

بررسی تجربی تأثیر تغییر فاصله و خمیدگی پره‌های راهنما بر کیفیت جریان خروجی

محمدعلی رنجبر^{۱*}، محمدعلی اردکانی^۲، فواد فرحانی بغلانی^۳

۱- مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء (ص)

۲- دانشیار، پژوهشکده مهندسی مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

۳- استادیار، پژوهشکده مهندسی مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۹/۱۶)

چکیده

به منظور هدایت جریان سیال به مسیر طراحی شده و همچنین کاهش تلفات انرژی در تغییر جهت سیال عبوری، از پره‌های راهنما استفاده می‌شود. مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر کیفیت جریان خروجی از پره‌های راهنما، مقدار گام^۱ (نسبت فاصله بین پره‌ها به وتر) و خمیدگی پره‌ها می‌باشد. در این تحقیق تأثیر این دو پارامتر بر کیفیت جریان خروجی با ساخت مدل‌های مختلف به صورت تجربی بررسی گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که در محدوده گام ۱۵ تا ۳۵ درصد، یکنواخت‌ترین توزیع سرعت مربوط به مقدار گام ۲۵ درصد می‌باشد و همچنین این مقدار دارای کم‌ترین میزان افت فشار کل می‌باشد. نتایج بررسی تغییر خمیدگی پره‌ها نیز نشان می‌دهد که با افزایش مقدار خمیدگی در محدوده ۴۵ تا ۹۰ درجه، یکنواختی توزیع سرعت خروجی کاهش یافته و میزان افت فشار کل افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز از 4×10^4 تا 1.8×10^5 دنباله پره‌ها کوچک‌تر شده است.

واژه‌های کلیدی: پره راهنما، تونل باد، افت فشار کل، توزیع سرعت

Experimental Investigation of the Effects of Variation in Guide Vanes Pitch and Curvature on Quality of Discharged Flow

Abstract

Guide vanes are used for directing flow in the desired path and reducing losses due to change in the flow direction. Guide vanes pitch (ratio of distance between the vanes to the vane chord) and the curvature of the vanes are the main parameters affecting the outlet flow quality. In this experimental study, different models with different vane pitches, ranging from 15 to 35%, and different curvature degrees, ranging from 45 to 90°, were constructed to investigate the effect of the above parameters. Results show that the most uniform velocity distribution with minimum pressure drop is obtained for a 25% pitch. The results also show that with an increase in the curvature degree, the velocity distribution becomes less uniform while the pressure drop increases. It is also observed that the wake of the guide vane reduces as Reynolds number increases from 4×10^4 to 1.8×10^5 .

Keywords: Guide Vane, Wind Tunnel, Pressure Drop, Velocity Distribution.

مقدمه

در بعضی از موارد نیاز است تا جریان سیال تغییر جهت یافته و در مسیرهای مشخصی جریان یابد. تغییر مسیر در جریان هوای عبوری، همواره با تلفات انرژی همراه است. برای کاهش این تلفات در گوشه‌های کانال‌ها معمولاً از پره‌های راهنما استفاده می‌شود. این پره‌های راهنما باعث هدایت جریان هوا به مسیر دلخواه شده و زاویه لازم را منطبق بر تغییر مسیر مورد نظر در جریان ایجاد می‌نمایند. شکل پره‌های راهنما می‌تواند از ورقه خمیده تا یک ایرفویل باشد. در طراحی پره‌های راهنما ضریب تلفات (نسبت افت فشار به فشار دینامیکی)، هزینه ساخت و حساسیت نسبت به جهت جریان بایستی مد نظر قرار گیرد.

از آنجایی که بیشترین استفاده از پره‌های راهنما در تونل باد می‌باشد، لذا بیشتر تحقیقات انجام شده در این زمینه در زمان طراحی تونل‌های باد بوده است و داده‌های ارائه شده دارای جزئیات تجربی و تحلیلی نمی‌باشند. پترسون [۱] طی گزارشی فنی به بررسی نکات طراحی گوشه‌ها در سیستم‌های هدایت‌کننده پرداخته است. در این تحقیق ارتباط افت گوشه با پارامترهای فاصله پره‌ها، نسبت وتر، زاویه تلاقی و شکل پره با استفاده از تئوری آیرودینامیک استخراج گردیده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که افت حول یک گوشه ۹۰ درجه حدود ۱۴ درصد سرعت ورودی در عدد رینولدز 4×10^4 می‌باشد، که عدد رینولدز بر مبنای سرعت میانگین در کانال و وتر پره می‌باشد. مطالعات تجربی بر روی طراحی پره‌های مختلف به منظور استفاده در گوشه‌های ۹۰ درجه توسط کلین و همکاران انجام شده است [۲]. محدوده عدد رینولدز (بر اساس وتر پره) بین 10^4 تا 10^5 بوده است. در این آزمایشات دو پره ورقه‌ای فلزی و دو پره با سطح مقطع ضخیم مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که توزیع یکنواخت سرعت هم با پره‌های ضخیم و هم نازک امکان‌پذیر است. تحقیقات هریس و همکاران [۳] و همچنین فری [۴] بر روی کاهش افت در گوشه‌ها با استفاده از پره‌ها نیز به نتایجی بسیار شبیه آن چیزی که توسط کلین شرح داده شده، منجر می‌شود. از آنجایی که میزان افت در گوشه‌ها نسبت بالایی است، نیازمند انجام آزمایش بر روی پره‌هایی متفاوت جهت هستیم؛ که به این منظور باید ضریب منظری و نسبت شعاع بهبود یابد. مشکل شکل پره تاکنون توسط هیچ کدام از تحقیقات حل نشده است. همه این آزمایشات انجام شده با شکل‌های خاص بوده است و

هیچ تلاشی برای معرفی روشی که به وسیله آن پروفیل مناسب برای انعکاسی که مد نظر است تولید شود؛ انجام نشده است. ویکتور و همکاران [۵] در تحقیقی طراحی و تست را برای تونل باد با سطح مقطع 80×40 سانتی‌متر در مرکز تحقیقات ایمر ناسا انجام داده‌اند و نتایج تحقیق شامل طراحی چندین نمونه مجموعه پره می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده ضریب افت کوچک $0/05$ برای ایرفویل‌های نازک و ضریب افت نسبتاً زیاد $0/3$ برای ایرفویل‌های ضخیم دارای فلپ می‌باشد. در یک رساله دکتری که توسط لیندگرین [۶] انجام شده است، طراحی تجهیزات جریان و مطالعه تجربی جریان برشی محدود شده به دیوار بررسی گردیده و تونل باد جدیدی ساخته و آزمایش شده است. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که طراحی مناسب پره‌های راهنما باعث می‌شود که افت جریان بسیار کم باشد و کیفیت جریان حتی در گوشه‌های با نسبت بازشوندگی، مناسب باقی بماند. هم‌چنین نتایج تحقیق وی نشان می‌دهد با توجه به این که بیشتر تونل‌های باد از پره‌های ربع دایره‌ای استفاده می‌کنند که در ادامه لبه فرار امتداد یافته‌اند، چنین پره‌هایی دارای ضریب افت فشار کل سه بعدی $0/2$ می‌باشند. در یک رساله دکتری جوز ماتیو [۷] به طراحی، ساخت و توصیف کردن تسهیلات تونل باد کم صدا پرداخته است. در این تحقیق از متدولوژی کلی طراحی تونل باد جهت طراحی اجزا استفاده شده و یک شبیه‌سازی عددی از جریان روی پره‌ها با استفاده از فلونتت به انجام رسیده است. دامنه محاسبات شامل منطقه بین سطوح بالایی و پایینی پره‌های مجاور می‌باشد. پروفیل دقیق سرعت یک جدایش در ناحیه نزدیک به لبه فرار در سطح مکش پره برای اعداد رینولدز مورد آزمایش را نشان می‌دهد.

