

## تأثیر سیم اغتشاش ساز بر تنش برشی رینولدز و سرعت‌های نوسانی در سیلندر دایروی

زهرا منصوری  
کارشناسی ارشد

میترا یادگاری  
دکتری

عبدالامیر بک  
خوشنویس\*

استاد، گروه مهندسی مکانیک،  
دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

مقاله علمی پژوهشی  
دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱  
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۷

**چکیده:** بررسی جریان حول سیلندر دایروی از مسائل کلاسیک مکانیک سیالات به شمار می‌رود. نیروهای ناپایدار تشکیل شده در پشت سیلندر، ناشی از گردابه‌های جدا شده از سطح آن است. کنترل شدت ریزش گردابه‌ها منجر به کنترل شدت نیروهای ناشی از گردابه‌ها می‌شود. یکی از نمونه‌های تجهیزاتی که در کاهش نوسانات ناشی از گردابه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، سیم اغتشاش ساز می‌باشد. لذا در پژوهش حاضر، سرعت‌های نوسانی، تنش برشی رینولدز و ضریب پسا حول سیلندر دایروی همراه با سیم اغتشاش ساز در اعداد رینولدز ۳۹۰۰ و ۱۳۶۹۲ و ۲۷۳۸۳ بررسی شد. بدین منظور قطر سیلندر مورد پژوهش ۲۰ میلی‌متر و قطر سیم‌های اغتشاش ساز نصب شده ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۵ میلی‌متر می‌باشد. سیم‌های اغتشاش ساز در موقعیت‌های  $\theta = \pm 40^\circ$  و  $\pm 140^\circ$  درجه نصب شده‌اند. نتایج حاصل نشان می‌دهند که استفاده از سیم اغتشاش ساز با قطر ۰/۲۵ میلی‌متر منجر به کاهش ۶۸٪، ۵۰٪ و ۵۵٪ سرعت‌های نوسانی  $u'$ ،  $v'$  و  $w'$  و کاهش ۸۵٪ تنش برشی رینولدز نسبت به سیلندر صاف می‌شود. همچنین وجود پیک در نمودارهای سرعت نوسانی بیانگر وجود گردابه‌های بزرگ در پشت سیلندر می‌باشد. تنش برشی رینولدز با قطر سیم اغتشاش ساز رابطه مستقیم دارد.

واژه‌های راهنما: سیلندر دایروی، سیم اغتشاش ساز، تنش برشی رینولدز، ضریب پسا، سرعت نوسانی

Zahra Mansouri  
M.Sc.

Mitra Yadegari  
PhD

Abdolamir Bak  
Khoshnevis\*  
Professor, Department  
of Mechanical  
Engineering Faculty of  
Engineering, Hakim  
Sabzevari University,  
Sabzevar

## Effect of trip wire on Reynolds shear stress and fluctuating velocities in circular cylinder

**Abstract:** Investigating the flow around a circular cylinder is one of the classical problems of fluid mechanics. Unsteady forces formed behind the cylinder are caused by vortices separated from its surface. Controlling the intensity of vortex shedding leads to controlling the intensity of forces caused by vortices. One of equipment that is used to reduce fluctuations caused by vortices is trip wires. Therefore, in the present study, the fluctuating velocities, Reynolds shear stress and drag coefficient around the circular cylinder with the trip wire have been investigated at different Reynolds numbers. For this purpose, the diameter of the circular cylinder is 20 mm and the diameter of the installed trip wires is 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5 mm. Trip wires are installed at  $\theta = \pm 40^\circ$  and  $\pm 140^\circ$  positions. The results show that the use of trip wires with a diameter of 0.25mm causes a decrease of 68%, 50% and 55% of fluctuating velocities ( $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$ ) and a decrease of 85% Reynolds shear stress compared to the smooth cylinder. Also, the presence of a peak in the fluctuating velocity indicates the presence of large vortices behind the cylinder. Reynolds shear stress has a direct relationship with the diameter of the trip wire.

**Keywords:** Circular Cylinder, Trip Wire, Reynolds Shear Stress, Drag Coefficient, Fluctuating Velocity

## ۱- مقدمه

روی سیم‌های اغتشاش ساز با قطرهای ۱/۵، ۱ و ۰/۵ میلی متر با موقعیت نصب  $\pm 140$  و  $\theta = \pm 40$  انجام شد. آن‌ها دریافتند که نصب سیم اغتشاش ساز با قطرهای ۱ و ۰/۵ میلی متر به صورت دو سیمه بر روی سیلندر صاف، منجر به کاهش قابل ملاحظه ضریب پسا می‌شود. در حالی که نصب سیم اغتشاش ساز با قطر ۱/۵ میلی متر باعث افزایش ضریب پسا سیلندر می‌گردد و سرعت نوسانی بی‌بعد روند افزایشی-کاهشی را دنبال می‌کند. در پژوهشی دیگر خوشنویس و همکاران [۱۲] به بررسی تجربی تأثیر سیم اغتشاش ساز با قطرهای مختلف بر پارامترهای جریانی دنباله یک ایرفویل اعم از سرعت متوسط و سرعت نوسانی بی‌بعد در عدد رینولدز ۳۷۸۰ پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد که ضریب پسا، عرض دنباله و کمینه سرعت نقصانی با افزایش قطر سیم اغتشاش ساز، افزایش می‌یابند. آلام و همکاران [۱۳] تأثیر سیم اغتشاش ساز را بر مشخصات جریان اطراف دو سیلندر دایروی پشت سر هم در عدد رینولدز ۵۵۰۰۰ به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. بر روی هر سیلندر، دو سیم اغتشاش ساز به قطر  $D/10$  در زاویه متقارن ۳۰ درجه نصب شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که نصب سیم اغتشاش ساز منجر به سرکوب ریزش گردابه‌ها در سیلندر دایروی می‌شود. همچنین ضرایب پسا و لیفت کاهش می‌یابند. یادگاری و همکاران [۱۶-۱۴] به بررسی تجربی و عددی تأثیر سیم اغتشاش ساز بر رفتار و مشخصات گردابه تشکیل شده در پشت سیلندر بیضوی در اعداد رینولدز ۳۸۵۵۰ و ۶۴۲۵۰ پرداختند. این بررسی بر روی سیلندر با قطر ۴۲/۴ میلی متر و سیم‌های اغتشاش ساز با قطر ۵ میلی متر انجام شد. آن‌ها دریافتند که سیم‌های اغتشاش ساز، تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های جریان و کاهش ضریب پسا دارند. خوشنویس و همکاران [۱۷] اثرات آشفتگی جریان ورودی را بر ضریب پسا در سیلندره‌های پشت سر هم با قطرهای مختلف ۱۵/۵ و ۲۱/۳ میلی متر در اعداد رینولدز ۱۰۱۰۰، ۱۶۰۰۰، ۲۲۰۰۰ و ۲۷۳۰۰ و ۳۰۶۵۰ به صورت تجربی بررسی کردند. نتایج نشان داد در زوایای کمتر از ۶۷/۵ درجه با افزایش عدد رینولدز، مقدار ضریب پسا به دلیل حضور سیلندر بالادست کاهش می‌یابد. حاتمی و همکاران [۲۰-۱۸] به بررسی تجربی تغییرات ضریب پسا در سه سیلندر A, B, C با قطرهای ۱۵/۵ و ۲۱/۳ و ۳۱ میلی متر در زوایای ۰°، ۵°، ۱۰°، ۲۲/۵°، ۴۵°، ۶۷/۵° و ۹۰° در دو نسبت فاصله ۴۰۲ برابر قطر سیلندر اصلی در اعداد رینولدز مختلف (۴۸۰۰۰ < Re < ۱۴۷۰۰) پرداختند. مشاهده شد با افزایش قطر سیلندر پایین دست از شدت تأثیر عدد رینولدز بر تغییرات افزایشی ضریب پسا کاسته می‌شود. حقیقت جو و همکاران [۲۳-۲۱] به بررسی تجربی تأثیر صفحات پیچان بر دنباله سیلندر

بررسی جریان حول سیلندر دایروی یکی از مسائل مهم در علم مهندسی به شمار می‌رود. از جمله کاربردهای جریان حول سیلندر دایروی می‌توان به دودکش‌ها، دکل‌های مخابراتی، ساختمان‌ها و ... اشاره کرد. دنباله جریان پشت سیلندر منجر به ایجاد نیروهای ناپایدار می‌گردد. این نیروها باعث تخریب تمام ساختارهای بدنه‌ای می‌شود. دلیل مطالعه این گونه پیکربندی، علاقه به فهم بارهای روی ساختارها با توجه به حرکت سیال و کنترل بیشتر جریان سیال برای کاهش اثرات مخرب نیروهای سیالی است [۳-۱]. بررسی جریان حول سیلندر دایروی از سال‌ها قبل مورد مطالعه قرار گرفته است. فیچ و وارسپ [۴] اولین پژوهشگرانی بودند که به بررسی تجربی اثرات سیم اغتشاش ساز بر ضریب پسا در بازه انتقال رینولدز پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از سیم اغتشاش ساز باعث کاهش ضریب پسا می‌شود. هوور و همکاران [۵] به بررسی تجربی تأثیر سیم اغتشاش ساز در سیلندر دایروی صاف بر مشخصات دنباله و ریزش گردابه‌ها در عدد رینولدز ۴۶۰۰۰ در جریان پایا پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در سیلندر ثابت، سیم اغتشاش ساز منجر به کاهش چشمگیر ضریب پسا و لیفت می‌گردد. نیشی [۶] به بررسی تجربی تأثیر زاویه نصب سیم‌های اغتشاش ساز در دو بازه ۲۰ تا ۶۰ درجه و ۹۷/۵ تا ۱۶۵ درجه بر نیروهای هیدرودینامیکی پرداخت. نتایج نشان داد که در این دو بازه، نیروهای هیدرودینامیکی کاهش می‌یابند. آلام و همکاران [۷] به بررسی تجربی تأثیر نصب سیم اغتشاش ساز در زوایای ۱۰ تا ۷۰ درجه نسبت به محل سکون جلویی سیلندر بر پارامترهای جریان پرداختند. آن‌ها در این پژوهش با تغییر موقعیت زاویه‌ای سیم اغتشاش ساز، پنج رژیم جریان عبوری از روی سیلندر را مشاهده کردند، به طوری که هر یک از پارامترهای جریان، تغییرات خاص خود را داشتند. همچنین با تغییر عدد رینولدز جریان گذرنده از روی سیلندر، مکان بهینه نصب سیم اغتشاش ساز به منظور کاهش ضریب پسا نیز تغییر می‌کرد. جیم و همکاران و همچنین ایگاشی [۹-۸] به بررسی تجربی تأثیر قطر و موقعیت‌های مختلف سیم اغتشاش ساز بر جریان عبوری از روی سیلندر در بازه اعداد رینولدز بین ۱۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد که استفاده از سیم اغتشاش ساز با قطر نسبی بزرگ‌تر، منجر به گذار در اعداد رینولدز کمتر می‌شود. خوشنویس و همکاران [۱۱، ۱۰] به بررسی تجربی تأثیر سیم اغتشاش ساز با قطرهای مختلف بر سرعت متوسط، سرعت نوسانی، عدد استروهمال و ضریب پسا پرداختند. این پژوهش بر

پرداختند. آن‌ها دریافتند که با افزایش سرعت دورانی، ضریب پسا کاهش و سرعت نوسانی بی‌بعد افزایش می‌یابد. ایزدی و بک خوشنویس [۳۴-۳۶] به بررسی تجربی مشخصات جریان حول سیلندر بیضوی در اعداد رینولدز مختلف پرداختند. آن‌ها دریافتند که با افزایش فاصله از سیلندر، ضریب پسا کاهش می‌یابد.

