

## بررسی تجربی تأثیر زاویه جریان هوا در ورودی پره‌های راهنما بر کیفیت جریان خروجی

محمد علی رنجبر<sup>۱\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۰۵ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۰۵	به منظور کاهش تأثیر نامطلوب وزش باد بر عملکرد برج‌های خنک‌کن خشک نیروگاه‌های بخار، روش‌های مختلفی از جمله نصب پره‌های راهنما در مسیر جریان ورودی باد به برج خنک‌کن مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق تجربی، با هدف بررسی کارایی پره‌های راهنما در برج‌های خنک‌کن در شرایطی که جهت وزش باد متغیر می‌باشد، تأثیر تغییر زاویه جریان هوا در ورودی پره‌های راهنما بر کیفیت جریان خروجی و میزان دبی جریان هدایت شده توسط پره‌های راهنما، با استفاده از آزمایش‌های تونل باد مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در زاویه ورودی صفر درجه نسبت به سطح پره‌ها، توزیع سرعت در خروجی پره‌ها یکنواخت و دنباله پره‌ها کوچک و افت فشار کل در حدود ۲ درصد می‌باشد. با افزایش زاویه جریان هوا در ورودی به پره‌ها (در محدوده ۳۰ تا ۶۰ درجه)، یکنواختی توزیع سرعت از بین رفته و میزان افت فشار کل افزایش می‌یابد که نشان دهنده کاهش کارایی پره‌ها در هدایت جریان ورودی می‌باشد. به عنوان مثال، در زاویه جریان ورودی هوای ۶۰ درجه، پره فقط توانایی هدایت ۲۰ درصد از کل جریان عبوری را دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد در زوایایی که جریان از پشت به پره راهنما برخورد می‌کند، نصب پره باعث ایجاد تأثیرات مثبت از طریق تغییر در جهت جریان به سمت رادیاتورهای برج و در نتیجه بهبود عملکرد حرارتی آنها می‌شود.
<b>واژگان کلیدی:</b> پره راهنما، تونل باد، برج خنک‌کن خشک، افت فشار کل، دبی جریان هوا.	

جریان باد می‌باشد. محققین متعددی تأثیر باد بر عملکرد برج‌های خنک‌کن خشک را مورد مطالعه قرار داده‌اند. اردکانی و رنجبر [۱] در تحقیقی میدانی نشان داده‌اند که با وزش باد، رادیاتورهای سکتورهای قرار گرفته در موقعیت مماس به باد (در کناره‌های برج خنک‌کن) به دلیل سرعت گرفتن جریان در کناره‌های برج و نحوه ورود جریان به رادیاتورها دچار افت راندمان می‌شوند. نحوه ورود جریان به دلتاهای این سکتورها یک حرکت گردابه‌ای مانند دارد و فقط مقدار کمی از جریان از رادیاتورها عبور می‌کند و به علت کاهش دبی جریان عبوری از رادیاتورها، راندمان آنها کاهش می‌یابد.

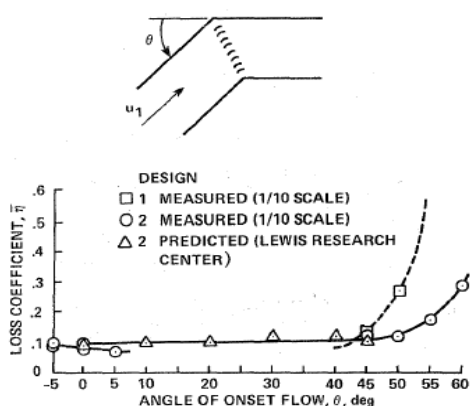
با توجه به مشخص شدن تأثیر نامطلوب باد بر عملکرد

### ۱- مقدمه

جهت خنک کردن آب در گردش نیروگاه‌های بخار از برج خنک‌کن استفاده می‌شود. اساس کار تمام برج‌های خنک‌کن بر مبنای ایجاد سطح تماس بیشتر بین جریان آب گرم و هوای سرد و در نتیجه تبادل حرارتی بین این دو می‌باشد. در مناطقی که به علت عدم وجود آب کافی باید از اتلاف آب و تبخیر بیشتر جلوگیری نمود، از برج خنک‌کن‌های خشک استفاده می‌گردد. در این برج‌ها آب گرم از لوله‌های فین‌دار که با هوای سرد در تماس است عبور کرده و خنک می‌گردد. یکی از مشکلات استفاده از این نوع برج‌ها، تأثیرپذیری نامناسب عملکرد آنها از شرایط محیطی و

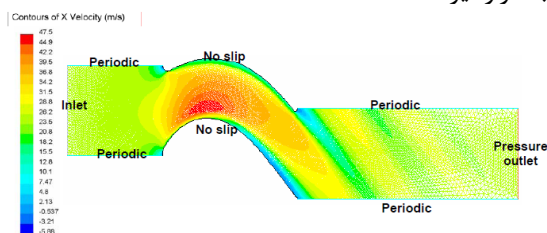
\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: M\_A\_Ranjbar@hotmail.com  
۱. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم‌الانبیاء (ص)

