



بررسی تجربی جریان پشت سیلندر مربعی سه‌بعدی با استفاده از کاوشگر پنج‌حفره و شبکه عصبی

سعید فتحی^۱، علی اکبر دهقان^{۲*}، مجتبی دهقان منشادی^۳، علیرضا موحدی^۴

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران
^۲ مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۸ مهر ۱۳۹۴
بازنگری: ۳ اردیبهشت ۱۳۹۵
پذیرش: ۲۰ اردیبهشت ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۸ آبان ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

سیلندر
کاوشگر پنج‌حفره
دنباله
گردابه
شبکه عصبی
انتهای آزاد

چکیده: در این مطالعه، ساختار جریان پشت سیلندر مربعی سه‌بعدی به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت استخراج مشخصات فیزیکی ساختار جریان در عدد رینولدز 10^4 از یک کاوشگر پنج‌حفره استفاده شده است. برای کالیبراسیون کاوشگر پنج‌حفره به جای استفاده از روش‌های مرسوم کالیبراسیون، سیستم‌های شبکه عصبی و به‌طور مشخص تابع اساسی شعاعی به کار گرفته شده‌اند. با معرفی تعدادی از معیارهای آماری و با مقایسه روش مطالعه حاضر با روش درون‌یابی خطی و روش انطباق منحنی چند جمله‌ای از مرتبه پنج، مشخص شد که تابع اساسی شعاعی دارای دقت مناسب و خطای کم‌تری در کالیبراسیون کاوشگر پنج‌حفره است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که گردابه‌های نوک و پایه سیلندر با افزایش فاصله از سیلندر ضعیف‌تر می‌شوند. افزایش اندازه ناحیه دنباله در صفحات عرضی در نزدیکی انتهای آزاد سیلندر کمترین مقدار خود و در قسمت میانی بیشترین مقدار خود را داراست. در این مطالعه، هم‌چنین به بررسی اثر تغییر شکل انتهای آزاد سیلندر مربعی بر میدان فشار کل پشت سیلندر و بردارهای سرعت در صفحات مختلف پرداخته شده است. ملاحظه شده است که در سیلندر مربعی با انتهای آزاد نیم‌بیضی، ارتفاع و پهنای ناحیه دنباله به‌طور قابل توجهی نسبت به سیلندر سه‌بعدی با انتهای تخت کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

صرف نظر از جنبه علمی شناخت فیزیک جریان در اطراف سیلندر مربعی با ارتفاع محدود، وجود اجسام و اشیاء به این شکل در طبیعت موجب شده است که پژوهشگران مطالعات مختلفی را پیرامون این موضوع انجام دهند. هندسه‌های سیلندری شکل در حوزه‌های مختلف کاربرد دارند. در کاربردهای مهندسی، جابه‌جایی مواد آلاینده در اطراف آسمان‌خراش‌ها، ساختمان‌های بلند، نیروهای آیرودینامیکی وارد بر دودکش‌ها، پل‌ها، دکل‌های توربین‌های بادی، جریان روی لوله‌های مبدل حرارتی، کابل‌ها، انتقال حرارت در مدارهای الکترونیکی و دیگر اثرات جریان هوا بر ساختارهای نزدیک به سیلندر با ارتفاع محدود، دارای اهمیت هستند. ساختار دنباله^۱ پشت اجسام جریان‌بند پیچیده است، زیرا پشت این اجسام برهم‌کنش لایه مرزی، جریان برشی آزاد جدا شده و دنباله صورت می‌گیرد. در نزدیکی دنباله سیلندر مربعی و دایره‌ای دوبعدی، جاری شدن گردابه‌ها به‌صورت منظم رخ می‌دهد. بنابراین دنباله سیلندر دوبعدی به‌صورت ساختاری منسجم و دوبعدی فرض می‌شود. انتهای آزاد سیلندر باعث اختلاف زیادی بین ساختار جریان اطراف سیلندر دوبعدی و سه‌بعدی می‌شود. مستقل از شکل سطح مقطع سیلندر، ساختار دنباله متأثر از جریان روی انتهای آزاد سیلندر بوده و بنابراین با حالت دوبعدی که مبتنی

بر مسیر گردابه دوبعدی کارمن است تفاوت دارد.

جریان عبوری از تک‌سیلندر سه‌بعدی با مقطع مربعی نیز مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است، چرا که بسیاری از سازه‌های واقعی مثل ساختمان‌ها، پایه و بدنه پل‌ها و موارد دیگر، مقاطع مربعی یا مستطیلی با انتهای آزاد دارند. مهم‌ترین تفاوتی که بین اجسامی مانند سیلندرهای مربعی که لبه‌های تیز دارند و اجسامی مثل سیلندرهای دایره‌ای که لبه‌های هموار دارند، نقطه جدایی جریان است. در مورد سیلندرهایی که لبه‌های هموار دارند، نقطه جدایی، ثابت و مشخص نیست، در حالی که برای سیلندرهایی که لبه‌های تیز دارند، این نقطه ثابت و منطبق بر لبه‌های تیز جسم است. این مطلب، دینامیک جریان را به‌نحو قابل توجهی تغییر می‌دهد. در مطالعات تجربی صورت‌گرفته در این زمینه، از تجهیزات مختلفی برای بررسی مشخصه‌های جریان استفاده شده است که می‌توان از جریان‌سنج لیزری داپلر^۲ [۱ و ۲]، سرعت‌سنج تصویری ذرات^۳ [۶-۲]، جریان‌سنج سیم داغ^۴ [۲]، [۴ و ۷] و کاوشگر فشار هفت‌حفره^۵ [۹ و ۱۰] نام برد. روه و پارک [۱۱] با استفاده از آشکارسازی جریان به‌وسیله روغن، دو نقطه الصاق و یک نقطه زینی را در پشت انتهای آزاد سیلندر مشاهده نمودند. بعضی از تحقیقات

2 Laser Doppler anemometry

3 Particle image velocimetry

4 Hot wire anemometry

5 Seven-hole probe

1 wake

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: adehghan@yazd.ac.ir

بزرگ^۳ برای حل جریان لحظه‌ای و تعیین ساختار متوسط زمانی جریان، در نزدیکی انتهای آزاد سیلندر با نسبت منطری ۲ استفاده کرد. پارک و لی [۱۹] اثر تغییر شکل انتهای آزاد سیلندر را بر ساختار جریان دنباله سیلندر دایره‌ای مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای مطالعه سیلندر با نسبت منطری ۶ و در عدد رینولدز ۷۵۰۰، از سرعت‌سنج تصویری ذرات و در عدد رینولدز ۲۰۰۰۰، از جریان‌سنج سیم داغ استفاده نمودند.

در مطالعه حاضر از یک کاوشگر پنج‌حفره^۴ برای اندازه‌گیری مشخصات جریان در دنباله سیلندر مربعی با ارتفاع محدود استفاده شده است. از یک روش شبکه عصبی جدید برای کالیبراسیون کاوشگر پنج‌حفره بهره گرفته شده است و همچنین مزیت‌های این روش نسبت به سایر روش‌های مرسوم بیان شده است. ضمناً در انتها اثر تغییر شکل انتهای آزاد بر مشخصات دنباله سیلندر مربعی با ارتفاع محدود بررسی شده است چرا که در مطالعات قبلی کم‌تر اثر این پارامتر مورد بررسی قرار گرفته است.

تلاش شده است مشخصات متوسط زمانی جریان که شامل گردابه‌های طولی و همچنین نحوه رشد دنباله است با استفاده از توزیع فشار نشان داده شود. همان‌گونه که بیان شد، تاکنون مطالعات زیادی در زمینه جریان حول سیلندرها انجام شده است، ولی هنوز نکات مبهمی در بررسی فیزیک جریان حول چنین اجسامی وجود دارد. ضمناً در تعداد کمی از مطالعات صورت‌گرفته در این زمینه، از کاوشگر چند حفره برای اندازه‌گیری مشخصات جریان استفاده شده است. با توجه به محاسن استفاده از کاوشگر پنج‌حفره در مطالعه جریان، نظیر توانمندی ابزار در اندازه‌گیری مولفه‌های سرعت، ساده‌بودن نسبی لوازم آزمایشگاهی در مقایسه با بسیاری از تجهیزات اندازه‌گیری دیگر، توانایی اندازه‌گیری فشارکل و استاتیک جریان نسبت به سایر تجهیزات اندازه‌گیری و موارد دیگر، در این مطالعه کوشش شده است تا اطلاعات مربوط به دنباله پشت سیلندر مربعی توسعه داده شود. البته لازم به ذکر است که کاوشگر پنج‌حفره نمی‌تواند جایگزین تجهیزاتی مثل جریان‌سنج سیم داغ یک‌بعدی شود، ولی در کنار آن می‌تواند نقاط ضعف چنین تجهیزاتی را پوشش دهد. همچنین مطابق دانش نویسندگان، پیرامون اثر نیم‌بیضی‌شدن انتهای آزاد سیلندر مربعی با ارتفاع محدود، تقریباً کاری در داخل کشور صورت نگرفته است و در خارج از کشور نیز پژوهش‌ها در این زمینه بسیار محدود هستند. همچنین با توجه به تاثیر قابل توجه انتهای آزاد سیلندر بر فیزیک جریان پشت آن، اثر تغییر شکل انتهای آزاد سیلندر مربعی بر مشخصات فیزیک جریان دنباله پشت سیلندر ارائه شده است.

۲- تجهیزات آزمایشگاهی

مطالعه تجربی حاضر در تونل باد سرعت پایین مدار باز دانشگاه یزد که طول اتاق آزمون آن ۲/۴ m و ابعاد سطح مقطع آن ۴۵۷ mm × ۴۵۷ mm است صورت گرفته است. حداکثر سرعت تونل حدود

حاکمی از آن است که مسیر گردابه‌های جریان اطراف سیلندر دوبعدی با مسیر ریزش گردابه‌های اطراف سیلندر با ارتفاع محدود متفاوت است [۲، ۸ و ۹]. وانگ و همکاران [۳] دو گردابه عرضی متقارن و نامتقارن را در دنباله پشت سیلندر مربعی نشان دادند. آن‌ها و برخی دیگر از پژوهشگران جریان رو به بالایی^۱ را پشت سیلندر در نزدیکی صفحه تخت و جریان رو به پایینی^۲ را در نزدیکی انتهای آزاد سیلندر مشاهده کردند که گردابه‌های نامتقارن عرضی را تحت تأثیر قرار داده تا آن‌ها را به گردابه‌های متقارن تبدیل کنند [۲، ۳ و ۸]. در نزدیکی انتهای آزاد سیلندر، گردابه‌های نامتقارن کم‌تر ایجاد می‌شوند و گردابه‌های متقارن اغلب در این مکان دیده می‌شوند [۳]. با چرخش دو جریان گردابه‌ای عرضی بیان شده به سمت بالادست جریان، دو جفت گردابه طولی در نزدیک انتهای آزاد سیلندر و صفحه تخت تشکیل می‌شوند که به‌عنوان گردابه نوک و گردابه پایه سیلندر شناخته می‌شوند [۲]. گستردگی گردابه‌های نوک با افزایش فاصله از سیلندر افزایش می‌یابد. بسیاری از مطالعات، مشاهده گردابه‌های پایه سیلندر با ارتفاع محدود و ارتباط متقابل بین آن‌ها و جریان رو به بالا و همچنین جهت چرخش عکس آن‌ها با گردابه‌های نوک سیلندر که در یک امتداد با آن‌ها قرار گرفته‌اند را تأیید کرده‌اند [۱۰ و ۱۵-۱۲].