همان‌طور که در پژوهش‌های بالا اشاره شد، بیشتر مطالعات به بررسی رفتار و مشخصات ویک (سرعت نقصانی، پهنای دنباله)، ضریب پسا، سرعت متوسط و شدت توربولانس اطراف سیلندر دایروی و بیضوی پرداختند. در حالی که در این پژوهش برای اولین بار به بررسی تاثیر چهار سیم اغتشاش ساز متقارن با قطرهای مختلف بر سه مولفه سرعت نوسانی ( $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$ ) و تنش برشی رینولدز ( $u'v'$ ) اطراف سیلندر دایروی در ایستگاه‌ها و اعداد رینولدز مختلف پرداخته شده است که این پژوهش را نسبت به پژوهش‌های پیشین متمایز می‌کند.

نتایج حاصل از این پژوهش به دلیل جامع بودن می‌تواند توسط طراحان صنعتی و سازه‌ای به عنوان ابزاری مناسب برای بهینه‌سازی، طراحی و بهبود دقت مدل‌های مهندسی استفاده شود.

## ۲- بیان مسأله

تاثیر سیم اغتشاش ساز نصب شده بر روی سیلندر دایروی بر ضریب پسا، سرعت‌های نوسانی و تنش برشی رینولدز در سه ایستگاه در پشت استوانه (۵ و ۲/۰۲ و ۱/۰۶  $X/D$ ) در اعداد رینولدز مختلف ۳۹۰۰، ۱۳۶۹۲ و ۲۷۳۸۳ مورد بررسی قرار گرفته است. از آن جایی که منحنی ضریب پسا در گستره اعداد رینولدز بین ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰۰ نسبتاً مسطح است و تغییرات ضریب پسا در آن بازه کم می‌باشد، لذا پژوهش حاضر در اعداد رینولدز ذکر شده انجام شده است. قطر سیلندر دایروی ۲۰ میلی‌متر و قطر سیم‌های اغتشاش ساز نصب شده بر سیلندر دایروی ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. سیم‌های اغتشاش ساز در زوایای  $\pm ۱۴۰^\circ$  و  $\pm ۴۰^\circ$  نصب شده‌اند. معیار انتخاب موقعیت نصب سیم‌های اغتشاش ساز براساس زوایای جدایش در لایه مرزی آرام و متلاطم می‌باشد. بدین صورت که زاویه نصب دو سیم اغتشاش ساز قبل از زاویه جدایش جریان آرام و زاویه نصب دو سیم اغتشاش ساز بعد از زاویه جدایش جریان توربولانس در نظر گرفته شده است.

شکل (۱) شماتیک سیلندر دایروی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که بین سیلندر دایروی و سیم‌های اغتشاش ساز، فاصله‌ای وجود ندارد و سیم‌های اغتشاش ساز بر سطح سیلندر نصب شده‌اند.

دایروی در عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ پرداختند. قطر سیلندر دایروی مورد بررسی ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. نتایج بدست آمده نشان داد که استفاده از صفحات پیچان منجر به کاهش سرعت نوسانی در دنباله سیلندر می‌شود. منصوری و همکاران [۲۴، ۲۵] به بررسی عددی تاثیر سیم اغتشاش ساز بر مشخصات دنباله سیلندر دایروی در اعداد رینولدز ۳۹۰۰ و ۱۳۶۹۲ و ۲۷۳۸۳ پرداختند. نتایج بیانگر آن است که با کاهش قطر سیم اغتشاش ساز، طول لایه برشی کاهش می‌یابد. ایزدی و همکاران [۲۶] به بررسی تجربی و عددی دنباله جریان سیلندر دایروی چرخان در اعداد رینولدز ۵۹۰۰ و ۱۱۸۰۰ پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که سرعت نوسانی بی‌بعد و ضریب پسا در این حالت، نسبت به حالت بدون چرخش، کاهش می‌یابند. مارتینوزی و همکاران [۲۷] به بررسی تجربی تاثیر سیم اغتشاش ساز بر سرعت نوسانی و مشخصات ریزش گردابه‌های عمودی روی سطح یک سیلندر دایروی در عدد رینولدز ۵۰۰۰۰ پرداختند. در این پژوهش، قطر سیلندر دایروی ۴۰ میلی‌متر و قطر سیم‌های اغتشاش ساز ۰/۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. سیم‌های اغتشاش ساز در زوایای ۸۰، ۴۵، ۶۰، ۲۵ درجه نصب شدند. نتایج این بررسی نشان داد که نصب سیم‌های اغتشاش ساز، سبب بهبود مشخصات جریان می‌شود و ویژگی‌های گردابه را تقویت می‌کند. همچنین باعث کاهش سرعت‌های نوسانی می‌شود. ژو و همکاران [۲۸] به منظور کنترل ارتعاشات پشت سیلندر دایروی در اعداد رینولدز ۳۹۰۰ و ۵۰۰ از روش طیفی استفاده کردند. در این پژوهش از میله‌های چرخان به منظور بررسی سرعت‌های نوسانی، ضریب پسا و مشخصات جریان استفاده شد. نتایج نشان داد که ضریب پسا در این حالت در مقایسه با سیلندر بدون چرخش ۱/۲۵٪ کاهش می‌یابد و افزایش زاویه چرخش سبب کاهش سرعت‌های نوسانی می‌شود. لوی و همکاران [۲۹] به بررسی عددی مشخصات جریان حول سیلندر دایروی در اعداد رینولدز ۳۹۰۰ و ۱۴۰۰۰۰ پرداختند. نتایج نشان داد که سرعت نوسانی در کار عددی نسبت به کار تجربی روند افزایشی دارد. لیو و همکاران [۳۰] به بررسی تجربی و عددی سرعت‌های نوسانی و مشخصات جریان حول سیلندر دایروی در اعداد رینولدز ۳۹۰۰ و ۱۴۰۰۰۰ با استفاده از مدل توربولانس کی امگا پرداختند. نتایج بدست آمده نشان داد که مطابقت خوبی بین کار تجربی و عددی وجود دارد. فوکودوم و همکاران [۳۱] تاثیر سیم اغتشاش ساز را بر ضرایب پسا و برا در ایرفویل مربوط به پره توربین بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که سیم اغتشاش ساز منجر به تاخیر در جدایش، افزایش نیروی برا و کاهش ضریب پسا می‌شود. ایزدی و بک خوشنویس [۳۳]، [۳۲] به بررسی تجربی مشخصات دنباله سیلندر دایروی چرخان

$$D_{T,ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \rho \overline{u_i u_j u_k} + \right. \quad (5)$$

$$\left. \rho (\delta_{kj} u_i + \delta_{ik} u_j) \right] \quad (6)$$

$$D_{L,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u_i u_j}) \right] \quad (7)$$

$$P_{ij} = -\rho \left( \overline{u_i u_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (8)$$

$$G_{ij} = -\rho \beta (g_i \overline{u_j \theta} + g_j \overline{u_i \theta}) \quad (9)$$

$$\varphi_{ij} = \rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

$$\varepsilon_{ij} = 2\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \quad (11)$$

$$F_{ij} = -2\rho \Omega_k (\overline{u_j k_m} \varepsilon_{ikm} + \overline{u_i k_m} \varepsilon_{jkm}) \quad (12)$$

$$G_{ij} = -\frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \left( g_i \frac{\partial \rho}{\partial x_j} + g_j \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right) \quad (13)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} \left( \rho \varepsilon + 2\rho \varepsilon \frac{k}{a^2} \right) \quad (14)$$

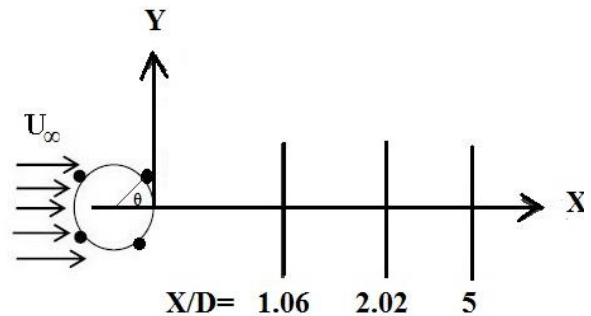
#### ۴- روش عددی

به منظور گسسته سازی معادلات حاکم از روش حجم محدود استفاده شده است. همچنین الگوریتم سیمپل<sup>۴</sup> برای کوپل معادلات سرعت و فشار در نظر گرفته شده است. معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی جنبشی آشفته  $10^{-6}$  لحاظ شده است. برای گسسته سازی فشار از روش استاندارد و برای گسسته سازی مومنوم از روش مرتبه دوم بالادست<sup>۵</sup> استفاده شده است.

