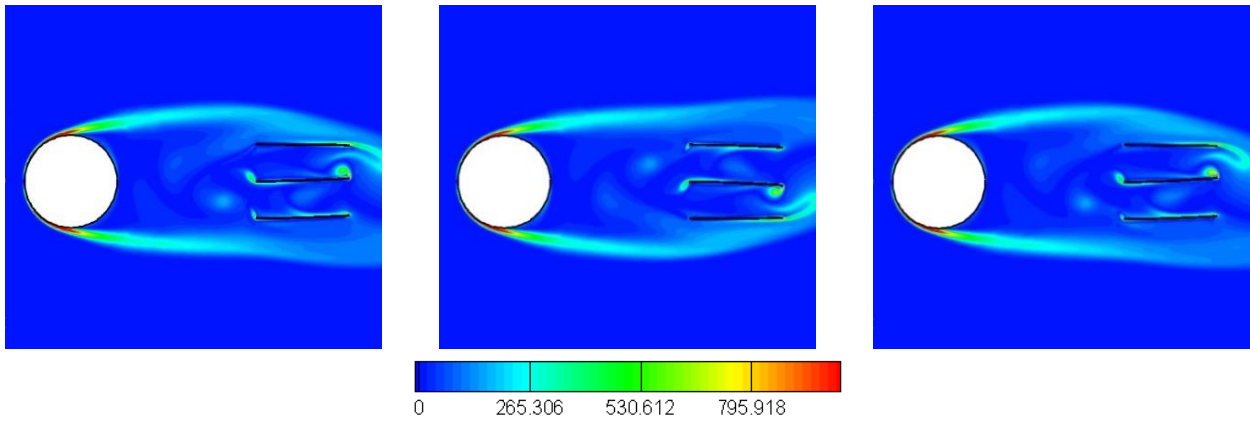
شکل ۱۲. نمودار جابه‌جایی، ولتاژ و طیف توان نوسانات تیغه پیزوالکتریک وسط برای حالت B۱۲

Fig. 12. Time history of displacement, voltage, and FFT of middle piezoelectric blade vibration for case B12.



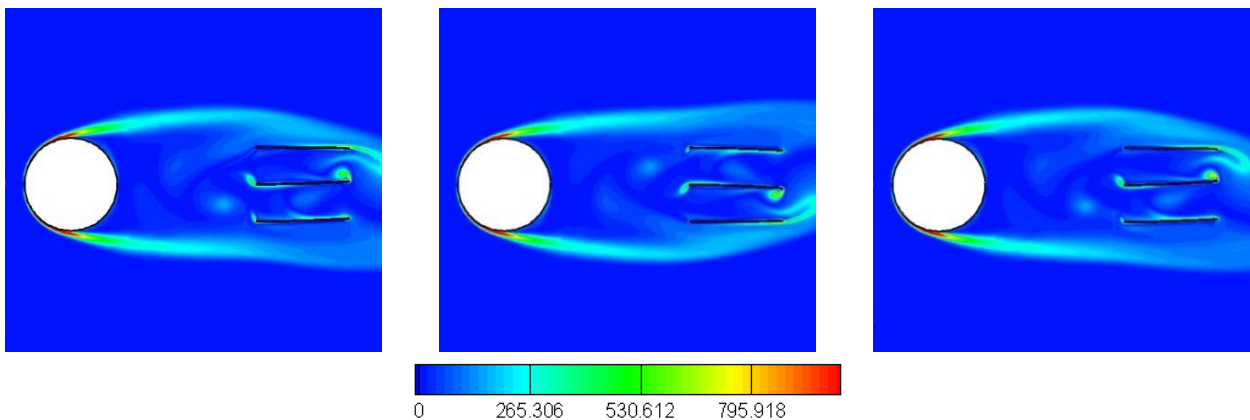
شکل ۱۳. نمودار جابه‌جایی، ولتاژ و طیف توان نوسانات تیغه پیزوالکتریک بالا برای حالت B12

Fig. 13. Time history of displacement, voltage, and FFT of upper piezoelectric blade vibration for case B12.



شکل ۱۴. خطوط همتراز شدت ورتیسیته در سه گام زمانی ۱/۶۸، ۱/۷۶ و ۱/۸۴ (از چپ به راست) برای حالت B۱۲

Fig. 14. Contour of vorticity at three time-steps of 1.68, 1.76, and 1.84 (from left to right) for case B12.



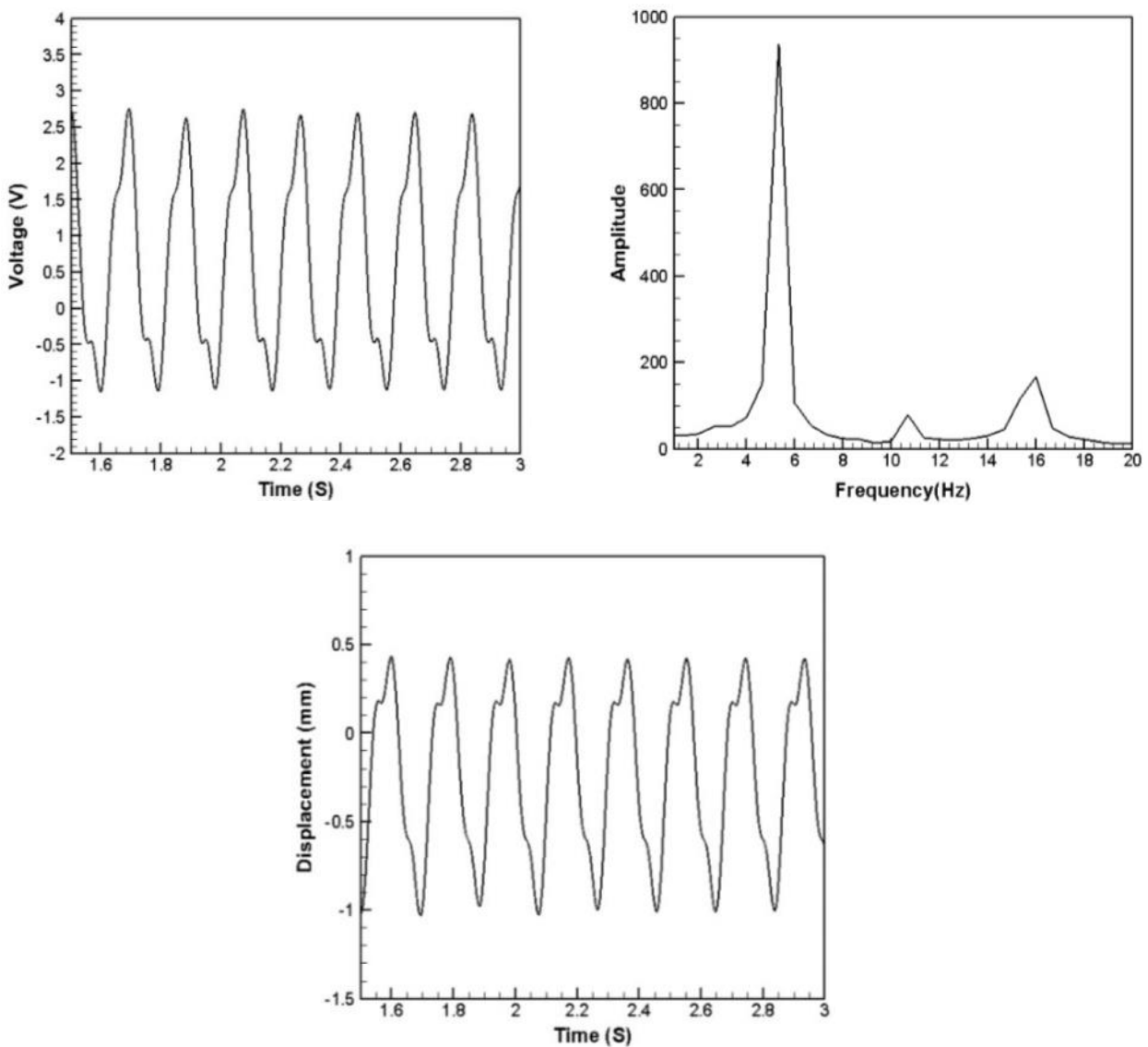
شکل ۱۵. خطوط همتراز فشار نسبی اطراف سیلندر و تیغه‌های پیزوالکتریک در حالت‌های B۱۱ و B۱۲

Fig. 15. The relative pressure contour around the cylinder and the piezoelectric blades for cases B11 and B12.

کرده و این تغییر لحظه‌ای نواحی پرفشار و کم‌فشار حرکت تناوبی تیغه‌ها را به همراه دارد.