اردکانی و رنجبر [۸] در تحقیقی میدانی به بررسی تأثیر باد بر الگوی جریان ورودی به رادیاتورهای برج خنک‌کن خشک نیروگاه منتظر قائم پرداخته‌اند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که با وزش باد سکتورهای قرار گرفته در موقعیت روبرو و پشت به باد دارای عملکرد مناسبی می‌باشند، ولی سکتورهای قرار گرفته در موقعیت مماس به باد به دلیل سرعت گرفتن جریان در کناره‌های برج و نحوه ورود جریان به رادیاتورها دچار افت راندمان می‌شوند. نحوه ورود جریان در دلتاهای مربوط به این سکتورها یک حرکت گردابه‌ای شکل دارد و فقط مقدار کمی از جریان به رادیاتورها وارد می‌شود و در نتیجه دبی جریان

راهنما می‌باشد. لذا جهت پیدا کردن بهینه‌ترین نسبت، ۳ مدل با مقادیر پیچ ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درصد و با نسبت ۰/۱ سازه اصلی ساخته و آزمایش شده است. در ساخت این مدل‌ها از ۳ ورق آهنی با ابعاد ۳۰ در ۳۰ سانتی‌متر و به ضخامت نیم میلی‌متر استفاده شده است. طول وتر هر یک از پره‌ها ۲۴ سانتی‌متر و فاصله بین پره‌ها به ترتیب ۳/۶، ۶ و ۸/۴ سانتی‌متر می‌باشد. از دیگر پارامترهای تأثیرگذار بر کیفیت جریان خروجی از پره‌های راهنما، مقدار خمیدگی پره‌ها می‌باشد. جهت بررسی اثر خمیدگی پره‌ها بر کیفیت جریان خروجی، سه مجموعه سه‌پره‌ای با خم‌های ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه و با نسبت ۰/۱ سازه اصلی و با مشخصات طراحی شکل (۱) ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. در شکل (۱)، D فاصله بین پره‌ها، C طول وتر، θ زاویه خمیدگی و R شعاع دایره کمان پره می‌باشد. تونل بادی که جهت انجام آزمایش‌ها به کار گرفته شده، تونل باد موجود در سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران می‌باشد که یک تونل باد مدارباز دمنده با فن سانتریفوژ و با سطح مقطع خروجی ۲۵ در ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد؛ حداکثر سرعت جریان هوا در این تونل باد ۱۰ متر بر ثانیه است. تونل باد فوق دارای دیفیوزر زاویه باز بین فن و اتاق آرامش بوده که به منظور جلوگیری از جدایش در دیفیوزر اول، درون آن ۲ عدد توری قرار دارد. به منظور کاهش شدت اغتشاش‌ها و یکنواخت نمودن جریان هوا، از ۳ عدد توری و یک عدد لانه زنبوری در اتاق آرامش آن استفاده شده است. شدت اغتشاشات تونل باد مورد استفاده حدود ۰/۴ می‌باشد. شکل (۲) تغییرات سرعت بی‌بعد شده جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن (Tu) را در محل قرارگیری مدل نشان می‌دهد. سرعت جریان (U) بر مبنای سرعت در ۱۰ سانتی‌متری بالادست جریان (خروجی تونل باد (U_0)) بی‌بعد شده است. با توجه به این که داده‌برداری در خروجی پره در یک خط انجام گرفته است، شدت اغتشاشات در راستای همان خط اندازه‌گیری شده است. مطابق شکل (۲) تغییرات سرعت و شدت اغتشاشات در این منطقه ناچیز است. آزمایش‌ها در سرعت‌های ۲/۵، ۵ و ۷ متر بر ثانیه انجام شده است که با توجه به وتر پره در محدوده اعداد رینولدز 4×10^4 تا $1/8 \times 10^5$ می‌باشد. جهت اندازه‌گیری توزیع سرعت لحظه‌ای خروجی از پره و کیفیت جریان، از دستگاه جریان‌سنج سیم داغ استفاده شده است. دستگاه پراب^۲ مورد استفاده از نوع یک‌بعدی بوده و حسگر آن از نوع تنگستن ۵ میکرونی است.

عبوری از رادیاتورها کاهش می‌یابد. لذا در تحقیقی دیگر، اردکانی و همکاران [۹] به منظور اصلاح نحوه ورود جریان به رادیاتورهای قرار گرفته در سکتورهای بحرانی، استفاده از پره‌های راهنما را به عنوان یک راه کار عملی پیشنهاد داده‌اند. به این منظور یک سازه چهار پره‌ای ساخته شده و در دلتای بحرانی برج خنک‌کن خشک نیروگاه (در کنارهای برج) نصب و به صورت میدانی بررسی گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پره‌های راهنما در سکتورهای جانبی برج باعث از بین رفتن حالت گردابه‌ای جریان ورودی هوا، افزایش دبی جریان ورودی به دلتاها تا حدود ۳۵ درصد و کاهش میانگین توزیع دما بر روی سطح رادیاتورها به میزان ۱/۹ درجه سانتیگراد می‌شود. با توجه به اثر مثبت پره‌های به کار رفته در آزمایش‌های میدانی، نیاز است تا بهترین حالت پره‌ها از لحاظ فاصله بین پره‌ها و همچنین میزان خمیدگی آن‌ها و تأثیر آن بر کیفیت جریان بررسی گردد. در این مقاله تأثیر پارامترهای پیش گفته بر توزیع سرعت خروجی از پره‌های راهنما و میزان اتلاف انرژی با ساخت مدل‌های مختلف به صورت تجربی بررسی و نتایج جهت استفاده در طراحی گوشه‌های تونل‌های باد و همچنین پره‌های نصب شونده میدانی، ارائه گردیده است.