#### ۵- نتایج

##### ۵-۱- استقلال از شبکه

تأثیر تعداد نقاط شبکه بر پروفیل سرعت متوسط بی‌بعد برای سیلندر با سیم اغتشاش‌ساز به قطر  $0.25$  میلی‌متر در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود از تعداد



شکل ۱ شماتیک سیلندر دایروی

#### ۳- معادلات حاکم و شرایط مرزی

جریان، دو بعدی، ویسکوز، تراکم‌ناپذیر و آشفته در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی ورودی و خروجی به ترتیب سرعت ورودی<sup>۱</sup> و فشار خروجی<sup>۲</sup> در نظر گرفته شده است. در سیلندر دایروی، سیم‌های اغتشاش‌ساز و سایر مرزها از شرط مرزی دیواره با شرط عدم لغزش استفاده می‌شود. به منظور بررسی دنباله جریان حول سیلندر دایروی با سیم اغتشاش‌ساز از مدل توربولانسی رینولدز استرس<sup>۳</sup> استفاده شده است. معادلات پیوستگی، ممنتوم و مدل توربولانسی در زیر بیان شده است [۳۷، ۳۹]:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\left(\frac{1}{\rho}\right) \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j}\right) - \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \bar{u}_i \bar{u}_j$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u'_i u'_j}) + C_{ij} = D_{T,ij} + D_{L,ij} + P_{ij} + \quad (3)$$

$$G_{ij} - \varphi_{ij} - \varepsilon_{ij} + F_{ij} + S_{user}$$

که در آن  $P_{ij}$  ترم تولید،  $\varepsilon_{ij}$  ترم اضمحلال،  $\varphi_{ij}$  ترم فشار-کرنش و  $D_{ij}$  ترم نفوذ تنش‌های رینولدز است. نفوذ تنش‌های رینولدز شامل دو بخش نفوذ آشفته  $D_{T,ij}$  و نفوذ مولکولی  $D_{L,ij}$  است.

ترم‌های اساسی معادلات انتقالی تنش‌های رینولدز به صورت

زیر بیان می‌شود:

$$C_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) \quad (4)$$

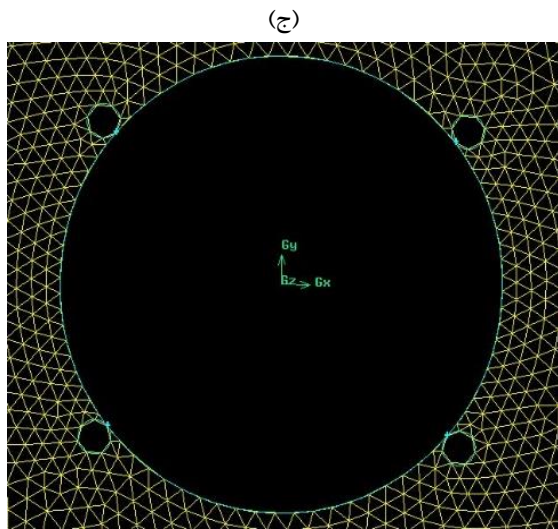
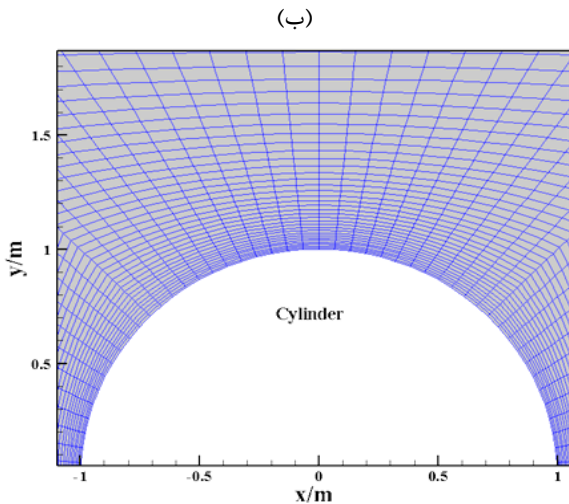
<sup>4</sup> SIMPLE

<sup>5</sup> Second order upwind

<sup>1</sup> Velocity inlet

<sup>2</sup> Pressure outlet

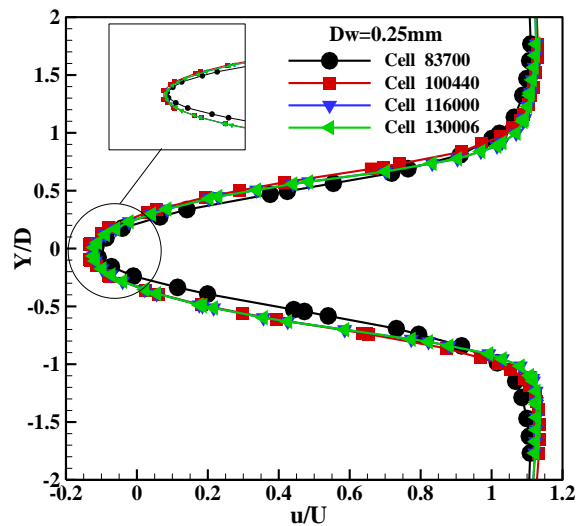
<sup>3</sup> RSM



شکل ۳ الف) ابعاد دامنه محاسباتی و جزئیات شبکه (ب) شبکه لایه مرزی کنار دیواره (ج) شبکه نزدیک به سیلندر به همراه سیم‌های اغتشاش ساز

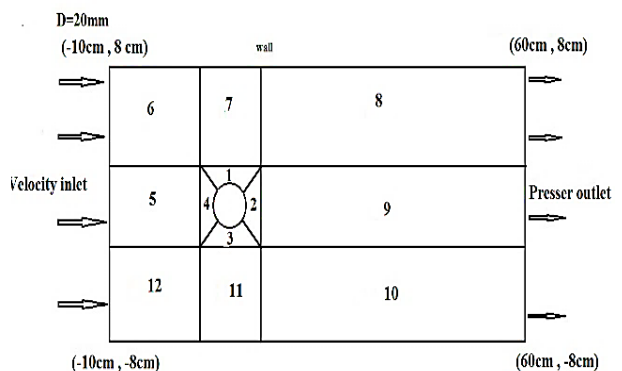
سلول ۱۱۶۰۰۰ به بعد، نتایج مستقل از شبکه هستند. لازم به ذکر است که نتایج شکل (۲) در عدد رینولدز ۳۹۰۰ و سطح مقطع  $0.00314$  متر مربع به دست آمده‌اند. جزئیات شبکه در فرآیند شبیه سازی در شکل (۳) نشان داده شده است. همان طور که در شکل (الف-۳) مشاهده می‌شود ناحیه محاسباتی به ۱۲ بخش تقسیم شده است. در نواحی ۱ تا ۴ در مجاورت سیلندر از شبکه‌های ظریف استفاده شده (شکل (ب-۳)) و برای افزایش دقت شبیه سازی از شبکه‌های ریزتر در لایه مرزی مجاور دیوارها استفاده شده است. برای بخش‌های باقی‌مانده، طول شبکه‌ها در جهت شعاعی افزایش یافته و از بخش‌های ۱ تا ۴ بزرگ‌تر در نظر گرفته شده است.

استفاده از شبکه درشت‌تر در مناطق دور افتاده و شبکه‌های ریزتر در نزدیکی دیواره منجر به کاهش هزینه محاسباتی و افزایش دقت شبیه سازی می‌شود. در (شکل (ج-۳)) نیز شبکه نزدیک به سیلندر به همراه سیم‌های اغتشاش ساز نشان داده شده است.



شکل ۲ استقلال از شبکه پروفیل سرعت متوسط بی‌بعد در سیلندر دایروی با سیم اغتشاش ساز به قطر  $0.25$  میلی‌متر

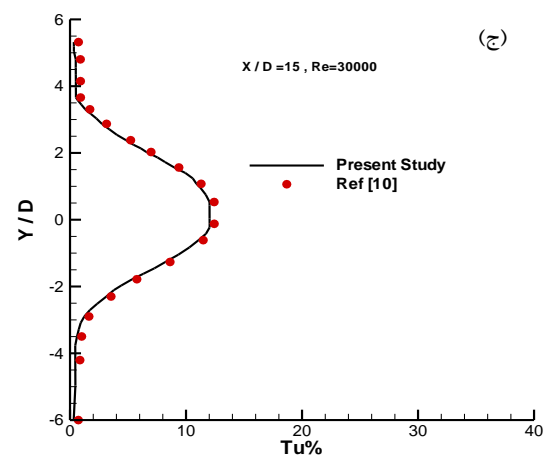
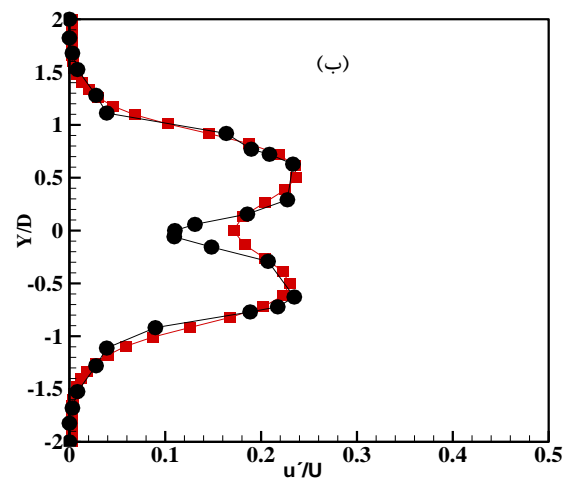
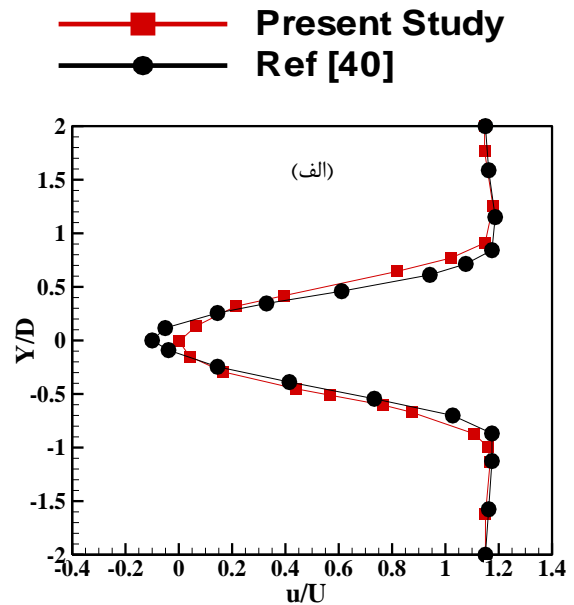
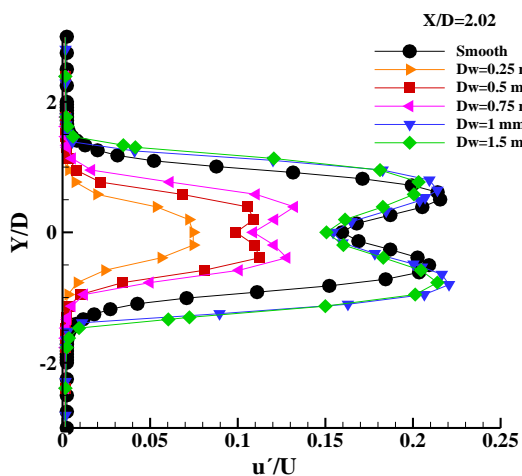
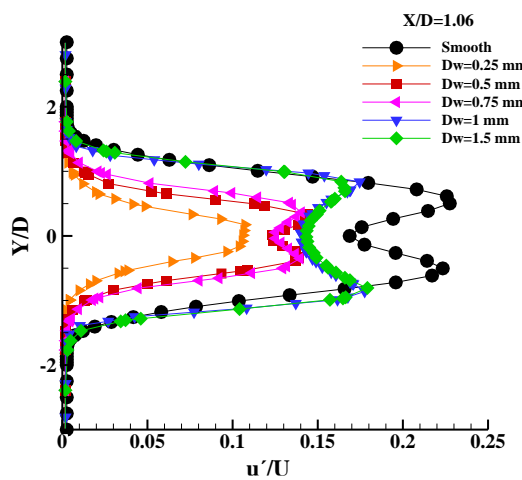
(الف)



