طراحی مقطع تست تونل‌باد جهت کالیبراسیون پروب‌های آیرودینامیک چندراهه

مهدی نصرتی[۱]، المیرا پارسا[۱]، آرمان محسنی[۲] ، امیر خوشدل[۱]، هیوا خالدی[۱]

۱- گروه اندازه‌گیری و تست، شرکت توربوکمپرسور تک خاورمیانه: تهران طرشت بلوار تیموری، پژوهشکده علوم و فناوری دانشگاه صنعتی شریف
۲- دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی: تهران، تهرانپارس، دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور

چکیده

پروب‌های ایرودینامیک به منظور اندازه‌گیری در توربوماشین‌ها کاربرد فراوان دارند. مرحله تنظیم یا کالیبراسیون[1] این پروب‌ها یکی از اساسی‌ترین چالش‌های کاربرد آنهاست. کالیبراسیون پروب‌های ایرودینامیکی به روش مقایسه‌ای انجام می‌شود. در این روش، پروب مد نظر با یک پروب مبنا یا پیتو-استاتیک در جریان هوا یک تونل باد تنظیم می‌شود. به منظور تعیین ابعاد تونل‌باد، فاصله بین دو پروب باید به گونه‌ای تعیین شود که برهم کنش میدان فشار اطراف پروب‌ها به حداقل برسد. در این مقاله از تحلیل جریان پتانسیل برای تخمین فاصله پروب با پروب مبنا استفاده شده است. فاصله دو پروب از این جهت اهمیت دارد که به واسطه آن، ابعاد مقطع تونل‌باد در محل اندازه‌گیری تعیین می‌شود که تاثیر مستقیم بر میزان جریان سیال عبوری و هزینه تامین آن دارد. مدل جریان پتانسیل به جهت سادگی و هزینه محاسباتی بسیار پایین، نسبت به روش‌های عددی و تجربی بسیار به صرفه است. در بررسی انجام شده مدل جریان پتانسیل با روش عددی (با استفاده از نرم افزار فلوئنت[2]) در یک رایانه با حافظه ۸ گیگابایت و سرعت پردازش ۳/۱ گیگا هرتز مقایسه شده است. نتایج این مقایسه حاکی از آن است که زمان محاسباتی مدل جریان پتانسیل بیش از ده بار کمتر از زمان محاسباتی روش عددی است درحالی که نتایج این دو حل کمتر از ۵ درصد اختلاف دارند. با توجه با این نتیجه مدل جریان پتانسیل به منظور طراحی مقطع تست تونل باد و فاصله مناسب دو پروب مورد استفاده قرار می‌گیرد و بعد از تعیین محدوده مناسب، با انجام حل عددی فاصله دو پروب با دقت بالا تعیین می‌شود.

واژه های کلیدی: *پروب چندراهه – تونل‌باد – جریان پتانسیل – دینامیک سیالات محاسباتی – توربین گاز*

مقدمه

با توجه به اهمیت توربین‌های گازی در سراسر جهان، لزوم بهره‌وری با راندمان بالاتر، دقت بهتر، سرعت بیشتر و هزینه‌های کمتر همواره مورد توجه صنعتگران بوده است. در مسیر بهبود و توسعه این وسایل، انجام تست‌ها و نتایج تجربی بسیار مورد توجه است. به منظور دست‌یابی به نتایج دقیق نیاز است که اندازه‌گیری در این تست‌ها با ابزارآلات اندازه‌گیری دقیقتر و خطای کمتر انجام شوند.

یکی از مهترین اندازه‌گیری‌ها در توربوماشین‌ها و بخصوص توربین‌های گاز تعیین شرایط و خواص سیال عامل در این وسایل است. پارامترها مهم در تعیین شرایط سیال عامل عبارتند از سرعت، فشار و دما، که به منظور تعیین این پارامترها در توربین‌گاز ابزار اندازه‌گیری به نام پروب توسعه داده شده است. در این میان پروب‌های چندراهه ازجمله ابزار اندازه‌گیری نسبتا ساده هستند که به طور همزمان سه مولفه بردار سرعت، فشار استاتیک و فشار سکون را اندازه‌گیری می‌کنند. به همین علت است که این پروب‌ها هنوز یکی از پرکاربردترین ابزار اندازه‌گیری در توربین‌گاز هستند[۱]. در حال حاضر روش‌هایی مانند PIV[3] و LDV[4] در مقایسه با پروب‌های چندراهه دارای کاستی‌هایی هستند. کاستی‌های این ابزار عبارتند از قیمت بالا، پیچیدگی کاربرد و صرف زمان زیادی برای تنظیم به منظور دستیابی به دقت بالا می‌باشند و اغلب در آنها دست‌یابی به نتایج دقیق در خارج از محیط آزمایشگاهی غیر ممکن است[۱].

تقریبا تمام وسایل اندازه‌گیری قبل از استفاده نیاز به تنظیم یا کالیبراسیون دارند. در این میان کالیبراسیون پروب‌های چندراهه به جهت اندازه‌گیری پارامترهایی که پیشتر گفته شد از اهمیت بالایی برخوردار است. در مورد پروب‌های چندراهه به دلیل روند ساخت، حتی پروب‌هایی که به صورت تجاری تولید می‌شوند از قبل کالیبره نیستند[۲]. بنابراین لازم است که قبل از اندازه‌گیری بر روی توربین‌گاز با توجه به شرایط و محل اندازه‌گیری، پروب‌ها کالیبره شوند. تونل‌باد به جهت ایجاد جریان مشخص سیال اصلی‌ترین قسمت کالیبراسیون پروب‌های چندراهه است [۳].

