

دانشگاه شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان:

تحقیق تجربی اثر دیواره بادشکن در بالای برجهای خنک کن
جابجایی طبیعی خشک

دانشجو : امیر مولوی

اساتید راهنما :

دکتر محمد حسن کیهانی

دکتر محمد محسن شاه مردان

بهمن ماه ۱۳۸۷



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مکانیک

گروه تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای امیر مولوی

تحت عنوان

" تحقیق تجربی اثر دیواره بادشکن در بالای برجهای خنک کن جابجایی طبیعی خشک "

در تاریخ ۱۳۸۷/۱۱/۷ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی : علی عباس نژاد		نام و نام خانوادگی : محمد حسن کیهانی
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : محمد محسن شاه مردان

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : محمد جواد مغربی
	مجتبی قطعی		نام و نام خانوادگی : محمود فرزانه گرد
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تعهد نامه

اینجانب **اثر مروری** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد / دکتری رشته **مهندسی مکانیک** ... **توسعه** ... **انرژی** ...
دانشگاه ... **صنعتی** ... **شاهرود** نویسنده پایان نامه / رساله ... **تحقیق** ... **تجزیه** ... **ایر** ... **دینار** ...
... **سالی** ... **خبر** ... **طبی** ... تحت راهنمایی **دکتر محمد حسن شاهرود** ... متعهد می شوم .
دکتر محمد حسن شاهرود

- تحقیقات در این پایان نامه / رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه / رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه / رساله تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه / رساله رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ: ۸۷/۱۱/۷

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه / رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد .

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه / رساله وجود داشته باشد .

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم که همواره حامی و پشتیبان زندگی من بودند

تقدیم به

همسر مهربانم که یار و مددکار من بود

تقدیم به

استاد بزرگوار جناب آقای محمد حسن کیهانی

و

اساتید گرانقدر دانشکده مکانیک که در طول تحصیل خود افتخار شاگردی آنان
را داشته ام

تشکر و قدر دانی

پس از حمد، سپاس و ستایش خداوند لازم می دانم تقدیر و تشکر ویژه خود را از اساتید ارجمند، دکتر محمد حسن کیهانی، دکتر محمد محسن شاه مردان و دکتر علی عباس نژاد که راهنمایی ها و حمایت های ارزنده شان همواره راهگشا و روشنی بخش مسیر پیشبرد اهداف این پایان نامه بود، ابراز دارم.

چکیده

برج های خنک کن خشک یکی از متداول ترین برج ها در نیروگاههای موجود در مناطق کم آب می باشند. یکی از مشکلاتی که در رابطه با عملکرد این برج ها مطرح است اثرات شرایط محیطی بر عملکرد آنهاست. از موثرترین این عوامل، وزش باد است. باد با ایجاد پدیده ای با نام اثر در پوشی (Wind Cover) مانع از خروج توده هوای گرم خروجی می شود. در این پروژه با استفاده از تونل باد و جریان سنج سیم داغ (Hot Wire Anemometer) تاثیر باد بر دبی، توزیع سرعت و فشار خروجی از دهانه برج، بررسی شده است.

در انتها برای بهبود عملکرد برجها تحت شرایط باد متقاطع، ایجاد تغییراتی در شکل خارجی برج (استفاده از دیواره های باد شکن) پیشنهاد شده و اثرات دیوارهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که استفاده از دیوارهای بادشکن در خروجی برج باعث کاهش اثر نامطلوب باد می شود.

واژه های کلیدی: برج خنک کن خشک- باد متقاطع- اثر درپوشی - تونل باد- جریان سنج سیم داغ- دیواره بادشکن.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ا	تقدیم
ب	تشکر و قدر دانی
ج	چکیده
د	فهرست مطالب
ز	فهرست شکلها
ک	فهرست جداول
ل	فهرست نشانه ها
۱	فصل اول-مقدمه
۲	۱-۱- سیستم های خنک کن
۳	۱-۱-۱- سیستم خنک کن تر
۴	۱-۱-۲- سیستم خنک کن خشک
۷	۱-۱-۳- تقسیم بندی برجهای خنک کن
۱۰	۲-۱- اثر شرایط محیطی
۱۱	۱-۲-۱- دمای محیط
۱۲	۱-۲-۲- رطوبت نسبی
۱۲	۱-۲-۳- سرعت باد
۱۴	فصل دوم- هدف از انجام پایان نامه
۱۵	۱-۲- هدف از انجام این پایان نامه
۱۵	۲-۲- روش های تحقیق در زمینه برج خنک کن
۱۶	۲-۳- مبانی تئوریک تحقیق
۱۹	فصل سوم- مروری بر اقدامات انجام گرفته
۲۰	۱-۳- مروری بر اقدامات انجام گرفته
۳۰	فصل چهارم- تئوری و اصول عملکرد دستگاه جریان سنج سیم داغ
۳۱	۱-۴- کمیت های مهم جریان سیال
۳۳	۲-۴- ویژگی های دستگاه جریان سنج سیم داغ
۳۵	۳-۴- اجزای تشکیل دهنده دستگاه جریان سنج سیم داغ
۳۵	۴-۴- مدار الکترونیکی دستگاه جریان سنج سیم داغ
۳۶	۱-۴-۴- مدار الکترونیکی دما ثابت
۳۸	۲-۴-۴- نسبت فراگرمایی
۳۹	۵-۴- اصول عملکرد دستگاه جریان سنج سیم داغ

۴۱	..... ۶-۴- انتقال حرارت
۴۲	..... ۱-۶-۴- انتقال حرارت از سیمی با طول محدود (سنسور سیم داغ)
۴۵	..... ۷-۴- پاسخ فرکانسی دستگاه جریان سنج سیم داغ
۴۶	..... ۱-۷-۴- پاسخ فرکانسی سنسور سیم داغ
۴۶	..... ۲-۷-۴- پاسخ فرکانسی جریان سنج سیم داغ
۴۸	..... ۸-۴- اثر دما بر روی اندازه گیری دستگاه جریان سنج سیم داغ
۵۱	..... ۱-۸-۴- روشهای کاهش اثر دما بر اندازه گیری سرعت جریان سیال
۵۵	..... ۹-۴- اندازه گیری سرعت لحظه ای جریان سیال
۵۵	..... ۱-۹-۴- رابطه سرعت جریان سیال و ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ
۵۷	..... ۲-۹-۴- اندازه گیری جریان سیال یک بعدی
۵۸	..... ۳-۹-۴- تبدیل ولتاژ به سرعت لحظه ای و تجزیه و تحلیل آن
۵۹	..... ۴-۹-۴- تجزیه و تحلیل سرعت لحظه ای اندازه گیری شده
۶۲	..... ۵-۹-۴- بررسی اثر شدت اغتشاشهای جریان سیال در اندازه گیری سرعت جریان سیال
۶۶	..... فصل پنجم- تونل باد
۶۷	..... ۱-۵- آزمایشهای تونل باد
۶۹	..... ۲-۵- تاریخچه تونل باد
۷۱	..... ۳-۵- انواع تونل باد
۷۶	..... ۱-۳-۵- ویژگیهای تونل باد مدار باز
۷۷	..... ۲-۳-۵- ویژگیهای تونل باد مدار بسته
۷۷	..... ۴-۵- اجزای تونل باد
۷۹	..... ۱-۴-۵- اتاق آزمون
۷۹	..... ۲-۴-۵- دیفیوزر
۸۰	..... ۳-۴-۵- نازل
۸۱	..... ۴-۴-۵- گوشه
۸۳	..... ۵-۴-۵- اتاق آرامش
۸۵	..... ۶-۴-۵- فن
۸۹	..... ۵-۵- تونل باد ویژه با سرعت کم
۹۰	..... ۱-۵-۵- تونل باد لایه مرزی
۹۱	..... ۶-۵- تشابه جریان در تونل باد
۹۲	..... ۱-۶-۵- آنالیز ابعادی
۹۳	..... ۲-۶-۵- پارامترهای مهم در جریان سیال
۹۵	..... ۳-۶-۵- تشابه هندسی، سینماتیکی و دینامیکی
۹۶	..... ۴-۶-۵- معادله های اساسی حرکت جریان سیال