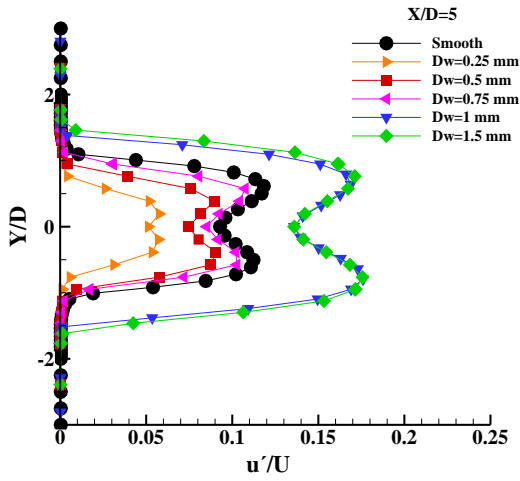
به منظور بررسی دقت شبیه سازی، پروفیل سرعت متوسط بی‌بعد و شدت توربولانس در پژوهش حاضر برای سیلندر صاف در عدد رینولدز ۳۹۰۰ با کارهای تجربی [۴۰ و ۱۰] مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین کار حاضر و مراجع [۴۰ و ۱۰] وجود دارد. درصد خطای سرعت‌های متوسط و نوسانی کار حاضر در مقایسه با مرجع [۴۰] به ترتیب ۱۴٪ و ۲۳٪ می‌باشد. علت درصد خطای بیشتر برای سرعت نوسانی، حساس‌تر بودن آن است. همچنین درصد خطای شدت توربولانس کار حاضر با مرجع [۱۰] حدود ۵٪ می‌باشد.

### ۵-۳- سرعت‌های نوسانی

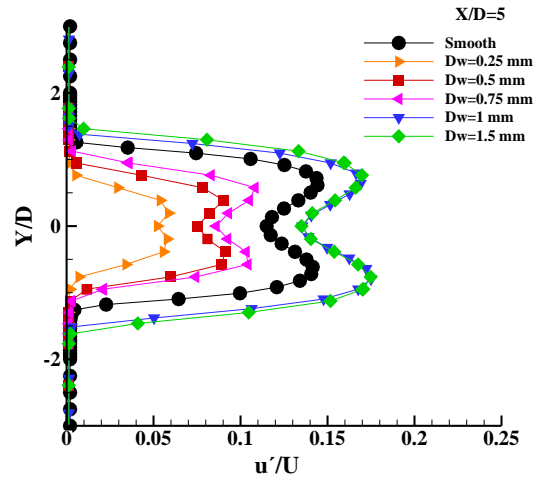
همان طور که در اشکال (۵-۷) مشاهده می‌شود در نزدیک مدل، سرعت نوسانی با افزایش قطر رابطه مستقیم دارد. با افزایش فاصله از مدل، عرض دهانه نمودار افزایش می‌یابد که نشان دهنده کاهش گردابه‌ها در بالا و پایین سیلندر می‌باشد. به عبارت دیگر هر دو پیک از خط مرکزی دنباله دورتر شده و پروفیل سرعت متوسط، مسطح‌تر می‌شود که به علت تاثیر انحنا در افزایش شدت خط جریان روی لبه‌های مرز داخلی دنباله و نیز بزرگ بودن گردابه‌ها در این نقاط می‌باشد. همچنین با افزایش فاصله از مدل، تاثیر قطرهای بزرگ‌تر کاهش می‌یابد. استفاده از سیم‌های اغتشاش ساز با قطر بزرگ‌تر بر سرعت نوسانی از ایستگاه دوم به بعد رفته رفته کاهش می‌یابد. وجود نقاط اکسترمم، نشان دهنده گردابه‌های تشکیل شده در پشت مدل می‌باشد که با افزایش فاصله از نقاط اکسترمم، عرض دهانه نمودار افزایش می‌یابد. بهترین حالت برای کاهش سرعت نوسانی، کوچک‌ترین قطر می‌باشد.



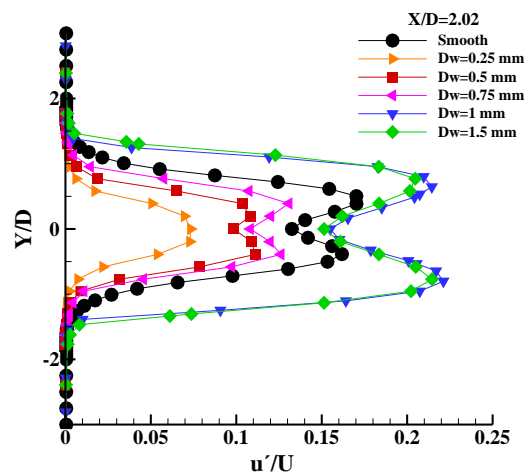
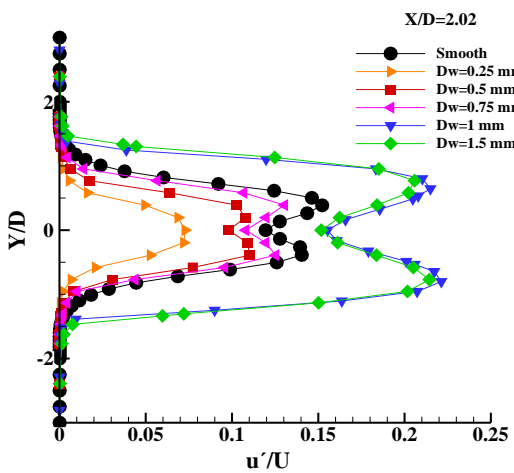
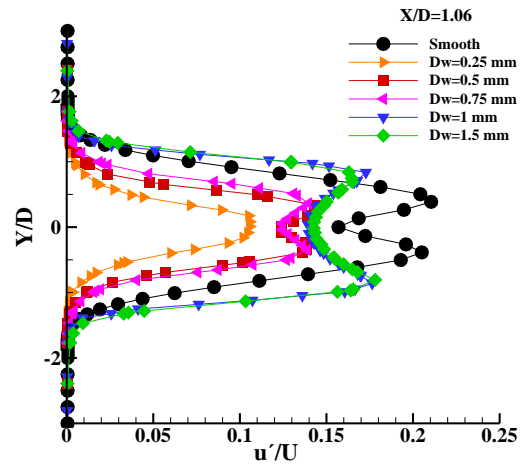
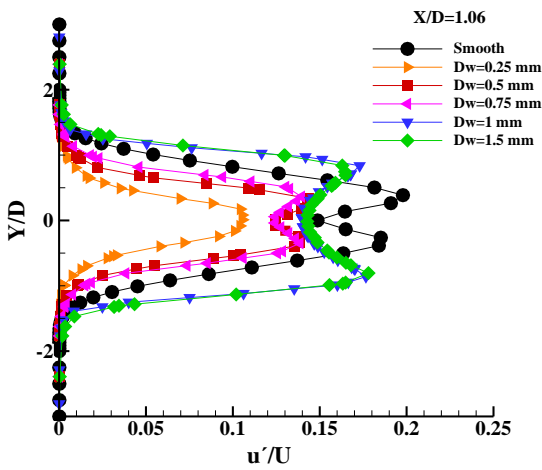
شکل ۴ مقایسه پروفیل (الف) سرعت متوسط بی‌بعد (ب) شدت توربولانس در پژوهش حاضر با مرجع [۴۰] (ج) شدت توربولانس در پژوهش حاضر با مرجع [۱۰]

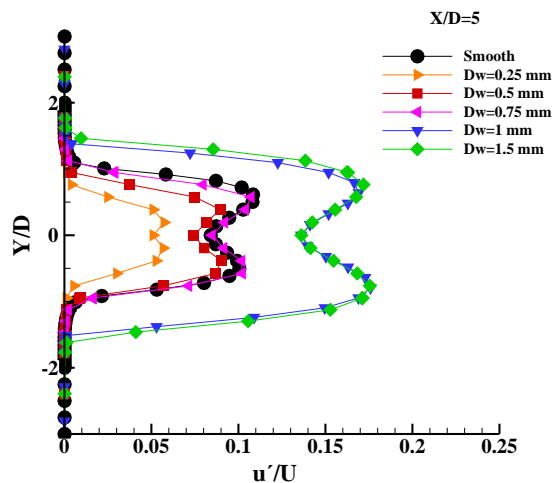
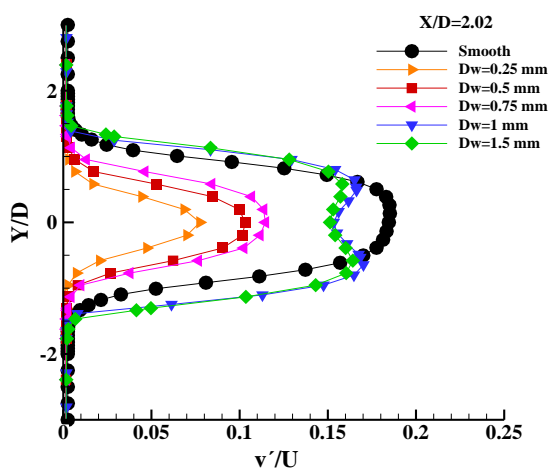


شکل ۶ پروفیل سرعت نوسانی  $u'$  بی بعد در سه ایستگاه در عدد رینولدز ۱۳۶۹۲ و قطرهای مختلف