بنابراین توجه ویژه باید به طراحی پره‌ها در جریان بالادست باشد. گلدرا [۶] در تحقیقی به بازسازی تونل باد مرکز تحقیقات لوئیس ناسا پرداخت که نیاز به طراحی پره‌های راهنمای جدید به منظور بهینه سازی کارکرد آنها داشت. طراحی و آزمایشات با استفاده از مدل با مقیاس ۰/۱ و بیشترین سرعت گوشه‌ای برابر ۰/۳۵ ماخ انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که برای پره طراحی شده با تکنیک دو بعدی معکوس با تغییر زاویه جریان ورودی (شکل ۱)، کل افت گوشه برابر ۱۲ درصد فشار دینامیکی ورودی است که حدود ۴ درصد آن ناشی از اصطکاک پوسته‌ای پره‌های راهنما است، در حالی که در پره‌های کمان دایره‌ای متداول این مقدار حدود ۱۴ درصد است که ۷ درصد آن ناشی از اصطکاک پوسته‌ای است.



شکل ۱- تاثیر زاویه جریان ورودی بر میزان ضریب افت در تحقیقات گلدرا [۶]

در تحقیقی دیگر هانسن و همکاران [۷] به بررسی جریان‌های ثانویه بر روی پره‌ها با استفاده از مرئی‌سازی پرداخته‌اند. نتایج به دست آمده همان‌طور که در شکل (۲) دیده می‌شود، بیان می‌کند که الگوی رفتار جریان ثانویه در لایه مرزی پره‌ها و خمیدگی‌های مستطیلی که در زمان گردش جریان اصلی به وجود می‌آید، شامل یک گردش رو به بالا در انتهای دیواره لایه مرزی می‌باشد که به سمت منطقه نزدیک سطح فشاری می‌باشد. همچنین گردابه‌های لبه فرار نیز مشاهده نشده است.

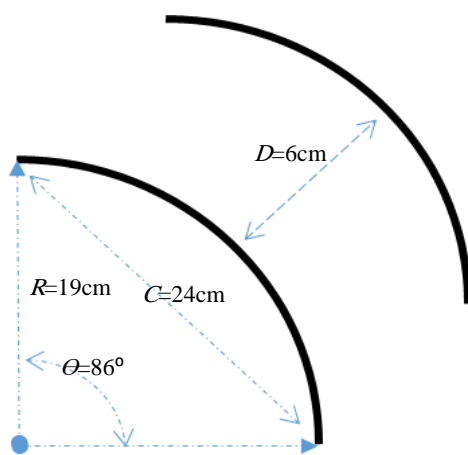


شکل ۲- نتایج شبیه‌سازی پره‌ها در تحقیقات هانسن [۷]

برج‌های خنک‌کن، محققین راه‌های متعددی را جهت حل این مشکل ارائه نموده‌اند که از آن جمله می‌توان به استفاده از دیوار بادشکن، تغییر هندسه برج و تزریق گاز به درون برج اشاره کرد. اردکانی و همکاران [۲] در طراحی پژوهشی به منظور اصلاح نحوه ورود جریان به رادیاتورهای قرار گرفته در سکتورهای بحرانی (در کنارهای برج خنک‌کن)، استفاده از پره‌های راهنما را به عنوان یک راه‌کار پیشنهاد داده‌اند. به این منظور یک سازه چهار پره‌ای ساخته شده و در دلتای بحرانی برج خنک‌کن خشک نیروگاه منتظر قائم کرج 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 مانند 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.

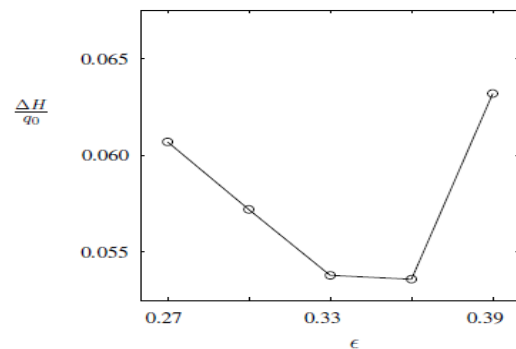
با توجه به این که بیشترین استفاده از پره‌های راهنما در تونل باد می‌باشد، لذا بیشتر تحقیقات انجام شده در این زمینه در زمان طراحی تونل‌های باد بوده است. بیشتر تحقیقات مربوط به پره‌های راهنما دارای قدمت ۵۰ ساله می‌باشد و داده‌های ارائه شده دارای جزئیات تجربی و تحلیلی نمی‌باشند. مبنای اکثر تحقیقات جدید بر اساس کارهای کولار [۳] و سالتر [۴] می‌باشد. کولار در تحقیقی که به صورت تجربی انجام گرفته است به دنبال مقطع ایرفویلی مناسب برای به کارگیری در گوشه‌های تونل باد بوده است. در این تحقیق سه مقطع ایرفویل متفاوت با طول وتر ۲ اینچ در تونل باد با حداکثر سرعت ۵۰ فوت بر ثانیه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نتایج نشان دهنده عملکرد بهتر ایرفویلی است که دارای دنباله کشیده است. سالتر در تحقیقی به منظور بهینه سازی یک تونل باد تحقیقاتی را بر روی پره‌ها انجام داده است. در این تحقیق تعدادی پره نازک در بین پره‌های ضخیم جایگذاری شده است. نتایج نشان دهنده بهبود عملکرد با استفاده از این کار می‌شود. کلاوتیت و همکاران [۵] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی یک بررسی سیستماتیک برای طراحی و شبیه‌سازی پارامترهای جریان در یک تونل باد مدار بسته انجام دادند. در این مدل مقیاس کامل تونل باد در نظر گرفته شد. آنالیزی که توسط تنظیم پره راهنما انجام گرفت نشان داد که شرایط جریان در بالادست نسبت به پایین دست تأثیرگذاری بیشتری روی بهینه‌سازی شرایط جریان دارد.