۸-۳- محدودیت اساسی حالت‌های پیشین و راه حل رفع آن همانطور که در شکل ۱۵ مشخص است، یکی از محدودیت‌های اساسی حالت‌های پیشین، امکان برخورد تیغه‌های پیزوالکتریک با یکدیگر در لحظات ابتدایی (کمتر از ۰/۲ ثانیه) می‌باشد که در صورت افزایش سرعت ورودی (افزایش عدد رینولدز) این برخورد به وقوع می‌پیوندد. در حقیقت در

شکل ۱۴ خطوط همتراز شدت ورتیسیته را در سه بازه زمانی ۱/۶۸، ۱/۷۶ و ۱/۸۴ از چپ به راست نشان می‌دهد. در اصل با عبور جریان سیال از روی سیلندر، پس از جدایش، گردابه‌هایی ایجاد می‌شود که به صورت تناوبی به تیغه‌های پیزوالکتریک در پشت سیلندر برخورد می‌کنند. همین برخورد متناوب گردابه‌ها با تیغه‌های پیزوالکتریک، منجر به حرکت تناوبی تیغه‌های پیزوالکتریک شده که این امر در نمودارهای جابه‌جایی و ولتاژ کاملاً مشخص است. در حقیقت ریزش گردابه‌هایی که در اطراف تیغه‌ها به وقوع می‌پیوندد، نواحی پرفشار و کم‌فشار را به طور همزمان اطراف آن‌ها ایجاد

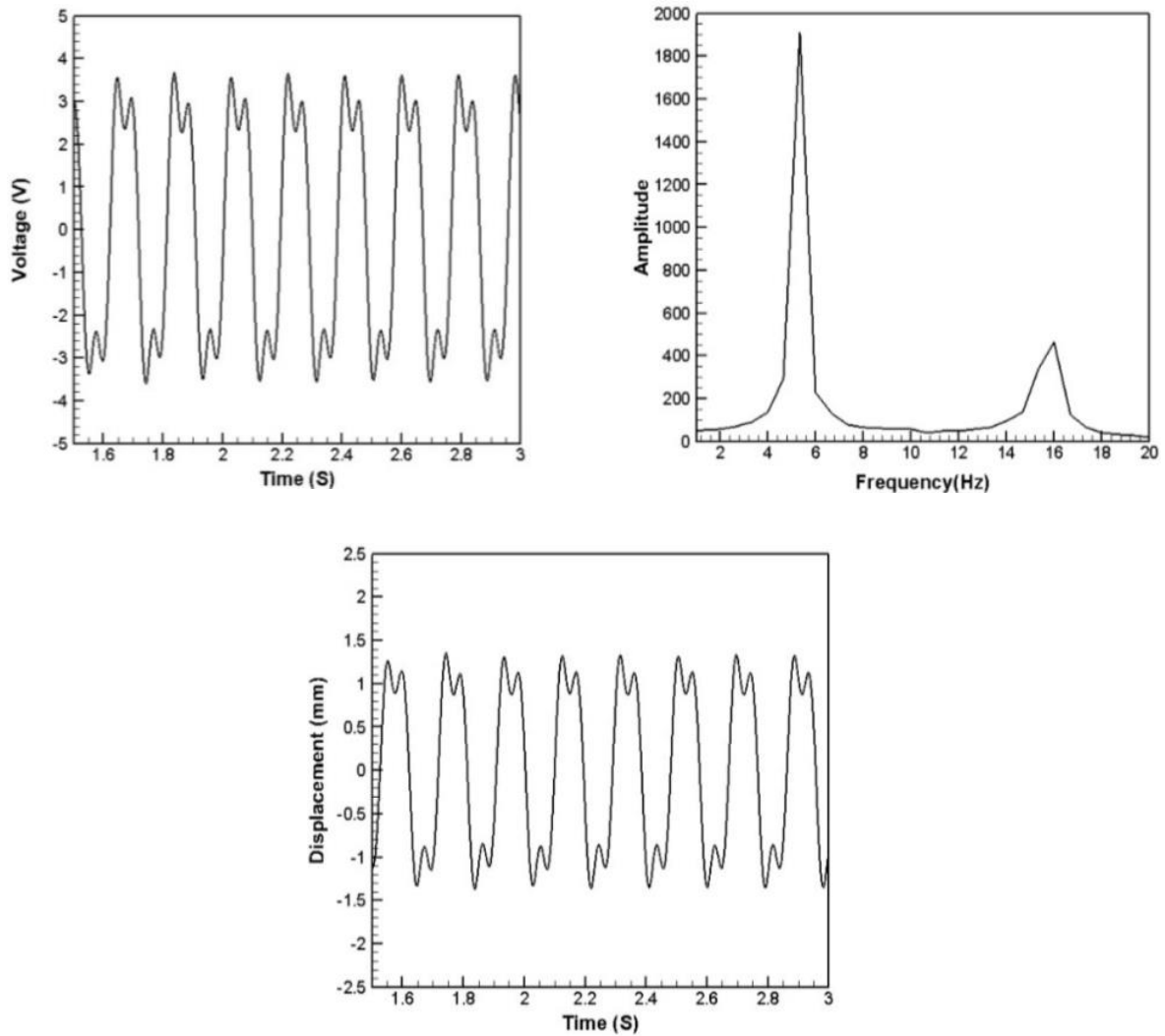


شکل ۱۶. نمودار جابه‌جایی، ولتاژ و طیف توان نوسانات تیغه پیزوالکتریک بالا برای حالت B۱۲

Fig. 16. Time history of displacement, voltage, and FFT of upper piezoelectric blade vibration for case B12.

فاصله عرضی تیغه‌ها، برای تیغه میانی به اندازه نصف طول تیغه (۱/۵ سانتی‌متر) تغییر مکان صورت گرفت. همزمان با آن جهت گیره نگهدارنده تیغه وسط نیز با تیغه‌های بالا و پایین متفاوت در نظر گرفته شد که نتایج آن برای عدد رینولدز ۲۳۵۰ در بخش‌های بعدی ارائه می‌شود. همچنین با این تغییر مشاهده شد که حداکثر عدد رینولدز بدون برخورد تیغه‌ها از عدد ۲۴۰۰ در حالت‌های گذشته به ۲۶۰۰ در حالت جدید افزایش یافته که نشان از رفع نسبی این محدودیت می‌باشد که نتایج دقیق آن در ادامه آورده شده‌است.

لحظات ابتدایی حل جریان، نواحی پرفشار در بدنه بیرونی تیغه‌ها و نواحی کم‌فشار در بدنه داخلی تیغه‌ها ایجاد می‌شود و این موضوع موجب خم شدن تیغه‌های پیزوالکتریک به سمت یکدیگر شده که می‌تواند عامل برخورد آن‌ها با یکدیگر شود. مطابق بررسی‌های صورت گرفته، حداکثر عدد رینولدزی که در آن تیغه‌های پیزوالکتریک با یکدیگر برخورد نمی‌کنند برای این موارد ذکر شده، عدد رینولدز ۲۴۰۰ بوده که اندکی بیشتر از عدد رینولدز ۲۳۵۰ می‌باشد که نتایج آن ارائه شد. بدین ترتیب برای رفع این محدودیت اقداماتی صورت گرفت. بدین منظور با ثابت در نظر گرفتن