اولین تونل‌باد در اواخر قرن نوزدهم میلادی در روزهای آغازین تحقیقات هوانوردی توسط فرانسیس ون‌هام ساخته شد [۴]. رشد و توسعه تونل‌های باد ادامه یافت تا اینکه امروز تونل‌بادهایی ساخته شده است که رنج وسیعی از اعداد ماخ را پوشش می‌دهد. بر خلاف آنچه که اجسام پرنده در هوای ساکن حرکت می‌کنند. در تونل‌باد اجسام به صورت ساکن در نظر گرفته می‌شوند و سپس جریان هوا برای بررسی اثرات آیرودینامیک توسط تونل‌باد ایجاد می‌شود. در این حالت به علت ثابت بودن اجسام می‌توان اندازه‌گیری‌های لازم را انجام داد.

استفاده از تونل‌های باد برای کالیبراسیون پروب‌ها بسیار متداول است. با توجه به اینکه کالیبراسیون پروب‌های چندراهه به روش مقایسه ای انجام می‌شود [۵]. لازم است پروب مورد نظر به همراه پروب مبنا مانند پروب پرانتل و یا پروب پیتو-استاتیک در جریان هوا قرار گیرند. شکل ۱ نمایی از تجهیزات کالیبراسیون پروب‌های چندراهه را نشان می‌دهد. به منظور تعیین ابعاد تونل‌باد، فاصله بین دو پروب باید به گونه‌ای تعیین شود که برهم کنش میدان فشار اطراف پروب‌ها به حداقل برسد.

[1] Calibration
[2] Fluent (http://www.ansys.com)
[3] Particle Image Velocimetry
[4] Laser Doppler Velocimetry

شکل ۲ ناحیه تست تونل‌باد را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است. پروب پرانتل یا پیتو-استاتیک با قطر ۱ cm جهت تعیین مشخصه‌های جریان در محل کالیبراسیون پروب چندراهه در تونل باد قرار داده می‌شود و سپس پروب چندراهه با قطر ۱ cm در فاصله مناسب نسبت به پررب مرجع (پروب پرانتل) قرار داده خواهد شد. در مقاله حاضر جهت تخمین فاصله مناسب بین دو پروب از مدل جریان پتانسیل استفاده شده است.

معادلات حاکم

در جریان سیالات تراکم‌پذیر زمانی که عدد ماخ نزدیک ۰/۳ است با تقریب خوب می‌توان جریان را تراکم‌ناپذیر فرض کرد[۶]. معادلات حاکم بر جریان سیال تراکم‌ناپذیر شامل معادله بقا جرم (رابطه (۱)) و معادله مومنتوم (رابطه (۲)) است:

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{u}=0 \qquad (۱)$$

$$\rho(\vec{u}\cdot\vec{\nabla})\vec{u}=\rho\vec{g}-\vec{\nabla}p+\eta\nabla^2\vec{u} \qquad (۲)$$

که در روابط بالا $\vec{u}=(u_x,u_y,u_z)$ بردار سرعت، ρ چگالی سیال، $\vec{g}$ بردار شتاب جاذبه زمین، p فشار سیال و η ویسکوزیته دینامیکی سیال هستند. در حالت دوبعدی معادله بقا جرم سرعت در جهت x و سرعت در جهت y را به صورت رابطه (۳) باهم مرتبط می‌سازد:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x}+\frac{\partial u_y}{\partial y}=0 \qquad (۳)$$

طبق رابطه بالا می‌توان در جریان دوبعدی تابع $\psi(x,y)$ را تعریف کرد که با مولفه‌های سرعت به صورت زیر ارتباط دارند:

$$u_x=\frac{\partial\psi}{\partial y}$$
$$u_y=\frac{\partial\psi}{\partial x} \qquad (۴)$$

تابع $\psi(x,y)$ ، در جریان‌های دوبعدی به تابع جریان موسوم است. با استفاده از این تابع دو متغییر u_x و u_y به یک متغییر $\psi(x,y)$ تبدیل شدند که تجزیه و تحلیل جریان را بسیار ساده‌تر می‌کند. این نکته را باید متذکر شد که تابع جریان به این شکل فقط برای جریان‌های دوبعدی کاربرد دارد و در جریان‌های سه بعدی تابع جریان به گونه‌ای دیگر تعریف می‌شود[۷].

اگر فرض جریان غیر چرخشی به معادلات حاکم بر جریان سیال اضافه شود منجر به بیان تابع دیگری به نام تابع پتانسیل سرعت می‌شود. شرط جریان غیر چرخشی به قرار زیر است [۷]:

$$\vec{\nabla}\times\vec{u}=0 \qquad (۵)$$

با توجه به شرط ارائه شده تابع پتانسیل سرعت $\phi(x,y)$ به صورت زیر با مولفه‌های سرعت ارتباط خواهد داشت:

$$u_x=\frac{\partial\varphi}{\partial x},\quad u_y=\frac{\partial\varphi}{\partial y},\quad u_z=\frac{\partial\varphi}{\partial z} \qquad (۶)$$

با بهره‌گیری از دو مفهوم تابع جریان و تابع پتانسیل روابط جریان دوبعدی و سه بعدی به شرح زیر خواهند بود.