۹۸	..... فصل ششم-پیش فرض ها و روش انجام آزمایش
۹۹	..... ۱-۶- مشخصات تونل باد
۱۰۱	..... ۲-۶- مدل برج خنک کن
۱۰۲	..... ۳-۶- بررسی شرایط، پیش فرض ها و مدلسازی
۱۰۵	..... ۴-۶- روش انجام آزمایش
۱۰۸	..... فصل هفتم- نتایج، بحث و نتیجه گیری
۱۰۹	..... ۱-۷- توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل
۱۱۲	..... ۲-۷- تغییرات دبی جرمی عبوری از برج مدل
۱۱۳	..... ۳-۷- مقایسه ای بین نتایج تجربی و عددی
۱۱۶	..... ۴-۷- تغییرات ضریب فشار میانگین در گلوگاه برج مدل
۱۱۹	..... مراجع و مأخذ

فهرست شکلها

صفحه	عنوان
۳	شکل (۱-۱) سیستم خنک کن یک بار گذر
۵	شکل (۲-۱) سیستم خنک کن خشک مستقیم
۶	شکل (۳-۱) برج خنک کن خشک غیر مستقیم و کندانسور تماس مستقیم
۷	شکل (۴-۱) برج خنک کن جابجایی طبیعی
۸	شکل (۵-۱) برج خنک کن دمشی
۹	شکل (۶-۱) برج خنک کن مکشی
۱۰	شکل (۷-۱) برج خنک کن جریان مخالف
۱۸	شکل (۱-۲) آرایش مختلف خنک کننده ها
۲۲	شکل (۱-۳) توزیع فشار برجها و مدل‌های آنها
۲۳	شکل (۲-۳) توزیع فشار برجهای خنک کن
۲۴	شکل (۳-۳) توزیع فشار داخلی و خارجی برج
۲۵	شکل (۴-۳) توزیع فشار برای دو برج در آرایش پشت سر هم با فواصل مختلف از هم
۲۶	شکل (۵-۳) توزیع فشار در گلوبی برج نسبت به سرعت جریان باد به سرعت میانگین ورودی به رادیاتورها
۲۸	شکل (۶-۳) مقایسه بین توزیع فشار بدست آمده در پیرامون برج با نتایج تئوری نیمان
۲۸	شکل (۷-۳) میزان ضریب فشار در گلوبی
۳۵	شکل (۱-۴) شماتیک سیستم دستگاه جریان سنج سیم داغ به همراه تجهیزات جانبی
۳۷	شکل (۲-۴) مدار الکترونیکی دما ثابت CT
۴۰	شکل (۳-۴) شماتیک مدار اندازه‌گیر منحنی مشخصه سنسور سیم داغ
۴۰	شکل (۴-۴) منحنی مشخصه پراب با سنسور سیم داغ از جنس تنگستن به قطر $5 \mu m$ و طول $1,25 mm$ در سرعت‌های مختلف جریان هوا
۴۳	شکل (۵-۴) هندسه سنسور سیم داغ و توازن انرژی برای المان سنسور سیم داغ
۴۷	شکل (۶-۴) اعمال سیگنال موج مربعی به مدار الکترونیکی دما ثابت CT
۴۸	شکل (۷-۴) پاسخ فرکانسی پراب سیم داغ در مدار الکترونیکی CT نسبت به سیگنال موج مربع
۴۹	شکل (۸-۴) کاهش ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ برای سنسور فیلم داغ بر اثر افزایش دمای محیط در نسبت فراگرمایی ۰,۴
۵۰	شکل (۹-۴) روند کاهش ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ برای سنسور فیلم داغ بر اثر افزایش دمای محیط در سرعت $U = 10 m/s$

- شکل (۴-۱۰) مقایسه شیب کاهش ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج
سیم داغ برای سنسور فیلم داغ و سنسور سیم داغ ۵۱
- شکل (۴-۱۱) نحوه‌ی قرارگیری پراب سنسور سیم داغ به همراه مقاومت
جبران کننده در مدار الکترونیکی دما ثابت CT ۵۲
- شکل (۴-۱۲) بردار سرعت و مؤلفه‌های آن نسبت به مختصات سنسور ۵۶
- شکل (۴-۱۳) بررسی سرعت لحظه‌ای در حوزه زمان و در حوزه فرکانس ۶۱
- شکل (۴-۱۴) سنسور سیم داغ در جریان یک بعدی با شدت اغتشاشهای بالا ۶۲
- جدول (۴-۱) نسبت سرعت اندازه‌گیری شده به سرعت واقعی در شدت
اغتشاشهای مختلف جریان ۶۴
- شکل (۴-۱۵) ضریب اصلاح سرعت متوسط جریان سیال ناشی از شدت
اغتشاشهای جریان سیال ۶۴
- شکل (۴-۱۶) اثر شدت اغتشاشهای جریان سیال بر مقادیر اندازه‌گیری شده
تنشهای رینولدز ۶۵
- شکل (۵-۱) تونل باد ساخت برادران رایت در سال ۱۹۰۱ ۷۱
- جدول (۵-۱) طبقه بندی انواع تونل باد بر حسب سرعت جریان هوا در اتاق آزمون ۷۲
- شکل (۵-۲) محدوده ماخ برای انواع وسایل آیرودینامیکی ۷۲
- شکل (۵-۳) تونل باد مدار باز مکنده ۷۳
- شکل (۵-۴) تونل باد مدار باز دمنده ۷۴
- شکل (۵-۵) تونل باد مدار بسته با اتاق آزمون بسته ۷۴
- شکل (۵-۶) تونل باد مدار بسته با اتاق آزمون باز ۷۴
- شکل (۵-۷) نمای شماتیک از تونل باد مدار بسته با اتاق آزمون باز ۷۵
- شکل (۵-۸) اتاق آزمون نیمه باز ۷۶
- شکل (۵-۹) دیفیوزر تونل باد مدار بسته که در پایین دست فن قرار دارد ۸۰
- شکل (۵-۱۰) نازل تونل باد شرکت مزدا، ژاپن ۸۱
- شکل (۵-۱۱) گوشه به ارتفاع ۱۲ متر و پره‌های راهنما (تونل باد شرکت مزدا) ۸۲
- شکل (۵-۱۲) اتاق آرامش تونل باد ۸۳
- شکل (۵-۱۳) لانه زنبوری ۸۴
- شکل (۵-۱۴) فن به قطر ۸ متر (تونل باد شرکت مزدا) ۸۶
- شکل (۵-۱۵) نمونه‌ای از یک فن جریان محوری ۸۸
- شکل (۵-۱۶) نمونه‌ای از فن سانتریفوژ ۸۹
- شکل (۵-۱۷) لایه مرزی باد بر روی یک ناحیه ۹۱
- شکل (۵-۱۸) استفاده از انواع زبری در ابتدای اتاق آزمون تونل باد لایه مرزی ۹۱
- شکل (۶-۱) شماتیک تونل باد دانشگاه صنعتی شاهرود ۹۹