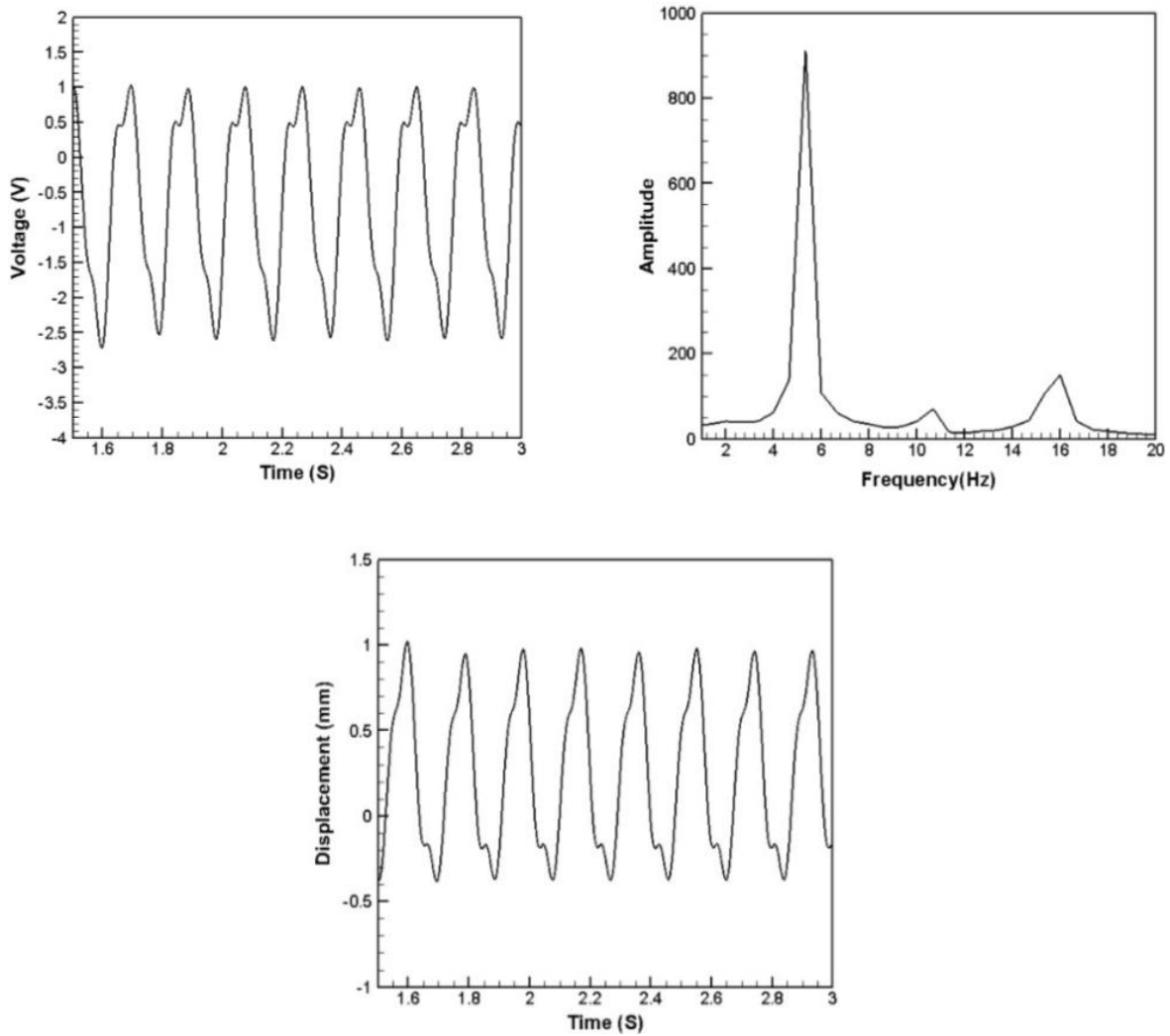
شکل ۱۷. نمودار جابه‌جایی، ولتاژ و طیف توان نوسانات تیغه پیزوالکتریک وسط برای حالت B21

Fig. 17. Time history of displacement, voltage, and FFT of middle piezoelectric blade vibration for case B21.

۸-۴- نتایج حالت B21

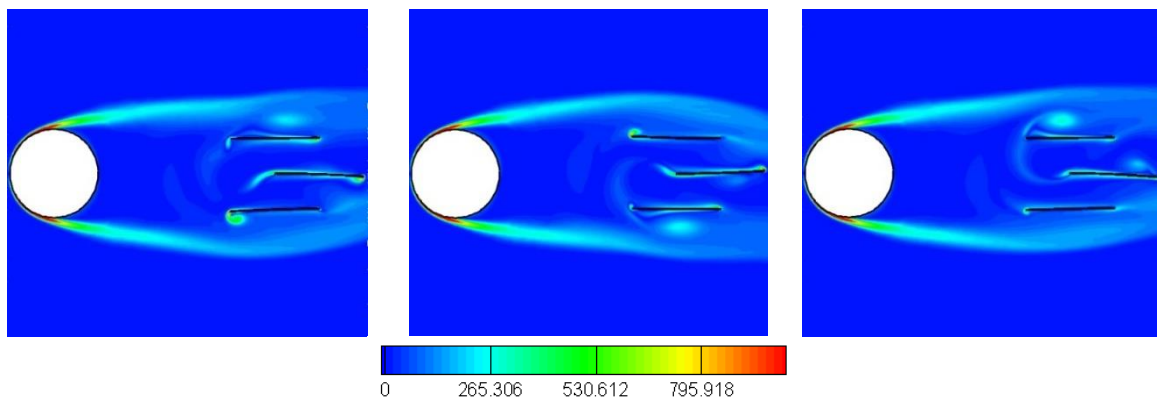
متغیر بوده که در شکل ۱۷ نمودار آن قابل مشاهده است. همچنین مطابق این شکل، نمودار طیف توان نوسانات آن ارائه شده و فرکانس غالب $۵/۳۳$ هرتز واقع شده است. بر اساس شکل ۱۸ برای تیغه بالا نیز مقادیر جابه‌جایی و ولتاژ به ترتیب بین مقادیر $۰/۴۵-$ و ۱ میلی‌متر و $۲/۷۵-$ و $۱/۱$ نوسان می‌کند. همچنین فرکانس نوسانات این تیغه دقیقاً همان مقدار نوسانات تیغه پایین می‌باشد که همگی آن‌ها در محدوده فرکانس پایین تلقی می‌شوند. شکل ۱۹ خط‌طور هم‌تراز شدت و رتیبسیته را نمایش می‌دهد. ساختار نوسانی ریزش گردابه‌ها در پشت سیلندر و اطراف تیغه‌های پیزوالکتریک در این

نتایج این حالت به عنوان اولین حالت مورد بررسی که در آن جهت گیره نگهدارنده تیغه‌های پیزوالکتریک متفاوت از یکدیگر هستند، در عدد رینولدز ۲۳۵۰ در این بخش گزارش شده است. مطابق شکل ۱۶ جابه‌جایی و مقدار ولتاژ تولیدی برای تیغه پایین به ترتیب $۱-$ و $۰/۴۵$ میلی‌متر و ولتاژ تولیدی آن $۱/۱-$ و $۲/۷۵$ ولت در نوسان می‌باشد. همچنین فرکانس غالب نوسانات تیغه پایین در محدوده $۵/۳۳$ هرتز قرار گرفته است. برای تیغه وسط مقادیر جابه‌جایی و ولتاژ تولیدی به ترتیب $۱/۳ \pm$ میلی‌متر و $۳/۲ \pm$ ولت



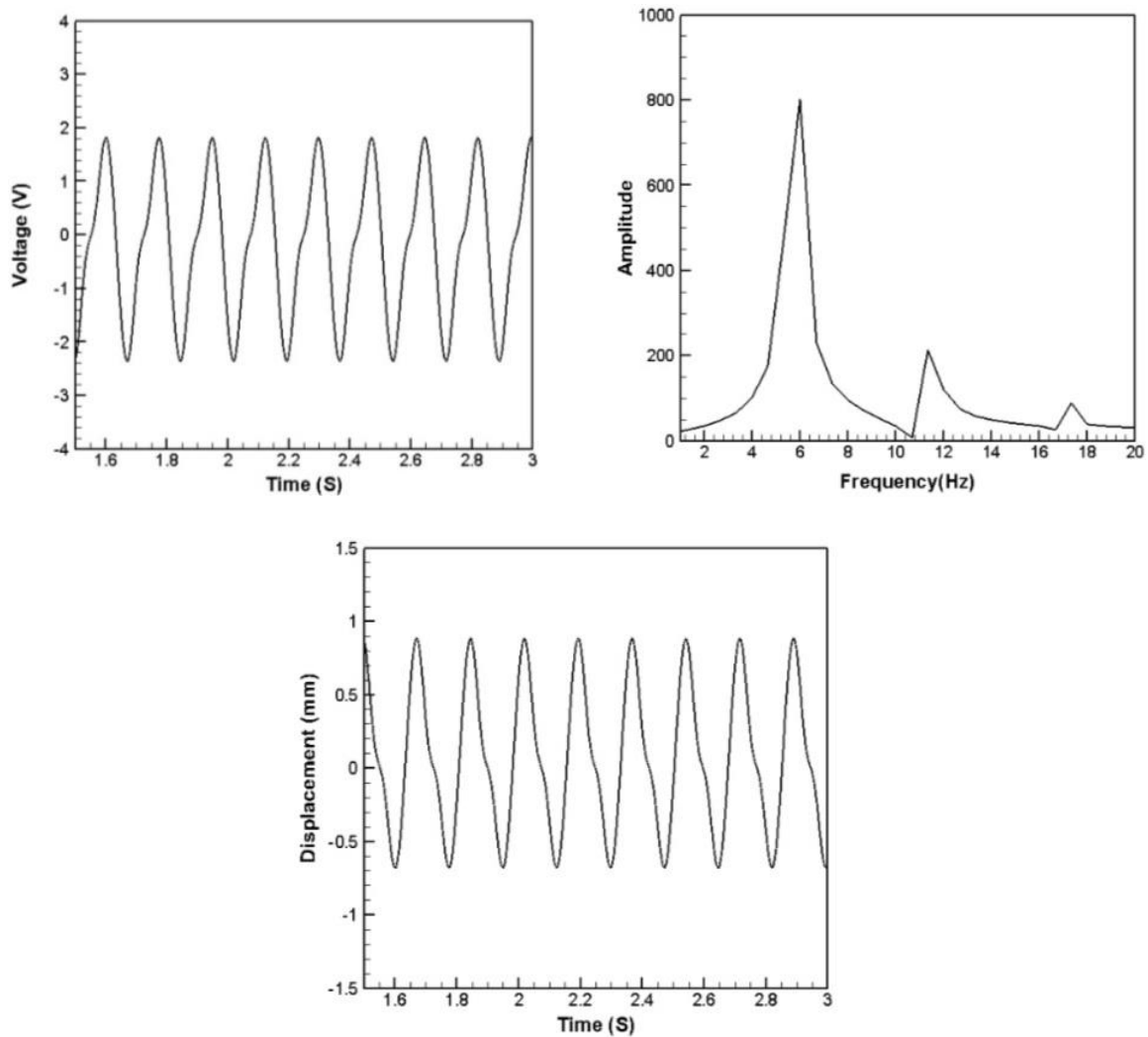
شکل ۱۸. نمودار جابه‌جایی، ولتاژ و طیف توان نوسانات تیغه پیزوالکتریک بالا برای حالت B21