در جریان دو بعدی با توجه به اینکه در جریان‌های غیر چرخشی تابع جریان و تابع پتانسیل در معادله لاپلاس صدق می‌کنند و همچنین از قضیه کوشی – ریمان بدست می‌آید که تابع جریان و تابع‌پتانسیل توابع مکمل [۷]. طبق این قضیه تابع مختلط F به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود که قسمت حقیقی آن، تابع پتانسیل و قسمت مجازی‌آن تابع جریان است:

$$F(z)=\varphi(x,y)+i\psi(x,y) \qquad (۷)$$

در رابطه بالا $z=x+iy$ است. به عبارت دیگر با مشخص بودن تابع F به راحتی مولفه‌های سرعت جریان سیال مشخص می‌شوند.

در بسیار از جریان‌ها نمی‌توان از فرض جریان دوبعدی استفاده کرد. لذا لازم است معادلات جریان پتانسیل برای جریان‌های سه بعدی نیز بدست آید. در مدل‌سازی جریان‌های سه بعدی متقارن محوری از دستگاه مختصات کروی به همراه شرط غیر چرخشی جریان سیال استفاده می‌شود. در این دستگاه مختصات تابع جریان و تابع پتانیسل به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شوند.

$$u_r=\frac{\partial\varphi}{\partial r}=\frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial\psi}{\partial\theta}$$
$$u_\theta=\frac{1}{r}\frac{\partial\varphi}{\partial\theta}=-\frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial\psi}{\partial r} \qquad (۸)$$

به منظور انتقال داده‌ها از دستگاه مختصات ذکر شده به دستگاه مختصات دکارتی از روابط زیر استفاده می‌شود [۸].

$$u_x=u_r\cos\theta-u_\theta\sin\theta$$
$$u_y=u_r\sin\theta+u_\theta\cos\theta \qquad (۹)$$

جریان پتانسیل با دقت خوبی توزیع فشار اطراف اجسام مختلف را بدست می‌دهد. جهت محاسبه میدان فشار از معادله مومنتوم استفاده می‌شود. با توجه به اینکه لزجت در جریان گازها بسیار ناچیز است از اثر نیروهای ویسکوز در این رابطه صرف نظر کرده و معادله ناویر استوکس بصورت رابطه زیر که به رابطه اولر موسوم است، تبدیل می‌شود.

$$\rho(\vec{u}\cdot\vec{\nabla})\vec{u}=\rho\vec{g}-\vec{\nabla}p \qquad (۱۰)$$

پیشتر نیز اشاره شده که برای استفاده از جریان‌های پتانسیل فرض جریان‌های غیر چرخشی طبق رابطه (۵) به کار می‌رود. به این ترتیب معادله اویلر به راحتی به معادله برنولی تبدیل می‌شود.

$$\frac{p}{\rho}+\frac{U_\infty^2}{2}+gz=\text{const.} \qquad (۱۱)$$

که در رابطه بالا U_∞ سرعت مطلق و z ارتفاع سیال نسبت به یک ارتفاع مرجع است که سیال در آن قرار دارد. با استفاده از معادله برنولی و توابع جریان پتانسیل، میدان سرعت و فشار مشخص می‌شود. نکته دیگری که از در جریان‌های پتانسیل مهم است قابل استفاده بودن اصل جمع آثار در این جریان‌ها است. به عبارت دیگری با ادغام جریان اطراف اجسام مختلف باهم می‌توان برهم کنش آنها را مورد بررسی قرار داد.

محاسبات مقطع اندازه‌گیری در تونل‌باد

در تحلیل توابع جریان پتانسیل دوبعدی باید برای هر پروب رابطه (۷) را بدست آورد. با توجه به اینکه در کالیبره کردن پروب‌های چندراهه از روش مقایسه استفاده می‌شود، باید جریان اطراف پروب پرانتل و پروب چندراهه که در شکل ۳ نشان داده شده‌اند را بدست آورد.

همانطور که در شکل ۳ مشاهد می‌شود پروب چندراهه به صورت یک استوانه است. در جریان پتانسیل برای مدل‌سازی جریان اطراف استوانه می‌توان از اصل جمع آثار استفاده کرد. بدین صورت که با اضافه کردن تابع جریان یکنواخت به جریان دابلت جریان اطراف استوانه به دست می‌آید. بنابراین تابع $F(z)$ در این جریان به صورت رابطه (۱۲) است.

$$F(z)=U_\infty z+\frac{\mu}{z} \qquad (۱۲)$$

در رابطه بالا μ قدرت دابلت[5] است که به صورت رابطه (۱۳) تعریف می‌شود:

$$\mu = U_\infty r_0^2 \qquad (۱۳)$$

که در این رابطه r_0 شعاع دابلت یا به عبارت دیگر شعاع پروب چندراهه است. با انجام محاسبات ریاضی در نهایت مولفه‌های میدان سرعت در اطراف استوانه به صورت رابطه (۱۴) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} u_x &= U_\infty + \mu \frac{(y-y_0)^2-(x-x_0)^2}{((y-y_0)^2+(x-x_0)^2)^2} \\ u_y &= -\mu \frac{2(y-y_0)(x-x_0)}{((y-y_0)^2+(x-x_0)^2)^2} \end{aligned} \qquad (۱۴)$$

در رابطه بالا x_0 و y_0 محل قرار گیری مرکز (محور) پروب نسبت به مبدا مختصات هستند.