دنباله مشاهده‌شده در ارتفاعی برابر با نصف ارتفاع سیلندر، به دلیل کم‌شدن اثر جریان رو به بالا در نزدیکی کف و جریان رو به پایین از سقف مدل، تا حدی شبیه مسیر گردابه‌ای کارمن به‌وجودآمده برای سیلندرهایی دوبعدی است [۴]. هنگامی که ضخامت لایه مرزی ناچیز است احتمال ایجاد گردابه‌های پایه کم و هنگامی که ضخامت لایه مرزی زیاد شود می‌شود، جریان رو به بالا قوی‌تر است و گردابه‌های پایه بیشتر از صفحه تخت فاصله گرفته و به انتهای آزاد سیلندر نزدیک‌تر می‌شوند؛ در واقع قدرت جریان رو به بالا متناسب با ضخامت لایه مرزی است [۳]. موحدی و همکاران [۱۶] جریان پشت سیلندر مربعی سه‌بعدی را به‌وسیله جریان‌سنج سیم داغ یک‌بعدی در اعداد رینولدز ۲۰۰۰ و ۱۱۰۰۰ مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها اثرات عدد رینولدز بر ویژگی‌های جریان، سرعت متوسط و شدت آشفتگی جریان حول سیلندر را مورد تحلیل قرار دادند. در این مطالعه، محدودیت‌هایی برای اندازه‌گیری با جریان‌سنج سیم داغ از جمله ناتوانی در اندازه‌گیری هر سه مؤلفه سرعت و نیز سرعت‌های منفی (در ناحیه جریان برگشتی) برشمرده شد. وانگ و همکاران [۱۷] اثر برش گوشه‌های سیلندر مربعی دوبعدی را بر تغییرات نیرو و ضریب پسای سیلندر، به‌وسیله سرعت‌سنج تصویری ذرات در عدد رینولدز ۱۰۳۵ بررسی کردند. بعد از برش گوشه سیلندر شدت نوسانات جریان دنباله پشت سیلندر کاهش می‌یابد؛ اما طول ناحیه جریان بازگشتی پشت سیلندر بزرگ‌تر و پهنای آن کوچک‌تر می‌شود. جوادی [۱۸] ساختار جریان اطراف سیلندر دایره‌ای را در عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ به‌صورت جزئی مورد بررسی قرار داد. وی در مطالعه خود از مدل شبیه‌سازی گردابه‌های

3 Large eddy simulation

4 Five-hole probe

1 Upwash flow

2 Downwash flow

کارکرد و همچنین یکی از کم‌هزینه‌ترین تجهیزات اندازه‌گیری هستند که با استفاده از آن‌ها می‌توان فشار کل و فشار استاتیک جریان عبوری از کاوشگر و همچنین مؤلفه‌های سرعت در جهت سه محور مختصات را تعیین کرد. در شکل ۲ (الف)، طرح‌واره‌ای از کاوشگر پنج‌حفره نشان داده شده است که P_1 تا P_5 ، فشارهای اندازه‌گیری شده توسط حفره‌های کاوشگر هستند. همچنین شکل ۲ (ب) جهت زاویه‌های آلفا (α) یا پیچ و بتا (β) یا یو را نشان می‌دهد.

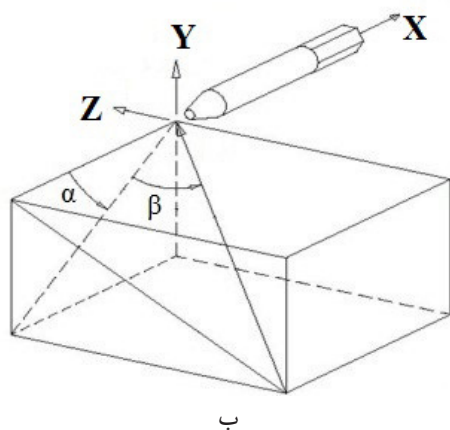
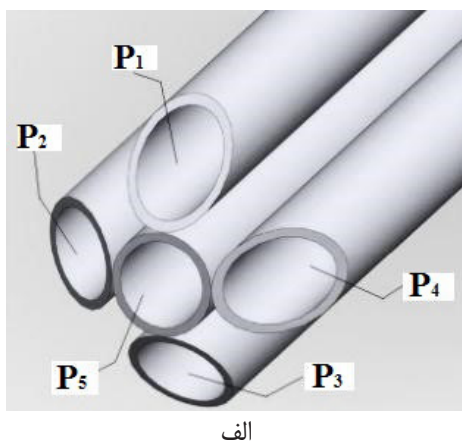


Fig. 2. a: 3D schematic of five-hole probe; b: definition of pitch and yaw angles

شکل ۲: الف - طرح‌واره سه‌بعدی از کاوشگر پنج‌حفره، ب - جهت قرارگیری محور مختصات و زاویه‌های پیچ و یو

۳-۱ - کالیبراسیون کاوشگر پنج‌حفره

به مجموعه اقداماتی که برای آماده‌سازی کاوشگر پنج‌حفره جهت آزمایش صورت می‌گیرد کالیبراسیون کاوشگر پنج‌حفره گفته می‌شود. روابط کالیبراسیون به صورت ضرایب بی‌بعد با استفاده از فشارهای اندازه‌گیری شده در مکان قرارگیری حفره‌های کاوشگر و فشار استاتیک (P_s) و فشار کل (P_t) جریان بالادست که توسط لوله پیتوت اندازه‌گیری می‌شوند، به دست می‌آیند که با توجه به زاویه جریان می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. ضرایب بی‌بعد فشار آلفا ($C_{p,\alpha}$)، بتا ($C_{p,\beta}$)، کل ($C_{p,t}$) و استاتیک ($C_{p,s}$) از روابط (۱) تا (۵) محاسبه می‌شوند.

۲۵ m/s و شدت آشفتگی جریان آزاد در تمام سرعت‌های مورد بررسی کمتر از ۰/۲ درصد است. در مطالعه حاضر، جریان اطراف دو مدل بررسی شده است. مدل اول که سیلندر مربعی با انتهای آزاد تخت نامیده می‌شود دارای طول سطح مقطع $D=15\text{ mm}$ و ارتفاع $H=105\text{ mm}$ است و نسبت منطری $(AR=H/D)$ برابر با ۷ است. شکل ۱ (الف)، طرح‌واره مدل استفاده‌شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. مدل دوم که سیلندر مربعی با انتهای آزاد نیم بیضوی نامیده می‌شود دارای سطح مقطع مربع تا ارتفاع $H/D=6$ است و ارتفاع باقی مانده سیلندر (تا $H/D=7$) دارای ساختار نیم‌بیضوی شکل است (شکل ۱ (ب)).

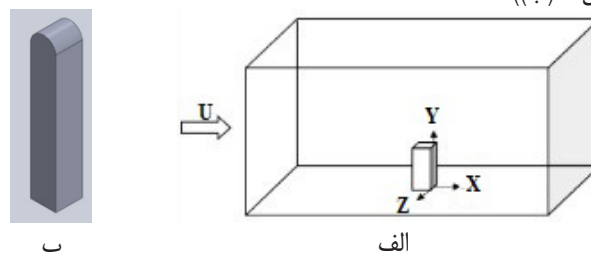


Fig. 1. The geometry and coordinate system used for the present study

شکل ۱: هندسه و دستگاه مختصات مورد استفاده در این مطالعه

نسبت انسداد سیلندر با انتهای آزاد تخت ۳/۳ درصد است که کمتر از مقدار استاندارد تعیین‌شده مجاز (۵ درصد) توسط فارل و همکاران [۲۰] است. سرعت جریان آزاد $U=10\text{ m/s}$ بوده و عدد رینولدز آزمایش، $Re_D=((U \times D)/\nu)$ که بر اساس طول سطح مقطع D و سرعت جریان بالادست U تعریف می‌شود برابر ۱۰^۴ است. در تعریف عدد رینولدز، ν ویسکوزیته سینماتیکی هوا است.

ناحیه دنباله پشت سیلندر و ساختار جریان آن به‌وسیله کاوشگر پنج‌حفره مورد بررسی قرار گرفته است. کاوشگر مورد استفاده در مطالعه حاضر از ۵ لوله فلزی به قطر خارجی ۱ mm ساخته شده است. برای جابجایی سنسور در ناحیه دنباله از یک دستگاه سه مؤلفه‌ای انتقال‌دهنده کاوشگر با دقت ۰/۰۱ mm استفاده شده است.

برای استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط کاوشگر پنج‌حفره نیاز به پنج کانال فشار جهت ثبت داده‌ها است. بدین منظور از یک مبدل فشار ۱۵ کاناله استفاده شده است تا فشارهای حس‌شده توسط حفره‌های کاوشگر ثبت شوند. سنسورهای فشار این دستگاه می‌توانند فشار دیفرانسیلی را در محدوده $\pm 1270\text{ Pa}$ با دقت $\pm 3\text{ Pa}$ اندازه‌گیری کنند. داده‌های کسب‌شده به‌وسیله یک کارت ۱۲ بیتی که ولتاژ آنالوگ را به ولتاژ دیجیتال تبدیل می‌کند به رایانه وارد شده و سپس از طریق نرم‌افزار فشاری که توسط زبان برنامه‌نویسی لب ویو^۱ نوشته شده است، نمایش داده می‌شوند.

۳-۲ کاوشگر پنج‌حفره

کاوشگرهای پنج‌حفره یکی از ساده‌ترین وسایل اندازه‌گیری از لحاظ



Fig. 3. Five-hole probe installed in the open loop wind tunnel
 شکل ۳: نمایی از کاوشگر پنج حفره بر روی دستگاه زاویه دهنده کاوشگر در تونل باد مدار باز

$$\bar{P} = \frac{(P_1 + P_2 + P_3 + P_4)}{4} \quad (1)$$

$$Cp_\alpha = \frac{P_1 - P_3}{P_5 - \bar{P}} \quad (2)$$

$$Cp_\beta = \frac{P_2 - P_4}{P_5 - \bar{P}} \quad (3)$$

$$Cp_t = \frac{P_5 - P_t}{P_5 - \bar{P}} \quad (4)$$

$$Cp_s = \frac{P - P_s}{P_5 - \bar{P}} \quad (5)$$

کالیبراسیون کاوشگر پنج حفره شامل دو قسمت تجربی و تئوری است. قسمت اول در آزمایشگاه انجام می شود که به عنوان کالیبراسیون کاوشگر پنج حفره در تونل باد شناخته می شود و برای قسمت دوم که ایجاد الگوی است، میان ضرایب بی بعد فشار و زاویه های جریان از شبکه عصبی استفاده می شود.

۳-۱-۱- کالیبراسیون کاوشگر پنج حفره در تونل باد

پس از نصب کاوشگر پنج حفره مطابق شکل ۳ بر روی مکانیزم نگهدارنده کاوشگر و اتصال شیلنگ های آن به دستگاه مبدل فشار، کاوشگر آماده کالیبراسیون می شود. با روشن نمودن دستگاه کنترل کننده، مکانیزم زاویه دهنده کاوشگر ابتدا آن را در زاویه صفر قرار داده و پس از آن کاوشگر را در زاویه $\alpha = 25/2^\circ$ و $\beta = -25/2^\circ$ قرار داده و فشارها در این موقعیت ثبت می شوند، سپس با ثابت نگه داشتن زاویه $\alpha = 25/2^\circ$ ، با گام های $3/6^\circ$ کاوشگر تا موقعیت $\beta = 25/2^\circ$ جابه جا شده و در هر موقعیت فشارها ثبت می شوند. پس از آن کاوشگر در موقعیت $\alpha = 21/6^\circ$ و $\beta = 25/2^\circ$ قرار داده شده و با ثابت نگه داشتن زاویه $\alpha = 21/2^\circ$ ، با گام های $3/6^\circ$ کاوشگر تا موقعیت $\beta = -25/2^\circ$ جابه جا شده و در هر موقعیت فشارها ثبت شدند. این کار تا زاویه $\alpha = -25/2^\circ$ تکرار شده و از داده های ثبت شده برای آموزش شبکه عصبی و ایجاد یک الگوی مناسب جهت کالیبراسیون کاوشگر پنج حفره استفاده می شود.

۳-۱-۲- کالیبراسیون کاوشگر پنج حفره به وسیله شبکه عصبی

۳-۱-۲- الف شبکه عصبی

شبکه های عصبی از عناصر عملیاتی ساده ای به صورت موازی ساخته می شوند. پس از تنظیم یا همان آموزش شبکه عصبی، اعمال یک ورودی خاص منجر به دریافت پاسخ خاص می شود. شبکه بر مبنای تطابق و همجنسی بین ورودی و هدف سازگار می شود تا اینکه خروجی شبکه و هدف بر هم منطبق گردند. شکل ۴ نحوه عملکرد شبکه عصبی را نشان می دهد.

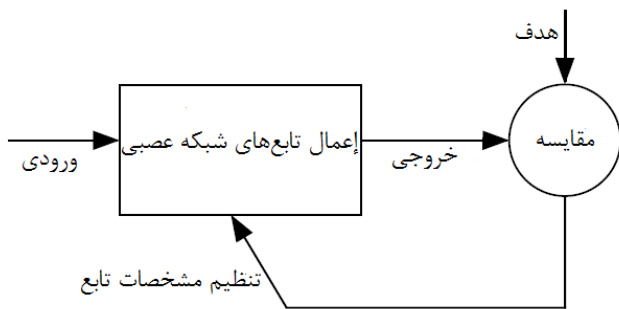


Fig. 4. Flowdiagram presentation of neural network method

شکل ۴: چشم انداز کلی نحوه کار شبکه عصبی

۳-۱-۲- ب- تابع اساسی شعاعی^۱

شبکه های تابع اساسی شعاعی از نوع شبکه های آموزشی پیش رو هستند که با استفاده از الگوریتم های پیشرفته شبکه عصبی را آموزش می دهند. در مقایسه با تابع های پس انتشار^۲ از جهات مختلف، شبکه های تابع اساسی شعاعی دارای عملکرد بهتری هستند. شبکه های شعاعی بسیار سریع هستند و حساسیت کمتری به داده های ناهمگون ورودی شبکه دارند. شبکه ی تابع اساسی شعاعی اولین بار توسط مودی و همکاران [۲۱] به عنوان یک ساختار مؤثر برای آموزش داده های شبکه عصبی معرفی شده است. تابع اساسی شعاعی یکی از مشهورترین شبکه های عصبی مصنوعی است که بر مبنای تابع اساسی و تابع های تقریبی تکرار پذیر است [۲۲-۲۴]. آموزش داده های تابع های شعاعی زمان کمی را به خود اختصاص داده و مکانیزم آموزش دارای شکل ساده تری نسبت به دیگر روش ها است. شکل ۵ ساختار شبکه اساسی شعاعی را به تعداد ز داده ورودی نشان می دهد.