در یکنواختی جریان ایجاد شود [۱۰]. ضریب تلفات پره، نسبت افت فشار به فشار دینامیکی می‌باشد، که شامل تلفات اصطکاکی و تلفات ناشی از چرخش جریان می‌شود. پرها معمولاً به شکل‌های ورقه‌ای با ضریب تلفات ۰/۲، ورقه‌ای زبانه‌دار با ضریب تلفات ۰/۱۳ و ایرفویلی با ضریب تلفات ۰/۱۱ ساخته می‌شوند. اگر چه در نوع پره ایرفویلی، ضریب افت کم است، اما وجود پره‌های ایرفویلی در قسمتی از مسیر جریان همانند دیفیوزر عمل می‌کند و احتمال ایجاد جدایش جریان هوا در لایه مرزی وجود دارد، که در صورت ایجاد جدایش جریان، تلفات افزایش می‌یابد. همچنین این پرها 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 [۱۱]. با توجه به تغییرات زیاد جهت جریان و همچنین در نظر گرفتن هزینه ساخت، در طراحی پره‌های نصب شده در نیروگاه از پره ورقه‌ای زبانه‌دار استفاده گردیده و با توجه به آن محاسبات طراحی برای پره‌های مورد استفاده در آزمایشات تونل باد مقاله حاضر انجام و بر اساس شکل (۴) با مقیاس ۰/۱ ساخته شده است. در شکل (۴)،  $C$  طول وتر پره،  $R$  شعاع قطاع دایره‌ای و  $D$  فاصله بین دو پره می‌باشد. مطابق شکل (۴)، زاویه قطاع ۸۶ درجه، زاویه حمله پره ۴ درجه، زاویه فرار صفر درجه و فاصله بین پرها حدود یک چهارم وتر می‌باشد. همچنین به دو سر پره، دو زبانه اضافه شده، که طول هر یک ۰/۱ وتر است.



شکل ۴- مشخصات هندسی پره ساخته شده

در یک رساله دکتری که توسط لیندگرین [۸] 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 باز شونده‌گی، مناسب باقی بماند. بیشتر تونل‌های باد از پره‌های ربع دایره استفاده می‌کنند که در ادامه لبه فرار امتداد یافته‌اند. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، چنین پره‌هایی دارای ضریب افت فشار کل سه بعدی ۰/۲ می‌باشند.



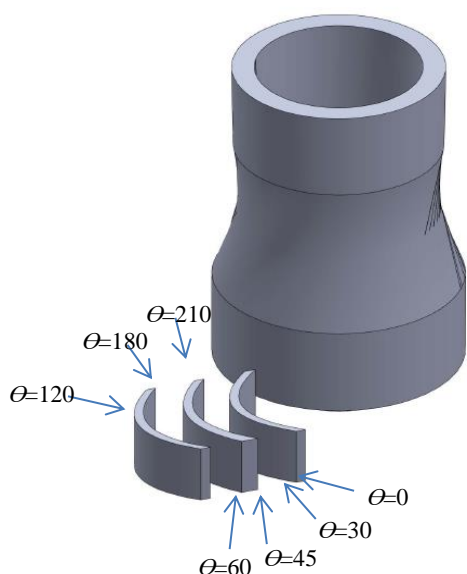
شکل ۳- ضریب افت فشار کل به عنوان تابعی از نسبت باز شونده‌گی (۴) در تحقیقات لیندگرین [۸]

با توجه به بررسی مطالعات پیشین، بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه پره‌های راهنما در خصوص طراحی پرها و عملکرد آنها در تونل‌های باد بوده که جهت جریان ورودی و خروجی آن مشخص است. از آنجایی که جهت وزش باد در نیروگاه متغیر می‌باشد، لذا نیاز است تا تاثیر تغییر زاویه جریان ورودی به پره بر کیفیت جریان خروجی بررسی گردد. در این مقاله به بررسی تجربی تغییر زاویه جریان ورودی به پره بر کیفیت جریان خروجی و همچنین تاثیر پره بر میزان دبی جریان هدایت شده با استفاده از تونل باد پرداخته می‌شود.