جهت محاسبه جریان اطراف پروب پرانتل با استفاده از ترکیب جریان یکنواخت با تابع جریان چشمه سه بعدی، جریان اطراف پروب پرانتل حاصل می‌شود. مولفه‌های میدان سرعت در اطراف پروب پرانتل به صورت رابطه (۱۵) می باشد.

$$\begin{aligned} u_x &= U_\infty + \frac{Q}{4\pi} \frac{x-x_1}{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}} \\ u_y &= \frac{Q}{4\pi} \frac{y-y_1}{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}} \end{aligned} \qquad (۱۵)$$

که در رابطه بالا Q قدرت چشمه در جریان پتانسیل است و به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$Q = \pi U_\infty r_0^2 \qquad (۱۶)$$

همانطور که پیشتر گفته شده توابع جریان پتانسیل از اصل جمع آثار پیروی می‌کنند. لذا برای محاسبه برهم کنش جریان پروب‌ها در ناحیه تست تونل باد می‌توان میدان سرعت اطراف پروب چندراهه را با میدان اطراف پروب پرانتل جمع کرد. در نتیجه میدان سرعت در ناحیه تست تونل‌باد به صورت روابط (۱۷) و (۱۸) بدست می‌آیند.

$$\begin{aligned} u_x = U_\infty &+ \frac{Q}{4\pi} \frac{x-x_1}{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}} \\ &+ \mu \frac{(y-y_0)^2-(x-x_0)^2}{((y-y_0)^2+(x-x_0)^2)^2} \end{aligned} \qquad (۱۷)$$

$$\begin{aligned} u_y = &\frac{Q}{4\pi} \frac{y-y_1}{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}} \\ &- \mu \frac{2(y-y_0)(x-x_0)}{((y-y_0)^2+(x-x_0)^2)^2} \end{aligned} \qquad (۱۸)$$

در رابطه بالا x_1 و y_1 محل قرار گیری مرکز پروب چندراهه نسبت به مبدا مختصات است. با جای‌گزاری روابط (۱۷) و (۱۸) در رابطه (۱۱) میدان فشار در ناحیه تست تونل‌باد بدست می‌آید.

اعتبارسنجی روش

به منظور بررسی صحت نتایج بدست آمده از حل جریان‌های پتانسیل، نتایج بدست آمده از جریان‌های پتانسیل با نتایج عدد بدست آمده از نرم‌افزار فلوئنت مقایسه شد.

شکل‌های ۴ و ۵ مقایسه‌ای از فشار و سرعت ایجاد شده در جلو پروب چندراهه را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل‌ها دیده می‌شود. فشار و سرعت محاسبه شده از روش جریان‌های پتانسیل تطابق مناسبی با نتایج بدست آمده از حل عددی نرم‌افزار فلوئنت دارد. قابل ذکر است که در انجام این مقایسه از رایانه‌ای با سرعت پردازش ۳/۱ گیگا هرتز و حافظه ۸ گیگابایت جهت انجام محاسبات استفاده شده است. در محاسبات انجام شد زمان حل به روش جریان پتانسیل، بسیار سریع تر از زمان حل عددی نرم‌افزار فلوئنت است. این بدان علت است که در روش عددی، معادلات جریان با استفاده از الگوریتم‌هایی که بر پایه تکرار محاسبات هستند بدست می‌آیند. در حالی که در روش جریان پتانسیل معادلات به صورت صریح هستند و محاسبات آن بسیار سریع‌تر انجام می‌شود. با این وجود نتایج بدست آمده از حل جریان پتانسیل کمتر از ۵ درصد با نتایج بدست آمده از روش عددی تفاوت دارد.

درضمن باید اشاره کرد که مدل جریان پتانسیل در پشت پروب‌ها معتبر نیست این بدن علت است که هنگام عبور جریان سیال در اطراف پروب‌ها لایه مرزی و جدایش ایجاد می‌شود. در کالیبراسیون پروب‌های چندراهه به جهت اینکه نقطه سکون در جلوی پروب اهمیت دارد. بنابراین از تغییرات میدان فشاردر پشت پروب‌ها صرف نظر شده است.

نتایج

در راستای کالیبراسیون پروب‌های چندراهه نیاز است که پروب چندراهه به همراه پروب مرجع که از نوع پرانتل هست در جریان تونل‌باد قرار گیرد. هنگامی که جسم جامدی در داخل جریان سیال قرار می‌گیرد به سبب برهم کنش بین سیال و جسم جامد با توجه به معادلات بقا شرایط حاکم بر سیال تغییر می‌کند و توزیع میدان فشار، سرعت و دما در نزدیکی جسم جامد با شرایط جریان در دور دست جسم جامد متفاوت است.

در مقاله حاضر به منظور بررسی جریان سیال در اطراف جسم جامد از روش جریان پتانسیل استفاده شده است. در شکل ۶ جریان اطراف پروب چندراهه مدل‌سازی شده است. در شکل ۷ نیز جریان در اطراف یک پروب پرانتل نشان داده شده است. چنانچه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود جریان در جلو پروب به حالت سکون می‌رسد و پس از عبور جریان از روی پروب دوباره سرعت جریان افزایش می‌یابد، این پدیده با خطوط جریان به خوبی قابل مشاهده است.