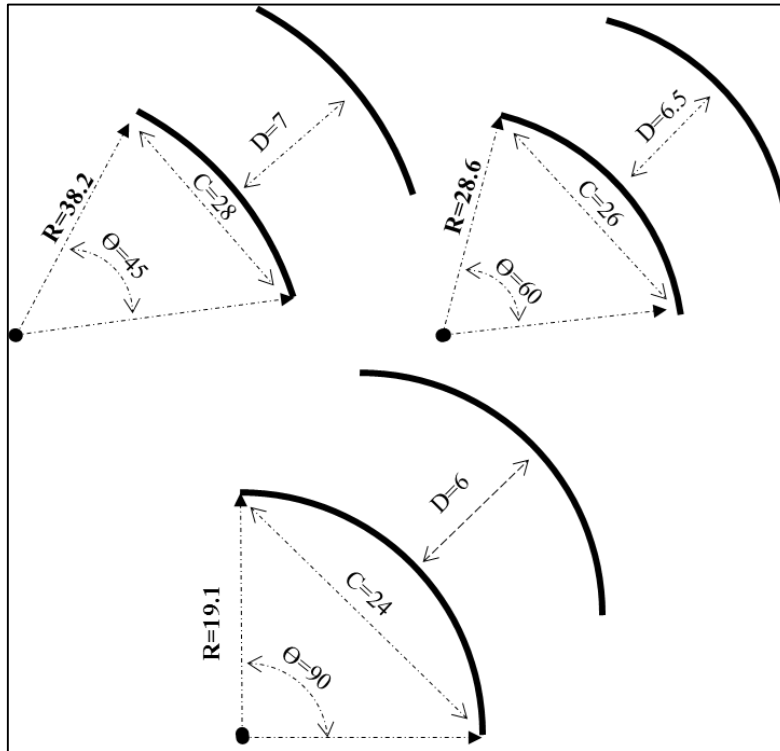
روش آزمایش

پره باید به صورتی طراحی شود که ضریب تلفات آن کم بوده و علاوه بر آن هزینه ساخت آن نیز کم باشد. ضریب تلفات پره، نسبت افت فشار به فشار دینامیکی است، که شامل تلفات اصطکاکی و تلفات ناشی از چرخش جریان می‌شود. پره‌ها معمولاً به شکل‌های ورقه‌ای، ورقه‌ای زبانه‌دار و ایرفویلی ساخته می‌شوند [۱۰]. اگر چه در نوع پره ایرفویلی، ضریب افت کم است، اما وجود پره‌های ایرفویلی در قسمتی از مسیر جریان هوا در لایه مرزی وجود دارد، که در صورت ایجاد جدایش جریان، تلفات افزایش می‌یابد. همچنین این پره‌ها نسبت به جهت جریان بسیار حساس می‌باشند و در جاهای کنترل شده باید نصب گردند. بنابراین با در نظر گرفتن میزان تلفات و هزینه ساخت، به طور معمول از ورق‌های به صورت قطاع دایره‌ای شکل استفاده می‌کنند که زاویه حمله آن‌ها ۴ تا ۵ درجه و زاویه فرار آن‌ها صفر درجه است.

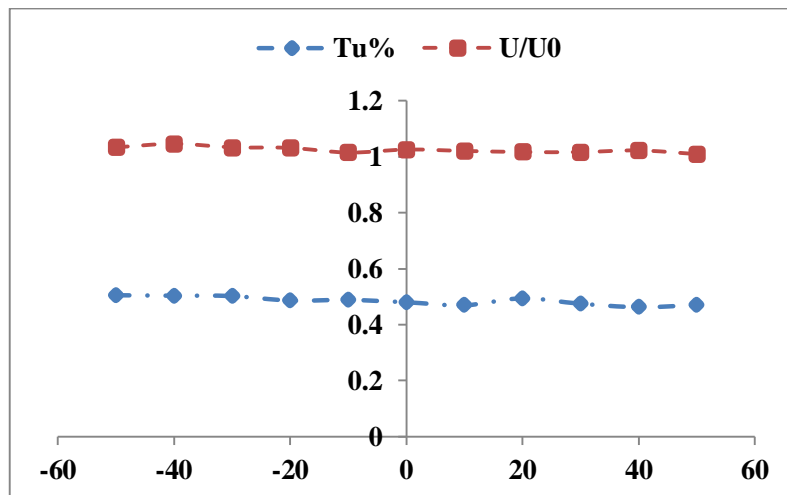
یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر کیفیت جریان خروجی، مقدار پیچ (نسبت فاصله بین پره‌ها به وتر) پره‌های

داده‌های اندازه‌گیری شده از طریق کارت آنالوگ به دیجیتال به رایانه منتقل و تجزیه و تحلیل شده است. برای جابجایی پراب از مکانیزم انتقال دهنده استفاده شده است که دقت آن ۰/۰۵ میلی‌متر در سه جهت است. نحوه حرکت بدین صورت بوده که پراب از پشت پره اول به عنوان مبدأ، حرکت نموده و داده‌برداری انجام شده است. شکل (۳) نشان دهنده بستر آزمون است.

داده‌های اندازه‌گیری شده از طریق کارت آنالوگ به دیجیتال به رایانه منتقل و تجزیه و تحلیل شده است. برای جابجایی پراب از مکانیزم انتقال دهنده استفاده شده است که دقت آن ۰/۰۵ میلی‌متر در سه جهت است. نحوه حرکت بدین صورت بوده که پراب از پشت پره اول به عنوان مبدأ، حرکت نموده و داده‌برداری انجام شده است. شکل (۳) نشان دهنده بستر آزمون است.



شکل ۱ - مشخصات طراحی پره‌های به کار رفته در آزمایشات با زاویه خم‌های مختلف



شکل ۲ - تغییرات سرعت بی‌بعد جریان هوا و شدت اغتشاش‌های تونل باد در سرعت ۵ متر بر ثانیه

به منظور به دست آوردن نتایج قابل اعتماد و تکرارپذیر از جریان سنج سیم داغ، نیاز است که مقادیر و بزرگی عدم قطعیت ناشی از قسمت‌های مختلف جریان‌سنج را به‌طور مجزا بررسی و تجزیه و تحلیل نمود. لذا خطاها و عدم قطعیت در مورد پراب و اغتشاشاتی که پراب در جریان ایجاد می‌کند، دستگاه کالیبراسیون، معادلات استفاده شده برای کالیبراسیون، ساده‌سازی‌های انجام شده برای تبدیل ولتاژ به سرعت و به دست آوردن مؤلفه‌های سرعت، خطاهای ناشی از اغتشاشات زیاد جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به روابط موجود و مشخصات دستگاه‌های به کار رفته در آزمایش‌ها که معرفی گردیدند، مقدار عدم قطعیت طبق جدول خلاصه ۱ محاسبه می‌گردد.