## ۲- روش آزمایش

پره باید به صورتی طراحی شود که ضریب تلفات آن کم بوده و علاوه بر آن هزینه ساخت آن نیز کم باشد [۹]. در میدان جریان یکنواخت، همه خطوط جریان به موازات صفحه مرکزی قرار دارند و بردارهای سرعت دارای مقادیر یکسانی هستند. بنابراین طراحی و بهینه‌سازی پره‌های راهنما باید به گونه‌ای انجام گیرد که کمترین میزان انحراف

حالتی است که پره به صورت مستقیم در برابر خروجی تونل باد قرار گرفته است و جریان به موازات دیواره‌های پره به آن وارد می‌شود. هدف از آزمایش‌های ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۱۰ بررسی تاثیر پره بر میزان انتقال دبی جریان به سمت برج در شرایطی می‌باشد که جهت باد محیطی عوض شده است. شکل (۶) شماتیک نحوه نصب میدانی پره راهنما در نیروگاه و زوایای ورود جریان به پره راهنما می‌باشد که با توجه به آن شبیه‌سازی آزمایش‌ها جهت استفاده در تونل باد انجام شده است.



شکل ۶- شماتیک محل نصب پره راهنما و زوایای ورود جریان

### ۳- بحث و بررسی نتایج

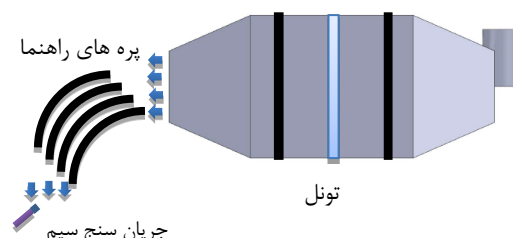
همان طور که گفته شد با وزش باد رادیاتورهای قرار گرفته در کنارهای برج خنک‌کن به علت شکل جریان عبوری دچار افت عملکرد می‌شوند. پره‌های راهنمای نصب شده در نیروگاه با در نظر گرفتن داده‌های هواشناسی ۱۰ ساله منطقه در جهت باد غالب قرار گرفته‌اند [۱۲]. از آنجایی که جهت باد دارای تغییرات می‌باشد، نیاز است تا تاثیر این تغییرات بر جریان عبوری از پره بررسی گردد. به این منظور سرعت خروجی از پره در زوایای مختلف جریان ورودی، میزان افت فشار کل در عبور از پره‌ها و توانایی پره‌های راهنما در هدایت دبی جریان عبوری به صورت تجربی در تونل باد مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۳-۱- بررسی توزیع سرعت خروجی از پره راهنما

شکل (۷) توزیع سرعت بی‌بعد (سرعت خروجی به ورودی) در امتداد دهانه خروجی پره‌ها در رینولدزهای مختلف را برای پره با زاویه جریان ورودی صفر درجه نشان می‌دهد.

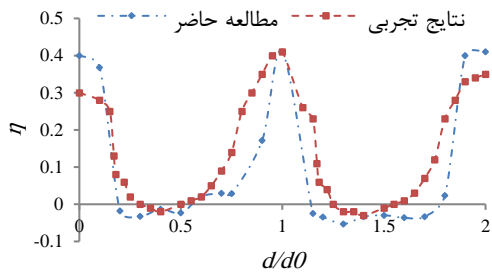
به طور کلی نسبت فاصله بین پره‌ها به وتر برای این نوع پره (پره از جنس ورق) در بازه ۰/۲ تا ۰/۳۵ است. با توجه به موارد فوق، جهت انجام آزمایش‌ها یک مدل با چهار پره ساخته شده است. در ساخت این مدل از ۴ ورق آهنی با ابعاد ۳۰ در ۳۰ سانتی‌متر و به ضخامت نیم میلی‌متر استفاده شده است. طول وتر هر یک از پره‌ها ۲۴ سانتی‌متر و فاصله بین پره‌ها ۶ سانتی‌متر می‌باشد. تونل بادی که جهت انجام آزمایش‌ها به کار گرفته شده، تونل باد مدار باز دمنده با فن سانتریفوژ و با سطح مقطع خروجی ۲۵ در ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد. 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 ۰/۳ درصد می‌باشد.

آزمایش‌ها در سرعت‌های ۲/۵، ۵، ۷ و ۱۰ متر بر ثانیه انجام شده است که با توجه به وتر پره در محدوده اعداد رینولدز  $4 \times 10^4$  تا  $1/8 \times 10^5$  می‌باشد. جهت اندازه‌گیری توزیع سرعت لحظه‌ای خروجی از پره و کیفیت جریان، از دستگاه جریان سنج سیم داغ استفاده شده است. پراب مورد استفاده از نوع یک بعدی بوده و سنسور آن از نوع تنگستن ۵ میکرونی است. داده‌های اندازه‌گیری شده از طریق کارت آنالوگ به دیجیتال به رایانه منتقل و تجزیه و تحلیل می‌شود. 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 مبدا شروع به حرکت نموده و داده‌برداری انجام شده است. شکل (۵) نشان دهنده بستر آزمون می‌باشد.