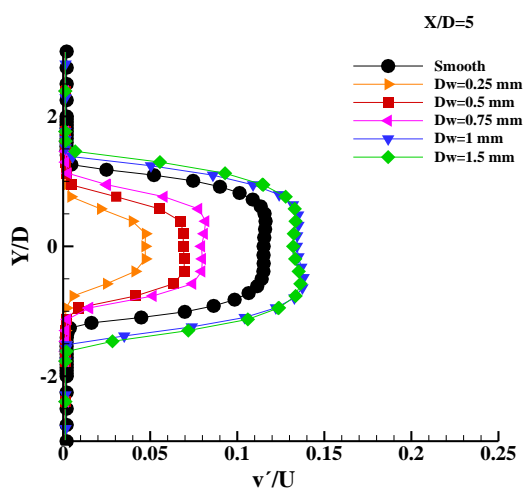


شکل ۵ پروفیل سرعت نوسانی  $u'$  بی بعد در سه ایستگاه در عدد رینولدز ۳۹۰۰ و قطرهای مختلف



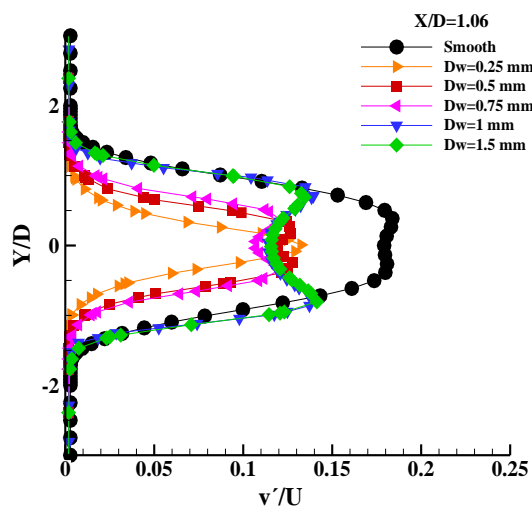
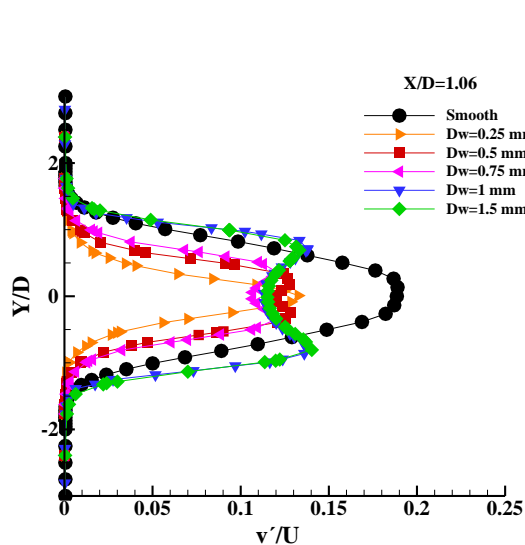


شکل ۷ پروفیل سرعت نوسانی  $u'$  بی بعد در سه ایستگاه در عدد رینولدز ۲۷۳۸۳ و قطرهای مختلف

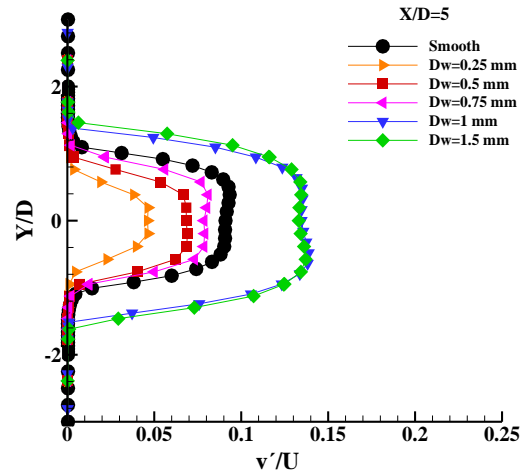
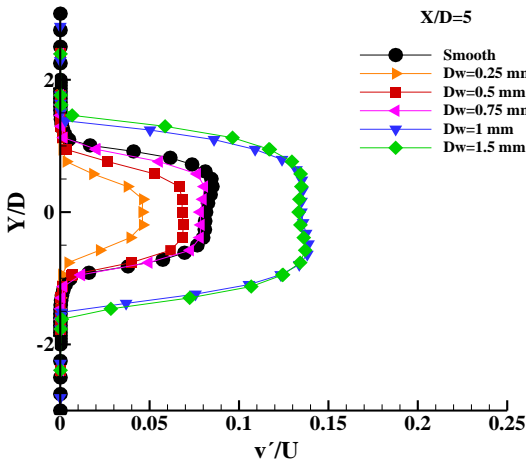
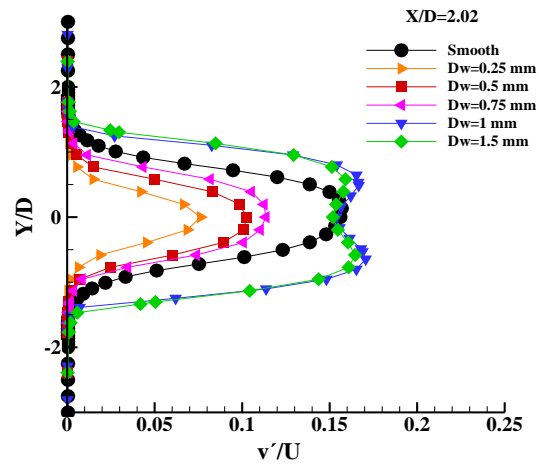
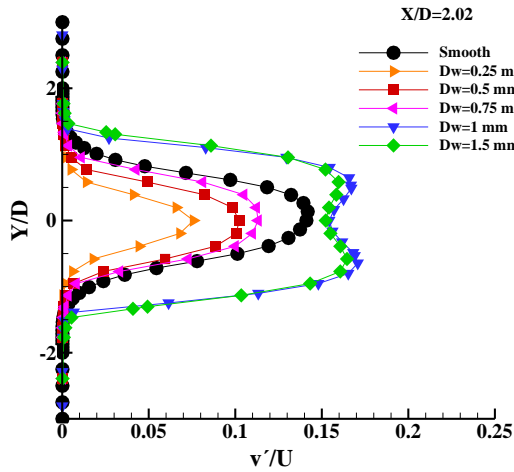


شکل ۸ پروفیل سرعت نوسانی  $v'$  بی بعد در سه ایستگاه در عدد رینولدز ۳۹۰۰ و قطرهای مختلف

با بررسی نمودارهای  $v'$  در اشکال (۸-۱۰) مشاهده می شود که در نواحی نزدیک به مدل، دو پیک وجود دارد که بیانگر وجود گردابه های بزرگ در پشت سیلندر می باشد. در نواحی دور از مدل با افزایش فاصله، اندازه گردابه ها کوچک تر می شود به گونه ای که تقریباً قله ها از بین می روند و انرژی آنها کاهش می یابد. همچنین در ایستگاه های آخر، عرض پیک ها افزایش می یابد. با افزایش عدد رینولدز در نواحی نزدیک مدل، پیک ها حذف می شوند. استفاده از سیم اغتشاش ساز با قطر بزرگ تر در اعداد رینولدز بالاتر، تاثیر کمتری دارد.



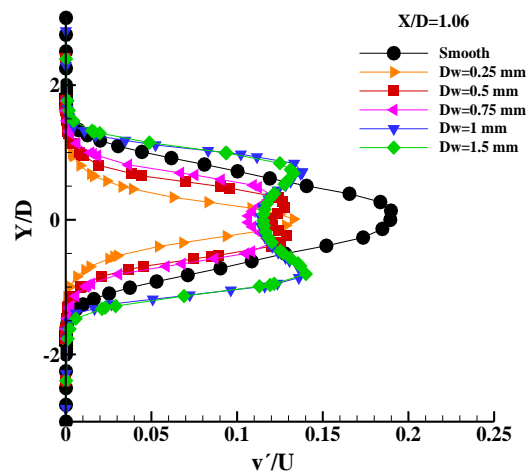




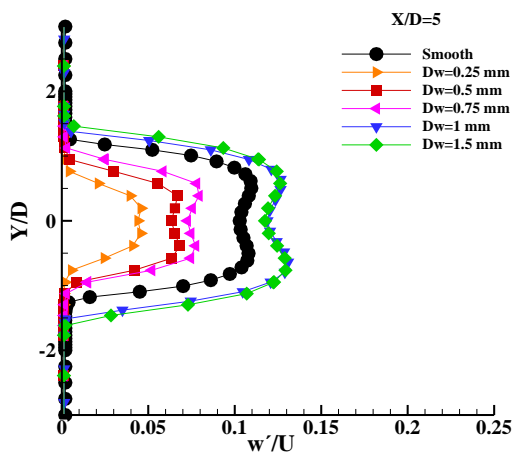
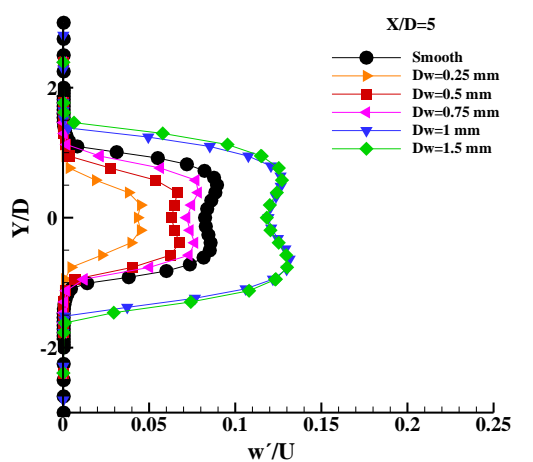
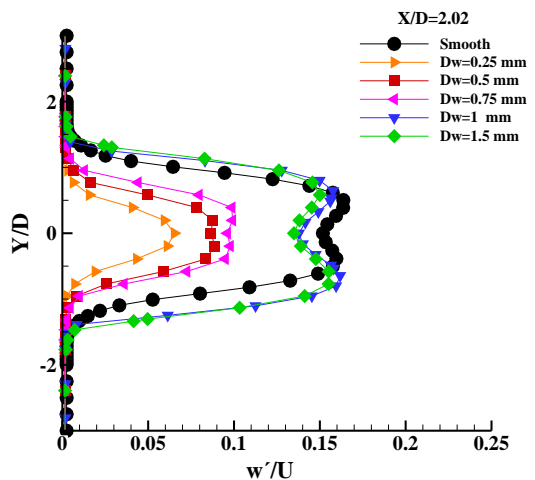
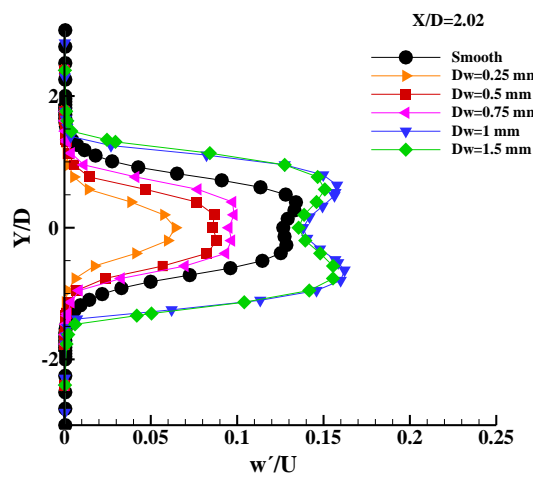
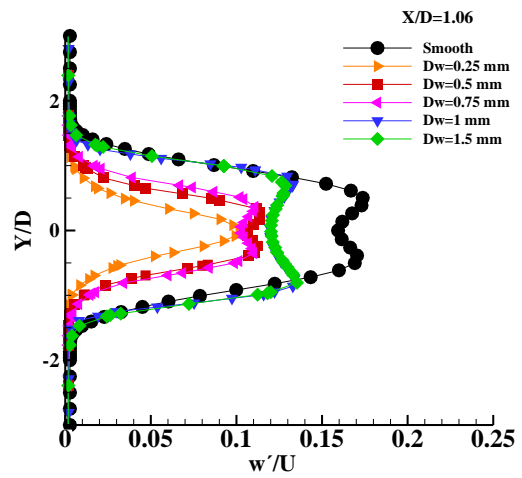
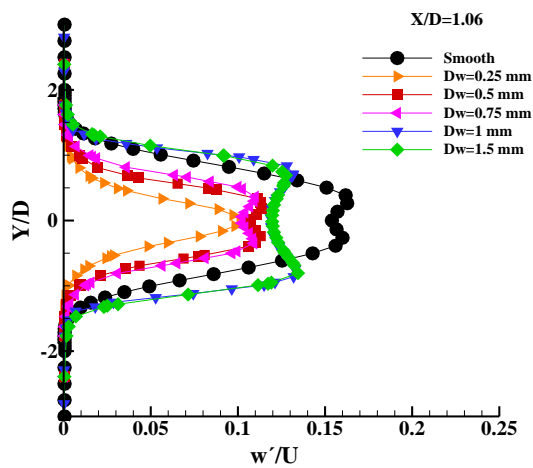
شکل ۱۰ پروفیل سرعت نوسانی  $v'$  بی بعد در سه ایستگاه در عدد رینولدز ۲۷۳۸۳ و قطرهای مختلف