بحث و بررسی نتایج

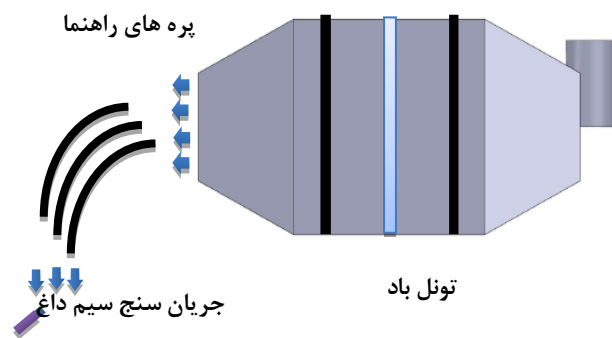
بررسی تغییرات پیچ

همان‌طور که گفته شد، یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر کیفیت جریان خروجی، مقدار پیچ (نسبت فاصله بین پره‌ها به وتر) پره‌های راهنما می‌باشد. با توجه به مطالعات انجام شده بهترین مقدار پیچ برای پره‌های مختلف در فواصل ۱۰ تا ۴۰ درصد قرار می‌گیرد. پارامترهایی که جهت تعیین کیفیت جریان خروجی مورد بررسی قرار می‌گیرند شامل توزیع سرعت خروجی از پره‌ها و افت فشار کل می‌باشند.

بررسی توزیع سرعت خروجی از پره

شکل (۴) توزیع سرعت بی‌بعد (سرعت خروجی به ورودی) در امتداد دهانه خروجی پره‌ها در رینولدزهای مختلف را برای پره با گام‌های ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درصد نشان می‌دهد. محور افقی نشان‌دهنده محل داده‌برداری (d) نسبت به فاصله ثابت بین پره‌ها (d_0) می‌باشد (نقاط ۰، ۱ و ۲ محل قرارگیری پره‌ها است).

در مجاورت پره‌ها به علت اثرات دیواره در کاهش سرعت، پروفیل‌های سرعت ورودی بسیار باریک‌اند و با جلو رفتن در داخل خم، جدایی جریان و حتی جریان‌های برگشتی ضعیف به وجود می‌آیند. با دور شدن از پره‌ها یعنی در سطح میانی بین دو پره، با کم شدن اثرات دیواره، نقش نیروی گریز از مرکز بارزتر شده و جریان به سمت سطح فشاری پره رانده می‌شود. در هنگام عبور از یک خم ۹۰ درجه، در ابتدای ورود جریان به



شکل ۳- نمای بالایی بستر آزمون به کار رفته در آزمایش‌ها

بررسی تکرارپذیری آزمایش‌ها

اولین و مهم‌ترین شرط اعتبار داشتن داده‌های هر آزمایش، تکرارپذیر بودن آن‌هاست. به بیان دیگر، اگر در شرایط محیطی مختلف بتوان تشابه هندسی و دینامیکی مشابهی ایجاد کرد، بایستی نتایج یکسانی نیز حاصل گردد [۱۱]. لذا اولین گام در این آزمایش‌ها نیز بررسی صحت تکرارپذیری اطلاعات و اطمینان از نتایج به دست آمده است. به این منظور در هر مورد آزمایش، چندین مرتبه داده‌برداری انجام شد تا از صحت نتایج اطمینان حاصل گردد. مقایسه داده‌های مراحل مختلف نشان می‌دهد که نتایج آزمایش‌ها به صورت کامل با هم تطابق دارند و هیچ‌گونه اختلافی بین آن‌ها دیده نمی‌شود.

هم‌چنین از آنجا که اگر از یک دستگاه در تمام مراحل اندازه‌گیری استفاده شود، حتی اگر اندازه‌گیری چندین مرتبه تکرار شود، مجموعه خطاهایی که اتفاق می‌افتد فقط یک بار نمونه می‌شود، بهتر است تا در صورت امکان بیشتر از یک دستگاه جهت داده‌برداری به کار گرفته شود تا موفقیت این آزمایش‌ها مطابق با اصول آماری قابل قبول باشد. با توجه به امکانات موجود در آزمایشگاه تونل باد سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران از دو دستگاه جریان‌سنج سیم داغ استفاده گردید که صحت نتایج را افزایش می‌دهد.

تحلیل خطاها

قبل از استفاده از داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های تونل باد، می‌بایست خطاهای وارده به نتایج را حذف نمود. به طور کلی در اندازه‌گیری دو نوع خطا شامل خطای بایاس و خطای دقت وجود دارد. خطای بایاس مربوط به دقت وسایل اندازه‌گیری و خطای دقت مرتبط با میزان خطا در روش اندازه‌گیری است که به صورت آماری محاسبه می‌شود [۱۲].

می‌شوند. با کم شدن مقدار گام، به علت کاهش فضا، مرکز دو گردابه به هم نزدیک شده و جریان حول محور تقارن رانده می‌شود. با افزایش مقدار گام، به علت افزایش محدوده میدان جریان، گردابه‌های میانی موجود کشیده شده و مرکز آن‌ها از هم دور می‌شود.

خم هیچ جریان ثانویه‌ای وجود ندارد. با حرکت به سمت جلو یک گردابه شکل می‌گیرد که با پیشروی به جلو و عبور از خم این گردابه شکسته و به دو گردابه ضعیف‌تر تبدیل می‌شود. پس از آن نیروهای لزجت باعث مستهلک شدن این گردابه‌های ضعیف شده و سبب توسعه یافتن جریان به سمت خروجی

جدول ۱- محاسبه عدم قطعیت ناشی از قسمت‌های مختلف

منشاء عدم قطعیت	اندازه Δx_i	واریانس خروجی نسبی $\frac{1}{U} \cdot \Delta y_i$	مقدار اسمی $\frac{1}{U} \cdot \Delta y_i$	عدم قطعیت استاندارد نسبی $\frac{1}{k} \cdot \frac{1}{U} \cdot \Delta y_i$
کالیبراتور	۱%	$2 \cdot STDV(100 \Delta U_{CAL})$	۰/۰۲	۰/۰۱
برازش منحنی	۰/۵%	$2 \cdot STDV(100 \Delta U_{fit})$	۰/۰۱	۰/۰۰۵
دقت کارت اخذ داده	۱۰ volt ۱۲ bit	$\frac{1}{U} \cdot \frac{E_{AD}}{2^n} \cdot \frac{\partial U}{\partial E}$	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۱۳
موقعیت پراب	۱°	$1 - \cos \theta$	۰/۰۰۰۱۵	۰

تفاوت بین فشار استاتیک و فشار کل در موقعیت پایین دست پره و تفاوت بین فشار اتمسفر و فشار استاتیک در موقعیت‌های پایین دست و بالادست پره می‌باشد. ضریب افت فشار کل از رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$\frac{\Delta H}{q_0} = \frac{P_{t0} - \bar{p}_{t1}}{q_0} \quad (1)$$