Fig. 18. Time history of displacement, voltage, and FFT of upper piezoelectric blade vibration for B21 case.



شکل ۱۹. خطوط هم‌تراز شدت ورتیسیتی در سه گام زمانی ۱/۶۸، ۱/۷۶ و ۱/۸۴ (از چپ به راست) برای حالت B21

Fig. 19. Contour of vorticity at three time-steps of 1.68, 1.76, and 1.84 (from left to right) for case B21.



شکل ۲۰. نمودار جابه‌جایی، ولتاژ و طیف توان نوسانات تیغه پیزوالکتریک پایین برای حالت B22

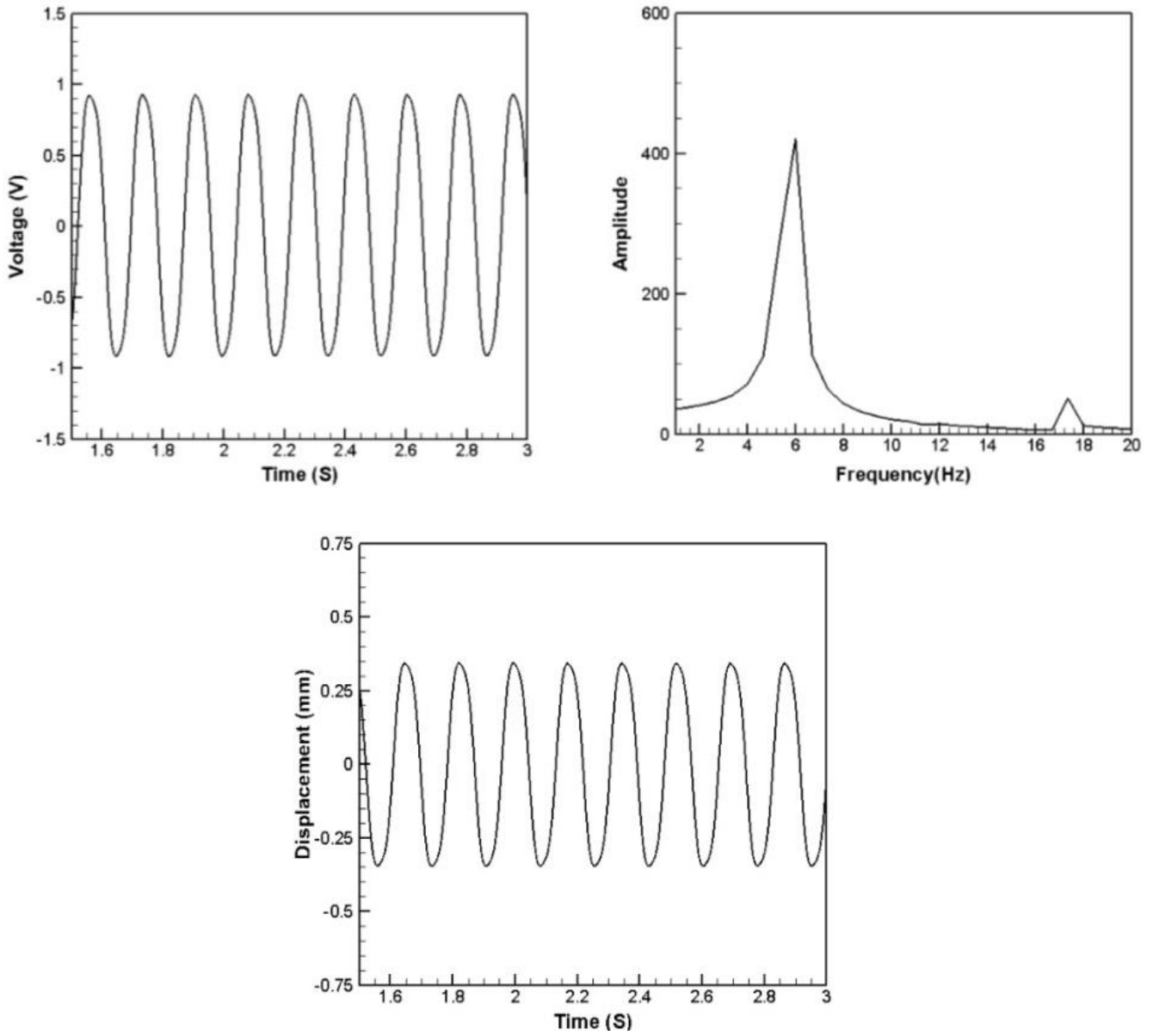
Fig. 20. Time history of displacement, voltage, and FFT of lower piezoelectric blade vibration for case B22.

شده‌است. شکل ۲۰ که جابه‌جایی و ولتاژ تیغه پایین را نمایش می‌دهد، مویده است. آن است که بازه نوسانات این تیغه بین $0/7-$ تا $0/9$ میلی‌متر و مقدار ولتاژ تولیدی آن در بازه $2/1-$ تا $1/9$ ولت متغیر می‌باشد. همچنین فرکانس غالب نوسانات تیغه پایین ۶ هرتز بدست آمده‌است. بر اساس شکل ۲۱ برای تیغه وسط، بازه نوسانات و میزان ولتاژ تولید شده بسیار کمتر از اولین حالت بررسی تیغه‌ها با جهت متفاوت گیره نگهدارنده (حالت B21) می‌باشد. مطابق این شکل جابه‌جایی و ولتاژ بدست آمده به ترتیب بین $\pm 0/35$ میلی‌متر و $\pm 0/9$ ولت متغیر است. بر اساس همین شکل، فرکانس غالب ۶ هرتز واقع شده‌است. شکل ۲۲ نیز جابه‌جایی و ولتاژ تیغه بالا را نشان می‌دهد که بازه نوسانات

شکل مشخص می‌باشد. مطابق این شکل، نوسان خلاف جهت تیغه میانی نسبت به تیغه‌های بالا و پایین، باعث عدم حبس و محدودیت آن شده‌است. همچنین گردابه‌هایی که از روی سیلندر دایروی جدا می‌شوند، به دلیل ایجاد نواحی پرفشار و کم‌فشار در هر لحظه، موجب نوسانات پی در پی تیغه‌ها شده که پیش‌تر اثر آن در نمودارهای جابه‌جایی و ولتاژ مشخص بود.