- شکل (۶-۲) نمایی از تونل باد دانشگاه صنعتی شاهرود ۱۰۰
- شکل (۶-۳) منحنی کالیبراسیون جریان سنج سیم داغ ۱۰۱
- شکل (۶-۴) برج خنک کن نیروگاه شازند اراک ۱۰۲
- شکل (۶-۵) شماتیک کلی انجام آزمایش ۱۰۶
- شکل (۶-۶) نمایی از چیدمان آزمایش ۱۰۷
- شکل (۷-۱) توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت ۱ متر بر ثانیه در دهانه خروجی و استفاده از دیواره های بادشکن با ابعاد مختلف ۱۰۹
- شکل (۷-۲) توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت ۲ متر بر ثانیه در دهانه خروجی و استفاده از دیواره های بادشکن با ابعاد مختلف ۱۰۹
- شکل (۷-۳) توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت ۳ متر بر ثانیه در دهانه خروجی و استفاده از دیواره های بادشکن با ابعاد مختلف ۱۱۰
- شکل (۷-۴) توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت ۴ متر بر ثانیه در دهانه خروجی و استفاده از دیواره های بادشکن با ابعاد مختلف ۱۱۰
- شکل (۷-۵) توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت ۵ متر بر ثانیه در دهانه خروجی و استفاده از دیواره های بادشکن با ابعاد مختلف ۱۱۰
- شکل (۷-۶) توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت ۶ متر بر ثانیه در دهانه خروجی و استفاده از دیواره های بادشکن با ابعاد مختلف ۱۱۱
- شکل (۷-۷) توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت ۷ متر بر ثانیه در دهانه خروجی و استفاده از دیواره های بادشکن با ابعاد مختلف ۱۱۱
- شکل (۷-۸) توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت ۸ متر بر ثانیه در دهانه خروجی و استفاده از دیواره های بادشکن با ابعاد مختلف ۱۱۱
- شکل (۷-۹) تغییرات دبی جرمی عبوری از برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت های مختلف در دهانه خروجی و استفاده از دیواره های بادشکن با ابعاد مختلف ۱۱۳
- شکل (۷-۱۰) مقایسه توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت ۲ متر بر ثانیه در دهانه خروجی برج برای داده های تجربی و عددی ۱۱۴
- شکل (۷-۱۱) مقایسه توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت ۵ متر بر ثانیه در دهانه خروجی برج برای داده های تجربی و عددی ۱۱۴
- شکل (۷-۱۲) مقایسه توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت ۸ متر بر ثانیه در دهانه خروجی برج برای داده های تجربی و عددی ۱۱۵
- شکل (۷-۱۳) بردارهای سرعت در صفحه تقارن برج مدل بدون دیواره بادشکن در مقابل باد با سرعت ۹ متر بر ثانیه ۱۱۵
- شکل (۷-۱۴) بردارهای سرعت در صفحه تقارن برج مدل با دیواره بادشکن در مقابل باد با سرعت ۹ متر بر ثانیه ۱۱۶

- ۱۱۷ شکل (۷-۱۵) تغییرات ضریب فشار میانگین در گلوگاه برج مدل، بر حسب سرعت باد، بدون استفاده از دیواره بادشکن
- ۱۱۷ شکل (۷-۱۶) تغییرات ضریب فشار میانگین در گلوگاه برج مدل، بر حسب سرعت باد، با استفاده از دیواره بادشکن

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۶۴	جدول (۱-۴) نسبت سرعت اندازه‌گیری شده به سرعت واقعی در شدت اغتشاشهای مختلف جریان
۷۲	جدول (۱-۵) طبقه‌بندی انواع تونل باد بر حسب سرعت جریان هوا در اتاق آزمون

فهرست نشانه ها

ضریب توزیع فشار	C_p
فشار محیطی در گلوگاه برج مدل	P_θ
فشار جریان هوای عبوری از برج	P_∞
چگالی هوای عبوری از برج	ρ
لزجت دینامیکی	μ
دمای جریان سیال	T
نوع زبری	S
نسبت ارتفاع نقطه مورد آزمایش به کل ارتفاع مدل	ζ
ارتفاع مدل	H
سرعت لحظه ای جریان سیال	$\bar{V}(t)$
جریان الکتریکی	I
مقاومت در پل و تسون	R
مقاومت پراپ	R_p
مقاومت سنسور	R_w
مقاومت کابل پراپ	R_l
مقاومت سنسور حساس	R_c
دمای سنسور در مقاومت R_w	T_w
ولتاژ بالای پل و تسون	E
دمای محیط	T_a
مقاومت سنسور در دمای محیط	R_a
ضریب دمایی مقاومت سنسور در دمای T_a	α_a
نرخ انتقال حرارت در واحد سطح	Q
ضریب همرفت هوا	h
قطر سنسور سیم داغ	d_w
طول سنسور سیم داغ	l_w
ضریب هدایت گرمایی سیال	k
گرمای ویژه سیال	c_p
ضریب پخش حرارتی سیال	α
عدد رینولدز	Re
عدد پراتل	Pr
عدد ناسلت	Nu

عدد ماخ	M
عدد گرافش	Gr
عدد فرود	Fr
سرعت صوت	C
ضریب انبساط حجمی سیال	β
عدد ناونسن	Kn
مسیر آزاد بین مولکولی	λ
مقاومت ویژه الکتریکی سنسور سیم داغ در دمای T_w	χ_w
سطح مقطع سنسور سیم داغ	A_w
ضریب هدایت گرمایی سیم در دمای T_w	k_w
ثابت استفان - بولتزمن	σ
ضریب نشر سنسور	ε
چگالی سنسور سیم داغ	ρ_w
چگالی جریان عبوری از داخل برج	ρ_∞
گرمای ویژه سنسور سیم داغ در واحد جرم	c_w
ظرفیت حرارتی سنسور سیم داغ	C_w
فرکانس قطع	f_c
سرعت متوسط جریان سیال	U_{mean}
سرعت اندازه گیری شده جریان سیال توسط لوله پیتوت	velocity
شدت اغتشاش های جریان سیال	T_u
انحراف معیار سرعت جریان سیال	u_{rms}
چولگی	S
برجستگی	K
قطر کره	d_c
جرم سیال	m
نسبت سرعت	a
مشخصه بدون طول سیال	L
شتاب گرانش	g
مولفه بردار سرعت در جهت X	U
مولفه بردار سرعت در جهت Y	V
سرعت باد در بالای برج	V_W
سرعت متوسط در گلوگاه برج مدل	V_i
مولفه بردار سرعت در جهت Z	W