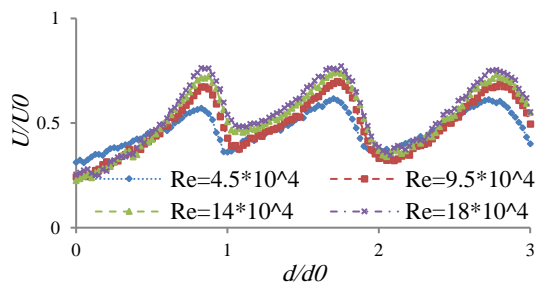


شکل ۵- نمای بالایی بستر آزمون به کار رفته در آزمایش‌ها

با توجه به نحوه نصب پره در نیروگاه، زوایای ورود جریان به پره در تونل باد ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۱۰ درجه در نظر گرفته شده است. منظور از زاویه صفر درجه

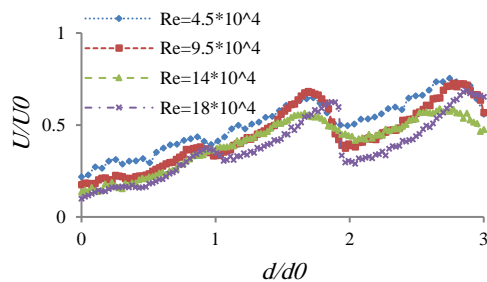


شکل ۸- مقایسه میزان ضریب افت فشار کل بر حسب فاصله در مطالعه حاضر و نتایج تجربی در تحقیق کورسیگلیا [۱۳]



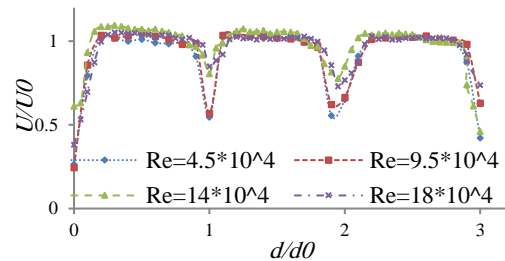
شکل ۹- توزیع سرعت بی بعد در امتداد دهانه خروجی پره‌ها در زاویه ورودی ۳۰ درجه

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه جریان ورودی، علاوه بر این که یکنواختی سرعت در خروجی پره‌ها وجود ندارد و جریان خروجی به سمت سطح فشاری پره‌ها متمایل شده است، با توجه به زاویه جریان نسبت به پره‌ها، پره‌های ۰ و ۱ عملکرد خود را از دست داده و فقط مقدار کمی از جریان را منتقل می‌کنند. شکل (۱۱) سرعت بی بعد (سرعت خروجی به ورودی) در امتداد دهانه خروجی پره‌ها در رینولدزهای مختلف را برای پره با زاویه جریان ورودی ۶۰ درجه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه جریان ورودی به ۶۰ درجه تقریباً تمامی پره‌ها دچار کاهش تاثیر در هدایت جریان شده‌اند. همچنین با افزایش عدد رینولدز نسبت سرعت خروجی به ورودی کاهش یافته است.



شکل ۱۰- توزیع سرعت بی بعد در امتداد دهانه خروجی پره‌ها در زاویه ورودی ۴۵ درجه

محور افقی نشان دهنده محل داده برداری نسبت به محل قرارگیری هر یک از پره‌ها می‌باشد (نقاط ۰، ۱، ۲ و ۳ محل قرارگیری پره‌ها می‌باشد). همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، در زاویه ورودی صفر درجه، توزیع سرعت در خروجی پره‌ها به صورت یکنواخت می‌باشد و دنباله ناشی از پره‌ها کوچک می‌باشد. همچنین با افزایش عدد رینولدز دنباله ناشی از پره‌ها کوچک‌تر شده است.



شکل ۷- توزیع سرعت بی بعد در امتداد دهانه خروجی پره‌ها در زاویه ورودی صفر درجه

جهت اعتبارسنجی داده‌ها از نتایج ارائه شده در تحقیقات کورسیگلیا [۱۳] استفاده می‌شود. وی در تحقیقی تجربی ضریب افت فشار کل  $\eta$  را با استفاده از توزیع سرعت اندازه‌گیری شده از جریان خروجی پشت پره‌ها در شرایطی که زاویه جریان ورودی صفر درجه بوده است، به دست آورده است. شکل (۸) داده‌های مربوط به ضریب افت فشار کل در تحقیقات کورسیگلیا و توزیع افت فشار در پشت پره‌ها در زاویه جریان ورودی صفر درجه در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج همخوانی مناسبی دارند و علت اختلاف موجود نیز نازک‌تر بودن پره‌های به کار رفته در تحقیق حاضر می‌باشد که باعث کوچک‌تر شدن دنباله آنها می‌شود.

شکل (۹) سرعت بی بعد (سرعت خروجی به ورودی) در امتداد دهانه خروجی پره‌ها در رینولدزهای مختلف را برای پره با زاویه جریان ورودی ۳۰ درجه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه جریان ورودی، یکنواختی سرعت در خروجی پره‌ها از بین رفته و جریان خروجی به سمت سطح فشاری پره‌ها متمایل شده است. علاوه بر این نسبت سرعت خروجی به ورودی نیز با افزایش زاویه کاهش یافته است، که بیان کننده کاهش تاثیر پره در هدایت جریان می‌باشد.