در رابطه ۱ موقعیت ۰ در بالادست پره و موقعیت ۱ در پایین دست جریان پره می‌باشد. P_{t0} فشار کل در نقطه صفر و \bar{p}_{t1} مقدار میانگین فشار کل در مقطع عبوری موقعیت ۱ است. ΔH میانگین افت فشار کل در گوشه و q_0 فشار دینامیکی در موقعیت ۰ می‌باشد. مقدار میانگین فشار کل در موقعیت ۱ از رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$\bar{p}_{t1} = \frac{1}{nh_1} \int_0^{nh_1} p_{t1}(y) dy \quad (2)$$

که n تعداد پره‌هایی است که روی آن‌ها انتگرال‌گیری انجام می‌شود و h_1 فاصله بین پره‌ها عمود بر جهت جریان خروجی می‌باشد. با جمع‌بندی معادلات، به معادله ۳ برای محاسبه اختلاف فشار اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها می‌رسیم.

$$\frac{\Delta H}{q_0} = \frac{P_{atm} - P_1 - \frac{1}{nh_1} \int_0^{nh_1} (P_{t1}(y) - P_1) dy}{P_{atm} - P_0} \quad (3)$$

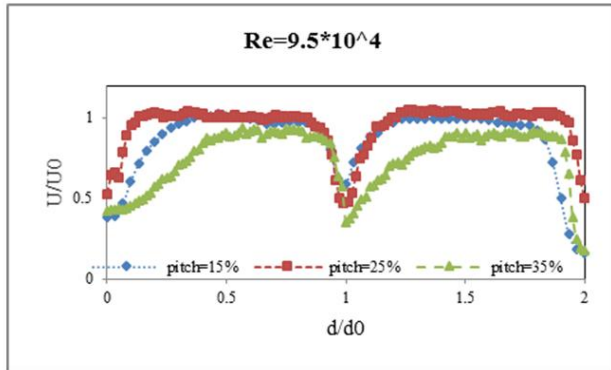
همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود توزیع سرعت در قسمت میانی پره‌های با پیچ ۱۵ درصد حالتی یکنواخت دارد و در مجاورت پره‌ها به علت وجود لایه مرزی و دنباله ناشی از پره، سرعت کاهش یافته است. هم‌چنین مشاهده می‌شود که دنباله پره‌ها تقریباً کوچک می‌باشد و با افزایش عدد رینولدز دنباله پره‌ها کوچک‌تر شده است. با افزایش مقدار گام به ۲۵ درصد مشاهده می‌شود که توزیع سرعت حالت یکنواخت‌تری پیدا کرده و دنباله پره‌ها نیز کوچک‌تر شده است. در این مقدار گام (گام ۲۵ درصد) نیز با افزایش عدد رینولدز، دنباله ناشی از پره‌ها کوچک‌تر شده است. در حالتی که مقدار گام به ۳۵ درصد رسیده است، مشاهده می‌شود بلافاصله بعد از پره یعنی بر روی سطح مکشی پره اول سرعت کاهش یافته است و با حرکت به سمت سطح فشاری پره بعد سرعت افزایش می‌یابد و در نزدیکی سطح فشاری پره دوم به دلیل لایه مرزی مقداری کاهش می‌یابد. هم‌چنین یکنواختی سرعت در این حالت نسبت به حالت‌های قبل کاهش یافته است. با توجه به شکل (۴) مشاهده می‌شود که یکنواخت‌ترین توزیع سرعت مربوط به پره با گام ۲۵ درصد می‌باشد و هم‌چنین میزان دنباله در پره با گام ۲۵ درصد کوچک‌تر از دو نسبت دیگر می‌باشد.

بررسی میزان افت فشار کل

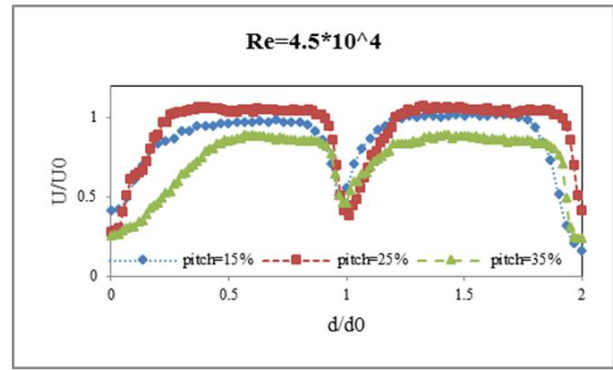
تلفات پره‌های راهنما شامل تلفات اصطکاکی و تلفات ناشی از چرخش جریان است که تابعی از عدد رینولدز است [۶]. در بررسی افت فشار، کمیت‌هایی که باید اندازه‌گیری شوند، شامل

اتمسفر می‌باشد و لذا ضریب افت فشار کل از معادله ۴ به دست می‌آید:

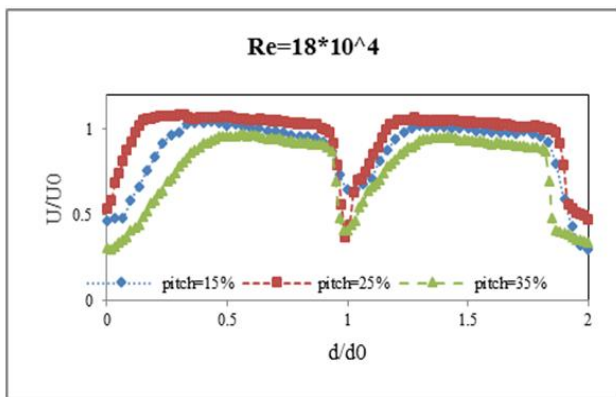
با توجه به این که در آزمایش‌ها از تونل باد مدار باز استفاده شده است، فشار استاتیکی در بالادست و پایین‌دست پره، فشار