1 Radial basis function

2 Back propagation

$$P_{dyn} = P_t - P_s \quad (۹)$$

$$V = \sqrt{\frac{2 \times P_{dyn}}{\rho}} \quad (۱۰)$$

$$V_x = V \times \cos(\alpha) \times \cos(\beta) \quad (۱۱)$$

$$V_y = V \times \sin(\alpha) \times \cos(\beta) \quad (۱۲)$$

$$V_z = V \times \sin(\beta) \quad (۱۳)$$

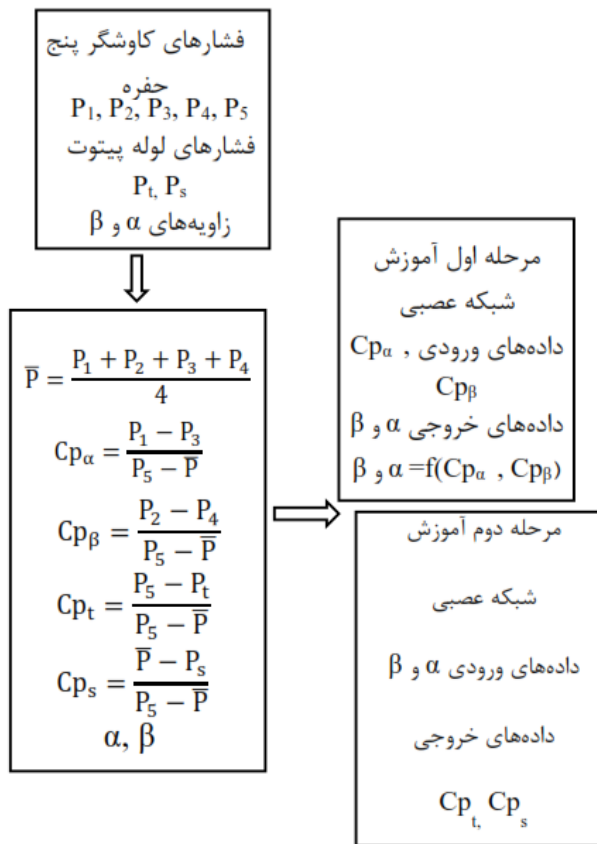


Fig. 6. Calibration steps of five-hole probe using artificial neural network

شکل ۶: طرح‌واره مراحل کالیبراسیون کاوشگر پنج حفره به‌وسیله شبکه عصبی

۳-۱-۳- معیارهای آماری سنجش کارایی شبکه عصبی

برای ایجاد یک الگوریتم مناسب برای پیش‌بینی داده‌های کالیبراسیون کاوشگر پنج‌حفره لازم است داده‌های آموزشی به شبکه معرفی شوند. داده‌های کالیبراسیون، یک شبکه 15×15 را تشکیل می‌دهند که در واقع از ۱۵ خط تشکیل شده‌اند که هر خط شامل ۱۵ نقطه است که در آن نقاط، مقادیر فشار پنج‌حفره کاوشگر با نصب آن در تونل باد اندازه‌گیری شده است. داده‌های خط $\alpha = 0^\circ$ از $\beta = -25/2^\circ$ تا $\beta = 25/2^\circ$ به عنوان داده‌های تست

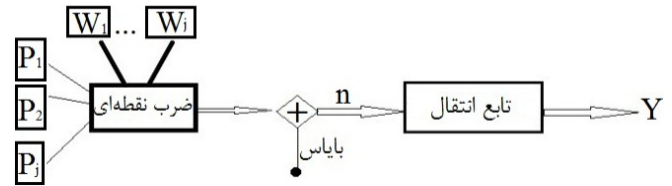


Fig. 5. Radial basis function

شکل ۵: شبکه اساسی شعاعی

تابع اساسی شعاعی دارای سه لایه شامل لایه ورودی، لایه خروجی و لایه مخفی است. لایه ورودی شامل بردارهای ورودی و لایه مخفی شامل نورون‌های شبکه است. در واقع بردارهای ورودی در لایه‌های مخفی در تابع‌های انتقال خطی قرار می‌گیرند. داده‌های ورودی تابع انتقال شبکه اساسی شعاعی (n)، حاصل ضرب نقطه‌ای داده‌های ورودی شبکه (p_j تا p_i) در وزن‌های مشخص (w_j تا w_i) و حاصل جمع آن‌ها با بایاس شبکه است. تابع انتقال شبکه اساسی شعاعی به‌صورت رابطه (۶) است.

$$radbas(n) = e^{-n^2} \quad (۶)$$

در فرایند کالیبراسیون دو بار باید از شبکه عصبی برای آموزش شبکه و پیش‌بینی داده‌ها استفاده کرد. یک بار برای به دست آوردن زاویه‌های پیچ و یاو و یک بار برای محاسبه ضرایب فشار کل و استاتیک. در مرحله اول برای آموزش شبکه، ضرایب فشار پیچ ($C_{p,\alpha}$) و یاو ($C_{p,\beta}$) که از فشارهای اندازه‌گیری شده در مرحله اول کالیبراسیون در تونل باد به‌دست‌آمده‌اند را به عنوان ورودی و زاویه‌های پیچ و یاو متناظر با این مقادیر حاصل از فرایند کالیبراسیون در تونل باد در سرعت مشخص، به عنوان خروجی به برنامه شبکه عصبی نوشته شده معرفی می‌شود. پس از آموزش مناسب شبکه، ضرایب فشار آلفا و بتای حاصل از آزمایش حول سیلندر در برنامه وارد شده، جواب‌های به‌دست‌آمده زاویه پیچ و یاو جریان عبوری از کاوشگر است. در مرحله دوم زاویه‌های پیچ و یاو به‌دست‌آمده از کالیبراسیون در تونل باد به عنوان ورودی مرحله دوم و ضرایب فشار استاتیک ($C_{p,s}$) و ضرایب فشار کل ($C_{p,t}$) متناظر که از فرایند کالیبراسیون در تونل باد به‌دست‌آمده‌اند به عنوان خروجی معرفی می‌شوند. پس از آموزش مناسب شبکه، زاویه‌های پیچ و یاو به‌دست‌آمده از مرحله اول را به عنوان ورودی

در برنامه وارد کرده، جواب به‌دست‌آمده ضرایب فشار استاتیک و کل جریان عبوری از کاوشگر است. طرح‌واره انجام مراحل کالیبراسیون کاوشگر پنج‌حفره در شکل ۶ ارائه شده است. اکنون می‌توان به‌وسیله ضرایب فشار کل و استاتیک محاسبه‌شده، فشار کل، فشار استاتیک و سرعت‌های جریان عبوری از کاوشگر را در جهت سه محور مختصات بر اساس روابط (۷) تا (۱۳) محاسبه کرد.

$$P_t = P_s - Cp_t \left(P_s - \bar{P} \right) \quad (۷)$$

$$P_s = \bar{P} - Cp_s \left(\bar{P} - P_s \right) \quad (۸)$$

جدول ۱: مقایسه عملکرد شبکه عصبی مطالعه حاضر با روش درون‌یابی خطی و روش انطباق منحنی چند جمله‌ای از مرتبه ۵

Table 1. Comparison of performance of neural network method (current study) and linear interpolation and 5th order curve fitting methods

زاویه یاب	زاویه پیچ	پارامتر آماری	روش
۱/۳۱۲۳	۰/۴۸۴	عدم قطعیت	روش انطباق منحنی چندجمله‌ای از مرتبه ۵
۰/۳۸۸	۰/۱۲۴۹	خطای استاندارد	
۰/۹۹۲	-	ضریب تعیین	
۱/۰۷۲	۰/۲۱۸۵	عدم قطعیت	درون‌یابی مستقیم
۰/۲۷۶۸	۰/۰۵۶۴	خطای استاندارد	
۰/۹۹۵	-	ضریب تعیین	
۰/۸۳۱۱۶	۰/۱۵۵۸۴	عدم قطعیت	با استفاده از تابع اساسی شعاعی شبکه عصبی
۰/۲۱۴۶	۰/۰۴۰۲	خطای استاندارد	
۰/۹۹۷	-	ضریب تعیین	
C_{Ps}	C_{Pt}	پارامتر آماری	روش انطباق منحنی چندجمله‌ای از مرتبه ۵
۰/۰۴۹۴	۰/۰۴۷۷	عدم قطعیت	
۰/۰۱۲۷	۰/۰۱۲۳	خطای استاندارد	
۰/۹۵۹	۰/۹۷۴	ضریب تعیین	درون‌یابی مستقیم
۰/۰۴۵۹	۰/۰۶۸۳	عدم قطعیت	
۰/۰۱۱۸	۰/۰۱۷۶	خطای استاندارد	
۰/۹۶۵	۰/۹۴۷	ضریب تعیین	با استفاده از تابع اساسی شعاعی شبکه عصبی
۰/۰۳۲۷	۰/۰۴۵۲	عدم قطعیت	
۰/۰۰۸۴	۰/۰۱۱۶	خطای استاندارد	
۰/۹۸۲	۰/۹۷۶	ضریب تعیین	

نشان‌دهنده آن است که روش شبکه عصبی دارای کارایی بهتری است. در تخمین ضرایب فشار کل و استاتیک روش انطباق منحنی چندجمله‌ای مناسب‌تر از روش درون‌یابی خطی است.

شناسایی پارامترهای موثر بر عملکرد شبکه عصبی بر اساس روش طراحی آزمایش^۱ نیاز به انتخاب تعدادی پارامتر موثر و تقسیم‌بندی سطح تغییرات آنها و پیشنهاد تعدادی زیادی آزمایش است. سپس با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی بر اساس عواملی مانند کمینه‌کردن زمان لازم برای کالیبراسیون یا بیشینه‌کردن دقت پیش‌بینی، حالت بهینه انتخاب شده و بر

شبکه عصبی انتخاب شدند. فاصله بین هر دو نقطه $3/6^\circ$ و تعداد نقاط تست ۱۵ عدد است.

راندمان شبکه عصبی باید مورد ارزیابی قرار گیرد. چندین پارامتر آماری بدین منظور مورد استفاده قرار گرفته است. ریشه خطای میانگین مربعات ($RMSE$) (عدم قطعیت)، خطای استاندارد (SE) و ضریب تعیین (CE) از این دسته از پارامترها هستند که به شکل روابط (۱۴) تا (۱۶) محاسبه می‌شوند.

$$RSME = \left[\left(\frac{1}{N} \right) \left(\sum_{i=0}^n u^R - u^P \right)^2 \right] \quad (14)$$

$$SE = \frac{RSME}{\sqrt{N}} \quad (15)$$

$$CE = 1 - \frac{\left(\sum_{i=0}^n u^R - u^P \right)^2}{\left(\sum_{i=0}^n u^R - M \right)^2} \quad (16)$$

هرچه قدر مقدار عدم قطعیت و خطای استاندارد پارامتر مورد نظر به صفر نزدیک‌تر باشد شبکه عصبی طراحی شده کارایی بهتری را برای پیش‌بینی داده‌های تست دارد. برای یک الگوریتم شبکه عصبی مناسب، ضریب تعیین نزدیک به یک است و محدوده‌ای بین صفر تا یک را داراست. اگر این پارامتر یک باشد همبستگی خوبی بین داده‌های نمونه اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده وجود دارد. درواقع اگر ضریب تعیین صفر باشد معادله رگرسیون نمی‌تواند در پیش‌بینی مقادیر مورد نظر کمکی کند. لازم به ذکر است که مقدار ضریب تعیین برای زاویه پیچ به دلیل این که داده‌های تست همگی دارای یک مقدار ($\alpha=0^\circ$) هستند قابل محاسبه نیست.

نتایج پارامترهای آماری حاصل از کالیبراسیون کاوشگر پنج‌حفره با شبکه عصبی تابع شعاعی با نتایج دو روش رایج کالیبراسیون درون‌یابی خطی و انطباق منحنی چندجمله‌ای از مرتبه ۵ در جدول ۱ جهت مقایسه و مشاهده برتری روش شبکه عصبی مورد استفاده در مطالعه حاضر نسبت به دو روش دیگر ارائه شده‌اند.