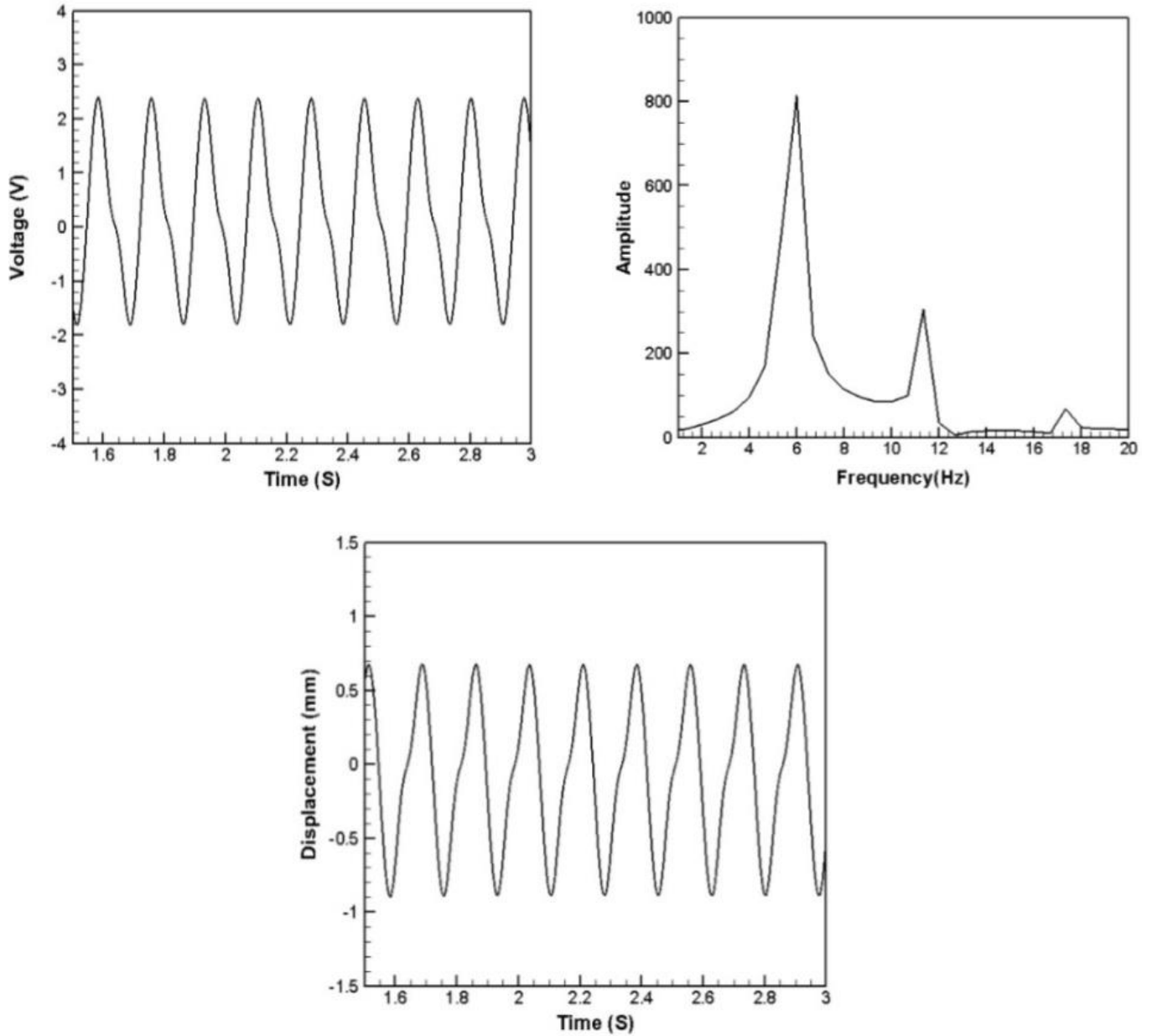
۸-۵ نتایج حالت B22

نتایج دومین حالتی که در آن جهت گیره نگهدارنده تیغه‌ها نسبت به یکدیگر متفاوت هستند، در عدد رینولدز ۲۳۵۰ در این بخش گزارش



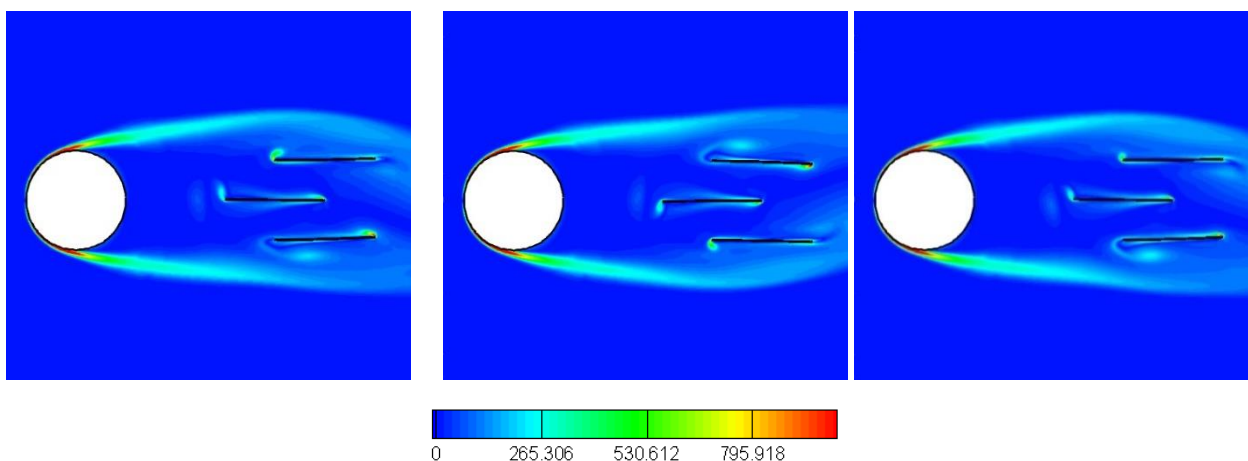
شکل ۲۱. نمودار جابه‌جایی، ولتاژ و طیف توان نوسانات تیغه پیزوالکتریک وسط برای حالت B22

Fig. 21. Time history of displacement, voltage, and FFT of middle piezoelectric blade vibration for case B22.



شکل ۲۲. نمودار جابه‌جایی، ولتاژ و طیف توان نوسانات تیغه پیزوالکتریک بالا برای حالت B22

Fig. 22. Time history of displacement, voltage, and FFT of upper piezoelectric blade vibration for case B22.



شکل ۲۳. خطوط همتراز شدت ورتیسیتی در سه گام زمانی ۱/۶۸، ۱/۷۶ و ۱/۸۴ (از چپ به راست) برای حالت B22

Fig. 23. Contour of vorticity at three time-steps of 1.68, 1.76, and 1.84 (from left to right) for case B22.