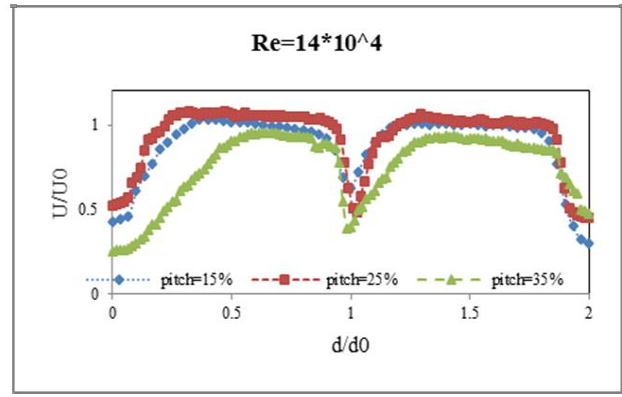
ب) عدد رینولدز 9.5×10^4



الف) عدد رینولدز 4.5×10^4



د) عدد رینولدز 18×10^4



ج) عدد رینولدز 14×10^4

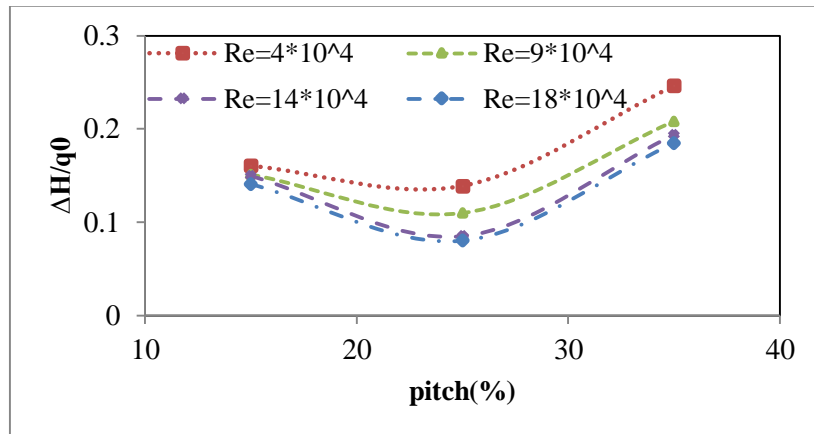
شکل ۴- توزیع سرعت بی‌بعد در امتداد دهانه خروجی پره‌ها با مقادیر گام ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درصد

توزیع سرعت جریان در خروجی پره‌ها و میزان افت فشار کل، مقدار گام ۲۵ درصد مناسب‌ترین مقدار جهت استفاده در این مدل از پره‌ها می‌باشد.

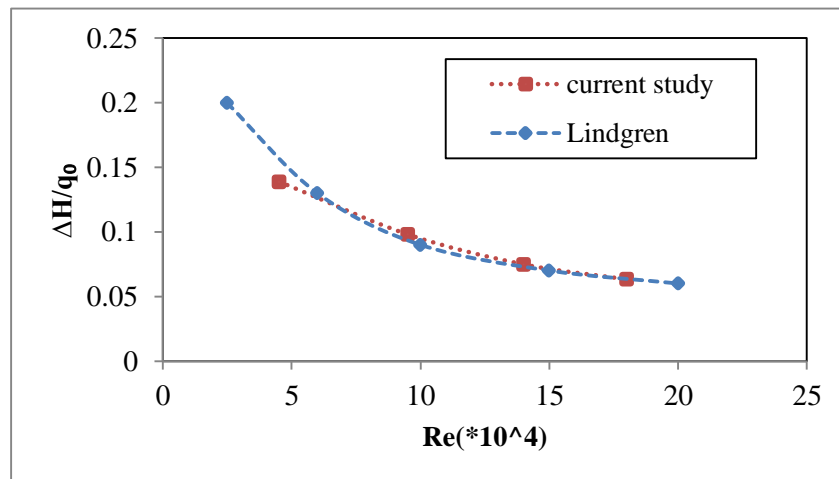
شکل (۶) نشان‌دهنده نتایج افت فشار کل در زاویه صفر درجه در مقایسه با نتایج به دست آمده در تحقیقات لیندگرین [۶] است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج دارای هم‌خوانی بسیار مناسبی می‌باشند.

$$\frac{\Delta H}{q_0} = 1 - \frac{U_1^2}{U_0^2} \quad (4)$$

شکل (۵) نموداری از مقایسه میزان ضریب افت فشار کل برای پره‌ها می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود کمترین میزان افت در نسبت ۲۵ درصد اتفاق می‌افتد. هم‌چنین با افزایش عدد رینولدز در هر سه مقدار پیچ میزان افت فشار کل کاهش می‌یابد. لذا با توجه به نحوه



شکل ۵- مقایسه میزان ضریب افت فشار کل برای پره‌ها



شکل ۶- میزان اتلاف انرژی بر حسب رینولدز با مقدار پیچ ۲۵ درصد

بررسی تغییرات میزان خمیدگی

با توجه به محل قرارگیری پره‌های راهنما و هم‌چنین شکل گوشه‌ها ممکن است که نیاز باشد تا جریان به اندازه مشخصی بچرخد. به همین دلیل از پره‌های راهنما با میزان خمیدگی‌های مختلفی استفاده می‌شود. در این قسمت به بررسی تأثیر خم‌های مختلف بر توزیع سرعت در خروجی پره‌ها و هم‌چنین میزان افت فشار کل در پره‌ها پرداخته می‌شود.

بررسی توزیع سرعت در خم‌های مختلف

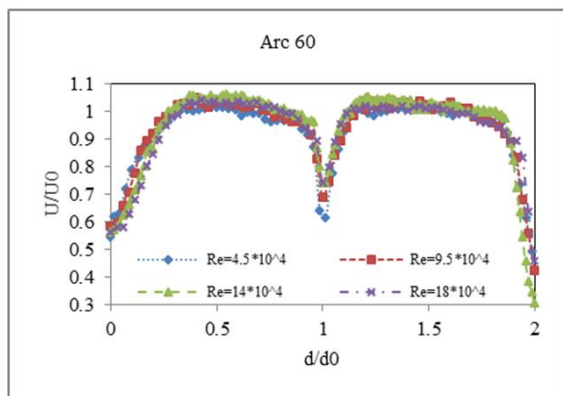
شکل (۷) توزیع سرعت بی‌بعد (سرعت خروجی به ورودی) در امتداد دهانه خروجی پره‌ها در رینولدزهای مختلف را برای پره با خم‌های ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه نشان می‌دهد. محور افقی

نشان‌دهنده محل داده‌برداری نسبت به محل قرارگیری هر یک از پره‌ها می‌باشد (نقاط ۰، ۱ و ۲ محل قرارگیری پره‌ها می‌باشند).

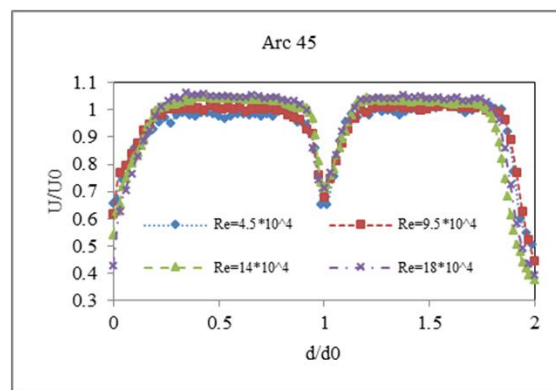
در هنگام عبور از خم‌ها با زاویه‌های مختلف، به علت قدرت جریان‌های ثانویه‌ای که وجود دارد تعداد گردابه‌های مختلفی را می‌توان مشاهده کرد. به‌عنوان مثال در خم‌های ۴۵ و ۶۰، در خروجی خم فقط یک گردابه را می‌توان تشخیص داد؛ در حالی که در خروجی خم با زاویه ۹۰ دو گردابه قابل شناسایی است [۱۳]. با حرکت به سمت جلو یک گردابه شکل می‌گیرد که با پیش‌روی به جلو و عبور از خم این گردابه شکسته و به دو گردابه ضعیف‌تر تبدیل می‌شود.