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، مقدار عدم قطعیت و خطای استاندارد زاویه‌های پیچ و یاب برای روش شبکه عصبی کم‌تر از دو روش درون‌یابی ذکر شده است. همچنین مقدار ضریب تعیین در تخمین زاویه‌های پیچ و یاب برای روش شبکه عصبی به یک نزدیک‌تر است و می‌توان گفت که روش شبکه عصبی پیشنهادی برای کالیبراسیون زوایای پیچ و یاب کاوشگر پنج‌حفره مناسب‌تر است. در محاسبه زاویه‌های پیچ و یاب درون‌یابی خطی دارای دقت مناسب‌تری نسبت به روش انطباق منحنی چندجمله‌ای است.

مقدار عدم قطعیت و خطای استاندارد برای محاسبه ضرایب فشار کل و استاتیک در روش شبکه عصبی کم‌تر از روش درون‌یابی خطی و انطباق منحنی چندجمله‌ای است. همچنین مقدار ضریب تعیین در تخمین ضریب فشار کل و استاتیک برای روش شبکه عصبی به یک نزدیک‌تر است که

تاکنون در تعداد نسبتاً کمی از مطالعات انجام شده بر روی جریان حول سیلندر مربعی سه‌بعدی از کاوشگر پنج‌حفره استفاده شده است و روی نتایج به‌دست‌آمده از این کاوشگر برای کمیت‌هایی مثل فشار کل و فشار استاتیک کم‌تر بحث شده است. لذا در مطالعه حاضر سعی شده است الگوهای مورد اشاره در بالا با استفاده از کاوشگر پنج‌حفره بررسی شود. همچنین با استفاده از کاوشگر مذکور تغییرات فشار کل، فشار استاتیک و ... در دنباله پشت سیلندر بررسی می‌شود.

۴-۱- صفحات X ثابت

۴-۱-۱- گردابه نوک و پایه

توزیع ورتیسیتته ω_x که با رابطه (۱۷) مشخص می‌شود، در صفحات ۱۰، ۷/۵ و $X/D = 5$ در شکل ۸ نشان داده شده است.

$$\omega_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_y}{\partial z} - \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) \quad (17)$$

پدیده قابل‌مشاهده، دو جفت گردابه با چرخش عکس هم است که یکی از آن‌ها در نزدیکی انتهای آزاد سیلندر و دیگری در نزدیکی صفحه تخت ایجاد می‌شوند. اولی به‌صورت ذاتی با جریان رو به پایین ناشی از انتهای آزاد سیلندر متصل و دومی در ارتباط با جریان رو به بالای پایه سیلندر است که به عنوان گردابه نوک و گردابه پایه معرفی می‌شوند. با وجود گردابه‌های نوک، دو چرخش عکس هم ایجاد شده و به موجب آن میدان سرعت به سمت پایین به وجود می‌آید که به عنوان جریان رو به پایین از آن یاد می‌شود (شکل ۹) [۱۴]. جریان رو به پایین و اثرات آن با نزدیک شدن به پایه سیلندر ضعیف می‌شود. همین‌طور از پایه سیلندر به طرف بالا جریان رو به بالا وجود دارد که با نزدیک شدن به انتهای آزاد سیلندر ضعیف‌تر می‌شود. مشاهده گردابه‌های پایه برای اولین بار به علت شیب پیدا کردن گردابه‌های کارمن نسبت به محور سیلندر در نزدیکی صفحه تخت توسط تاناکا و موراتا [۲۷] گزارش شده است. یکی از دلایل ممکن برای کاهش یافتن جریان رو به بالا، ناچیزبودن اثر لایه مرزی بر روی صفحه تخت است.

با افزایش ضخامت لایه مرزی، جریان رو به بالا قوی‌تر شده و قدرت گردابه‌های پایه افزایش می‌یابند. البته باید توجه داشت که جریان رو به بالا و گردابه پایه سیلندر با گردابه نعل‌اسبی دو موضوع متفاوت هستند. هم‌زمان با دورشدن از سیلندر مرکز گردابه‌های نوک و گردابه‌های پایه از محور مرکزی دنباله سیلندر دور می‌شوند و گردابه‌ها از نظر عرضی و در جهت محور Z توسعه می‌یابند.

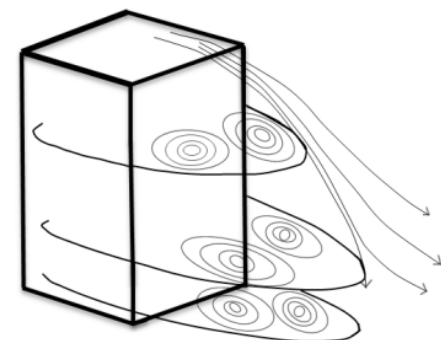
با افزایش فاصله از سیلندر علاوه بر این که قدرت گردابه (اندازه ورتیسیتته) کاهش می‌یابد، مرکز گردابه‌های نوک از انتهای آزاد دور شده و به صفحه تخت نزدیک می‌شوند و بالعکس گردابه‌های پایه از صفحه تخت دور شده و به آرامی بالا می‌آیند که به دلیل رشد لایه مرزی است. این الگوی جریان مشاهده‌شده کاملاً با ساختار ارائه‌شده ریزش گردابه‌های نوک و پایه سیلندر توسط وانگ و همکاران [۲۶] در شکل ۷ (ب) مطابقت دارد. البته در

اساس آن فرایند کالیبراسیون را انجام داد که این روش خود به مطالعه جداگانه‌ای نیازمند است.

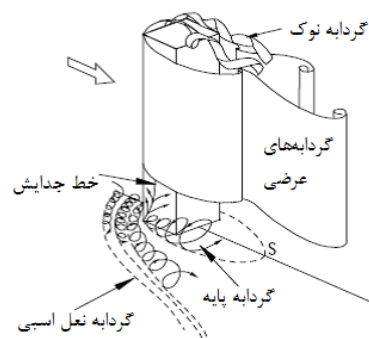
۴- تحلیل و بررسی نتایج

در این بخش نتایج به‌دست‌آمده برای بررسی ساختار جریان حول سیلندر مربعی متصل به صفحه تخت در اتاق آزمون تونل ارائه شده‌اند. زمان داده‌برداری برای هر نقطه حدود ۱۲ ثانیه است. نتایج به تفکیک و به ترتیب صفحات X ، Y و Z ثابت ارائه شده‌اند.

الگوی طرح‌واره سه‌بعدی از جریان پشت سیلندر مربعی سه‌بعدی (متصل به کف) توسط کاوایی و همکاران [۲۵] ارائه شده است (شکل ۷ الف)). همان‌گونه که از این شکل پیداست، وسعت ناحیه جریان برگشتی با دور شدن از میانه سیلندر به سمت انتهای آزاد و نیز پایه سیلندر کاهش می‌یابد. همچنین در این شکل، نحوه جدایش جریان از وجوه کناری و بالایی سیلندر نیز مشخص است. انواع گردابه‌های جداشده از سیلندر مربعی سه‌بعدی به‌صورت طرح‌واره توسط وانگ و همکاران [۲۶] ارائه شده است (شکل ۷ ب)). همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است سه نوع گردابه از سیلندر مربعی سه‌بعدی جدا می‌گردند. دو گردابه طولی که اصطلاحاً گردابه پایه و گردابه نوک نامیده می‌شوند و نیز گردابه‌های عرضی که اصطلاحاً گردابه‌های کارمن نامیده می‌شوند.



الف

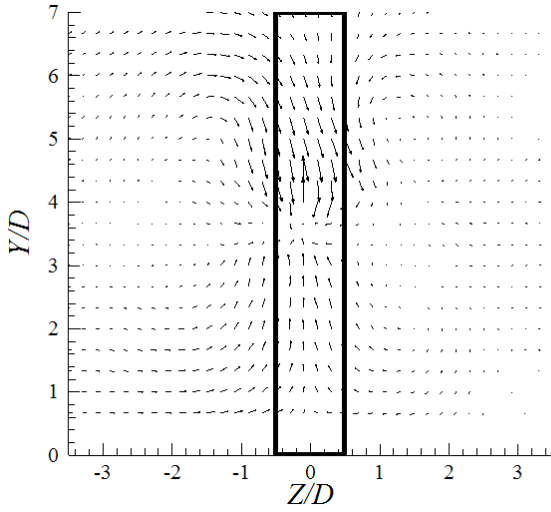


ب

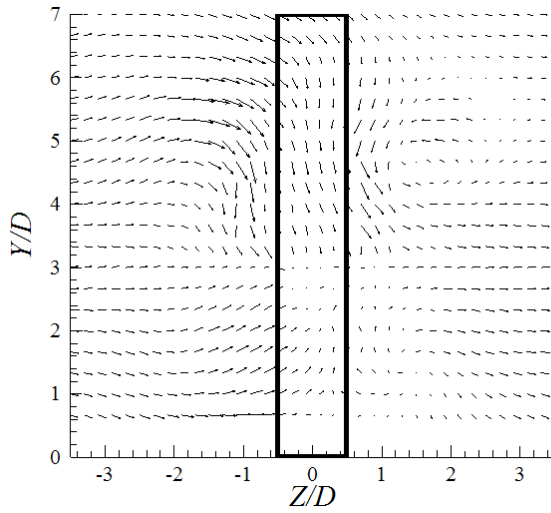
Fig. 7. 3D flow pattern around a finite length square cylinder; a: kawai et. al. study [25]; b: Wang et. al. [26]

شکل ۷: الگوی سه‌بعدی جریان پشت سیلندر مربعی با ارتفاع محدود (الف) مطالعه کاوایی و همکاران [۲۵]، (ب) مطالعه وانگ و همکاران [۲۶]

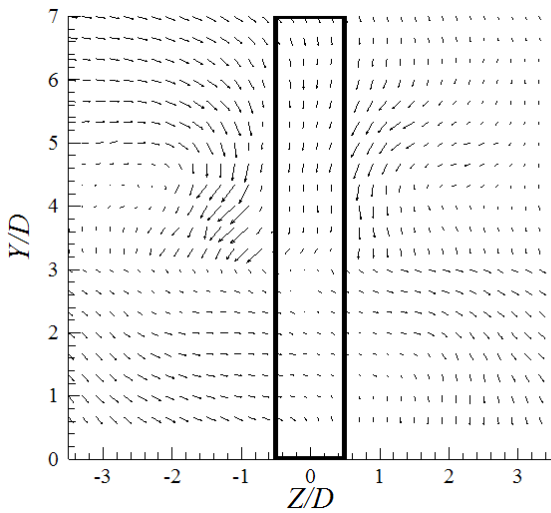
صورتی که ضخامت لایه مرزی ناچیز باشد جابه‌جایی گردابه‌های پایه ناچیز بوده و تقریباً ثابت باقی می‌مانند.



الف



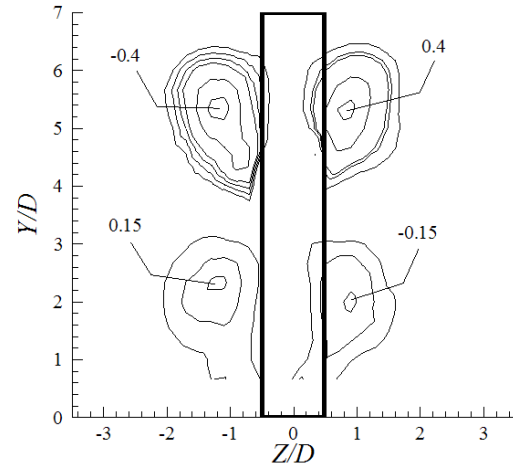
ب



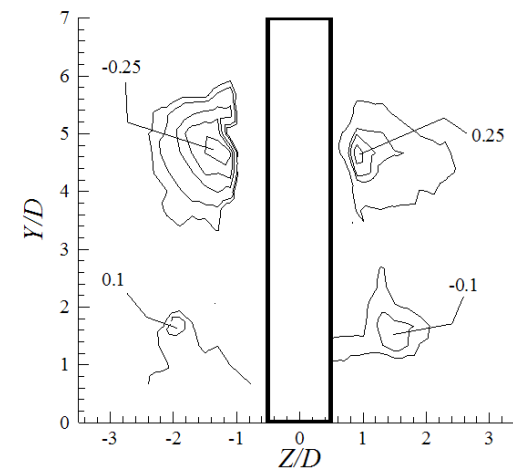
پ

Fig. 9. Velocity vectors (scale: 0.6) in planes: a: $X/D=5$; b: $X/D=7.5$; c: $X/D=10$