در کالیبراسیون پروب چندراهه به جهت اینکه این پروب بر اساس پروب پرانتل کالیبره می‌شود، فاصله دو پروب باید بگونه‌ای تعیین شود که تاثیرات پروب چندراهه بر میدان جریان اطراف پروب پرانتل کمترین مقدار باشد. به همین منظور در مقاله حاضر پروب چندراهه در فاصله ۵cm و cm ۱۰ پروب پرانتل قرار داده شد و جریان در اطراف پروب‌ها در اعداد ماخ ۰/۳ و ۰/۶ مورد بررسی قرار گرفت.

در شکل ۸ میدان فشار در اطراف پروب چندراهه و پروب پرانتل را در ناحیه تست تونل‌باد وقتی که فاصله پروب‌ها cm ۵ و عدد ماخ ۰/۳می‌باشد نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود در جلوی هر دو پروب جریان به حالت سکون می‌رسد. با فاصله گرفتن جریان از نقطه سکون دوباره جریان سرعت گرفته و باعث می‌شود فشار سیال کاهش یابد. این افزایش سرعت باعث می‌شود که فشار استاتیکی جریان در زاویه ۹۰ درجه نسبت به جلوی پروب به کمترین مقدار برسد که نسبت به فشار

[5] doublet

جریان یکنواخت مقدار کمتری دارد. در اثر این پدیده میدان فشار در اطراف پروب نسبت به میدان جریان یکنواخت تغییر می‌کند.

در شکل ۹ میدان فشار جریان در طراف پروب پرانتل برای هر دو حالت، یعنی زمانی که پروب به تنهایی در جریان قرار دارد و زمانی که پروب چندراهه نیز در میدان جریان قرار دارد رسم شده است. چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود، هنگامی که پروب چندراهه در جریان قرار می‌گیرد توزیع فشار در اطراف پروب پرانتل به سمت پایین متمایل می‌شود و همچنین در نقاط یکسان فشار سیال در حالتی که پروب چندراهه در جریان تونل‌باد قرار دارد نسبت به زمانی که پروب چندراهه در جریان قرار ندارد کمتر است.

شکل ۱۰ تغییرات میدان فشار در اطراف پروب پرانتل، برای عدد ماخ ۰/۶ در دو حالت ذکر شده را نشان می‌دهد. چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود هنگامی که عدد ماخ افزایش می‌یابد، شدت کاهش فشار در نقاط یکسان در نزدیکی پروب پرانتل بیشتر می‌شود.

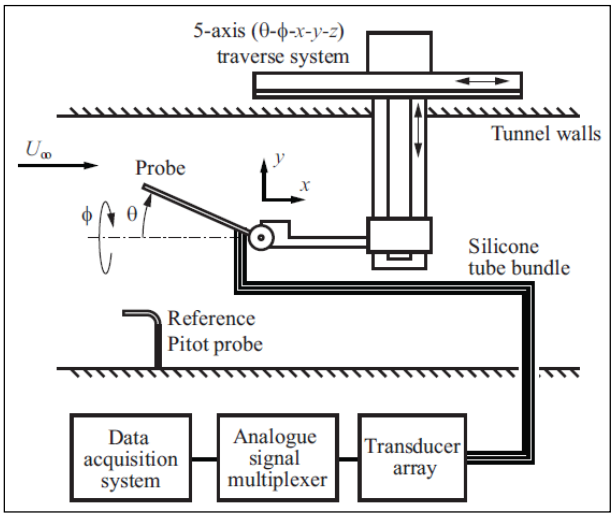
یکی از روش‌های کاهش برهم کنش بین پروب‌ها افزایش فاصله بین دو پروب است که در مقاله حاضر فاصله دو پروب نسبت به فاصله اولیه دو برابر شده است. شکل ۱۱ کانتور فشار در اطراف پروب‌ها وقتی که فاصله دو پروب ۱۰ cm است را نشان می‌دهد همانطور که در این شکل دیده می‌شود اثرات پروب چندراهه بروی پروب پرانتل به حداقل رسیده است. به منظور تایید این موضوع توزیع فشار در اطراف پروب پرانتل در حالتی که پروب چندراهه در جریان قرار دارد با حالتی که پروب چندراهه در جریان قرار ندارد، برای اعداد ماخ ۰/۳ و ۰/۶ به ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ رسم شده است. در این شکل‌ها به خوبی دیده می‌شود که با افزایش فاصله به ۱۰ cm اثر پروب چندراهه کاهش یافته است و میدان فشار در نزدیکی پروب کاملا برهم منطبق شده اند.