شکل ۹ پروفیل سرعت نوسانی  $v'$  بی بعد در سه ایستگاه در عدد رینولدز ۱۳۶۹۲ قطرهای مختلف

با بررسی نمودارهای  $W$  در اشکال (۱۱-۱۳) مشاهده می‌شود که در نواحی نزدیک مدل ( $X/D=1/0.6$  و  $2/0.2$ ) نمودار دو پیک دارد که نشان دهنده وجود گردابه‌های بزرگ در پشت سیلندر می‌باشد. در نواحی دورتر از مدل ( $X/D=5$ ) با افزایش فاصله، اندازه گردابه‌ها کوچک‌تر می‌شود و انرژی آن‌ها کاهش می‌یابد به طوری که تقریباً این قله‌ها از بین می‌روند. در ایستگاه‌های آخر، عرض پیک‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش عدد رینولدز در نواحی نزدیک مدل، این پیک‌ها حذف می‌شوند. همچنین استفاده از سیم اغتشاش ساز در قطرهای بالاتر در اعداد رینولدز بالاتر، تاثیر کمتری دارند. با پیشروی به ایستگاه‌های جلوتر، پیک سرعت‌های نوسانی برای سیلندر صاف و سیلندر با سیم اغتشاش ساز به قطرهای ۱ و ۱/۵ میلی‌متر روند افزایشی-کاهشی را دنبال می‌کند. به طوری که بیشترین مقدار سرعت نوسانی از ایستگاه دوم به بعد به ترتیب در سیلندر با قطر ۱/۵ و ۱ میلی‌متر، سپس



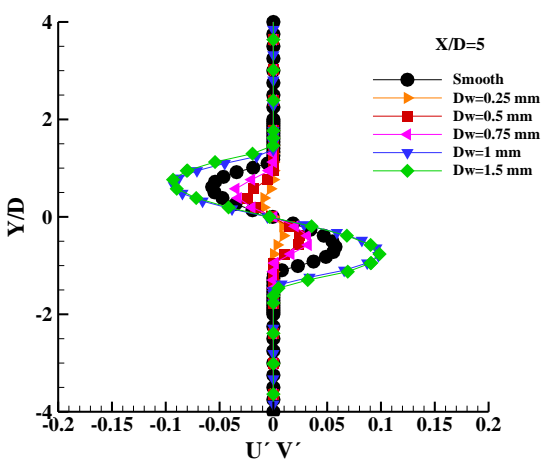
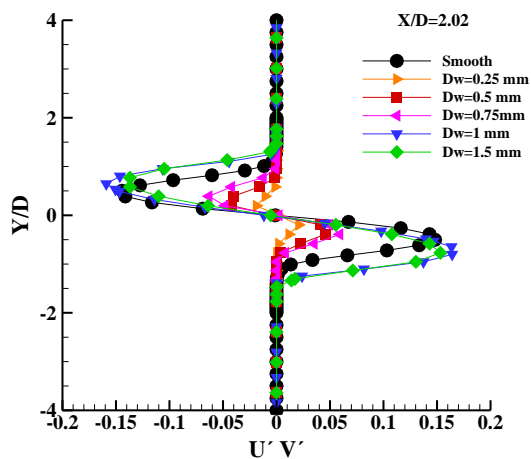
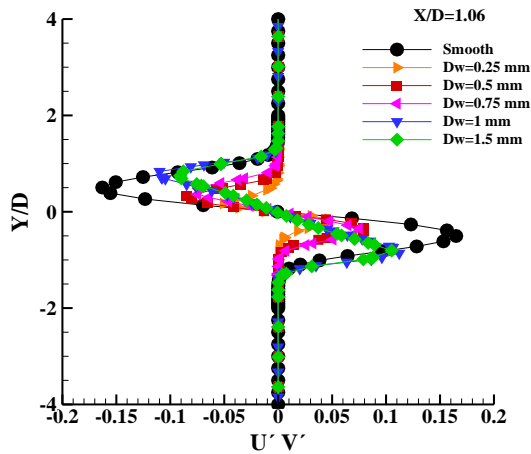
در سیلندر صاف اتفاق می‌افتد. کمترین مقدار سرعت نوسانی مربوط به سیم اغتشاش ساز به قطر ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد.



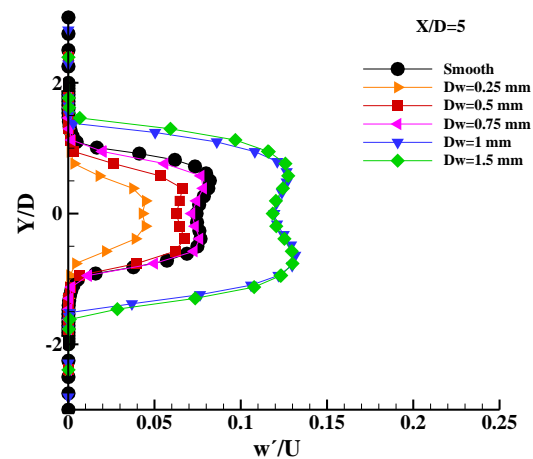
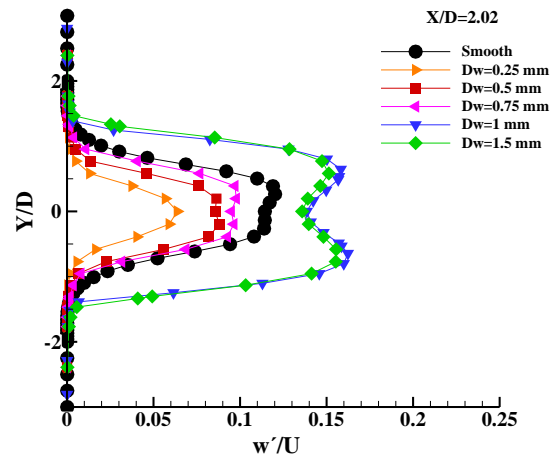
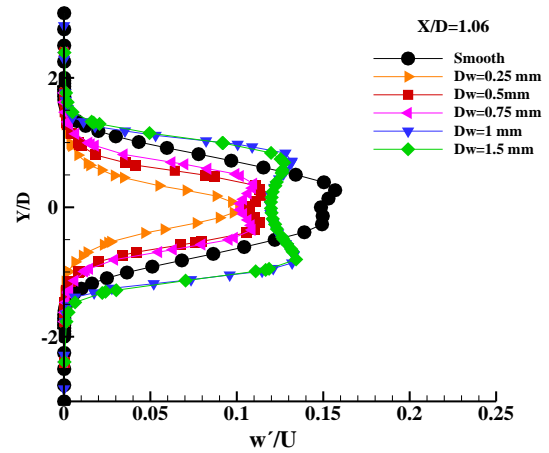
شکل ۱۲ پروفیل سرعت نوسانی  $w'$  بی بعد در سه ایستگاه در عدد رینولدز ۱۳۶۹۲ و قطرهای مختلف

شکل ۱۱ پروفیل سرعت نوسانی  $w'$  بی بعد در سه ایستگاه در عدد رینولدز ۳۹۰۰ و قطرهای مختلف

اغتشاش ساز رابطه مستقیم دارد. با افزایش فاصله از سیلندر، مقدار تنش برشی رینولدز در سیلندرهایی با سیم اغتشاش ساز به قطر ۱ و ۱/۵ میلی‌متر بیشتر از سیلندر صاف می‌باشد. کمترین مقدار تنش برشی رینولدز مربوط به سیلندر با سیم اغتشاش ساز به قطر ۰/۲۵ میلی‌متر می‌باشد.