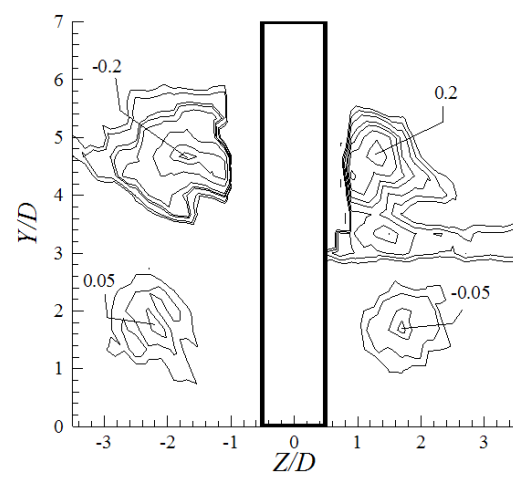
شکل ۹: بردارهای سرعت با مقیاس ۰/۶ در صفحات (الف) $X/D=5$ ، (ب) $X/D=7.5$ ، (پ) $X/D=10$



الف



ب

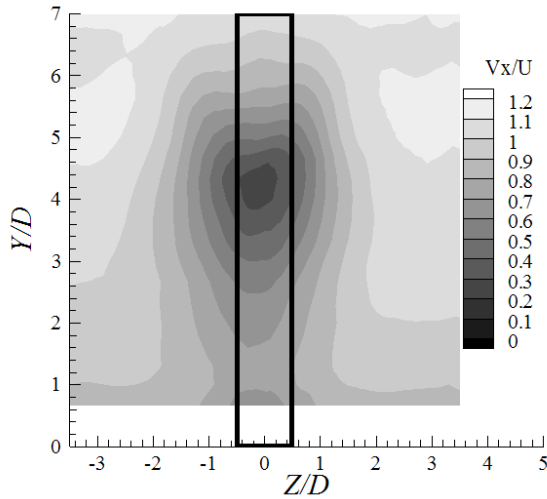


پ

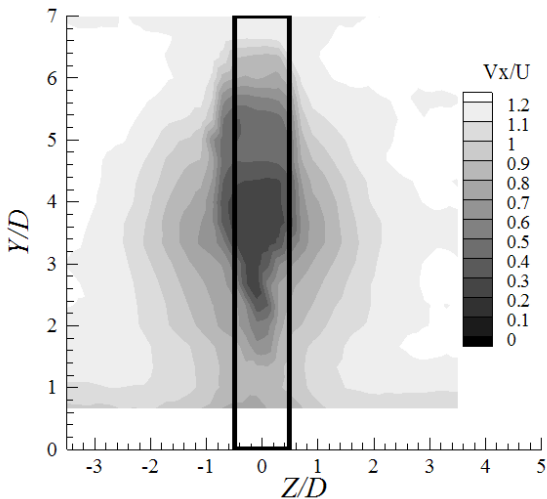
Fig. 8. Tip and base vortices in planes: a: $X/D=5$; b: $X/D=7.5$; c: $X/D=10$

شکل ۸: گردابه‌های نوک و پایه در صفحات (الف) $X/D=5$ ، (ب) $X/D=7.5$ ، (پ) $X/D=10$

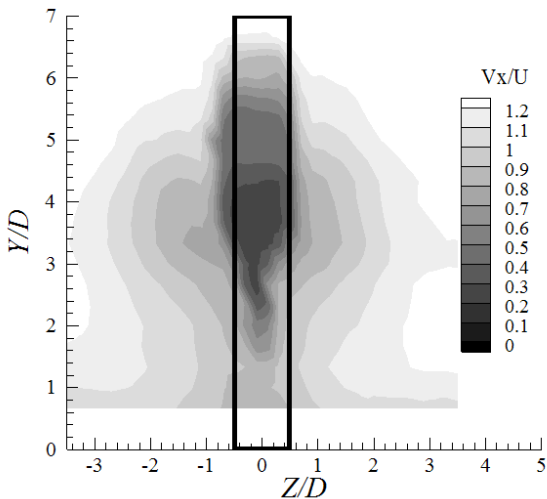
۴-۱-۲- توزیع سرعت متوسط



الف



ب



پ

Fig. 10. Contours of mean value of X-velocity normalized with up-stream velocity: a: $X/D=5$; b: $X/D=7.5$; c: $X/D=10$

شکل ۱۰: توزیع سرعت متوسط در جهت جریان نسبت به سرعت جریان بالادست در صفحات (الف) $X/D=5$ ، (ب) $X/D=7.5$ ، (پ) $X/D=10$

توزیع مؤلفه سرعت متوسط در جهت جریان در صفحات ۱۰، $7/5$ و 5 در شکل ۱۰ نشان داده شده است. سرعت‌ها در این شکل با سرعت بالادست بی‌بعد شده‌اند. همان‌طور که در توزیع سرعت بدون بعد نشان داده شده است، دو لایه برشی جداشده از کناره‌های مدل، جریان را به سمت دور از مدل سوق می‌دهند. مطابق انتظار، سرعت در ناحیه دنباله کم‌تر از سایر نقاط است و مکان لایه‌های برشی جداشده از دو طرف سیلندر را می‌توان در محل وقوع سرعت بیشینه جستجو نمود. با افزایش فاصله از سیلندر مقدار کمینه سرعت افزایش می‌یابد و ناحیه‌ای که در آن محدوده سرعت به سرعت آزاد نزدیک‌تر است، بزرگ‌تر می‌شود؛ چرا که در ناحیه متأثر از مدل، سطح مقطع موثر جریان کم شده و لازم است در نقاطی از میدان جریان، سرعت از مقدار سرعت بالادست فراتر برود تا بقای جرم برقرار شود. همچنین باید توجه نمود که در جریان حول سیلندر مربعی، همان‌طور که در شکل ۷ (الف) مشاهده می‌شود، یک لایه برشی از بالای سیلندر جدا می‌شود که پس از فرود آمدن در ناحیه دنباله، اصطلاحاً به سمت مدل پیچیده و جریان را به سمت مدل هدایت می‌نماید که می‌تواند باعث پهن‌تر شدن ناحیه دنباله در این صفحه با دور شدن از سیلندر شود. همان‌گونه که از شکل ۱۰ مشهود است، با نزدیک شدن به انتهای آزاد سیلندر پهنای ناحیه دنباله که متأثر از حضور مدل است و نیز شدت اثرگذاری مدل بر جریان به دلیل اثرات لایه برشی جداشده از انتهای آزاد سیلندر کم‌تر می‌شود.

نکته دیگری که به خوبی در شکل ۱۰ نشان داده شده است، این است که با افزایش فاصله از سیلندر به دلیل فرود لایه برشی، ارتفاع ناحیه دنباله کاهش می‌یابد ولی از نظر عرضی این محدوده در جهت Z گسترش می‌یابد که دلیل آن را هم می‌توان دور شدن لایه‌های برشی جداشده از کناره سیلندر و از خط مرکزی دنباله عنوان کرد. شکل ۱۰ (الف) و (ب) نشان می‌دهند که خط $Y/D=7$ که هم راستای سقف مدل است و حتی خط $Y/D=6/5$ در این صفحه، خیلی متأثر از حضور مدل نیست. این مطلب می‌تواند کمک نماید تا محدوده داده‌برداری، محدودتر شود، یعنی مثلاً می‌توان گفت در چنین هندسه‌ای داده‌برداری در صفحه $X/D=7/5$ و در خطوط ۸ و $Y/D=7/5$ لزومی ندارد. این کار می‌تواند زمان لازم برای داده‌برداری را کاهش دهد.

۴-۱-۳- توزیع فشار کل

شکل ۱۱ توزیع فشار کل پشت سیلندر در صفحات ۱۰، $7/5$ و 5 را نشان می‌دهد. فشار در تمامی نقاط نسبت به فشار کل جریان بالادست بی‌بعد شده است. با توجه به شکل ۱۱ به نظر می‌رسد خطوط فشار ثابت می‌توانند مرز ناحیه دنباله را که در واقع مکانی است که مقدار فشار بی‌بعد به یک می‌رسد را نشان دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله از سیلندر مقدار کمینه توزیع فشار کل به دلیل وارد شدن بیش‌تر لایه برشی جداشده از انتهای آزاد سیلندر به ناحیه دنباله افزایش یافته است. همچنین

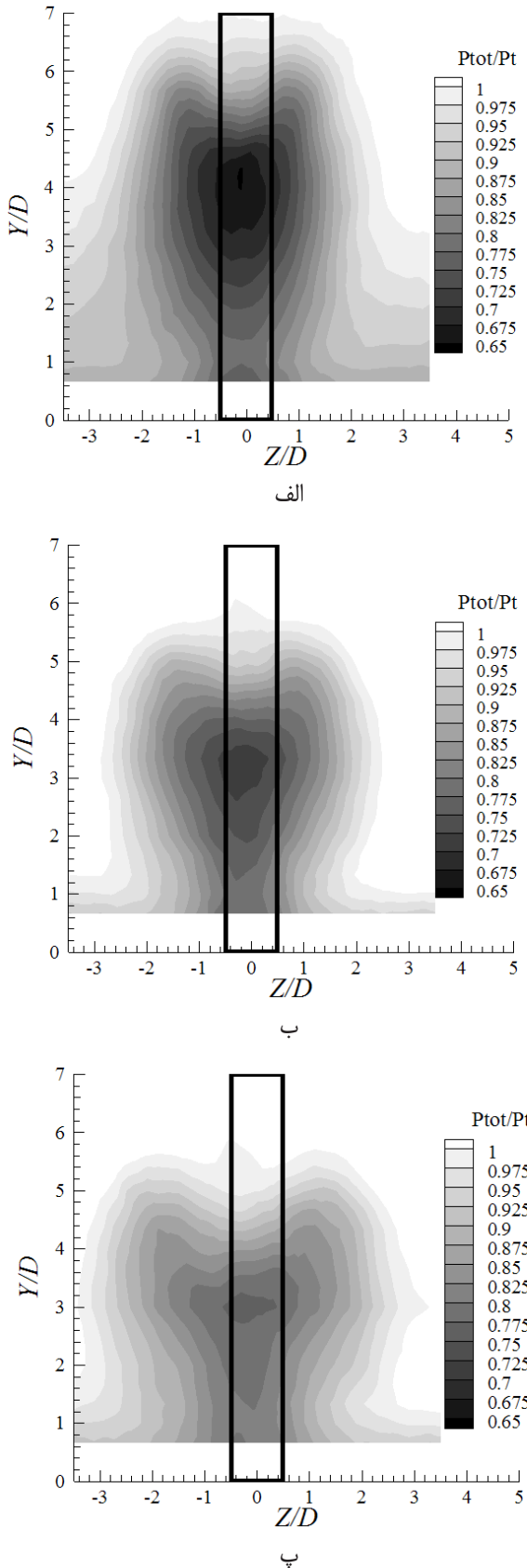


Fig. 11. Total pressure contours normalized with upstream flow total pressure: a: $X/D=5$; b: $X/D=7.5$; c: $X/D=10$

شکل ۱۱: توزیع فشار کل نسبت به فشار کل جریان بالادست در صفحات $X/D=10$ (پ)، $X/D=7/5$ (ب)، $X/D=5$ (الف)

ارتفاع ناحیه دنباله و پهنای دنباله با افزایش فاصله از سیلندر کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد خطوط فشار ثابت می‌توانند مرز ناحیه دنباله را که در واقع مکانی است که مقدار فشار بی‌بعد به یک می‌رسد را نشان دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله از سیلندر مقدار کمینه توزیع فشار کل به دلیل وارد شدن بیش‌تر لایه برشی در جهت Z زیاد می‌شود که کاملاً تاییدکننده رفتار دیده‌شده در توزیع مؤلفه سرعت متوسط در جهت جریان است.

۴-۱-۴ فشار استاتیک

شکل ۱۲ توزیع فشار استاتیک بی‌بعد شده نسبت به فشار استاتیک پشت سیلندر را در صفحات ۱۰، ۷/۵ و ۵ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در یک صفحه X ثابت، نواحی که گردابه‌های نوک و گردابه‌های پایه حضور دارند، فشار استاتیک در آن نقاط کمینه است. با دور شدن از سیلندر مقدار افزایش فشار دینامیکی نسبت به افزایش فشار کل بیش‌تر است که خود دلیلی بر این است که فشار استاتیک با دور شدن از سیلندر کم‌تر می‌شود.

۴-۲ صفحات Y ثابت

۴-۲-۱ میدان فشار کل

شکل ۱۳، توزیع فشار کل بی‌بعد شده نسبت به فشار کل جریان بالادست را برای صفحات ۱، ۳/۵ و ۶ نشان می‌دهد.