نتیجه‌گیری

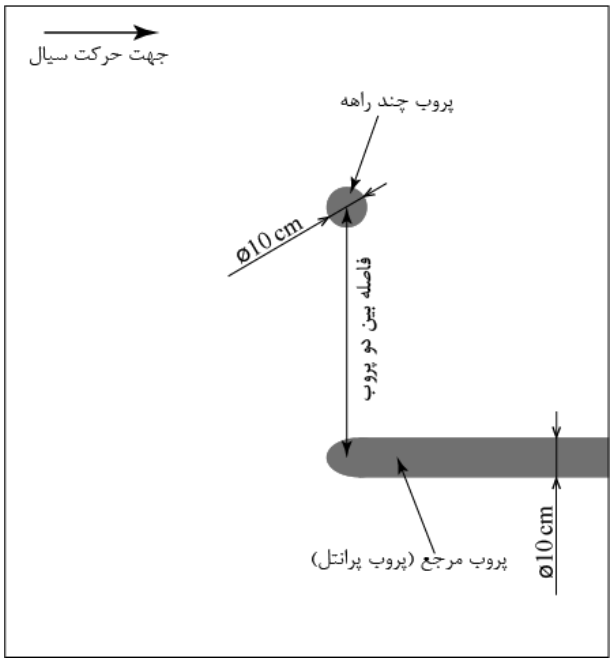
در این تحقیق اثر برهم کنش پروپ چندراهه و پروب پرانتل جهت کالیبراسیون پروب چندراهه مطالعه شد. روش محاسبه میدان جریان در اینجا بر اساس مدل جریان‌های پتانسیل انجام شد. به منظور اعتبارسنجی مدل جریان‌های پتانسیل، این مدل با روش عددی مقایسه شد که نتایج این مقایسه حاکی از آن بود که روش جریان‌های پتانسیل با نتایج بدست آمده از روش عددی تطابق خوبی دارند. بیشترین انحراف از نتایج عددی در این مقایسه ۵ درصد بود است در حالی که هزینه محاسباتی روش پتانسیل بسیار کمتر از روش عددی است.

نتایج حاصل از مدل جریان‌های پتانسیل نشان می‌دهد برای پروب‌های بررسی شده زمانی که فاصله دو پروب ۵ cm است برهم کنش پروب‌ها بر یکدیگر چشمگیر است. و با افزایش فاصله دو پروب به ۱۰ cm اثرات برهم کنش جریان پروب‌ها به مقدار مطلوبی می‌رسد. بنابراین برای پروب‌هایی با قطر ۱ cm فاصله مطلوب بین دو پروب نزدیک به ۱۰ cm سانتی متر است.

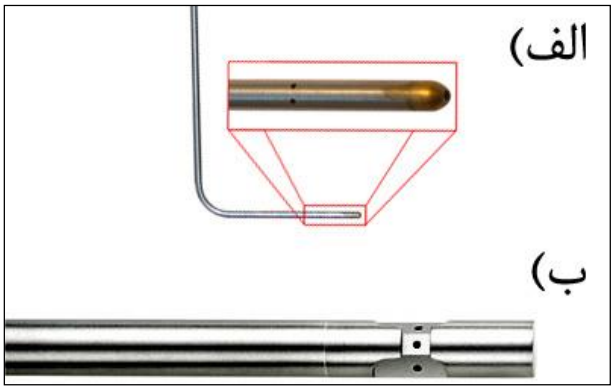
شکل‌ها و نمودارها



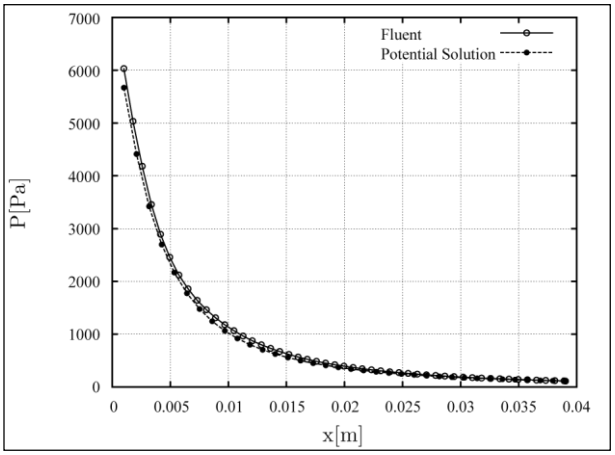
شکل ۱- نمایی از پروسه کالیبراسیون پروب چندراهه [۴].



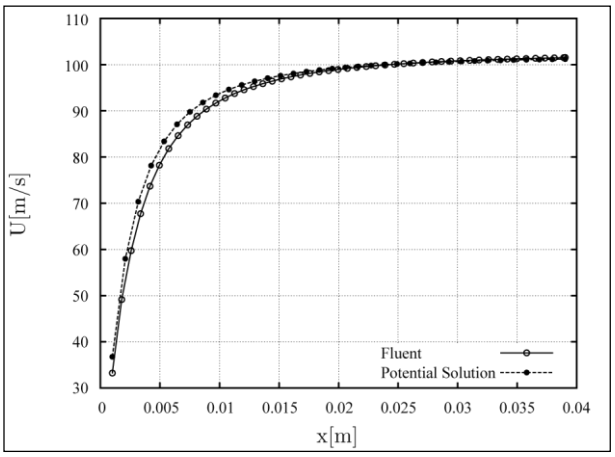
شکل ۲- نمایی از محل قرارگیری پروب‌چندراهه به همراه پروب پرانتل در ناحیه تست تونل باد.



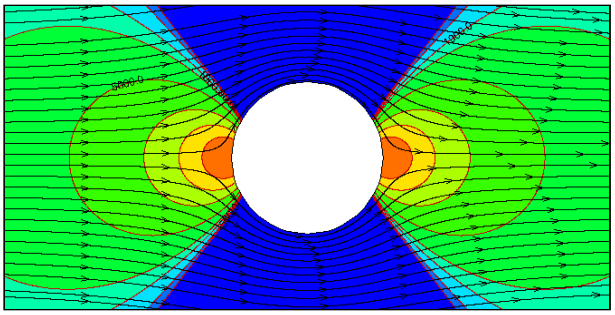
شکل ۳- نمونه‌ای از پروب پرانتل (الف) و پروب چندراهه (ب).