یافته و در این حالت نیز با افزایش عدد رینولدز نسبت سرعت بی‌بعد افزایش یافته و دنباله پره‌ها کوچک‌تر شده است. در خم ۹۰ درجه توزیع سرعت به یکنواختی دو خم دیگر نبوده و دنباله پره‌ها بزرگ‌تر می‌باشد. در این حالت نیز با افزایش عدد رینولدز نسبت سرعت بی‌بعد افزایش یافته و دنباله پره‌ها کوچک‌تر شده است.

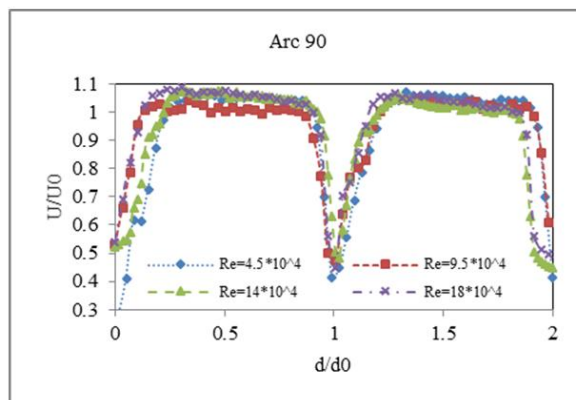
همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، در خم ۴۵ درجه توزیع سرعت در امتداد دهانه خروجی یکنواخت می‌باشد و دنباله پره‌ها کوچک می‌باشد. هم‌چنین با افزایش عدد رینولدز، نسبت سرعت بی‌بعد افزایش یافته و دنباله پره‌ها کوچک‌تر شده است. با افزایش خم به مقدار ۶۰ درجه یکنواختی سرعت کاهش



ب) پره با خم ۶۰ درجه



الف) پره با خم ۴۵ درجه



ج) پره با خم ۹۰ درجه

شکل ۷- توزیع سرعت بی‌بعد (سرعت خروجی به ورودی) در امتداد دهانه خروجی پره‌ها با خم‌های متفاوت

که h_b ضریب افت کل می‌باشد و ζ ضریب افت به واسطه تأثیر خم می‌باشد که مقادیر آن در جدول ۲ نشان داده شده است. هم‌چنین در خم‌ها به علت نیروی گریز از مرکز یک جریان ثانویه تشکیل می‌گردد که باعث افزایش افت می‌شود. با توجه به این که کم‌ترین میزان افت فشار کل در مدل پره مورد بررسی مربوط به مقدار گام ۲۵ درصد می‌باشد، هر سه نوع پره مورد آزمایش، دارای طول ورق‌های یکسان می‌باشند و

بررسی میزان افت فشار کل

همان‌طور که گفته شد، در خم‌ها علاوه بر افت انرژی ناشی از وجود اصطکاک، یک افت هم به علت تغییر در جهت جریان تولید می‌شود. افت انرژی کل جریان به صورت معادله ۵ تعریف می‌شود [۱۴].

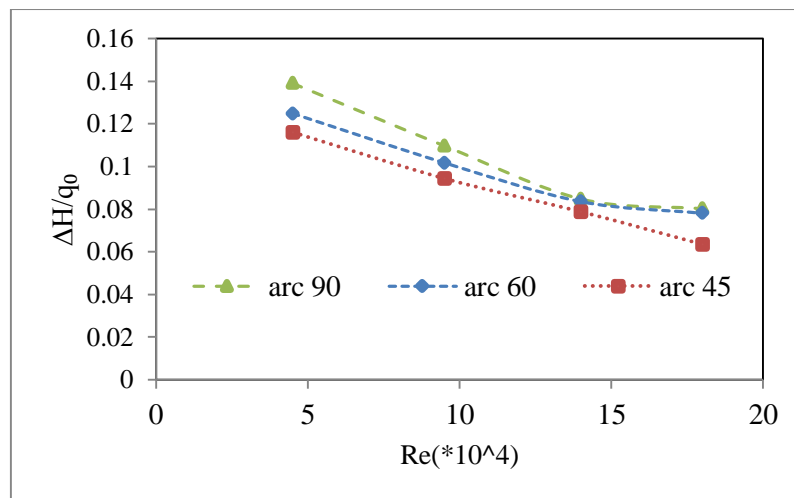
$$h_b = \zeta_b \frac{U^2}{2g} = \left(\zeta + \lambda \frac{l}{d} \right) \frac{U^2}{2g} \quad (5)$$

رینولدز، در خم‌های مورد آزمایش می‌باشد. با توجه به نحوه توزیع سرعت در دهانه خروجی پره‌ها (شکل (۷)) کم‌ترین میزان افت فشار کل با توجه به ابعاد پره‌ها مربوط به خم ۴۵ درجه می‌باشد که علت آن داشتن دنباله‌های کوچک‌تر ناشی از جریان‌های ثانویه است. همان‌طور که گفته شد با افزایش میزان زاویه خمیدگی، تعداد گردابه‌های تشکیل شده نیز بیشتر می‌شود.

جدول ۲- مقادیر ضریب افت به علت تغییر جهت جریان [۱۴]

Θ	R/D=۱	۲	۳	۴	۵
۴۵°	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۰۸	۰/۰۸۵	۰/۰۷
۶۰°	۰/۱۹	۰/۱۲	۰/۰۹۵	۰/۰۸۵	۰/۰۷
۹۰°	۰/۲۱	۰/۱۳۵	۰/۱۰	۰/۰۸۵	۰/۱۰۵

فاصله بین پره‌ها به اندازه‌ای می‌باشد که این مقدار پیچ حاصل شود. با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول ۱ و همچنین مراجع دیگر [۱۳] ضریب افت به واسطه تأثیر خم از پارامترهای نسبت شعاع کمان به فاصله بین پره‌ها و همچنین میزان خم تبعیت می‌کند. با در نظر گرفتن ابعاد پره‌های مورد آزمایش میزان نسبت شعاع کمان به فاصله بین پره‌ها برای خم‌های ۴۵، ۶۰ و ۹۰ به ترتیب ۶، ۵ و ۴ می‌باشد و مقدار ضریب افت به واسطه تأثیر خم برای آن‌ها تقریباً یکسان می‌باشد. همچنین با توجه به طول یکسان پره‌ها، افت حاصل از اصطکاک نیز در آنها برابر است. در این حالت پارامتر تأثیرگذار در تفاوت میزان افت فشار کل، افت حاصل از جریان‌های ثانویه می‌باشد. شکل (۸) نشان‌دهنده مقایسه میزان ضریب افت فشار کل با تغییر عدد