در این مطالعه پیشنهاد شده است که توسعه محدوده دنباله با استفاده از خطوط فشار کل ثابت در پشت سیلندر (مکان‌هایی با فشار بی‌بعد برابر با یک) پیش‌بینی شود. پهنای ناحیه دنباله در صفحه میانی ($Y/D=3/5$) پشت سیلندر دارای بیش‌ترین وسعت است و جریان در فاصله بیش‌تری از $Z/D=0$ به شرایط جریان آزاد می‌رسد. به دلیل جریان قوی رو به پایین و برخورد آن با جریان عرضی و جلوگیری از توسعه جریان عرضی، پهنای ناحیه دنباله در نزدیکی انتهای آزاد سیلندر کاهش می‌یابد. همچنین به دلیل برخورد جریان رو به بالای ایجادشده توسط گردابه‌های پایه سیلندر با جریان عرضی، ناحیه دنباله در نزدیکی پایه سیلندر کوچک‌تر از میانه سیلندر است اما این کاهش پهنای ناحیه دنباله کم‌تر از صفحه نزدیک به انتهای آزاد سیلندر است که کاملاً با الگوی جریان سه‌بعدی ارائه‌شده در شکل ۷ (الف) مطابقت دارد.

۴-۲-۲ خطوط جریان و توزیع سرعت متوسط در جهت جریان

خطوط جریان در شکل ۱۴ برای صفحات ۱، ۳/۵ و ۶ نشان داده شده است. موضوع قابل‌توجه در توزیع خطوط جریان این است که با دور شدن از میانه سیلندر خطوط جریان به سمت خط مرکزی صفحات پشت سیلندر همگرا می‌شوند. البته این الگوی جریان در نزدیکی انتهای آزاد سیلندر بیش‌تر از دیگر مناطق رخ می‌دهد چون که جریان رو به پایین برای متوقف کردن جریان عرضی مؤثرتر از جریان رو به بالای نزدیک صفحه

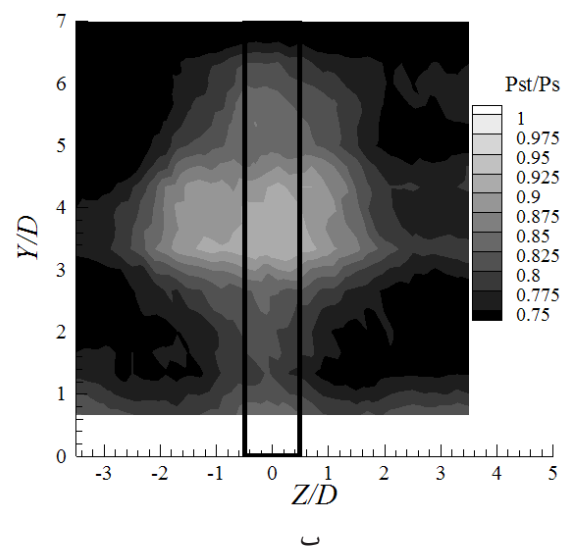
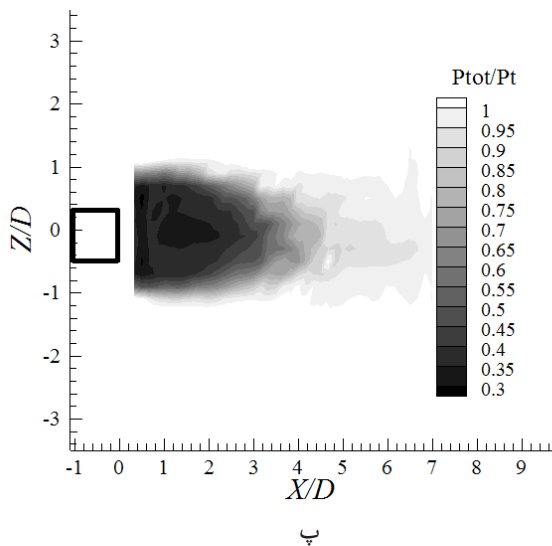
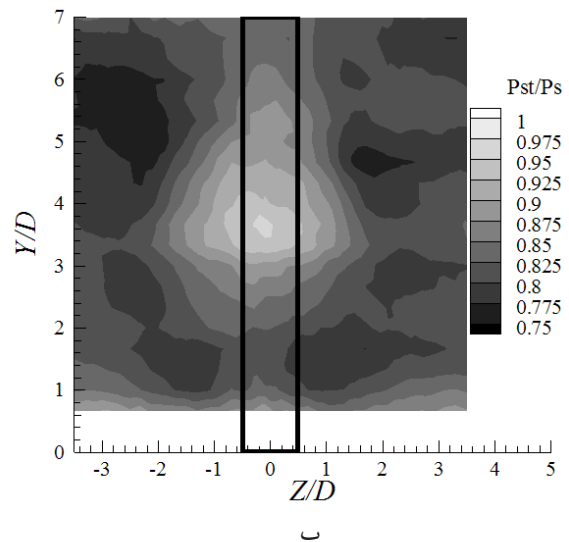
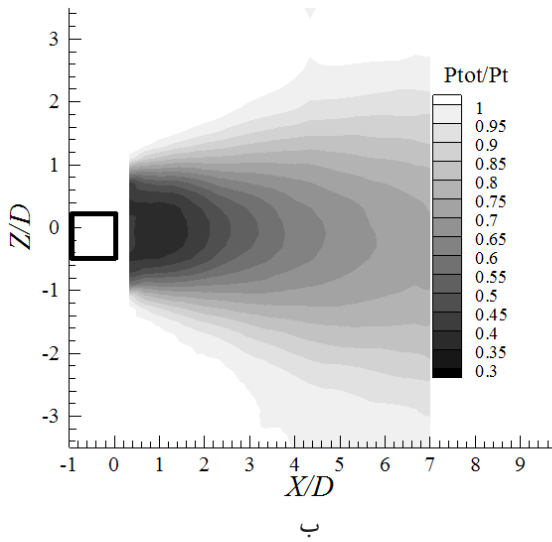
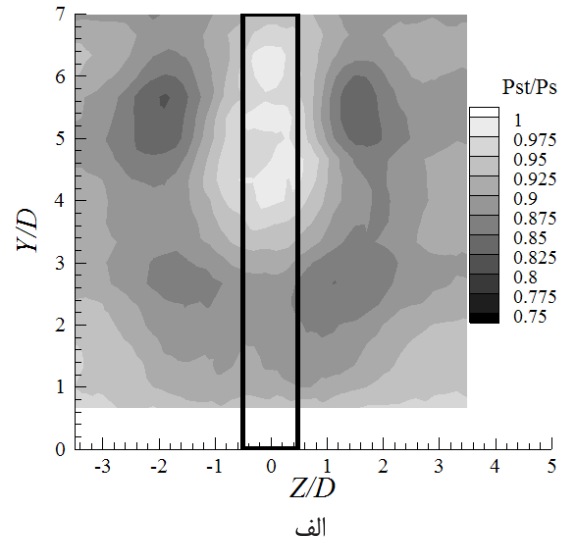
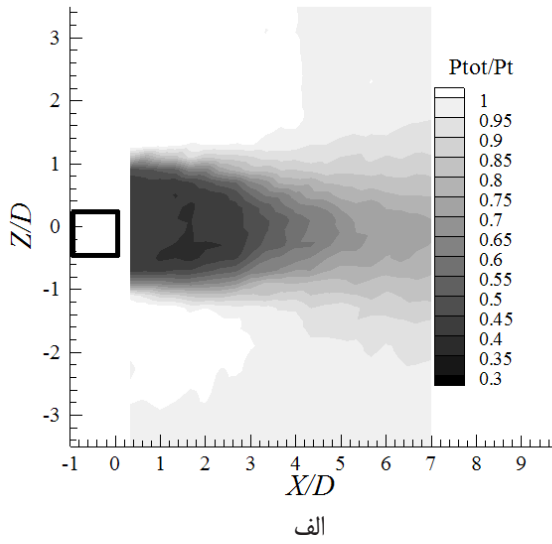


Fig. 13. Static pressure contour normalized with upstream flow static pressure: a: $Y/D=1$; b: $Y/D=3.5$; c: $Y/D=6$

شکل ۱۳: توزیع فشار استاتیکی بی بعد شده با فشار استاتیکی جریان بالادست در صفحات (الف) $Y/D=1$ ، (ب) $Y/D=3.5$ ، (پ) $Y/D=6$

Fig. 12. Static pressure contour normalized with upstream flow static pressure: a: $X/D=5$; b: $X/D=7.5$; c: $X/D=10$

شکل ۱۲: توزیع فشار استاتیکی بی بعد شده با فشار استاتیکی جریان بالادست در صفحات (الف) $X/D=5$ ، (ب) $X/D=7.5$ ، (پ) $X/D=10$

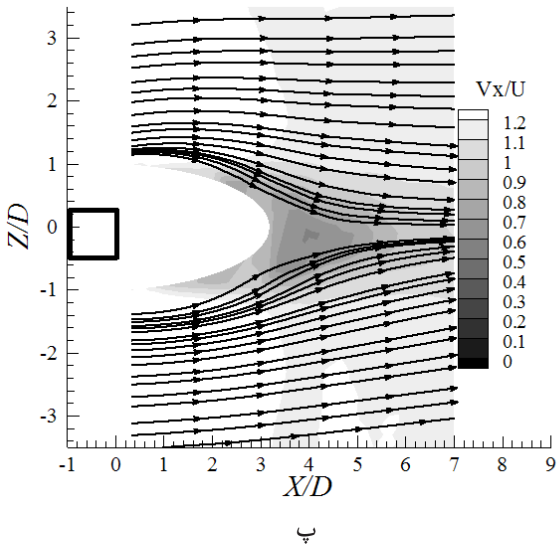
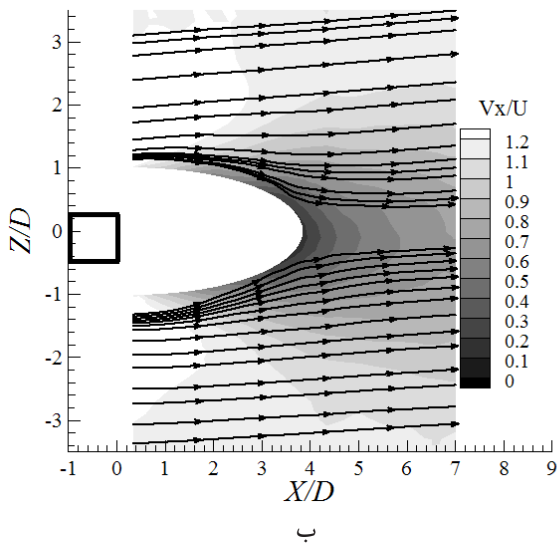
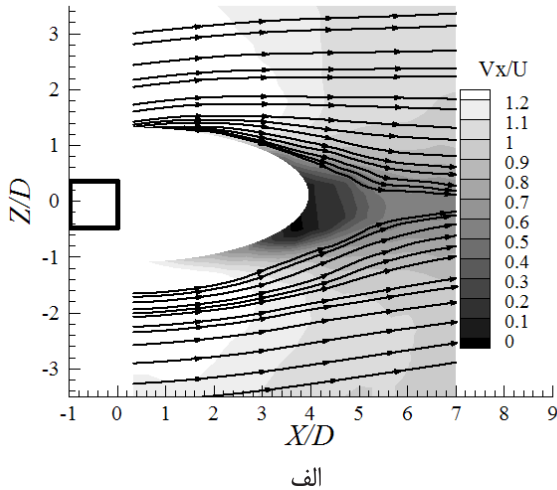


Fig. 14. Streamlines and x-velocity contours in planes: a: $Y/D=1$; b: $Y/D=3.5$; c: $Y/D=6$.

شکل ۱۴: خطوط جریان و توزیع سرعت متوسط طولی بدون بعد در صفحات (الف) $Y/D=1$ ، (ب) $Y/D=3/5$ ، (پ) $Y/D=6$

تخت است. همچنین در شکل ۱۴ چگونگی تغییرات مؤلفه سرعت بدون بعد در جهت جریان در این صفحات نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است ناحیه دنباله در صفحه میانی دارای بیشترین پهنا است و با دور شدن از میانه سیلندر کوچکتر می شود که مشابه آنچه در شکل ۷ (الف) نشان داده شده است؛ این کاهش با نزدیک شدن به انتهای آزاد سیلندر بیشتر از بقیه نواحی است. علت آن را هم می توان نفوذ لایه برشی جدا شده از انتهای آزاد سیلندر به ناحیه دنباله عنوان کرد (شکل ۷ (الف)) که از گسترش عرضی لایه های برشی جدا شده از کناره های سیلندر جلوگیری می نماید.

۴-۳- صفحات Z ثابت

۴-۳-۱- بردارهای سرعت

در شکل ۱۵ (الف) میدان جریان در صفحه مرکزی دنباله نشان داده شده است. در پشت سیلندر ناحیه ای وجود دارد که زاویه پیچ یا یو جریان خارج از محدوده کالیبراسیون کاوشگر پنج حفره است.