مولفه X نیروی برآیند در جهت X	F_x
لزجت سینماتیکی	ν
زاویه محیطی اطراف برج	θ

فصل اول

مقدمه

۱-۱- سیستم های خنک کن

سیستم های خنک کن از جمله ارکان ضروری اکثر صنایع می باشند. این سیستم ها در نیروگاههای حرارتی از اهمیت ویژه ای برخوردار هستند چرا که انرژی غیر قابل دسترس بخار خروجی از توربین را به طور مستقیم یا بواسطه آب به اتمسفر انتقال می دهند. در فرآیند خنک کن منبع دریافت کننده اصلی حرارت، اتمسفر است که گرما را به طور مستقیم و یا به کمک یک سیال واسطه دریافت می کند.

به طور کلی می توان سیستم های خنک کن نیروگاهی را به سه گروه اصلی زیر تقسیم بندی نمود:

الف - سیستم خنک کن یک بار گذر^۱

ب - سیستم خنک کن تر^۲

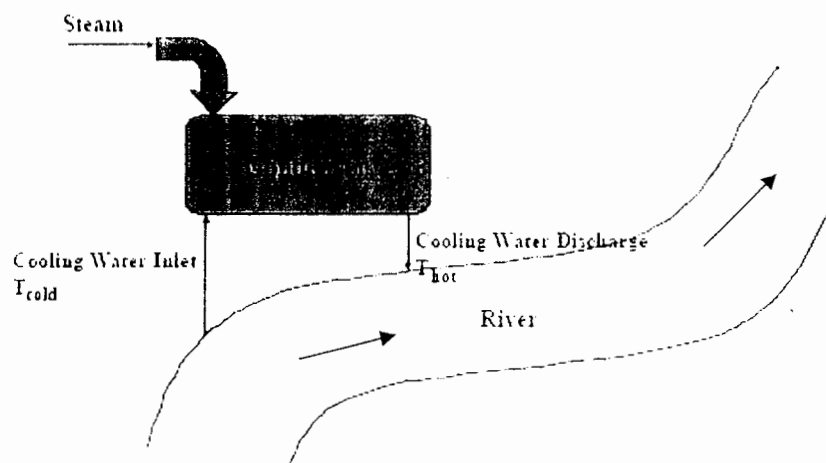
ج - سیستم خنک کن خشک^۳

در سیستم خنک کن یک بار گذر، آب از منبع طبیعی همانند رودخانه، دریاچه و یا دریا به درون چگالنده پمپ می شود و در آنجا پس از مبادله حرارت و گرم شدن به منبع اولیه بازگردانده می شود. این نوع سیستم های خنک کن از نظر ترمودینامیکی بالاترین راندمان را دارند. علت بالا بودن راندمان، پایین بودن دمای منبع سرد یا چگالنده بوده که این عمل باعث افزایش راندمان کل سیکل قدرت می گردد. از نکات قابل توجه در این سیستم، توجه به مقدار افزایش دمای منبع و اثرات زیست محیطی است. از جمله محدودیتهای این سیستم این است که حتما بایستی در نزدیکی یک منبع طبیعی آب همانند رودخانه، دریاچه و یا دریا واقع شود. نمای شماتیک این سیستم در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.

^۱ Once Through Cooling System

^۲ Wet Cooling System

^۳ Dry Cooling System



شکل (۱-۱) سیستم خنک کن یک بار گذر [۱۱]

در سیستم های خنک کن تر، آب بعد از عبور از چگالنده وارد وسایل و تجهیزاتی می گردد تا بتواند حرارت جذب شده را با محیط مبادله نماید. در این سیستم ها تبادل حرارت عمدتاً از طریق تبخیر آب صورت می گیرد، لذا بایستی یک منبع آب جهت جبران آب تبخیر شده در دسترس باشد تا میزان آب در گردش سیستم ثابت باقی بماند.

در سیستم های خنک کن خشک، وسایل استفاده شده جهت تبادل حرارت ما بین آب در گردش و محیط از نوع مبدلهای حرارتی فشرده است، به گونه ای که تبادل حرارت تنها در اثر اختلاف دمای آب و هوای محیط صورت می گیرد. بنابراین در چنین سیستمی نیازی به دسترس بودن یک منبع بزرگ آب نبوده یا به عبارت دیگر مصرف آب چنین سیستمی تقریباً صفر می باشد، اما این سیستم به دمای هوا و دیگر شرایط اقلیمی و محیطی وابستگی بیشتری نسبت به دو سیستم قبل دارد.

۱-۱-۱- سیستم خنک کن تر

از جمله تجهیزات رایج مورد استفاده در سیستم خنک کن تر، برجهای خنک کن تر می باشند. در برجهای خنک کن تر، آب در نتیجه برخورد مستقیم با هوا خنک می شود. فرآیند انتقال حرارت در این حالت شامل دو مرحله زیر است :

الف - انتقال گرمای نهان ناشی از تبخیر بخش کوچکی از آب

ب - انتقال گرمای محسوس ناشی از اختلاف دمای آب و هوا

تقریباً ۸۰٪ انتقال حرارت ناشی از گرمای نهان و ۲۰٪ ناشی از گرمای محسوس است. مقدار گرمای قابل جذب توسط هوا در برج به دمای هوا و میزان رطوبت موجود در آن بستگی دارد. تقریباً دمای آب خنک شده در برج به دمای حباب تر هوا نزدیک است اما برابر آن نیست چرا که نمی توان تمام آب را با هوای تازه تماس داد. دمای حباب تر، کمترین دمای نظری است که آب تا آن دما قابل خنک شدن است.

شدت نزدیک شدن به دمای حباب تر به طراحی برج وابسته است. از جمله فاکتورهای مهم در این نزدیکی، زمان تماس آب با هوا، میزان سطح تماس و میزان قطره قطره شدن آب خواهد بود.