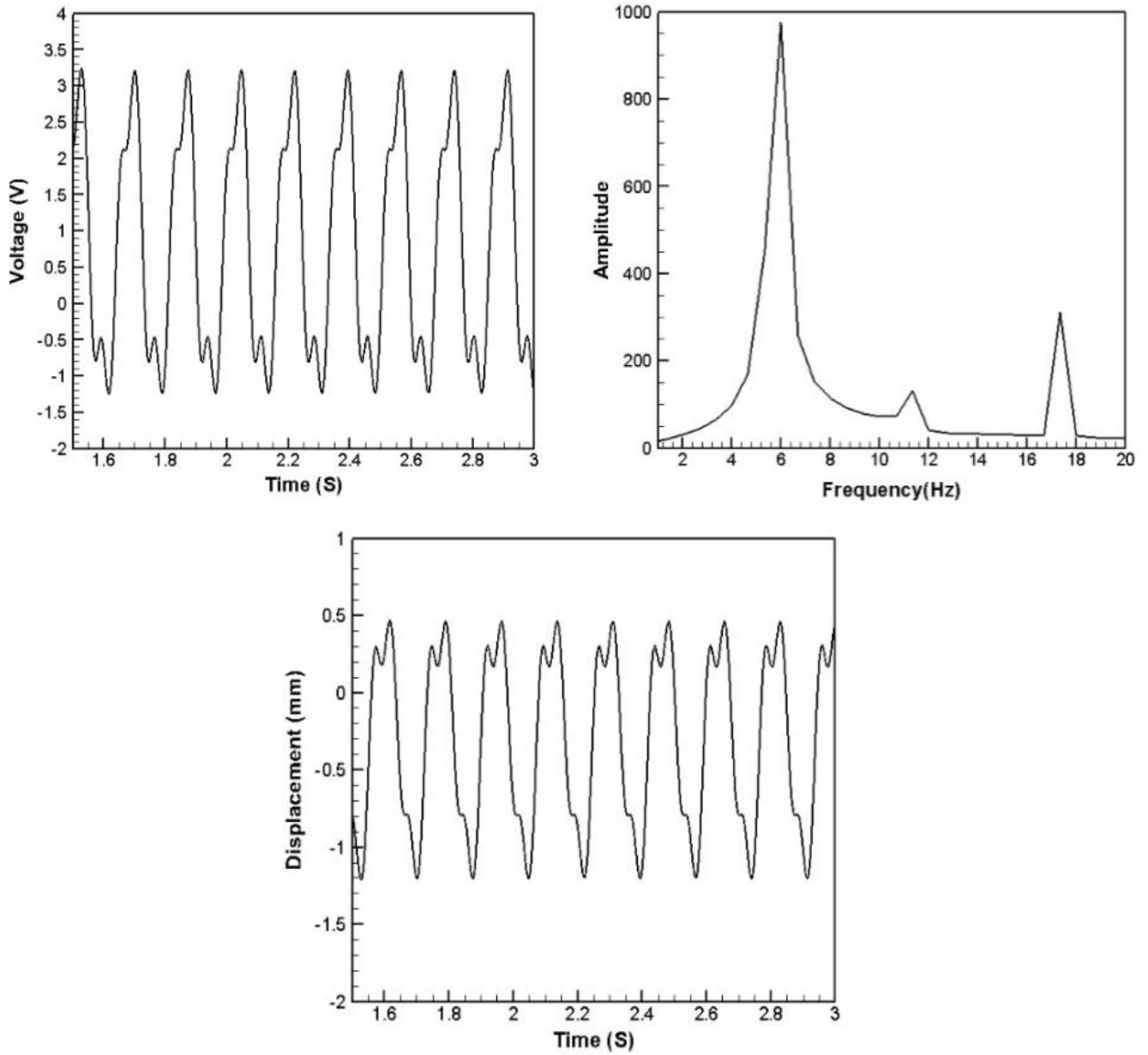
می‌دهد. مطابق بررسی‌های صورت گرفته بیشترین عدد رینولدزی که بدون برخورد تیغه‌ها به یکدیگر می‌توان اعمال کرد، عدد رینولدز ۲۶۰۰ بوده که در مقایسه با بیشترین عدد رینولدز بدون برخورد تیغه‌ها در حالت‌های پیشین که نوسانات تمامی تیغه‌ها در یک سمت بود (عدد رینولدز ۲۴۰۰ در حالت B1)، بهبود ۸/۳ درصدی را نشان می‌دهد. در این حالت مطالعه شده، جابه‌جایی و ولتاژ تولیدی تیغه پایین به ترتیب در بازه ۱/۲- تا ۰/۵ میلی‌متر و ۱/۲۵- تا ۳/۲۵ ولت نوسان کرده که در شکل ۲۴ مشخص است. مطابق شکل ۲۵ این مقادیر برای تیغه وسط به ترتیب $\pm 1/75$ میلی‌متر و ± 5 ولت در نوسان بوده که مقدار قابل توجهی می‌باشد. شکل ۲۶ نیز مقادیر جابه‌جایی و ولتاژ تولیدی را در بازه ۰/۵- تا ۱/۲ میلی‌متر و ۳/۲۵- تا ۱/۲۵ ولت برای تیغه بالایی نشان می‌دهد. مطابق این سه شکل، با توجه به اینکه در این حالت صرفاً عدد رینولدز به ۲۶۰۰ افزایش یافته و ساختار هندسی و شبکه، مشابه ساختار هندسی و شبکه حالت B21 می‌باشد، فرکانس غالب هر سه تیغه مقدار ۶ هرتز باقی مانده که به نظر این افزایش نسبی در عدد رینولدز (افزایش سرعت ورودی) تأثیر خاصی در فرکانس غالب نوسانات تیغه‌ها نداشته است.

شکل ۲۷ ساختار جریان سیال را اطراف سیلندر و تیغه‌های پیزوالکتریک تحت عنوان خطوط همتراز شدت ورتیسیتی در سه گام زمانی نزدیک هم به نمایش می‌گذارد. ساختار نوسانی سیال اطراف آن‌ها کاملاً مشخص بوده و حرکت تیغه‌های پیزوالکتریک مخصوصاً تیغه پیزوالکتریک میانی، به دلیل افزایش عدد رینولدز نسبت به حالت‌های مطالعه شده پیشین در عدد رینولدز

آن به ترتیب بین ۰/۹- تا ۰/۷ میلی‌متر و ۱/۹- تا ۲/۱ ولت می‌باشد. مشابه حالت‌های گذشته فرکانس نوسانات تیغه بالا، دقیقاً مشابه فرکانس نوسانات تیغه پایین بوده و فرکانس غالب نیز همان عدد ۶ هرتز بدست آمده است. هرچند نوسانات فرکانس نوسانات دیگری نیز در نمودار طیف توان نوسانات تیغه‌ها مشخص است، اما فرکانس غالب آن‌ها عددی بسیار کمتر از فرکانس طبیعی بوده و به همین جهت نوسانات به عنوان فرکانس پایین در نظر گرفته می‌شوند. همچنین شکل ۲۳ خطوط همتراز شدت ورتیسیتی را نمایش می‌دهد. پس از جدایش جریان ناشی از حضور سیلندر، گردابه‌های ایجاد شده که عامل ایجاد اختلاف فشار هستند. با برخورد به سطح تیغه‌ها سبب تغییر فشار روی سطح آنها و ایجاد جابه‌جایی عرضی متناوب خواهد شد که این حرکت نوسانی در نمودارهای مربوطه نیز مشخص است.