شکل (۱۰) سرعت بی بعد (سرعت خروجی به ورودی) در امتداد دهانه خروجی پره‌ها در رینولدزهای مختلف را برای پره با زاویه جریان ورودی ۴۵ درجه نشان می‌دهد.

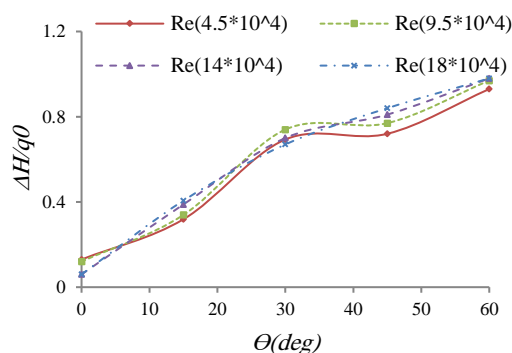
فشار اتمسفر می‌باشد و لذا ضریب افت فشار کل از معادله

(۴) به دست می‌آید:

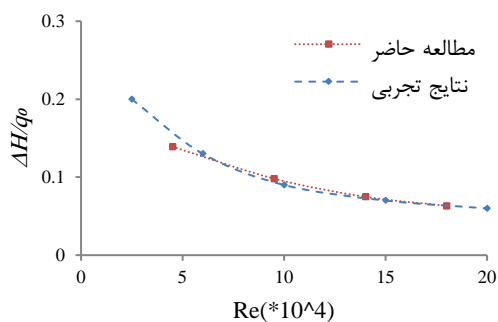
$$\frac{\Delta H}{q_0} = 1 - \frac{V_1^2}{V_0^2} \quad (4)$$

شکل (۱۲) نشان دهنده مقایسه میزان ضریب افت فشار کل برای زوایای مختلف ورودی به پره می‌باشد.

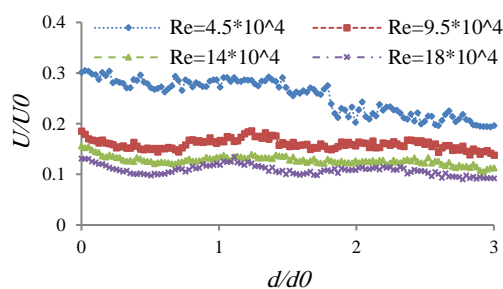
همان‌طور که مشاهده می‌شود، کمترین میزان افت فشار مربوط به زاویه صفر درجه می‌باشد. با افزایش زاویه جریان ورودی میزان افت افزایش می‌یابد که می‌توان نیاز به چرخش بیشتر جریان را یکی از دلایل آن دانست. همچنین همان‌طور که در نمودارهای توزیع سرعت مشاهده شد، با افزایش زاویه جریان ورودی، جریان در خروجی از پره‌ها به سمت سطح فشاری متمایل شده که باعث افزایش افت فشار کل می‌شود. شکل (۱۳) نشان دهنده نتایج افت فشار در زاویه صفر درجه در مقایسه با نتایج به دست آمده در تحقیقات لیندگرین [۸] است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج دارای همخوانی بسیار مناسبی می‌باشند.



شکل ۱۲- میزان افت فشار کل بر حسب رینولدز در زاویه‌های ورودی مختلف



شکل ۱۳- مقایسه میزان افت فشار کل بر حسب رینولدز در مطالعه حاضر و نتایج تجربی لیندگرین [۸]



شکل ۱۱- توزیع سرعت بی‌بعد در امتداد دهانه خروجی پره‌ها در زاویه ورودی ۶۰ درجه

### ۳-۲- بررسی میزان افت فشار کل

تلفات در پره‌های راهنما شامل تلفات اصطکاکی و تلفات ناشی از چرخش جریان است که تابعی از عدد رینولدز است. بدون وجود پره‌ها جریان چرخشی و غیریکنواخت در خروجی ایجاد می‌شود [۱۴]. در بررسی افت فشار، کمیت‌هایی که باید اندازه‌گیری شوند شامل 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 بالا دست پره می‌باشد. ضریب افت فشار کل از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$\frac{\Delta H}{q_0} = \frac{P_{t0} - \overline{p_{t1}}}{q_0} \quad (1)$$

در رابطه (۱) موقعیت ۰ در بالا دست پره و موقعیت ۱ در پایین دست جریان پره می‌باشد.  $P_{t0}$  فشار کل در نقطه صفر و  $\overline{p_{t1}}$  مقدار میانگین فشار کل در مقطع عبوری موقعیت ۱ می‌باشد.  $\Delta H$  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:

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

که  $n$  تعداد پره‌هایی است که روی آنها انتگرال‌گیری 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.