۱-۱-۲- سیستم خنک کن خشک

در سیستم خنک کن خشک، بخار یا آب گرم از درون لوله های فین دار می گذرد و عبور طبیعی یا اجباری جریان هوا از روی این لوله ها، گرما را بدون واسطه دریافت می کند. سیستم های خنک کن خشک عمدتاً به دو گروه اصلی زیر تقسیم می شوند:

الف - سیستم های خنک کن خشک مستقیم یا چگالنده هوایی^۱

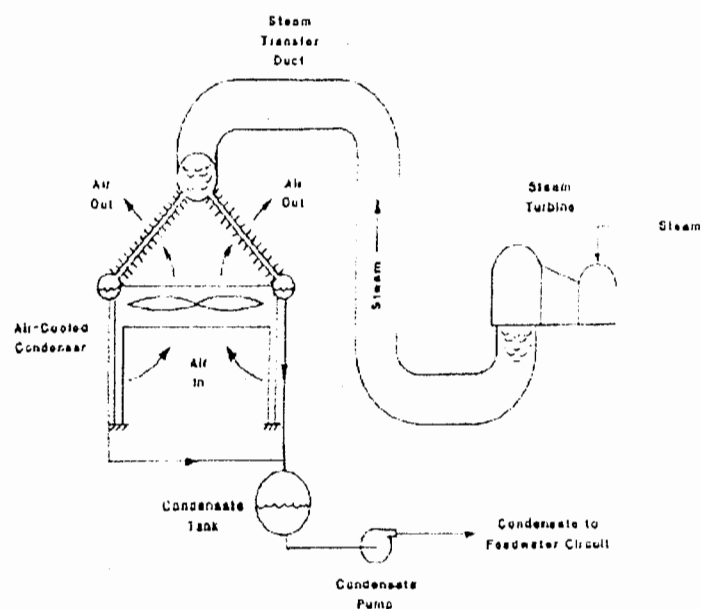
ب - سیستم های خنک کن خشک غیر مستقیم یا هلر^۲

الف - سیستم های خنک کن خشک مستقیم

در سیستم های خنک کن خشک مستقیم، بخار خروجی از توربین مستقیماً با هوای محیط تبادل حرارت می کند. در این سیستم بخار درون لوله های پره دار که عموماً به فرم A قرار می گیرند، تقطیر شده و با وزش باد از روی پره ها خنک می شود. یک نمونه از این سیستم در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.

^۱ Air Cooled Condenser

^۲ Heller



شکل (۱-۲) سیستم خنک کن خشک مستقیم [۱۱]

ب - سیستم های خنک کن خشک غیر مستقیم

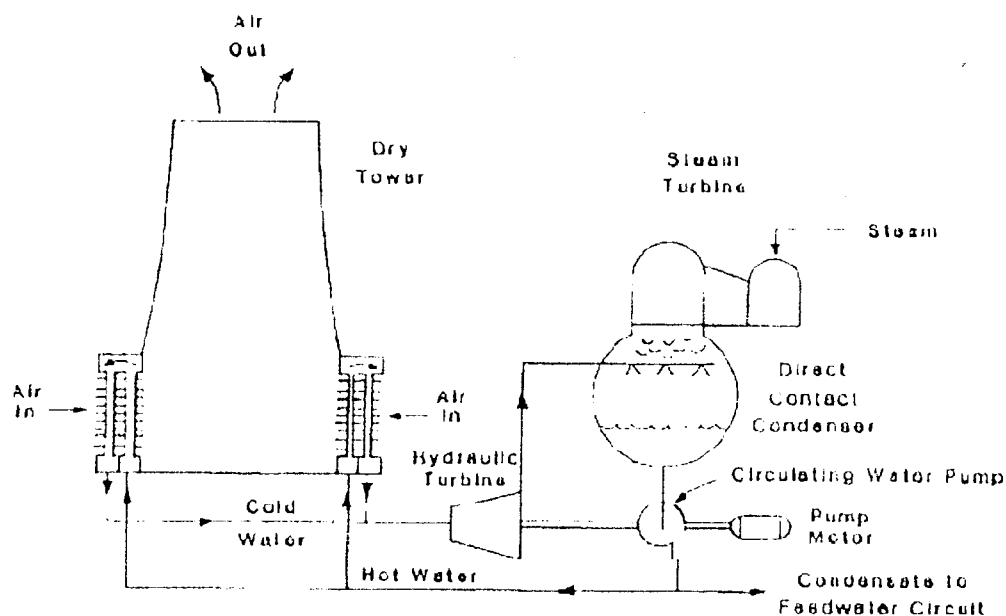
در سیستم های خنک کن خشک غیر مستقیم، سیال واسطه ای وجود دارد که حرارت را از بخار خروجی از توربین در چگالنده گرفته و سپس این حرارت را با محیط در برج خنک کن خشک مبادله می کند. در این نوع برجها بین آب و هوا تماس غیر مستقیم ایجاد می شود. همچنین این برجها در مناطقی که از لحاظ منابع آبی محدودیت دارند مورد استفاده قرار می گیرند. علت اصلی استفاده از برجهای خنک کن خشک، حذف آب جبرانی سرمایه‌ی است. این برجها تنها هوای تمیز و گرم را به محیط اطراف تخلیه کرده و هیچ اثر معکوسی بر محیط زیست اطراف خود ایجاد نمی کنند.

سیستم خنک کن خشک غیر مستقیم اولین بار در سال ۱۹۵۶ توسط لازلو هلر^۱ پروفیسور دانشگاه فنی بوداپست مجارستان در کنفرانس جهانی نیرو در وین مطرح گردید و بدین جهت این برجها به نام هلر مشهور شدند.

در این سیستم بخار خروجی از توربین توسط آب عبوری از برج که دبی جرمی آن حدوداً ۴۰ تا ۵۰ برابر دبی بخار خروجی از توربین است، تقطیر می شود. عمل میعان در درون یک چگالنده پاششی صورت می گیرد. آب واسطه که حرارت بخار خروجی از توربین را گرفته و گرم شده است، به کمک

^۱ Lazlo Heller

تعدادی مبدل حرارتی فشرده، حرارت جذب شده را با محیط مبادله می کند. مبدل‌های حرارتی بکار رفته در این سیستم نوع خاصی از مبدل‌های حرارتی فشرده با پره‌های صفحه‌ای مشهور به فورگو^۱ می باشد. این مبدل‌ها در اطراف یک برج بلند چیده می شوند. برج براساس مکش طبیعی کار کرده و باعث ایجاد جریان (عبور هوای محیط) از روی مبدل‌ها می شود. شکل (۳-۱) یک نمونه از این برج‌ها را نشان می دهد.



شکل (۳-۱) برج خنک کن خشک غیر مستقیم و کندانسور تماس مستقیم [۱۱]

استفاده از این سیستم در جهان دارای سابقه کاری متجاوز از ۴۰ سال می باشد که با نیروگاه ذوب آهن مجارستان در سال ۱۹۶۱ میلادی شروع گردید. در ایران نیز با نیروگاه شهید محمد منتظری اصفهان شروع گردید و در نیروگاه‌های حرارتی شهید رجایی، سازند اراک و نیروگاه سیکل ترکیبی منتظر قائم کرج گسترش یافت.