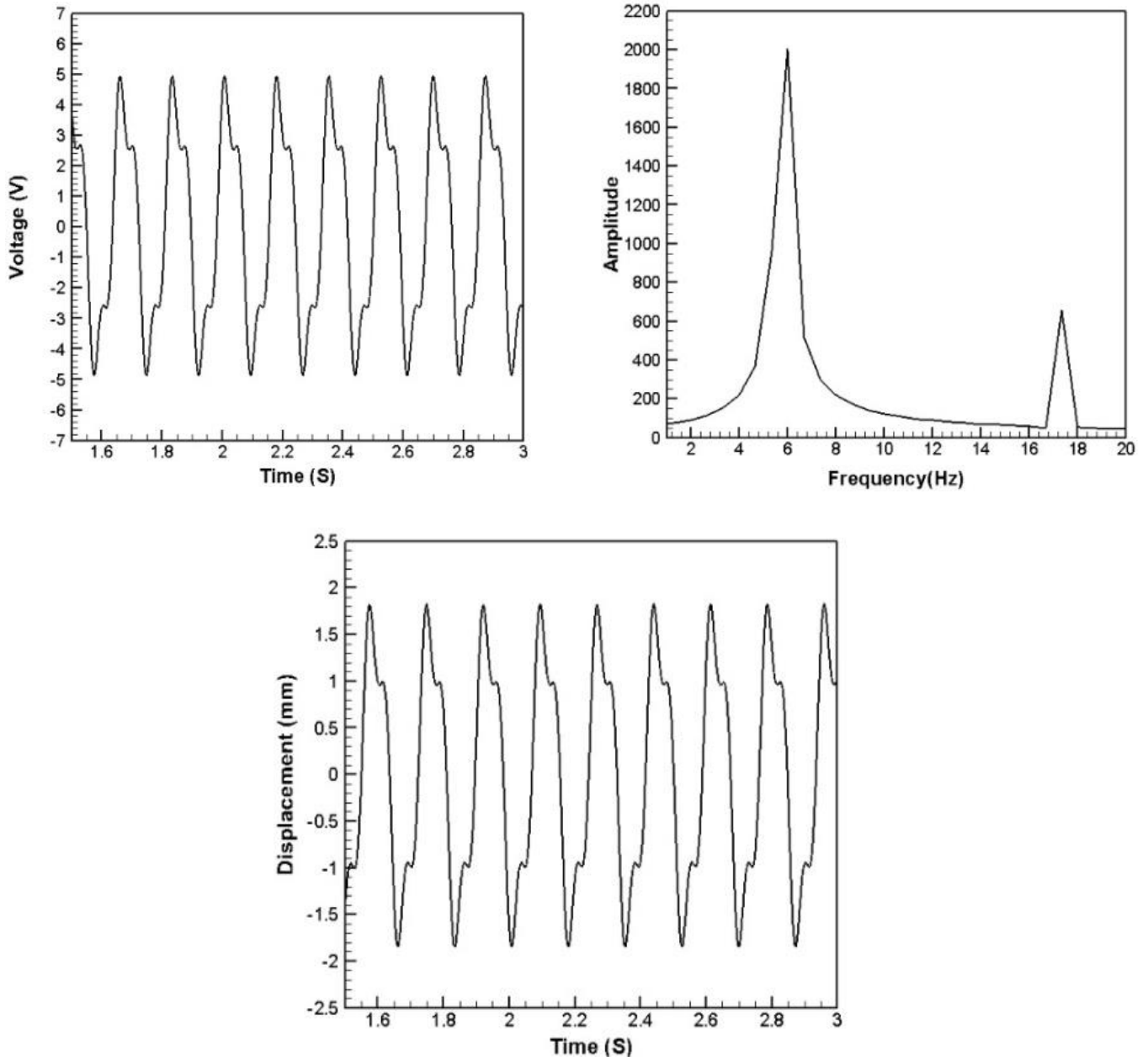
۸-۶ نتایج حالت B23

همانطور که از نتایج دو بخش پیشین (که مربوط به جهت گیره نگهدارنده تیغه وسط در مقایسه با تیغه‌های بالا و پایین می‌باشد) مشخص است، برای حالت اول (حالت B21)، نتایج بهتری از نظر میزان تولید ولتاژ نسبت به حالت دوم (حالت B22) بدست آمده است. به همین دلیل صرفاً نتایج این حالت برای عدد رینولدز بحرانی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در اینجا منظور از رینولدز بحرانی، بیشترین عدد رینولدزی است که در آن تیغه‌ها با یکدیگر برخورد ندارند و در عدد رینولدز بیشتر از آن عملاً واگرایی فیزیکی رخ



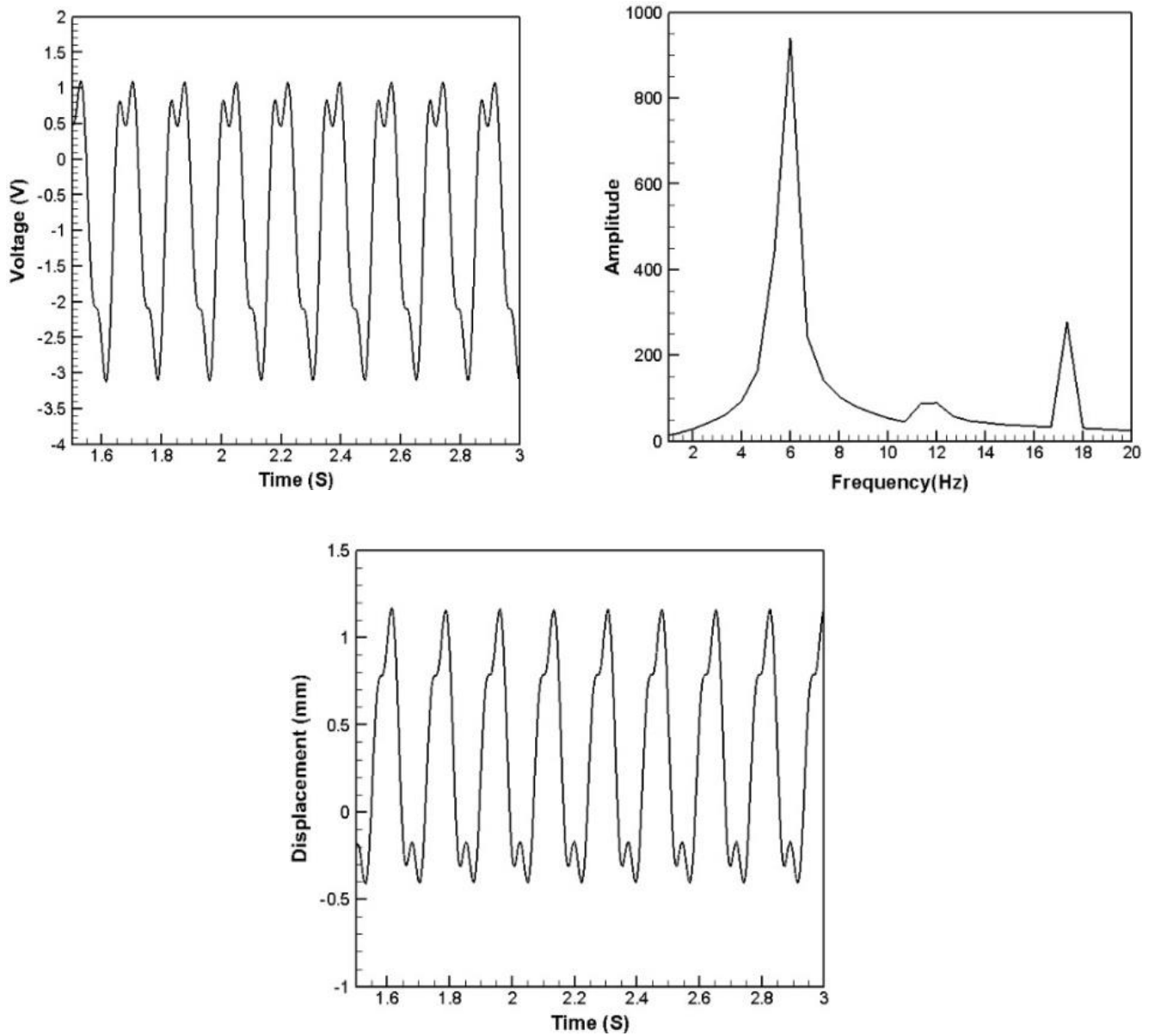
شکل ۲۴. نمودار جابه‌جایی، ولتاژ و طیف توان نوسانات تیغه پیزوالکتریک پایین برای حالت B۲۳

Fig. 24. Time history of displacement, voltage, and FFT of lower piezoelectric blade vibration for case B23.



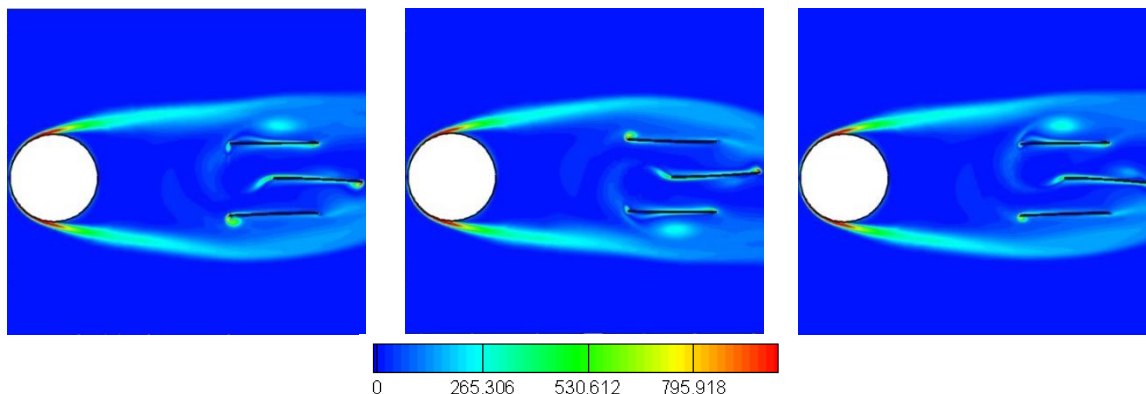
شکل ۲۵. نمودار جابه‌جایی، ولتاژ و طیف توان نوسانات تیغه پیزوالکتریک وسط برای حالت B23

Fig. 25. Time history of displacement, voltage, and FFT of middle piezoelectric blade vibration for case B23.



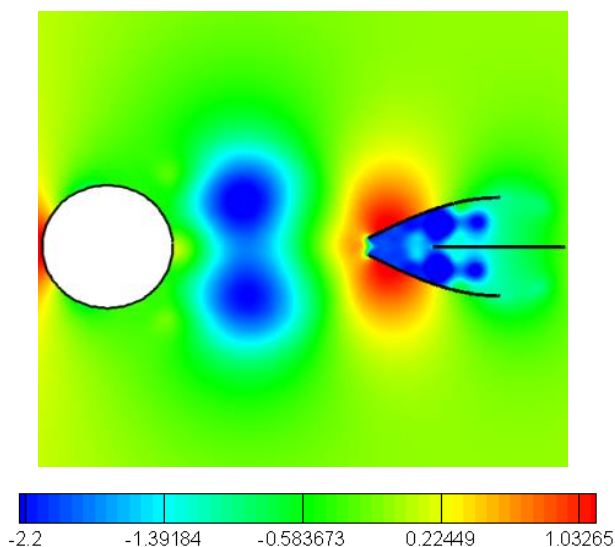
شکل ۲۶. نمودار جابه‌جایی، ولتاژ و طیف توان نوسانات تیغه پیزوالکتریک بالا برای حالت B23

Fig. 26. Time history of displacement, voltage, and FFT of upper piezoelectric blade vibration for case B23.