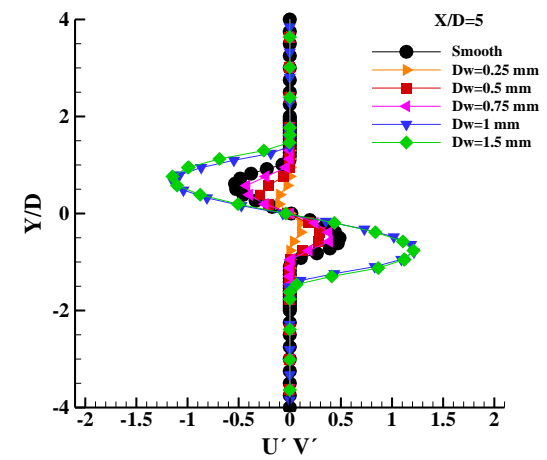
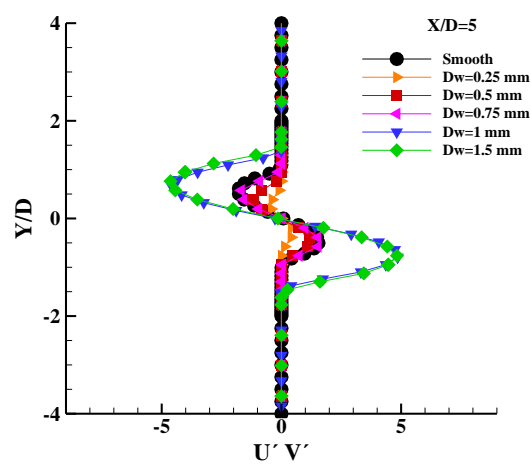
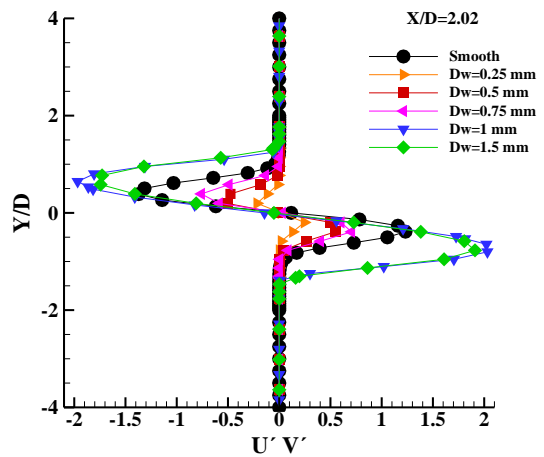
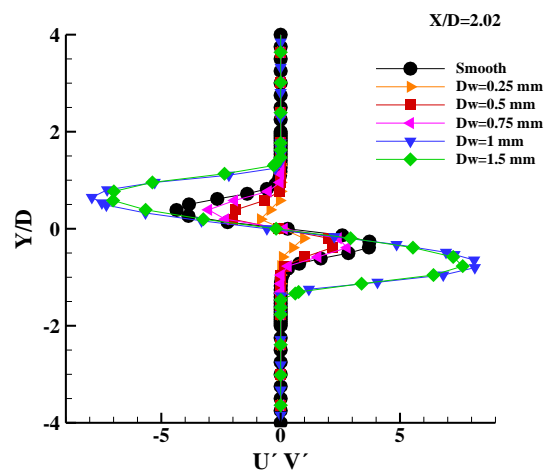
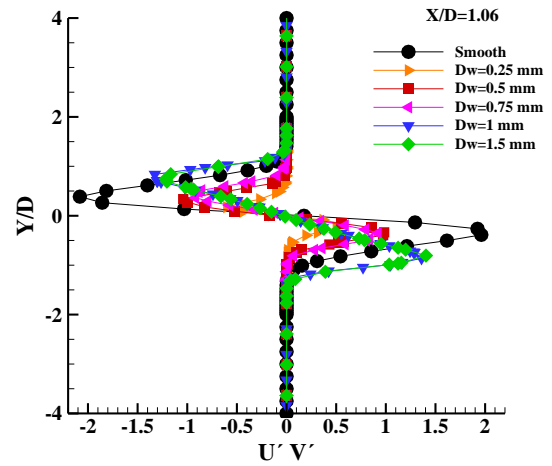
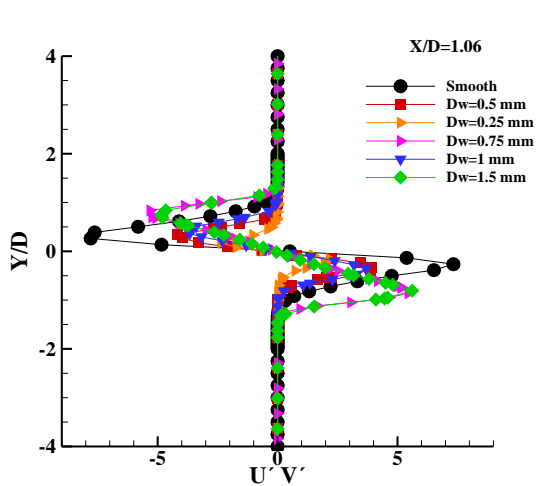


شکل ۱۴ پروفیل تنش برشی رینولدز در عدد رینولدز ۳۹۰۰



شکل ۱۳ پروفیل سرعت نوسانی  $w'$  بی بعد در سه ایستگاه در عدد رینولدز ۲۷۳۸۳ و قطر های مختلف

نتایج تنش برشی رینولدز در اشکال (۱۶-۱۴) بیانگر آن است که مقدار تنش برشی رینولدز در سیلندر صاف در ایستگاه اول در هر سه عدد رینولدز نسبت به حالت سیلندر دایروی با سیم اغتشاش ساز بیشتر است. همچنین تنش برشی رینولدز با قطر سیم



شکل ۱۶ پروفیل تنش برشی رینولدز در عدد رینولدز ۲۷۳۸۳

شکل ۱۵ پروفیل تنش برشی رینولدز در عدد رینولدز ۱۳۶۹۲

در شکل (۱۷) نمودار ضریب پسا در حالت سیلندر دایروی صاف و سیلندر دایروی با سیم اغتشاش ساز در قطرهای مختلف نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود در نواحی نزدیک

کاهش ۴۸٪، ۴۵٪ و ۴۴٪ سرعت‌های نوسانی  $u'$ ،  $v'$  و  $w'$  و کاهش ۵۰٪ تنش برشی رینولدز نسبت به سیلندر صاف می‌شود.

- ضریب پسا در سیم‌های اغتشاش ساز با قطرهای ۰/۲۵ و ۰/۵ میلی‌متر به ترتیب ۱۶٪ و ۴٪ نسبت به سیلندر صاف کاهش می‌یابد.
- ضریب پسا در سیم اغتشاش ساز با قطر بزرگ‌تر نسبت به حالت صاف ۸۰٪ افزایش می‌یابد.
- تنش برشی رینولدز با قطر سیم اغتشاش ساز رابطه مستقیم دارد.

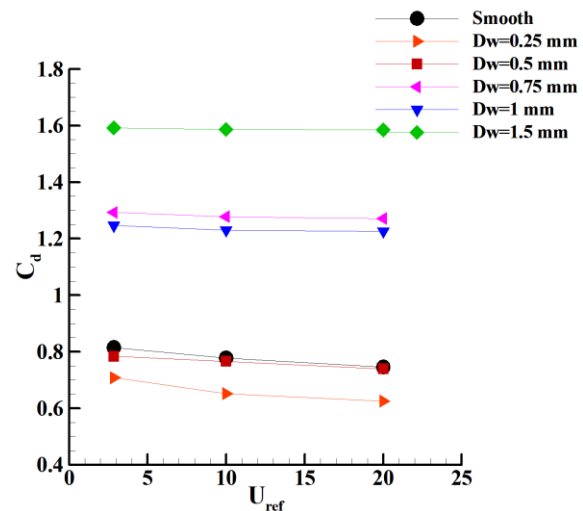
#### ۷- فهرست علائم و اختصارات

$C_d$	ضریب پسا
$D$	قطر سیلندر [m]
$D_w$	قطر سیم اغتشاش ساز [m]
$p$	فشار ( $\text{kg ms}^{-2}$ )
$Re$	عدد رینولدز
$t$	زمان (s)
$u_i$	مولفه‌های سرعت [ $\text{ms}^{-1}$ ]
$u$	سرعت متوسط [ $\text{ms}^{-1}$ ]
$u_{min}$	سرعت مینیمم [ $\text{ms}^{-1}$ ]
$u', v', w'$	مولفه‌های سرعت نوسانی [ $\text{ms}^{-1}$ ]
$U_\infty$	سرعت جریان آزاد [ $\text{ms}^{-1}$ ]
$u'v'$	تنش برشی رینولدز [ $\text{m}^2/\text{s}^2$ ]
$X$	فاصله از نقطه سکون پشت سیلندر [m]
$\varepsilon$	نرخ تلفات ( $\text{m}^2\text{s}^{-2}$ )
$\theta$	زاویه نصب سیم اغتشاش ساز
$\mu$	ویسکوزیته دینامیکی [ $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ]
$\mu_t$	ویسکوزیته گردابی [kg/ms]
$\vartheta$	لزجت سینماتیکی ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )
$\rho$	چگالی [ $\text{kgm}^{-3}$ ]

#### ۸- مراجع

- [1] Rockwell, D., Flow-Induced Vibrations, *An Engineering Guide*: Routledge, DOI: 10.1201/9780203755747, (2017).
- [2] Zdravkovich, M., Review and classification of various aerodynamic and hydrodynamic means for suppressing vortex shedding, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 7, No. 2, pp. 145-189, DOI: 10.1016/0167-6105(81)90036-2, (1981).

مدل به علت جریان‌های برگشتی و افزایش شدت اغتشاشات در پشت مدل، سرعت جریان برآیندی از مقدار  $U$  و  $V$  می‌باشد. همچنین استفاده از سیم‌های اغتشاش ساز با قطرهای ۰/۲۵ و ۰/۵ میلی‌متر سبب کاهش ضریب پسا می‌شود. با افزایش قطر سیم اغتشاش ساز، مقدار ضریب پسا افزایش می‌یابد.