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

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

به عنوان مثال در زاویه ورودی ۶۰ درجه مشاهده می‌شود که پره توانایی هدایت ۲۰ درصد از دبی جریان عبوری از کنار برج به سمت برج را دارد که همین مقدار نیز باعث افزایش دبی عبوری از رادیاتورها و بهبود عملکرد آنها نسبت به زمانی که پره وجود ندارد، می‌شود. نتایج آزمایش میدانی نشان می‌دهد که در حالت بدون پره دبی جریان عبوری از رادیاتورهای کناری برج حدود ۵ تا ۱۰ درصد جریان عبوری از کنار برج می‌باشد. همچنین در حالتی که جریان از زوایای پشت (۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۱۰) به پره می‌خورد، نیز مشاهده می‌شود که پره توانایی چرخش جریان به سمت لورها (ورودی رادیاتورهای برج) را دارد. البته جریان خروجی در این حالت به یکنواختی زاویه صفر درجه نمی‌باشد. لذا در شرایطی که جهت باد محیطی عوض می‌شود نیز پره‌ها باعث افزایش دبی عبوری از رادیاتورها و در نتیجه بهبود عملکرد آنها می‌شوند و استفاده از پره‌های راهنمای ثابت در شرایطی میدانی که جهت باد عوض می‌شود نیز به بهبود عملکرد برج کمک می‌کنند.

#### ۴- نتیجه گیری

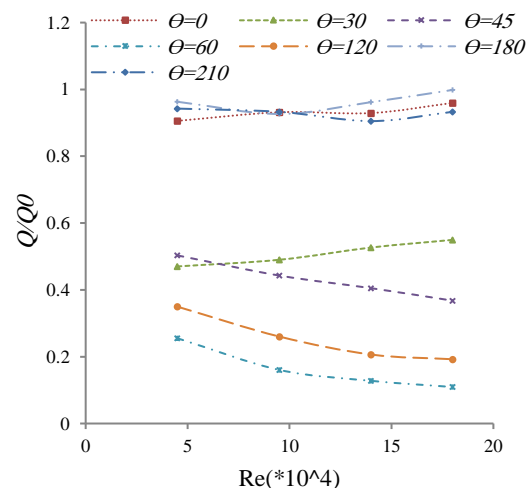
با توجه به این که در زمان وزش باد رادیاتورهای قرار گرفته در کنارهای برج‌های خنک‌کن به علت الگوی جریان عبوری با کاهش دبی جریان و افت عملکرد مواجه می‌شوند، از پره‌های راهنما به عنوان یک راه‌کار پیشنهادی جدید استفاده گردیده است و به صورت میدانی در شرایطی که باد در زاویه صفر درجه به پره‌های راهنما وارد می‌شود، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده بهبود عملکرد برج خنک‌کن در این شرایط می‌باشد. با توجه به این که جهت باد در شرایط میدانی متغیر می‌باشد، نیاز است تا تاثیر این تغییرات نیز بر جریان عبوری از پره‌های راهنما بررسی گردد. در این تحقیق تجربی تاثیر تغییر زاویه جریان ورودی به پره انجام شده و با بررسی داده‌ها می‌توان نتایج زیر را ارائه داد:

۱- در زاویه ورودی صفر درجه، توزیع سرعت در خروجی پره‌ها به صورت یکنواخت می‌باشد و دنباله ناشی از پره‌ها بسیار کوچک می‌باشد. با افزایش عدد رینولدز، دنباله ناشی از پره‌ها کوچک‌تر شده و میزان اتلاف انرژی نیز کاهش می‌یابد. در این شرایط راندمان دبی جریان هدایت شده توسط پره حدود ۹۸ درصد می‌باشد که باعث بهبود عملکرد

#### ۳-۳- بررسی توانایی پره در میزان هدایت دبی جریان عبوری

همان‌طور که ذکر گردید با وزش باد سکتورهای قرار گرفته در موقعیت مماس به باد به دلیل سرعت گرفتن جریان در کنارهای برج و در نتیجه کاهش دبی جریان عبوری از رادیاتورها دچار افت راندمان می‌شوند.

با توجه به این که باد دارای انرژی می‌باشد، اگر این انرژی به صورت کنترل شده به رادیاتورها وارد شود، دارای اثرات مفید خواهد بود. در این قسمت به بررسی تاثیر پره بر میزان انتقال دبی جریان عبوری پرداخته می‌شود. شکل (۱۴) نشان دهنده مقایسه میزان نسبت دبی هدایت شده توسط پره (به سمت ورودی رادیاتورهای برج) به دبی جریان عبوری از کنار برج برای زوایای مختلف جریان ورودی می‌باشد. به این منظور حجم کنترلی که در نظر گرفته شده به اندازه خروجی تونل باد و سطح ورودی پره‌ها می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در زاویه جریان ورودی صفر درجه که بهترین حالت ورود جریان به پره می‌باشد، پره‌های راهنما حدود ۹۸ درصد جریان را به سمت برج هدایت می‌کنند که متناسب با مقداری است که در آزمایشات میدانی نیز مشاهده گردیده است. این امر باعث بهبود عملکرد رادیاتورهای کناری برج و در نتیجه راندمان کل برج می‌شود. با افزایش زاویه جریان ورودی، به علت زاویه گرفتن پره‌ها نسبت به ورودی جریان، توانایی آنها در هدایت جریان عبوری کاهش می‌یابد.