به همین دلیل در آن نقاط بردارهای سرعت قابل محاسبه نیستند و این ناحیه در شکل با رنگ سفید نشان داده شده است. شاید بتوان گفت منطقه مرزی بین بردارهای سرعت و ناحیه سفید، مرز ناحیه جریان برگشتی را تعیین می نماید. جریان رو به پایین تقریباً بعد از انتهای آزاد سیلندر شروع شده و محل برخورد جریان رو به بالا و جریان رو به پایین در نزدیکی میانه سیلندر است. بردارهای رسم شده مسیر لایه برشی جدا شده از انتهای آزاد سیلندر را که در شکل ۷ (الف) نیز مشهود است، نشان داده اند. پرتاب شدن جریان از روی انتهای آزاد سیلندر، پس از برخورد به لبه جلویی سیلندر باعث ایجاد یک خلأ بر روی انتهای آزاد سیلندر می شود که در شکل ۱۵ (الف) به خوبی نشان داده شده است. به دلیل بزرگتر بودن مؤلفه سرعت در جهت جریان نسبت به سایر مؤلفه ها، بردارهای سرعت در جهت جریان با مقیاس 0.05 رسم شده است.

۴-۳-۲- فشار کل

توزیع فشار کل که نسبت به فشار کل جریان بالادست بی بعد شده است در شکل ۱۵ (ب) نشان داده شده است. به نظر می رسد ناحیه ای که کاوشگر پنج حفره قادر به نشان دادن بردارهای سرعت نیست تقریباً منطقه ای است که فشار کل در آن کمتر از 0.06 شده است. همچنین منطقه بین فشار کل بی بعد 0.06 و 0.07 به صورت تقریبی مسیر جدایش لایه برشی از انتهای آزاد سیلندر و نفوذ آن به دنباله پشت سیلندر، که در شکل ۱۵ (الف) به وسیله بردارهای سرعت رسم شده اند را نشان می دهد.

۴-۳-۳- انحراف معیار فشار P_5 کاوشگر پنج حفره

شکل ۱۵ (پ) انحراف معیار فشار مکان حفره P_5 کاوشگر یا معیاری از نوسانات فشار در هر نقطه را نشان می‌دهد. مسیر جدانشدن لایه برشی از انتهای آزاد سیلندر و فرود آن به میدان دنباله را می‌توان در نقاطی که انحراف معیار نوسانات فشار بیشینه مقدار خود را داراست، دنبال کرد. همچنین در نزدیک صفحه تخت مقدار نوسانات فشار کمی افزایش پیدا کرده است که به دلیل تقابل بین لایه مرزی صفحه تخت و جریان رو به بالای پشت سیلندر است. پس از جدایش جریان از انتهای آزاد سیلندر، گردابه‌ای ثابت بر روی انتهای آزاد سیلندر تشکیل می‌شود که افزایش نوسانات فشار بر روی سیلندر نیز به همین دلیل است.

۵- اثر تغییر شکل انتهای آزاد سیلندر

در این قسمت نتایج مربوط به توزیع فشار کل در صفحه $X/D=5$ و بردارهای سرعت در صفحات $X/D=5$ و $Z/D=0$ برای جریان اطراف سیلندر مربعی با انتهای آزاد تخت و سیلندر مربعی با انتهای آزاد نیم بیضوی ارائه و مقایسه شده است.

۵-۱- بردارهای سرعت

در شکل ۱۶ بردارهای سرعت در صفحه $X/D=5$ برای سیلندرهای مربعی با انتهای آزاد تخت و انتهای آزاد نیم بیضوی ارائه شده است. همان طور که از شکل ۱۶ مشخص است، در سیلندر مربعی با انتهای آزاد نیم بیضوی محل برخورد جریان رو به پایین و رو به بالا در ارتفاع پایین‌تری نسبت به سیلندر مربعی با انتهای آزاد تخت رخ می‌دهد. علت این موضوع را می‌توان به نفوذ سریع‌تر لایه برشی جدانشده از انتهای آزاد به داخل ناحیه دنباله در سیلندر مربعی با انتهای آزاد نیم بیضوی نسبت داد.

در شکل ۱۷ میدان جریان در طول خط مرکزی دنباله ($Z/D=0$) نشان داده شده است. برای سیلندر مربعی با انتهای آزاد نیم بیضوی محل برخورد جریان رو به پایین و جریان رو به بالا در ارتفاع کم‌تری رخ می‌دهد. همان طور که در شکل ۱۷ مشخص است جدایش بردارهای سرعت در سیلندر مربعی با انتهای آزاد تخت در لبه جلویی سیلندر و برای سیلندر مربعی با انتهای آزاد نیم بیضوی در نزدیکی مرکز انتهای آزاد سیلندر اتفاق می‌افتد؛ همچنین شیب فرود بردارهای سرعت در سیلندر مربعی با انتهای آزاد نیم بیضوی اندکی بیش‌تر از سیلندر مربعی با انتهای آزاد تخت است.

۵-۲- بردارهای سرعت

در شکل ۱۸ توزیع فشار کل در صفحه $X/D=5$ برای سیلندر مربعی با انتهای آزاد تخت و سیلندر مربعی با انتهای آزاد نیم بیضوی ارائه شده است. در این شکل، فشار به وسیله فشار کل جریان بالادست بی‌بعد شده است. همان طور که در شکل ۱۸ نشان داده شده است، ارتفاع و پهناي ناحیه دنباله در سیلندر مربعی با انتهای آزاد نیم بیضوی به طور قابل توجهی کاهش یافته

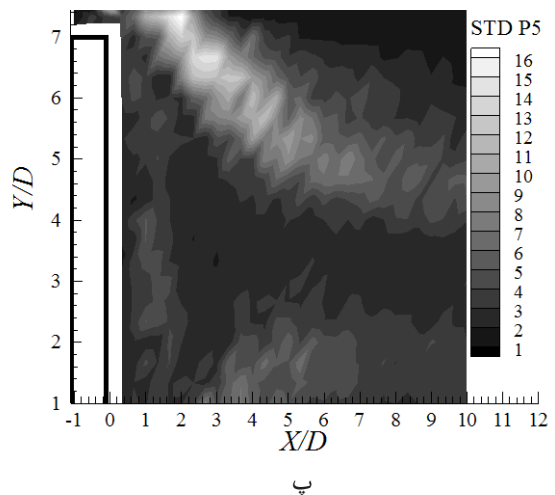
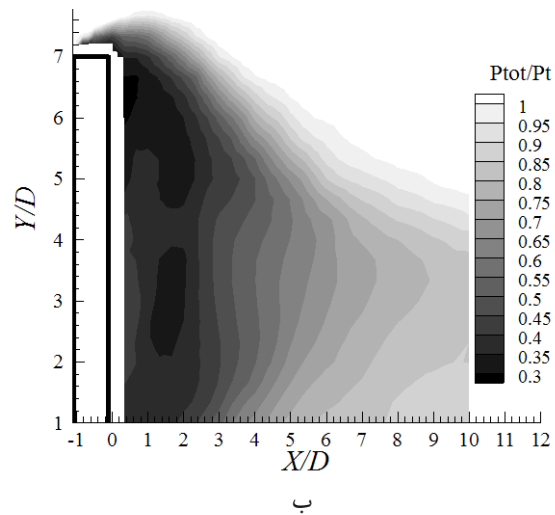
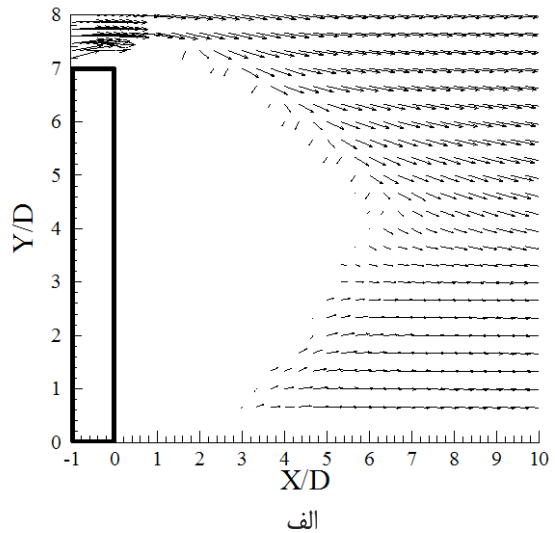


Fig. 15. Distribution for different parameters in $z=0$ plane: a: Velocity vectors; (b) Total pressure contour normalized with upstream flow total pressure; (c) Standard deviation of P_5 pressure sensor

شکل ۱۵: توزیع کمیت‌های مختلف در صفحه $Z/D=0$ ، (الف) بردارهای سرعت، (ب) نسبت فشار کل به فشار کل جریان بالادست، (پ) انحراف از معیار فشار حفره P_5 کاوشگر پنج حفره

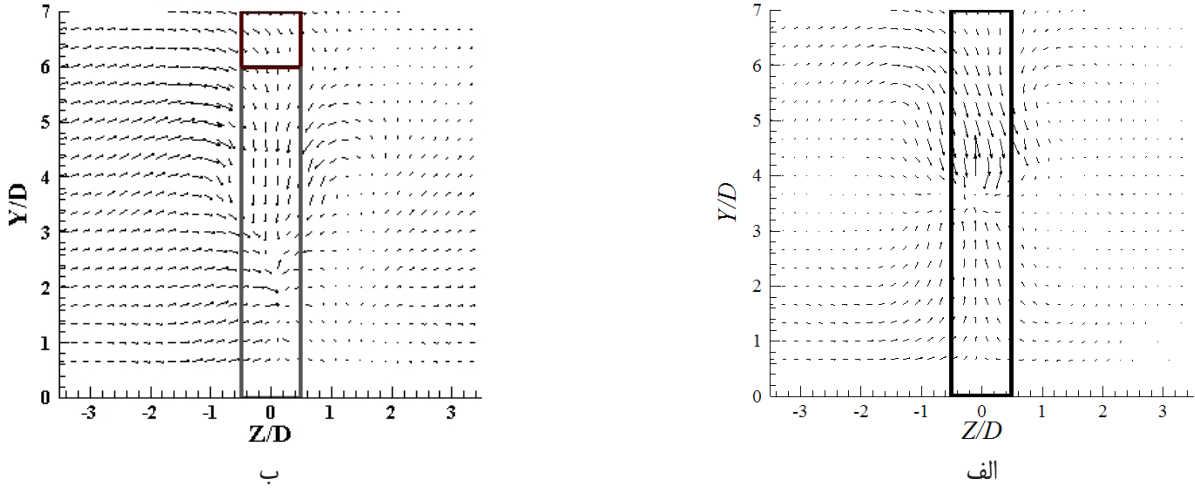


Fig. 16. Velocity vectors in $X/D=5$ plane: (a) flat free end cylinder; (b) elliptical free end cylinder.

شکل ۱۶: بردارهای سرعت در صفحه $X/D=5$: (الف) سیلندر با انتهای آزاد تخت (ب) سیلندر با انتهای آزاد نیم بیضوی

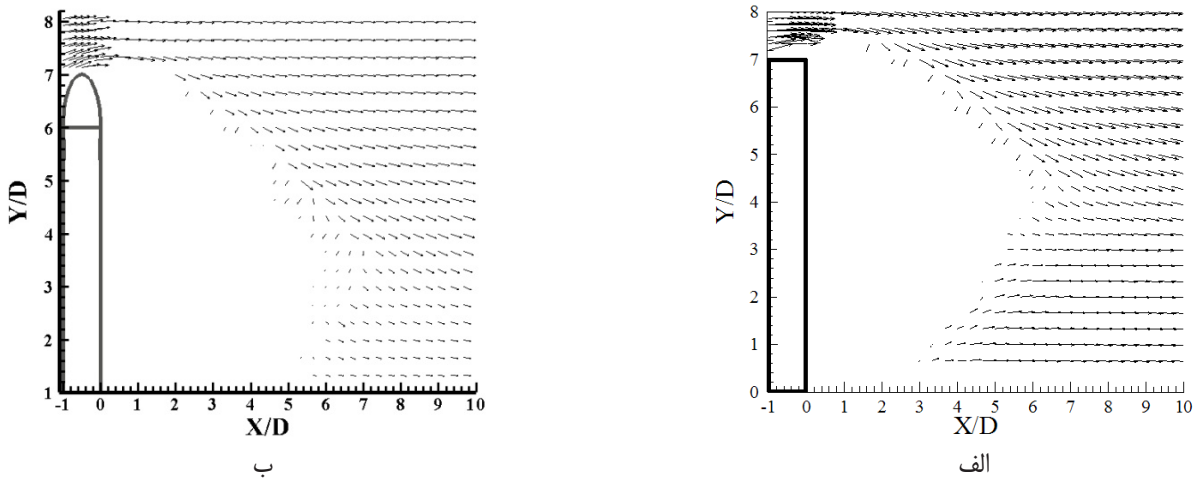


Fig. 17. Velocity vectors in $Z/D=0$ plane: (a) flat free end cylinder; (b) elliptical free end cylinder.