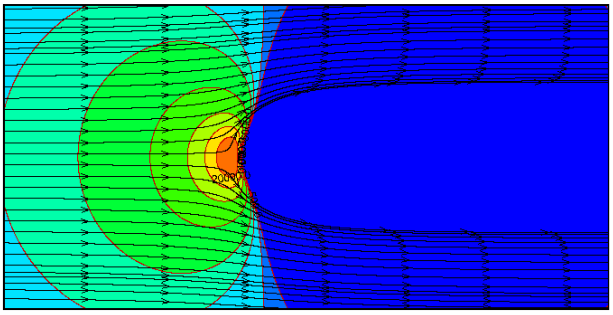
شکل۴- مقایسه فشار حاصل از حل عددی فلوئنت با روش جریان پتانسیل در ناحیه حمله پروب چند راهه.



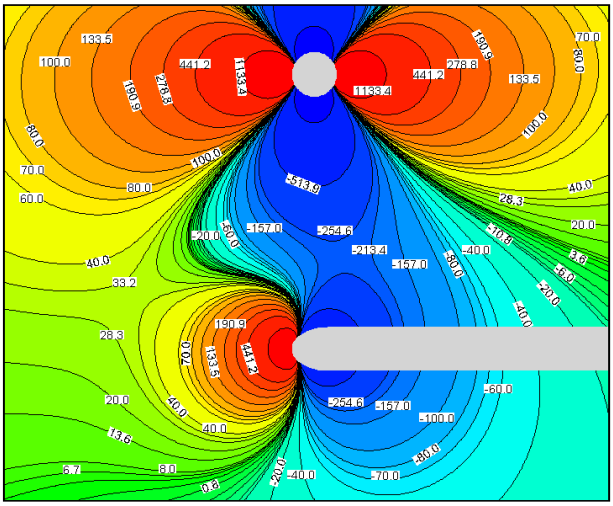
شکل ۵- مقایسه سرعت حاصل از حل عددی فلوئنت با روش جریان پتانسیل در ناحیه حمله پروب چند راهه.



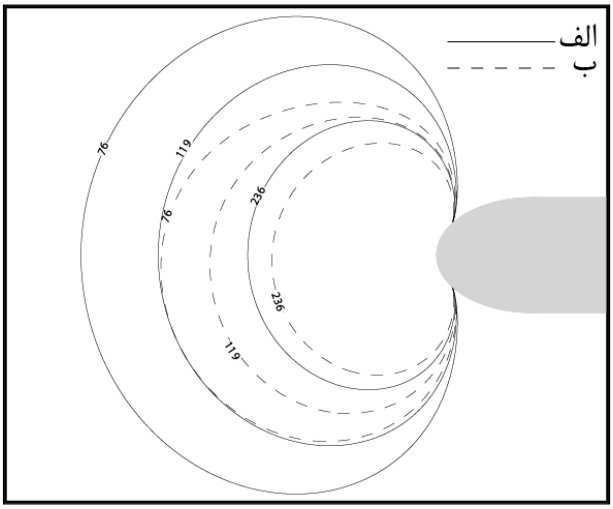
شکل ۶- میدان فشار و خطوط جریان در اطراف یک پروب چندراهه با مقطع استوانه‌ای.



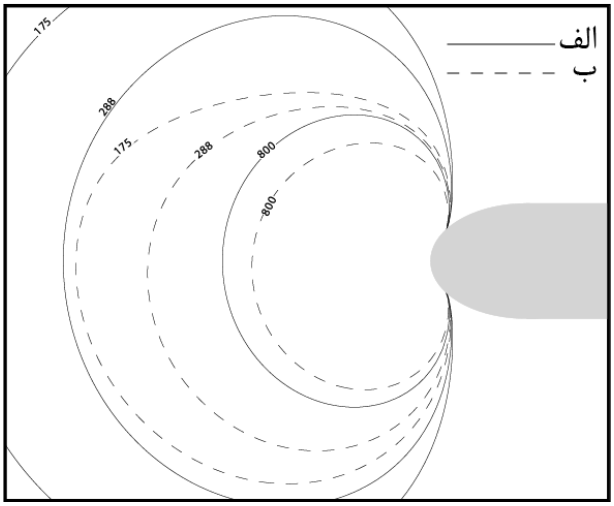
شکل ۷- میدان فشار و خطوط جریان در اطراف یک پروب پرانتل.



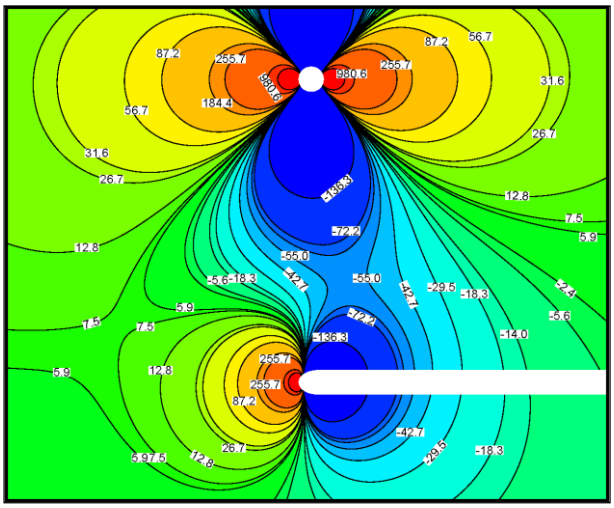
شکل ۸- میدان فشار در اطراف پروب‌ها برای جریان با ماخ ۰/۳ وقتی که فاصله دو پروب ۵ cm است.