شکل ۱۴- نسبت دبی هدایت شده توسط پره به دبی جریان عبوری از کنار برج در زوایای مختلف جریان ورودی

بهبود عملکرد آن‌ها در مقایسه با حالت بدون پره می‌شود (نتایج آزمایش میدانی نشان می‌دهد که در حالت بدون پره دبی جریان عبوری از رادیاتورهای کناری برج حدود ۵ تا ۱۰ درصد جریان عبوری از کناره برج می‌باشد).  
 ۳- در حالتی که جریان از زوایای پشت (۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۱۰) به پره می‌خورد، مشاهده می‌شود که علت زاویه‌ای که پره‌ها نسبت به جریان دارند، باعث چرخش جریان به سمت رادیاتورهای برج شده و در نتیجه آن دبی جریان عبوری از رادیاتورها افزایش یافته و عملکرد آنها بهبود می‌یابد. لذا استفاده از پره‌های ثابت در شرایطی که جهت باد محیطی تغییر یافته است نیز باعث بهبود عملکرد برج‌های خنک‌کن خشک می‌شود.

رادیاتورهای برج خنک‌کن شده و نتایج آزمایش میدانی نیز نشان‌دهنده این موضوع می‌باشد.

۲- با افزایش زاویه جریان ورودی به پره‌ها، یکنواختی سرعت در خروجی پره‌ها از بین رفته و جریان خروجی به سمت سطح فشاری پره‌ها متمایل شده است و نسبت سرعت خروجی به ورودی نیز کاهش یافته است. همچنین دنباله حاصل از پره‌ها بزرگ‌تر شده و باعث افزایش اتلاف انرژی می‌شود. میزان تاثیر پره‌های راهنما بر جریان نیز با افزایش زاویه ورودی کاهش یافته است و به عنوان مثال در زاویه ورودی ۶۰ درجه پره توانایی هدایت ۲۰ درصد جریان عبوری را دارد. البته قابل ذکر است که همین مقدار دبی هدایت شده به سمت رادیاتورهای کناری برج نیز باعث

## مراجع

- [۱] م. اردکانی، م. رنجبر، "بررسی میدانی الگوی جریان ورودی به رادیاتورهای برج خنک‌کن خشک هلر"، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۳، شماره ۱۱، ۱۳۹۲، صفحه ۳۰-۴۰.
- [۲] م. اردکانی، آ. انوری، م. رنجبر، م. مزیدی، بررسی تجربی تاثیر باد و دمای محیط بر عملکرد برج خنک‌کننده خشک نیروگاه منتظر قائم، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، گزارش طرح ارجاعی، شماره ۱۰۱۰۷۸۹۶، ۱۳۹۳.
- [3] A.R. Collar, "Some Experiments with Cascades of Airfoils". Aeronautical Research Council, Reports and Memoranda, No. 1768, 1937.
- [4] C. Salter, "Experiments on Thin Turning Vanes". Aeronautical Research Council, Reports and Memoranda, No. 2469, 1946.
- [5] Calautit, John Kaiser, "A Validated Design Methodology for a Closed-Loop Subsonic Wind Tunnel", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 125, 2014, pp. 180-194.
- [6] T.F. Gelder, R. D. Moore, J.M. Sanz, E.R. Mcfarland, "Wind Tunnel Turning Vanes of Modern Design", AIAA Paper-86-0044, January, Reno, Nevada, 1986.
- [7] A.G. Hansen, H. Z. Herzing, G.R. Costello, "A Visualization Study Of Secondary Flows In Cascades", NACA TN 2947, 1953.
- [8] B. Lindgren, "Flow Facility Design and Experimental Studies of Wall-Bounded Turbulent Shear-Flows", Technical Reports from Royal Institute of Technology Department of Mechanics, SE-100 44, Stockholm, Sweden, 2002.
- [۹] م. اردکانی، اصول طراحی و کاربرد تونل باد با سرعت پایین، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۸، صفحه ۱۴۲-۱۷۰.
- [10] S.F. Moujaes, S. Aekula, "CFD Predictions and Experimental Comparisons of Pressure Drop Effects of Turning Vanes in 90 Duct Elbows", Journal of Energy Engineering, Vol. 20, No 2, 2009.



[11] P. Moonen, B. Blocken, J. Carmeliet, "Indicators for the Evaluation of Wind Tunnel Test Section Flow Quality and Application to a Numerical Closed-Circuit Wind Tunnel", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 95, No. 9-11, 2007, pp. 1289-1314.

[۱۲] گزارش داده‌های هواشناسی (۲۰۰۳-۲۰۱۴)، ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کشاورزی کرج.

[13] V.R. Corsiglia, L.E. Olson, M.D. Falarski, "Aerodynamic Characteristics of the Wind Tunnel at NASA Ames Research Center", *NASA Technical Memorandum No 85946*, 1984.

[14] S. Watkins, S. Ravi, B. Loxton, "The Effect of Turbulence on the Aerodynamics of Low Reynolds Number Wings", *Advanced Online Publication, Engineering Letters*, Vol. 18, No. 3, 2010.