شکل ۲۷. خطوط همتراز شدت ورتیسیته در سه گام زمانی ۱/۶۸، ۱/۷۶ و ۱/۸۴ (از چپ به راست) برای حالت B۲۳

Fig. 27. Contour of vorticity at three time-steps of 1.68, 1.76, and 1.84 (from left to right) for case B23.



شکل ۲۸. خطوط همتراز فشار نسبی اطراف سیلندر و تیغه‌های پیزوالکتریک برای شرایط بحرانی در حالت B۲۳ در گام زمانی ۰/۱۴ ثانیه (لحظات ابتدایی حل جریان)

Fig. 28. Relative pressure contour around the cylinder and piezoelectric blades for critical conditions in the case B23 in a time step of 0.14 second (initial moments of flow solution).

تیغه‌های پیزوالکتریک در لحظات ابتدایی جریان سیال را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، در صورتی که تیغه وسط به سمت راست منتقل نشود، احتمال زیاد تیغه‌های بالا و پایین به تیغه میانی برخورد می‌کنند. همچنین نوسانات خلاف جهت تیغه وسط در مقایسه با تیغه‌های بالا و پایین (جهت متفاوت گیره نگهدارنده تیغه وسط در مقایسه با تیغه‌های بالا و پایین)، موجب محبوس نشدن تیغه وسط در بین تیغه‌های بالا و پایین شده و این تیغه به صورت آزاد در پشت تیغه‌های بالا و پایین نوسان داشته که همین

۲۳۵۰ کاملاً مشخص است. با افزایش عدد رینولدز، گردابه‌های جدا شده از پشت سیلندر نیز عامل ایجاد اختلاف فشار یا به بیان دیگر نیروی بیشتری بوده که این نیرو با برخورد با تیغه‌های پیزوالکتریک به آن‌ها منتقل می‌شود. همین موضوع موجب جابه‌جایی متناوب تیغه‌های پیزوالکتریک شده که با توجه به نیروی اعمال شده بیشتر (در مقایسه با حالت با عدد رینولدز کمتر)، مقدارش نیز بیشتر است.

شکل ۲۸ نشان‌دهنده خطوط همتراز فشار نسبی اطراف سیلندر و

جدول ۸. مقایسه ولتاژ تولیدی برای تمامی حالت‌های بررسی شده در عدد رینولدز ۲۳۵۰

Table 8. Comparison between the output voltage for all cases at Reynolds number of 2350.

حالت B۲۲	حالت B۲۱	حالت B۱۲	حالت B۱۱	
۲/۱ تا -۱/۹	۱/۱ تا -۲/۷۵	۳/۱ تا -۰/۵	۲ تا -۱/۵	ولتاژ تیغه بالا
۰±/۹	۳±/۲	۴±/۲	۲±	ولتاژ تیغه وسط
۱/۹ تا -۲/۱	۲/۷۵ تا -۱/۱	۰/۵ تا -۳/۱	۱/۵ تا -۲	ولتاژ تیغه پایین

درصد و برای تیغه‌های بالا و پایین هر کدام حدوداً ۱۴ درصد محاسبه شد. موضوع دیگری که در مقایسه تمامی حالات بدست آمد، فرکانس غالب نوسانات تیغه‌ها بود که مطابق آن هر تیغه ممکن است با فرکانس‌های متفاوتی نوسان کند اما فرکانس غالب نوسان تمام تیغه‌ها برای یک حالت خاص، مقدار یکسانی مشاهده شد. لازم به ذکر است که این مقدار غالب برای تمامی حالت‌ها از ۵ تا ۶ هرتز تغییر کرده که در مقایسه با فرکانس طبیعی هر تیغه (۲۵/۶۴ هرتز) فرکانس پایین تلقی می‌شود.

منابع

- [1] G.W. Taylor, J.R. Burns, S. Kammann, W.B. Powers, T.R. Welsh, The energy harvesting eel: a small subsurface ocean/river power generator, IEEE journal of oceanic engineering, 26(4) (2001) 539-547.
- [2] S. Pobering, N. Schwesinger, A novel hydropower harvesting device, in: 2004 International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems (ICMENS'04), IEEE, (2004), pp. 480-485.
- [3] W.P. Robbins, D. Morris, I. Marusic, T.O. Novak, Wind-generated electrical energy using flexible piezoelectric materials, in: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, (2006), pp. 581-590.
- [4] Q. Zheng, Y. Xu, Asymmetric air-spaced cantilevers for vibration energy harvesting, Smart materials and Structures, 17(5) (2008) 055009.
- [5] R. Guigon, J.-J. Chaillout, T. Jager, G. Despesse, Harvesting raindrop energy: experimental study, Smart

موضوع موجب جابه‌جایی بیشتر و تولید ولتاژ قابل توجهی می‌شود.

۸-۷- مقایسه ولتاژ تولیدی برای حالت‌های بررسی شده در عدد رینولدز ۲۳۵۰

مقایسه میزان ولتاژ تولیدی حالت‌های بررسی شده در عدد رینولدز ۲۳۵۰ مطابق جدول ۸ صورت گرفته است. براساس این جدول، میزان ولتاژ تولیدی در حالت B۱۲ برای تیغه میانی بیشترین مقدار و با فاصله نه چندان زیاد بعد از آن حالت B۲۱ می‌باشد. برای تیغه‌های بالا و پایین، با توجه به نوسان نامتقارن آن‌ها، بیشترین مقدار ولتاژ تولید شده صرفاً در یکی از حدهای بالا و یا پایین به ترتیب در حالت‌های B۱۲ و B۲۱ رخ می‌دهد.

۹- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، به بررسی برداشت انرژی از نوسانات سه تیغه پیزوالکتریک پشت سیلندر ساکن در ساختارهای گوناگون در عدد رینولدز ۲۳۵۰ پرداخته شد. همچنین در بررسی‌های اولیه یک محدودیت در افزایش عدد رینولدز (سرعت ورودی) به جهت ممانعت از برخورد تیغه‌های بالا و پایین با تیغه میانی مشاهده شد که موجب ارائه ساختار جدید برای بهبود این محدودیت گشت. با بررسی‌هایی که حول نتایج این پژوهش صورت گرفت به ترتیب دو حالت B۱۲ و B۲۱ دارای بهترین ساختاری جهت استحصال انرژی بودند. اما در حالت اول ذکر شده، محدودیت در افزایش عدد رینولدز به دلیل امکان برخورد تیغه‌های بالا و پایین با تیغه میانی تا حداکثر عدد رینولدز ۲۶۰۰ وجود داشت اما در حالت B۲۱، این محدودیت تا عدد رینولدز ۲۶۰۰ افزایش یافت (حالت B۲۳) که افزایش ۸ درصدی را نشان می‌داد. همچنین این مقدار افزایش برای محدوده نوسان ولتاژ تولیدی تیغه وسط حدود ۱۲

- on Vortex-induced Vibration, Engineering Research Express, 3(4) (2021) 045056.
- [11] N.G. Elvin, N. Lajnef, A.A. Elvin, Feasibility of structural monitoring with vibration powered sensors, Smart materials and structures, 15(4) (2006) 977.
- [12] 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, 125 (2018) 405-418.
- [13] 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, 29(5) (2008) 1309-1318.
- [14] 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 Reynolds number, Journal of Fluids and Structures, 48 (2014) 235-259.
- Materials and Structures, 17(1) (2008) 015039.
- [6] T. Wacharasindhu, J. Kwon, A micromachined energy harvester from a keyboard using combined electromagnetic and piezoelectric conversion, Journal of Micromechanics and Microengineering, 18(10) (2008) 104016.
- [7] C.D.M. Junior, A. Erturk, D.J. Inman, An electromechanical finite element model for piezoelectric energy harvester plates, Journal of Sound and Vibration, 327(1-2) (2009) 9-25.
- [8] H.D. Akaydin, N. Elvin, Y. Andreopoulos, Energy harvesting from highly unsteady fluid flows using piezoelectric materials, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 21(13) (2010) 1263-1278.
- [9] H. Mutsuda, Y. Tanaka, R. Patel, Y. Doi, Y. Moriyama, Y. Umino, A painting type of flexible piezoelectric device for ocean energy harvesting, Applied Ocean Research, 68 (2017) 182-193.
- [10] M. Liu, H. Xia, G. Liu, Experimental and numerical study of underwater piezoelectric generator based

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Heidari, 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 J. Mech Eng., 54(9) (2022) 2009-2040.

DOI: [10.22060/mej.2022.21049.7367](https://doi.org/10.22060/mej.2022.21049.7367)