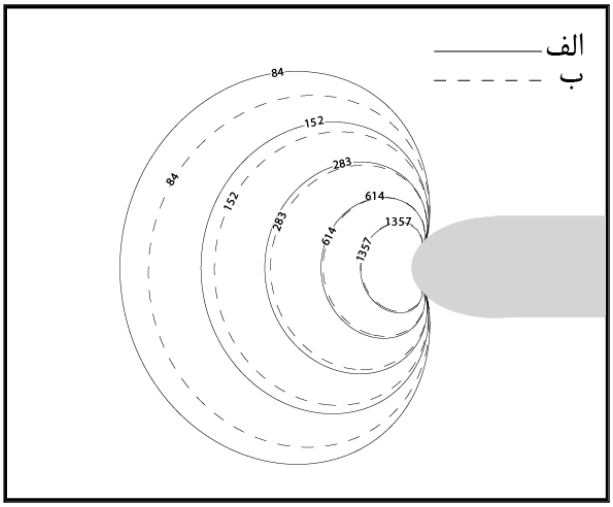
شکل ۹- مقایسه میدان فشار در جلوی پروب پرانتل در حالتی که پروب پرانتل به تنهایی در جریان قرار دارد (الف) با حالتی که دو پروب باهم در جریان قرار دارند (ب) وقتی که فاصله دو پروب ۵ cm و عدد ماخ ۰/۳ است.



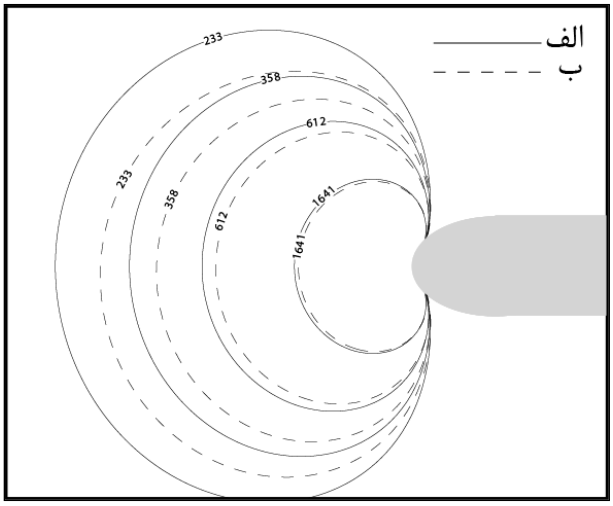
شکل ۱۰- مقایسه میدان فشار در جلوی پروب پرانتل در حالتی که پروب پرانتل به تنهایی در جریان قرار دارد (الف) با حالتی که دو پروب باهم در جریان قرار دارند (ب) وقتی که فاصله دو پروب ۵ cm و عدد ماخ ۰/۶ است.



شکل ۱۱- میدان فشار در اطراف پروب‌ها برای جریان با ماخ ۰/۳ وقتی که فاصله دو پروب ۱۰ cm است.



شکل ۱۲- مقایسه میدان فشار در جلوی پروب پرانتل در حالتی که پروب پرانتل به تنهایی در جریان قرار دارد (الف) با حالتی که دو پروب باهم در جریان قرار دارند (ب) وقتی که فاصله دو پروب ۱۰ cm و عدد ماخ ۰/۳ است.



شکل ۱۳- مقایسه میدان فشار در جلوی پروب پرانتل در حالتی که پروب پرانتل به تنهایی در جریان قرار دارد (الف) با حالتی که دو پروب باهم در جریان قرار دارند (ب) وقتی که فاصله دو پروب ۱۰ cm و عدد ماخ ۰/۶ است.

مراجع

1. Johansen ES, Rediniotis OK, Jones G., "The Compressible Calibration of Miniature Multi-Hole Probes." *ASME. J. Fluids Eng*. 2000; 123(1):128-138.

2. Telionis, Demetri, Yihong Yang, and O. Redinioti, "Recent developments in multi-hole probe (mhp) technology." 20th International Congress of Mechanical Engineering. Vol. 21. 2009.

3. Mehta R. D., P., Bradshaw. Design rules for small low speed wind tunnels. The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society, 1979.

4. Hirschel, E.H., Prem, H., and Madelung, G. "Aeronautical Research in Germany: From Lilienthal Until Today." in Aeronautical Research in Germany. Springer, 2003

5. Shaw-Ward, Samantha, Alex Titchmarsh, and David M. Birch. "Calibration and use of n-hole velocity probes." AIAA Journal 53.2 (2014): 336-346.

6. White, Frank M., and Isla Corfield. "Viscous fluid flow." Vol. 3. New York: McGraw-Hill, 2006.

7. Currie, I.G. and Currie, I.G. "Fundamental Mechanics of Fluids." McGraw-Hill 3rd ed., 2002

8. Korn, G.A. and Korn, T.M. " Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review", Dover Civil and Mechanical Engineering Series, Dover Publications, 2000.