شکل ۱۷: بردارهای سرعت در صفحه $Z/D=0$: (الف) سیلندر با انتهای آزاد تخت (ب) سیلندر با انتهای آزاد نیم بیضوی

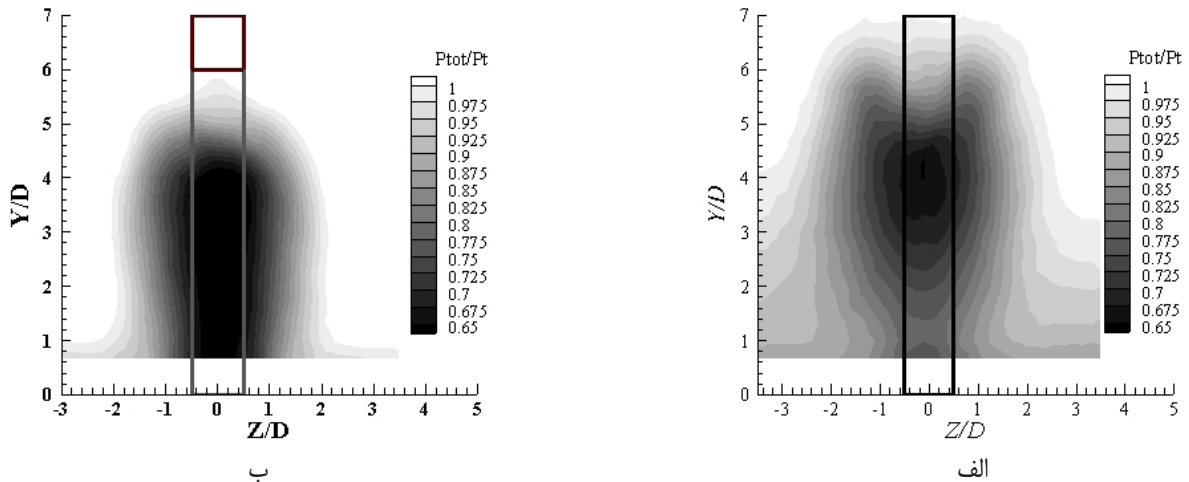


Fig. 18. Total pressure distributions in $X/D=5$ plane: (a) flat free end cylinder; (b) elliptical free end cylinder.

شکل ۱۸: توزیع فشار کل در صفحه $X/D=5$: (الف) سیلندر با انتهای آزاد تخت (ب) سیلندر با انتهای آزاد نیم بیضوی

۷- نتیجه‌گیری

مشخصات جریان پشت سیلندر مربعی با انتهای آزاد و نسبت منطری ۷ در تونل باد مادون صوت و در عدد رینولدز 10^4 توسط کاوشگر پنج‌حفره مورد بررسی قرار گرفته است. کاوشگر پنج‌حفره دارای مزایایی از قبیل ساده‌بودن تجهیز و در عین حال توانایی اندازه‌گیری هم زمان مؤلفه‌های سرعت، فشار کل و فشار استاتیک است. کاوشگر به‌وسیله تابع اساسی شعاعی شبکه عصبی کالیبره شده و نشان داده شده است که این روش نسبت به روش‌های کالیبراسیون مرسوم درون‌یابی خطی و انطباق منحنی چندجمله‌ای از مرتبه ۵ دارای دقت مناسب‌تری است. گردابه‌های نوک و پایه سیلندر با افزایش فاصله از سیلندر، از محور مرکزی سیلندر دور می‌شوند و از قدرت آن‌ها کاسته می‌شود. با افزایش فاصله از سیلندر، مرکز گردابه‌های نوک از انتهای آزاد سیلندر دور شده و مرکز گردابه‌های پایه تقریباً در فاصله ثابتی از صفحه تخت قرار می‌گیرند. جریان رو به پایین از انتهای آزاد سیلندر و جریان رو به بالای نزدیک صفحه تخت باعث کم‌شدن ناحیه دنباله پشت سیلندر مربعی در این مناطق نسبت به میانه سیلندر می‌شود که تأثیر جریان رو به پایین بیش‌تر از جریان رو به بالا است. میانگین نوسانات فشار حفره P_5 کاوشگر در صفحات عرضی، مسیر لایه برشی جداشده از انتهای آزاد سیلندر را نشان می‌دهد. نتایج اخذشده برای سیلندر با انتهای آزاد نیم‌بیضوی نشان می‌دهند که برای این هندسه جریان رو به بالا از نزدیکی کف در پشت سیلندر برای در ارتفاع پایین‌تری رخ می‌دهد. همچنین ارتفاع و پهنای دنباله در سیلندر مربعی با انتهای آزاد نیم‌بیضوی نسبت به سیلندر با انتهای آزاد تخت کاهش قابل توجهی یافته است.

منابع

- [1] Uffinger, T., I. Ali and S. Becker, "Experimental and numerical investigations of the flow around three different wall-mounted cylinder geometries of finite length", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 119 (2013): 13-27.
- [2] Wang, H. F. and Y. Zhou, "The finite-length square cylinder near wake", *Journal of Fluid Mechanics*, 638 (2009): 453-490.
- [3] Wang, H. F., Y. Zhou, C. K. Chan and K. S. Lam, "Effect of initial conditions on interaction between a boundary layer and a wall-mounted finite-length-cylinder wake", *Physics of Fluids*, 18.6 (2006): 065106.
- [4] Sattari, P., J. A. Bourgeois and R. J. Martinuzzi, "On the vortex dynamics in the wake of a finite surface-mounted square cylinder", *Experiments in Fluids*, 52.5 (2011): 1149-1167.
- [5] Sheridan, J W., J. Welsh, M. C. Hourigan and M. Thompson, "Longitudinal vortex structures in a cylinder wake", 1994: 2883-2885.
- [6] Pattenden, R. J., S. R. Turnock and X. Zhang,

است و فشار اطراف ناحیه دنباله به‌طور محسوسی افزایش یافته است. با این که وسعت ناحیه دنباله کاهش یافته است اما فشار کمینه هم از نظر مقداری کم‌تر شده و هم وسعت آن افزایش یافته است.

۶- بررسی عدم قطعیت آزمایش

از داده‌های تجربی اغلب برای تکمیل آنالیزهای مهندسی، به عنوان اساسی برای طراحی استفاده می‌شود. همه داده‌های یک آزمایش کاملاً مناسب نیستند پس اعتبارسنجی داده‌ها باید قبل از ارائه نتایج آزمایش برای طراحی صورت گیرد. آنالیز عدم قطعیت روشی است که برای بررسی کیفیت داده‌ها از نظر اعتبارسنجی و دقت آزمایش انجام می‌گیرد. آنالیز عدم قطعیت اغلب برای طراحی آزمایش مؤثر است. یک راه برای پیدا کردن مقدار عدم قطعیت برای هر متغیر، انجام مکرر هر مرحله اندازه‌گیری است اما تکرار اندازه‌گیری معمولاً غیرممکن است. در بسیاری از کاربردها، داده‌برداری کافی جهت ایجاد نمونه آماری مناسب غیرممکن بوده و به هزینه و زمان زیادی نیاز دارد.

۶-۱ آنالیز عدم قطعیت در محاسبات

اگر فرض شود پارامترهای اندازه‌گیری در آزمایشگاه به‌صورت متغیرهای مستقل x_1, x_2, \dots, x_n هستند آنگاه عدم قطعیت هر متغیر اندازه‌گیری شده مستقل را به‌صورت u_i تخمین می‌زنند. با فرض این که R در حالت ریاضی به‌صورت $R=R(x_1, x_2, \dots, x_n)$ بیان شود، عدم قطعیت نسبی R (u_R) به ازای چندین متغیر به‌صورت رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود [۲۸].

$$u_R = \pm \left[\left(\frac{x_1}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial x_1} \cdot u_1 \right)^2 + \left(\frac{x_2}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial x_2} \cdot u_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{x_n}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial x_n} \cdot u_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

جدول ۲ عدم قطعیت نسبی مربوط به متغیرهای مورد بررسی آزمایش را ارائه می‌دهد.

جدول ۲: عدم قطعیت پارامترهای آزمایش

Table 2. Uncertainty of various parameters

پارامتر	عدم قطعیت نسبی (%)	پارامتر	عدم قطعیت نسبی (%)
u_{p1}	۰/۱۵	u_{cps}	۳/۲
u_{p2}	۲/۰۴	u_{cpt}	۴/۵
u_{p3}	۰/۹۱	u_α	۰/۶۱
u_{p4}	۲/۶۶	u_β	۳/۲۵
u_{p5}	۰/۸۲	u_U	۳/۹۷

- square cylinders with cut-corners at the front edges”, *Exp Fluids*, 2014.
- [18] Javadi, K., “On the Turbulent Flow Structures over a Short Finite Cylinder Numerical Investigation”. *Proceedings of the International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow*, 2014.
- [19] Park, C.W., S.J Lee, “Effects of free-end corner shape on flow structure around a finite cylinder”, *Journal of Fluids and Structures*, (2004): 141-158.
- [20] Farrell, C., S. Carrasquel, O. Guven and X. Patel, “Effect of wind tunnel walls on the flow past circular cylinder and cooling tower models”, *J. Fluids Eng.*, 1977.
- [21] Moody, J. and J. Darke, “Fastlearning in networks of locally-tuned processing units”. *Neural Computation*, 1, 281-294, (1989): 281-294.
- [22] Lowe, D. and D. Broomhead, “Multivariable functional interpolation and adaptive networks”, *Complex Syst.* 2 (1988): 321-355.
- [23] Dayhoff, J. E., “Neural Network Architectures: an Introduction”. *Van Nostrand Reinhold*, 1990.
- [24] Huang, S. H. and C. Hong, “Artificial neural networks in manufacturing: concepts, applications, and perspectives”, *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol. Part A* 17 (1994): 212-228.
- [25] Kawai, H. and Y. Ohashi, “Three Dimensional Structures behind a Square Prism”. *The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*, November 8-12, 2009, Taipei, Taiwan.
- [26] H. F. Wang, Y. Chan, W. Wong, K. Lam, “Flow Structure Around A Finite-Length Square Prism”, *15th Australasian Fluid Mechanics Conference*. The University of Sydney, Sydney, Australia 13-17 December, 2004.
- [27] Shuji Tanaka, S. M., “An investigation of the wake structure and aerodynamic characteristic of a finite circular cylinder”, (1999): 178-187.
- [28] Fox, R. W., A. T. McDonald’s, “introduction to fluid mechanics, analysis of experimental uncertainty”, fluid mechanics, Eight edition, (2011): 829-836.
- “Measurements of the flow over a low-aspect-ratio cylinder mounted on a ground plane”, *Experiments in Fluids*, 39.1 (2005): 10-21.
- [7] Iungo, G. V., L. M. Pii and G. Buresti, “Experimental investigation on the aerodynamic loads and wake flow features of a low aspect-ratio circular cylinder”, *Journal of Fluids and Structures*, 28 (2012): 279-291.
- [8] Shiki akamoto, Y. S., “Vortex Shedding From a Circular Cylinder of Finite Length Placed on a Ground Plane”, *Journal of Fluids Engineering*, (1992): 512-521.
- [9] Sumner, D. and J. L. Heseltine, “O. Dansereau, Wake structure of a finite circular cylinder of small aspect ratio”, *Experiments in Fluids*, 37.5 (2004): 720-730.
- [10] Sumner, D. and J. Heseltine, “Tip vortex structure for a circular cylinder with a free end”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96.6-7 (2008): 1185-1196.
- [11] Roh, S. and S. Park, “Vortical flow over the free end surface of a finite circular cylinder mounted on a flat plate”, *Experiments in Fluids*, 34.1 (2003): 63-67.
- [12] Adaramola, M. S., O. G. Akinlade, D. Sumner, D. J. Bergstrom and A. J. Schenstead, “Turbulent wake of a finite circular cylinder of small aspect ratio”, *Journal of Fluids and Structures*, 22.6-7 (2006): 919-928.
- [13] Sumner, D., “Two circular cylinders in cross-flow”, A review, *Journal of Fluids and Structures*, 26.6 (2010): 849-899.
- [14] Park, C. W., S. J. Lee, “Free end effects on the near wake flow structure behind a finite circular cylinder”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 88.2-3 (2000): 231-246.
- [15] Krajnovic, S., “Flow around a tall finite cylinder explored by large eddy simulation”, *J.Fluid Mech*, (2011): 294-317.
- [16] Movahedi, A., A. Sohankar and M. Dehghan Manshadi, “Experimental investigation of turbulent flow around a 3d square cylinder with wall effect”, *Sharif Mechanical Engineering Journal*, 30-3.1 (2014): 65-77.
- [17] Wang, J. J., G. H Sheng and N. Li, “Drag reduction of

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

S. Fathi, A. A. Dehghan, M. Dehghan Manshadi, A. Movahedi, “Experimental Investigation of Flow Around a 3D Square Cylinder Using Five-hole Probe and Neural Networks Method”, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(1) (2017) 67-82.
DOI: 10.22060/mej.2016.722