^۱ Forgo Type

۱-۱-۳- تقسیم بندی برجهای خنک کن

صرفنظر از تقسیم بندی برجها به دو دسته تر و خشک، می توان آنها را بدین صورت نیز تقسیم

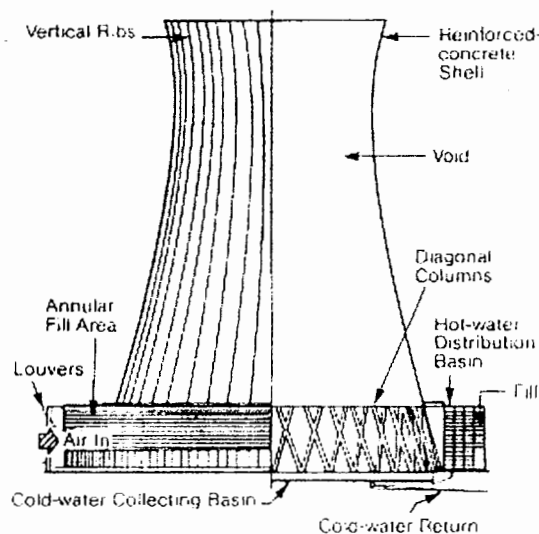
نمود:

الف - برج خنک کن جابجایی طبیعی^۱

ب - برج خنک کن جابجایی مکانیکی^۲

الف- برج خنک کن جابجایی طبیعی

در برجهای خنک کن جابجایی طبیعی، هوا به طور طبیعی و بدون نیاز به فن وارد برج می شود. این برجها به شرایط آب و هوایی وابسته هستند چرا که وسیله مکانیکی جهت به جریان درآوردن هوا در برج وجود ندارد. برجهای جابجایی طبیعی با ارتفاع زیاد ساخته می شوند تا جریان هوای خروجی از برج دوباره وارد برج نگردد. این برجها مساحت زیادی اشغال نموده و در مواردی که اختلاف بین دمای آب گرم ورودی و آب سرد خروجی زیاد باشد بکار می روند. معمولا به شکل هذلولی ساخته شده و در ساخت آن از بتن که محکم و بادوام بوده و از مقاومت خوبی در برابر حرارت برخوردار است، استفاده می شود. نمونه ای از این برجها در شکل (۴-۱) آمده است.



شکل (۴-۱) برج خنک کن جابجایی طبیعی [۱۳]

^۱ Natural Draft Cooling tower

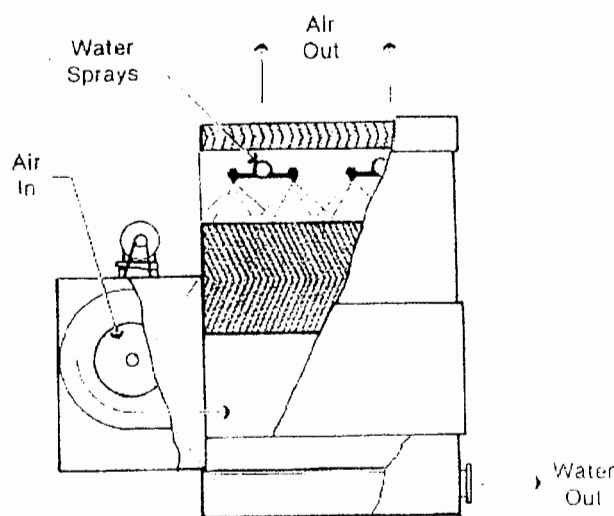
^۲ Mechanical Draft Cooling Tower

ب - برج خنک کن جابجایی مکانیکی

در برجهای خنک کن جابجایی مکانیکی، از فن جهت کشیدن هوا به داخل برج استفاده شده و در نتیجه اثر سرعت باد و هوای محیط کمتر می شود. این برجها به فضای کمتری نسبت به برجهای خنک کن جابجایی طبیعی نیازمندند. این برجها به دو دسته دمشی^۱ و مکشی^۲ تقسیم بندی می شوند.

در برجهای دمشی فن بکار رفته در پایین برج قرار می گیرد. این برجها آلودگی صوتی و ارتعاش کمتری داشته و هزینه نگهداری آنها نیز کمتر است اما احتمال برگشت هوای گرم خروجی از بالای برج، تحت شرایط پایین بودن فشار هوا، از پایین برج وجود دارد چرا که سرعت هوای ورودی، بالا و سرعت هوای خروجی، پایین است در نتیجه بازده خنک کنندگی برج تا ۲۰٪ کاهش می یابد.

تحت شرایط پایین بودن دمای هوای محیط، احتمال یخ زدگی ساختمانها و تجهیزات و یا اطراف فن ها وجود خواهد داشت و با تشکیل برفک در فن، احتمال شکستن پره های آن افزایش می یابد. میزان توان مورد نیاز فن این نوع برجها دو برابر برجهای مشابه مکشی در شرایط باری یکسان می باشد. نمای کلی این برجها در شکل (۵-۱) آمده است .

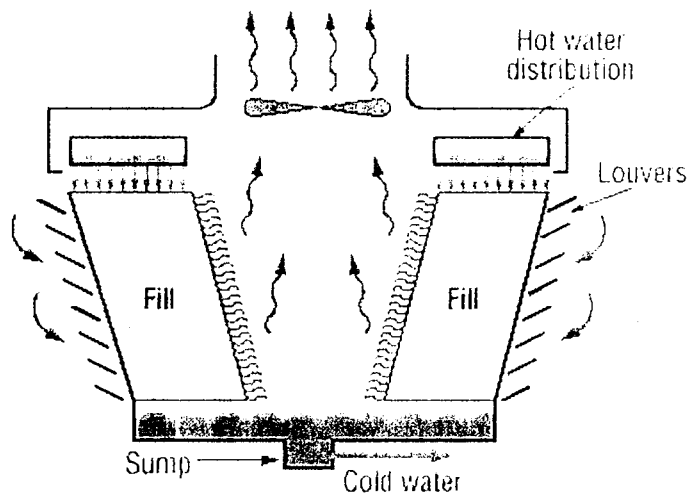


شکل (۵-۱) برج خنک کن دمشی [۸]

^۱ Forced Draft

^۲ Induced Draft

در برجهای مکشی فن در قسمت بالای برج نصب می گردد در نتیجه مشکل برگشت دوباره هوا حل شده و بازدهی برج افزایش می یابد. ابعاد و اندازه فن بکار رفته بزرگتر بوده اما توان مصرفی آن کمتر از برج مشابه دمشی خواهد بود. میزان هزینه اولیه برج نیز کمتر می باشد. در شکل (۶-۱) نمونه ای از این برجها نمایش داده شده است.