شکل ۸- مقایسه میزان ضریب افت فشار کل با تغییر عدد رینولدز، در خم‌های ۴۵، ۶۰ و ۹۰

خنک‌کن در این شرایط می‌باشد. جهت طراحی مناسب پره‌های مورد استفاده نیاز به بررسی تأثیر پارامترهای تغییر فاصله و خمیدگی پره‌های راهنما بر کیفیت جریان خروجی از پره‌ها می‌باشد. در این تحقیق تجربی با ساخت مدل‌های مختلف، تأثیر این پارامترها بر کیفیت جریان خروجی مورد مطالعه قرار گرفته است که بر این اساس می‌توان نتایج زیر را ارائه داد:

۱- بررسی سرعت بی‌بعد (سرعت خروجی به ورودی) در امتداد دهانه خروجی پره‌ها با گام‌های ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درصد نشان می‌دهد که یکنواخت‌ترین توزیع سرعت مربوط به پره با

نتیجه‌گیری

به منظور تغییر جهت جریان هوا و هدایت آن به مسیر دلخواه معمولاً از پره‌های راهنما استفاده می‌شود. وجود پره‌های راهنما در مسیر جریان هوای عبوری، همواره با مقداری تلفات قدرت همراه است و کاهش این تلفات نیاز به طراحی مناسب پره‌های راهنما دارد. استفاده از پره‌های راهنما جهت بهبود عملکرد برج‌های خنک‌کن خشک نیروگاهی به‌عنوان یک راه‌کار پیشنهادی جدید ارائه گردیده و به صورت میدانی مورد مطالعه قرار گرفته است، که نتایج نشان‌دهنده بهبود عملکرد برج

- [2] Klein G. J., Tupper K. F. and Green J. J. "The Design of Corners in Fluid Channels". *Canadian Journal of Research*, Vol. 3, 1930.
- [3] Harris R. G. and Fair R. A., "Wind Tunnel Experiments with Infinite Cascades of Airfoils", Aeronautical Research Council, Reports and Memoranda No 1206, 1929.
- [4] Frey K. "Reduction of Aerodynamical Losses in Channels by means of Guide Surfaces", *Forschung journal*, Vol. 5, No. 3., May 1934.
- [5] Corsiglia V. R., Olson L. E., Falarski M. D. , "Aerodynamic Characteristics of the Wind Tunnel at NASA Ames Research Center", NASA Technical Memorandum No 85946, 1984.
- [6] Lindgren B., "Flow Facility Design and Experimental Studies of Wall-Bounded Turbulent Shear-Flows", Technical Reports from Royal Institute of Technology Department of Mechanics, SE-10044, Stockholm, Sweden, December 2002.
- [7] Mathew J., "Design Fabrication And Characterization Of an Anechoic Wind Tunnel Facility", A Dissertation Presented to The Graduate School Of The University Of Florida In Partial Fulfillment Of The Requirements For The Degree Of Doctor Of Philosophy, University Of Florida, 2006.
- [۸] اردکانی، محمدعلی، رنجبر، محمدعلی، "بررسی میدانی الگوی جریان ورودی به رادیاتورهای برج خنک‌کن خشک هلر"، *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، دوره ۱۳، شماره ۱۱، ۱۳۹۲، ص ۳۰-۴۰.
- [۹] اردکانی، محمدعلی، انوری، آذر، رنجبر، محمدعلی، مزیدی، محسن، *بررسی تجربی تاثیر باد و دمای محیط بر عملکرد برج خنک کننده خشک نیروگاه منتظر قائم*، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، گزارش طرح ارجاعی، شماره ۱۰۱۰۷۸۹۶، ۱۳۹۳.
- [۱۰] اردکانی، محمدعلی "اصول طراحی و کاربرد تونل باد با سرعت پایین، تهران"، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، اردیبهشت ۱۳۸۸، صص ۱۴۲-۱۷۰.
- [11] Harvil L. M., "Standard Error of Measurement," *Instructional Topics in Educational Measurement*, pp. 33-41, 1991.
- [12] Bechwith T. G., Marangoni R. D. and Lienhard J. H., "Mechanical Measurements", Addison-Wesley Publishing Company, 1993.
- [۱۳] عظیمیان، احمدرضا، "بررسی جریان آرام سیال در خمهای با مقطع مربعی - مستطیلی" *مجله علمی پژوهشی استقلال*، سال ۲۳، شماره ۲، اسفند ۱۳۸۳.
- [14] Nakayama Y. "Introduction to Fluid Dynamics", Yokendo Co LTD Press, 2000.
- گام ۲۵ درصد می‌باشد و هم‌چنین دنباله ناشی از پره با گام ۲۵ درصد کوچک‌تر از دو نسبت دیگر است. هم‌چنین در پره با گام ۱۵ درصد توزیع سرعت خروجی یکنواخت می‌باشد ولی در نسبت گام ۳۵ درصد جریان به سمت فشاری پره‌ها متمایل گشته و توزیع سرعت در خروجی از یکنواختی خارج گردیده است.
- ۲- مقایسه میزان ضریب افت فشار کل برای پره‌ها با گام‌های ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درصد نشان می‌دهد که کم‌ترین میزان افت مربوط به نسبت گام ۲۵ درصد می‌باشد. هم‌چنین با افزایش عدد رینولدز در هر سه نسبت پیچ مورد آزمایش، مقدار افت فشار کل کاهش یافته است.
- ۳- بررسی توزیع سرعت بی‌بعد (سرعت خروجی به ورودی) در امتداد دهانه خروجی پره‌ها با خم‌های ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه نشان می‌دهد که توزیع سرعت در خم‌های ۴۵ و ۶۰ تقریباً یکنواخت‌تر از خم ۹۰ درجه می‌باشد و دنباله حاصل از پره‌ها در خم ۹۰ درجه بزرگ‌تر از دو خم دیگر می‌باشد. هم‌چنین با افزایش عدد رینولدز مشاهده می‌شود که نسبت سرعت خروجی به ورودی در هر سه خم افزایش یافته و دنباله پره‌ها کوچک‌تر شده‌اند.
- ۴- مقایسه میزان ضریب افت فشار کل برای پره‌ها با خم‌های ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه با توجه به ابعاد پره‌ها نشان می‌دهد که کم‌ترین میزان افت فشار کل مربوط به خم ۴۵ درجه می‌باشد که علت آن داشتن دنباله‌های کوچک‌تر ناشی از جریان‌های ثانویه است. با در نظر گرفتن ابعاد پره‌های مورد آزمایش میزان نسبت شعاع کمان به فاصله بین پره‌ها برای خم‌های ۴۵، ۶۰ و ۹۰ به ترتیب ۶، ۵ و ۴ می‌باشد و مقدار ضریب افت به واسطه تأثیر خم برای آن‌ها تقریباً یکسان می‌باشد. هم‌چنین با توجه به طول یکسان پره‌ها، افت حاصل از اصطکاک نیز در آن‌ها برابر است.

پی نوشت‌ها:

- 1- Pitch
- 2- Prob

منابع و مراجع

- [1] Patterson G. N., "Note on the Design of Corners in Duct Systems", Aeronautical Research Council, Reports and Memoranda No 1778, 1937.