شکل ۱۷ نمودار ضریب پسا در حالت سیلندر دایروی صاف و سیلندر دایروی با سیم اغتشاش ساز در قطرهای مختلف

#### ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، تاثیر سیم اغتشاش ساز نصب شده در زوایای  $\pm 140^\circ$  و  $\pm 40^\circ$  در سیلندر دایروی بر ضریب پسا، سرعت‌های نوسانی و تنش برشی رینولدز در سه ایستگاه در پشت استوانه (۵ و  $2/0.2$  و  $1/0.6$   $X/D$ ) در اعداد رینولدز مختلف ۳۹۰۰، ۱۳۶۹۲ و ۲۷۳۸۳ به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد:

- وجود پیک در نمودارهای سرعت نوسانی بیانگر وجود گردابه‌های بزرگ در پشت سیلندر می‌باشد.
- با افزایش فاصله از مدل، اندازه گردابه‌ها کوچک‌تر می‌شود و انرژی آن‌ها کاهش می‌یابد.
- با افزایش عدد رینولدز در نواحی نزدیک مدل، پیک‌ها حذف می‌شوند.
- استفاده از سیم اغتشاش ساز با قطر ۰/۲۵ میلی‌متر منجر به کاهش ۶۸٪، ۵۰٪ و ۵۵٪ سرعت‌های نوسانی  $u'$ ،  $v'$  و  $w'$  و کاهش ۸۵٪ تنش برشی رینولدز نسبت به سیلندر صاف می‌شود.
- استفاده از سیم اغتشاش ساز با قطر ۰/۵ میلی‌متر باعث

- [13] Alam, M.M., Kim, S., and Maiti, D.K., Flow interference between two tripped cylinders, *Wind and Structures, An International Journal*, Vol. 23, No. 2, pp. 109-125, DOI: 10.12989/was.2016.23.2.109, (2016).
- [14] Yadegari, M., and Bak Khoshnevis., A., Numerical and experimental study of characteristics of the wake produced behind an elliptic cylinder with trip wires, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, pp. 265-285, DOI: 10.1007/s40997-020-00373-6, (2021).
- [15] Yadegari, M., and Bak Khoshnevis., A., Investigation of entropy generation, efficiency, static and ideal pressure recovery coefficient in curved annular diffusers, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 136, pp. 1-19, DOI: 10.1140/epjp/s13360-021-01071-1, (2021).
- [16] Yadegari, M., and Khoshnevis., A.B., Numerical study of the effects of adverse pressure gradient parameter, turning angle and curvature ratio on turbulent flow in 3D turning curved rectangular diffusers using entropy generation analysis, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 135, No.7, pp. 548, DOI: 10.1140/epjp/s13360-020-00561-y, (2020).
- [17] Khoshnevis, A., Abasghorbani, N., and Yazdi., M.E., Experimental Investigation of Drag Coefficient of Two Tandem Cylinders at Staggered Arrangement in Turbulent Flow, Vol. 50, No. 2, pp. 83-91, DOI: 10.22034/jmeut.2020.9987, (2020).
- [18] Hatami, S., Yadegari, M., Bak Khoshnevis, A., The Experimental investigation of the drag coefficient of two tandemly-arranged circular cylinders at different angles, Vol. 31, No. 6, pp.3-12, DOI:10.30506/MMEP.2023.562121.2048, (2023). (in Persian).
- [19] Yadegari, M., and Khoshnevis, A.B., Entropy generation analysis of turbulent boundary layer flow in different curved diffusers in air-conditioning systems, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 135, No. 6, pp. 534, DOI: 10.1140/epjp/s13360-020-00545-y, (2020).
- [20] Yadegari, M., An optimal design for S-shaped air intake diffusers using simultaneous entropy generation analysis and multi-objective genetic algorithm, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 136, No. 10, pp. 10-19, DOI: 10.1140/epjp/s13360-021-01999-4, (2021).
- [21] Yadegari, M., Bak Khoshnevis, A., and Boloki, M., An experimental investigation of the effects of helical strakes on the characteristics of the wake around the circular cylinder, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical*
- [3] Kumar, R.A., C.-H. Sohn, and B.H. Gowda., Passive control of vortex-induced vibrations: an overview, *Recent patents on mechanical engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-11, DOI: 10.2174/2212797610801010001, (2008).
- [4] Fage, A., The effects of turbulence and surface roughness on the drag of a circular cylinder, *Aero., Res, Counc, Lond*, Vol. 1283, DOI: 10.3130/aijs.68.23\_3, (1929).
- [5] Hover, F., H. Tvedt, and M. Triantafyllou., Vortex-induced vibrations of a cylinder with tripping wires, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 448, pp. 175-195, DOI: 10.1017/S0022112001005985, (2001).
- [6] Quadrante, L.A.R., and Nishi., Y., Amplification/suppression of flow-induced motions of an elastically mounted circular cylinder by attaching tripping wires, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 48, pp. 93-102, DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2014.02.018, (2014).
- [7] Mahbub Alam, M.d., Zhou, Y., Zha, J.M., Flamand, O., Boujard, O., Classification of the tripped cylinder wake and bi-stable phenomenon, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 31, No. 4, pp. 545-560, DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.02.018, (2010).
- [8] James, D.F., and Truong., Q.-S., Wind load on cylinder with spanwise protrusion, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 98, No. 6, pp. 1573-1, DOI: 10.1061/JMCEA3.0001699, (1972).
- [9] Igarashi, T., Effect of tripping wires on the flow around a circular cylinder normal to an airstream, *Bulletin of JSME*, Vol. 29, No. 255, pp. 2917-2924, DOI: 10.1299/jsme1958.29.2917, (1986).
- [10] Bak Khoshnevis, A., Foroozesh, F., Pedram, M., Vahidi, M., Experimental investigation on drag coefficient reduction due to tripping wire on a cylinder, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 2, No. 2, pp.81-90, DOI: 10.22044/JSFM.2013.139, (2013). (in Persian ).
- [11] Bak Khoshnevis, A., Nazari, S., Ezadi Yazdi, M.J., Experimental Investigation of the Characteristics of the Flow around an Elliptic Cylinder in the Presence of a Tripping Wire, *Journal of Fluid mechanics and aerodynamics*, Vol. 5, No. 2, pp. 39-54, DOI: 10.22044/JSFM.2017.3999.2067, (2017). (in Persian).
- [12] Bak Khoshnevis, A., Pedram, M., Experimental Study of Wake Characteristics on an Asymmetric Airfoil Using Tripping Wires, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 41, No. 1, pp. 1-9, (2011). (in Persian).

- Aerodynamics*, Vol. 170, pp. 162-178, DOI: 10.1016/j.jweia.2017.08.014, (2017).
- [31] Fukudome, K., Watanabe, M., Iida, A., and Mizuno, A., Separation control of high angle of attack airfoil for vertical axis wind turbines, *AIAA*, Vol. 50, No. 3, (2005).
- [32] Ezadi, Y.M., and Bak, K.A., Experimental investigation of the characteristics of the wake of a rotating circular cylinder at different Reynolds numbers and speed ratios, *Journal Fluid mechanics and aerodynamics*, Vol. 4, No. 1, pp. 51-64, (2015). (in Persian).
- [33] Ezadi Yazdi, M. and Bak Khoshnevis, A., Experimental Investigation of the Effect of Reducing the Drag Coefficient on the Cylinder by Hot-Wire Anemometry, *Journal Mechanical Engineering*, Vol. 46, No. 2, pp. 19-30, (2016). (in Persian ).
- [34] Yazdi, M.J.E., and Khoshnevis, A.B., Experimental study of the flow across an elliptic cylinder at subcritical Reynolds number, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 133, No. 12, pp. 533, DOI:10.1140/epjp/i2018-12342-1, (2018).
- [35] Ezadi Yazdi, M., Safavi Rad, A., and Bak Khoshnevis, A., Experimental investigation of mean velocity profiles and turbulence intensities around an elliptic cylinder in the different Reynolds numbers, in *1st International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering*, Tehran University, Tehran, Iran, (2016). (in Persian).
- [36] Ezadi, Y.M., and Bak, K.A., Experimental investigation of flow characteristics around an elliptic cylinder near a flat plate, *Fluid mechanics and aerodynamics*, Vol. 4, No. 2, pp. 19-35, (2016). (in Persian ).
- [37] Khan, N.B., Ibrahim, Z., Khan, M.I., Hayat, T., Javed, M.F., VIV study of an elastically mounted cylinder having low mass-damping ratio using RANS model, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 121, pp. 309-314, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.109, (2018).
- [38] Launder, B.E., Second-moment closure: present and future, *International Journal of Heat and fluid flow*, Vol. 10, No. 4, pp. 282-300, DOI: 10.1016/0142-727X(89)90017-9, (1989).
- [39] Daly, B.J., and Harlow, F.H., Transport equations in turbulence, *The physics of fluids*, Vol. 13, No. 11, pp. 2634-2649, DOI: 10.1063/1.1692845, (1970).
- [40] Lourenco, L.M., Characteristics of the plate turbulent near wake of a circular cylinder, A particle image velocimetry study, In *Unpublished, results taken from Beaudan and Moin*, (1994).
- Engineering*, Vol. 47, No. 1, pp. 67-80, DOI: 10.1007/s40997-022-00494-0, (2023).
- [22] Yadegari, M., and Bak Khoshnevis, A., A numerical study over the effect of curvature and adverse pressure gradient on development of flow inside gas transmission pipelines, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 42, pp. 1-15, DOI: 10.1007/s40430-020-02495-z, (2020).
- [23] Haghghatjoo, H., Yadegari, M., and Bak Khoshnevis, A., Optimization of single-obstacle location and distance between square obstacles in a curved channel, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 137, No. 9, pp. 1042, DOI: 10.1140/epjp/s13360-022-03260-y, (2022).
- [24] Mansouri, Z., Yadegari, M., and Khoshnevis, A.B., Numerical investigation of the effect of installing four trip wires with different diameters on the mean and fluctuation velocities and characteristics of the wake around the circular cylinder, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, DOI: 10.1007/s40430-023-04409-1, (2023), (in Perss).
- [25] Bak Khoshnevis, A., Boloki, M., and Yadegari, M., The Investigation of the effect of the helical strakes' height on the cylindrical wake, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 10, No. 1, pp. 223-236, DOI: 10.1016/j.jweia.2014.08.014, (2020). (in Persian ).
- [26] Ezadi Yazdi, M.J., Rad, A.S., and Khoshnevis, A.B., Features of the flow over a rotating circular cylinder at different spin ratios and Reynolds numbers, Experimental and numerical study, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 134, pp. 1-21, DOI: 10.1140/epjp/i2019-12508-3, (2019).
- [27] Araújo, T.B., Sicot, C., Borée, J., and Martinuzzi, R. J., Influence of obstacle aspect ratio on tripped cylinder wakes, *International journal of heat and fluid flow*, Vol. 35, pp. 109-118, DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2012.01.010, (2012).
- [28] Yu, Z., Ping, H., Liu, X., Zhu, H., Wangu, R., Bao, Y., Zhou, D., Han, Z., and Xu, H., bulent wake suppression of circular cylinder flow by two small counter-rotating rods, *Physics of Fluids*, Vol. 32, No. 11, pp. 115-123, DOI: 10.1063/5.0023881 (2020).
- [29] Luo, D., Yan, C., Liu, H., and Zhao, R., Comparative assessment of PANS and DES for simulation of flow past a circular cylinder, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 134, pp. 65-77, DOI: 10.1016/j.jweia.2014.08.014, (2014).
- [30] Liu, Y., Guan, X., and Xu, C., A production limiter study of SST-SAS turbulence model for bluff body flows, *Journal of Wind Engineering and Industrial*