شکل (۶-۱) برج خنک کن مکشی [۱۲]

برجهای خنک کن بسته به مسیر حرکت آب و هوا نسبت به هم بدین صورت تقسیم بندی می شوند:

الف - برج خنک کن جریان مخالف^۱

ب - برج خنک کن جریان متقاطع^۲

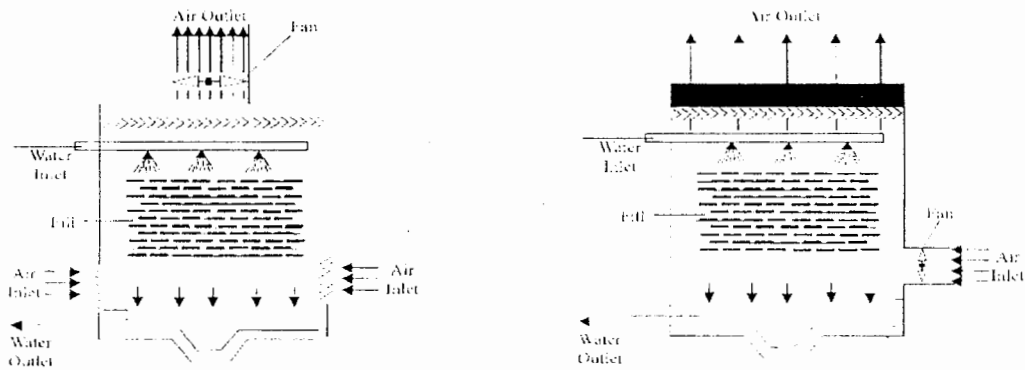
الف - برج خنک کن جریان مخالف

در این برجها هوا و آب در جهت مخالف هم حرکت می کنند. در نتیجه برخورد هوا و آب، مقداری از آب تبخیر شده و در نتیجه حرارت از آب باقیمانده دفع می گردد. دو نمونه از این برجها در شکل (۷-۱) نشان داده شده است.

مطابق شکل این برجها هم به صورت مکشی و هم به صورت دمشی مورد استفاده قرار می گیرند.

^۱ Counter Flow

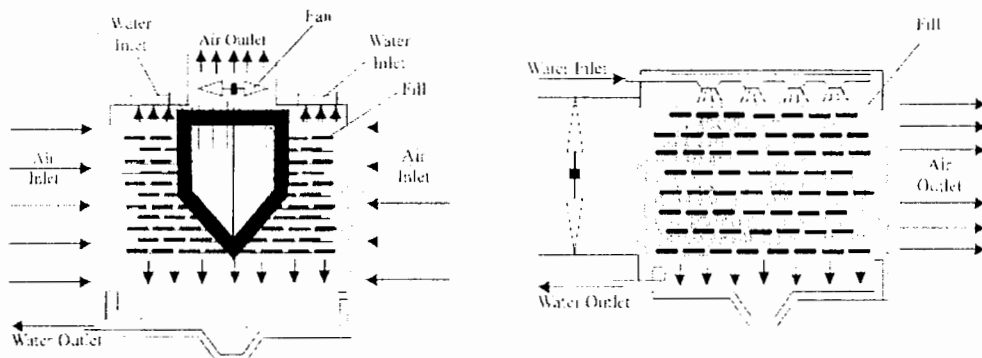
^۲ Cross Flow



شکل (۷-۱) برج خنک کن جریان مخالف [۱۲]

ب - برج خنک کن جریان متقاطع

در این نوع برجها هوا به صورت افقی و عمود بر جریان آب ریزشی وارد برج می شود. افت فشار داخلی این برجها کمتر است. در شکل (۸-۱) دو نمونه از این برج آمده است.



شکل (۸-۱) برج خنک کن جریان متقاطع [۱۲]

۲-۱ - اثر شرایط محیطی

عملکرد تمام مبدلهای حرارتی که با هوا خنک می شوند و برجهای خنک کن تحت تاثیر شرایط محیطی قرار دارد. تغییرات در درجه حرارت، رطوبت، باد، باران، برف و تشعشع خورشید همگی بر عملکرد برجهای خنک کن تاثیر می گذارد. تغییرات شدید شرایط اتمسفریک همواره باعث بهبود یا اختلال در کارکرد عادی نیروگاهها و حتی در برخی مواقع منجر به توقف ناگهانی آنها بعلاوه عدم کارایی سیستم خنک کن می گردد.

با توجه به مساله کم آبی در کشور بخصوص در فلات داخلی، سیستم خنک کن نیروگاههای حرارتی اکثراً از نوع خشک انتخاب می گردد در نتیجه بررسی شرایط محیطی در عملکرد آنها حائز اهمیت است.

۱-۲-۱- دمای محیط

یکی از عوامل مهمی که نقش مهمی در عملکرد برجهای خنک کن دارد، دمای محیط می باشد. در طی زمانهایی که درجه حرارت محیط خیلی کم است، یخ زدن آب داخل رادیاتورها مشکلات جدی ایجاد می کند اما ابزار و روشهای مختلفی از جمله تعبیه کرکه^۱ در ورودی برج جهت جلوگیری از یخ زدگی رادیاتورها روش مفیدی خواهد بود.

در فصول گرم سال و هنگام افزایش درجه حرارت محیط، راندمان برجها به مقدار بسیار زیادی افت می کند. جهت رفع این مشکل نیز از خنک کن های اضطراری استفاده می شود. این خنک کن ها، برجهای خنک کن کوچکی هستند که در داخل برجهای خنک کن خشک قرار گرفته و از نوع جریان اجباری می باشند.

در مقایسه سیستم های خنک کن نیروگاهی بخصوص نوع خشک آن در ارتباط با درجه حرارت محیط قابل ذکر است که سیستم خنک کن مستقیم در دمای بالا، کارایی بهتری از سیستم خنک کن غیر مستقیم دارد، در عوض کارایی سیستم غیر مستقیم در دمای پایین از قابلیت بیشتری برخوردار می باشد. دلیل این تغییر عملکرد، ویژگی دو سیستم در تامین هوای مورد نیاز (مکش طبیعی و مصنوعی) و تغییر وزن مخصوص هوا با درجه حرارت می باشد. بنابراین برای مناطق گرمسیر استفاده از سیستم خنک کن مستقیم مناسبتر از سیستم خنک کن غیر مستقیم خواهد بود در عوض برای مناطق سردسیر استفاده از سیستم خنک کن غیر مستقیم مناسبتر می باشد.

^۱ Louver

۱-۲-۲- رطوبت نسبی

تاثیر رطوبت نسبی محیط در انواع سیستم های خنک کن بعضاً متناظر و در جهت مخالف می باشد. از یک طرف با افزایش رطوبت نسبی محیط راندمان سیستم های خنک کن تر کم و از طرف دیگر همین افزایش رطوبت نسبی بدلیل افزایش وزن مخصوص هوا موجب بهبود عملکرد سیستم های خنک کن خشک می شود.

دلیل کاهش راندمان سیستم های خنک کن تر با افزایش رطوبت نسبی به دلیل کاهش ظرفیت حمل رطوبت هوای عبوری از سیستم می باشد. بدین ترتیب که بخش اصلی خنک کنندگی سیستم خنک کن تر ناشی از تبخیر آب در حال ریزش از پکینگ مرجع بدلیل پایین تر بودن رطوبت هوای محیط از نقطه اشباع است. لذا هرچه هوای محیط دارای رطوبت نسبی پایین تری باشد، امکان تبخیر آب بیشتری را به سیستم ارائه می نماید که این مساله موجب پایین آمدن بیشتر دمای آب سیستم خنک کن تر خواهد شد. بنابر مطالب بالا عملکرد برجهای تر در هوای خشک و کم رطوبت بهتر از مناطق با هوای رطوبت نسبی بالا مانند کناره دریاها می باشد. اما در مورد سیستم های خشک چون انتقال حرارت مستقیماً از طریق هوا و به صورت جابجایی است لذا هرچه جرم مخصوص هوا افزایش یابد امکان انتقال حرارت در واحد سطح بهتر خواهد شد. بنابراین عملکرد سیستم های خشک چه مستقیم و چه غیر مستقیم در مناطق مرطوب بهتر از مناطق خشک می باشد.

شایان ذکر است که رطوبت نسبی محیط نقش تعیین کننده ای برای سیستم های خنک کن خشک ندارد و تنها به عنوان یک عامل ثانوی مورد بررسی قرار می گیرد.

۱-۲-۳- سرعت باد

از جمله پارامترهایی که تاثیر منفی در کارکرد سیستم های خنک کن خشک دارد، تغییرات سرعت و جهت وزش باد می باشد. این تغییرات به درجات مختلف، کارائی برجهای خنک کن خشک غیر مستقیم هلر و مستقیم را تحت تاثیر قرار می دهد.

سرعت و جهت وزش باد، در توزیع فشار استاتیکی اطراف پوسته برج خنک کن موثر می باشد، بطوریکه تغییرات توزیع فشار استاتیکی در پایین برج، در مواردی می تواند باعث به هم خوردن

عملکرد برج در محل تجهیزات ورودی و خروجی هوا گردیده و نهایتاً منجر به کاهش قدرت خروجی نیروگاه گردد.

وزش باد در سرعت های بالا سبب ایجاد پدیده ای به نام اثر درپوشی^۱ در بالای برج های خنک کن هلر می گردد که کاهش دبی جرمی هوای عبوری و به تبع آن کاهش بازده خنک کنندگی برج را به همراه دارد.

از بین پارامترهای ذکر شده سرعت باد نقش مهمی داشته و نیاز به تحقیقات و آزمایشات بسیاری در این زمینه جهت طراحی بهینه و بهبود عملکرد برجهای صنعتی بزرگ خواهد داشت.

^۱ wind cover or cap effect

فصل دوم

هدف از انجام پایان نامه

۱-۲- هدف از انجام این پایان نامه

همان گونه که اشاره شد استفاده از برجهای خنک کن جریان طبیعی خشک در نیروگاهها به عنوان سیستم خنک کن جهت چگالش بخار خروجی از توربین تحت شرایط معین از جمله کافی نبودن آب و مشکلاتی همچون جلوگیری از تلفات آب، از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است. با توجه به مساله کمبود آب در محل های دورتر از رودخانه ها و دریاچه ها و منابع طبیعی آب، لزوم استفاده از برج های خنک کن خشک مشهودتر می شود. کشور ایران نیز از نظر در اختیار داشتن رودخانه ها و منابع طبیعی آب در زمره کشورهای نسبتاً خشک قرار دارد، به همین جهت لزوم استفاده از برج های خنک کننده خشک بیش از پیش نمایان می گردد، به ویژه اینکه طرح تبدیل برج های خنک کن تر به خشک برای بعضی از نیروگاهها در حال بررسی است.

با توجه به موارد فوق، مطالعه و بررسی عملکرد برج های خنک کن و عوامل تاثیر گذار بر آن در طراحی نیروگاهها حائز اهمیت است. از جمله این عوامل سرعت وزش بادهای محیطی می باشد که گاهاً اثرات بسیار مخربی بر عملکرد برجها گذاشته و باعث افت شدید راندمان نیروگاه می شود.

۲-۲- روش های تحقیق در زمینه برج خنک کن

روش های تحقیق در زمینه برج خنک کن را می توان به سه صورت زیر بیان نمود:

الف- عددی^۱

ب - تجربی^۲

ج - تحقیقات میدانی^۳

در روش عددی با شبیه سازی جریان هوا در اطراف برج خنک کن و استفاده از معادله های حاکم بر جریان هوا نظیر معادلات بقای جرم، بقای مومنتم و بقای انرژی و با در نظر گرفتن شرایط مرزی و

^۱ Numerical

^۲ Experimental

^۳ Field Research

شرایط اولیه، کانتورهای فشار و دما و بردارهای سرعت در شرایط سرعتهای مختلف باد به دست آمده و نتایج بدست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد.

در روش تجربی، مدل مشابه برج خنک کن ساخته شده و با استفاده از تجهیزاتی همچون تونل باد، جریان هوایی مشابه باد طبیعی ایجاد می شود و در نتیجه جریان هوای اطراف مدل اندازه گیری و مورد بررسی قرار می گیرد. در این روش مدل نسبت به جسم واقعی بسیار کوچکتر می باشد.

در روش تحقیقات میدانی نیز با اندازه گیری جریان هوا و همچنین پارامترهای مختلف نظیر دمای هوا و رطوبت آن، فشار و دمای آب ورودی به برج خنک کننده و پارامترهای مختلف، راندمان برج خنک کننده مورد ارزیابی قرار می گیرد.

هر سه روش دارای مزایا و معایب مربوط به خود می باشند، به عنوان مثال در روش عددی پس از مدل سازی و حل معادلات مربوطه، داده های بدست آمده را می توان در شرایط مختلف به سادگی بررسی نمود اما صحت داده های بدست آمده بایستی بررسی گردد. با مدل سازی برج خنک کن و قرار دادن آن در تونل باد، جریان هوای اطراف مدل اندازه گیری شده و در نتیجه صحت نتایج عددی بررسی می گردد.

در روشهای تجربی نیز نیاز به مدل، تجهیزات آزمایش و دستگاههای اندازه گیری بوده که معمولاً پرهزینه تر از روشهای عددی است. استفاده از روشهای تجربی بسیار پیچیده و مشکل است. تحقیقات میدانی، تحقیقات جامعی بوده و نتایج آن کاملاً واقعی می باشد ولی با توجه به ابعاد بسیار بزرگ برج خنک کن، این تحقیقات مشکل است.

در این تحقیق سعی شده اثر بادهای محیطی بر عملکرد برجهای خنک کن خشک در بالای برج به صورت تجربی بررسی گردد و تاثیر وجود دیواره باد شکن در بالای برج برای غلبه بر پدیده درپوشی مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲-۳- مبانی تئوریک تحقیق

اثر باد بر عملکرد برجهای خنک کن خشک با مکش طبیعی مانند سیستم هلر از جهات مختلف قابل بررسی می باشد. این تاثیرات را می توان به دو گروه اصلی به قرار زیر مورد بررسی قرار داد:

الف - اثر باد بر هوای ورودی به برج و عدم توزیع یکنواخت جریان هوا در سطوح خنک کننده
ب - انحراف در مسیر هوای خروجی از برج و وقوع پدیده درپوشی در بالای برج

الف - اثر باد بر هوای ورودی به برج و عدم توزیع یکنواخت جریان هوا در

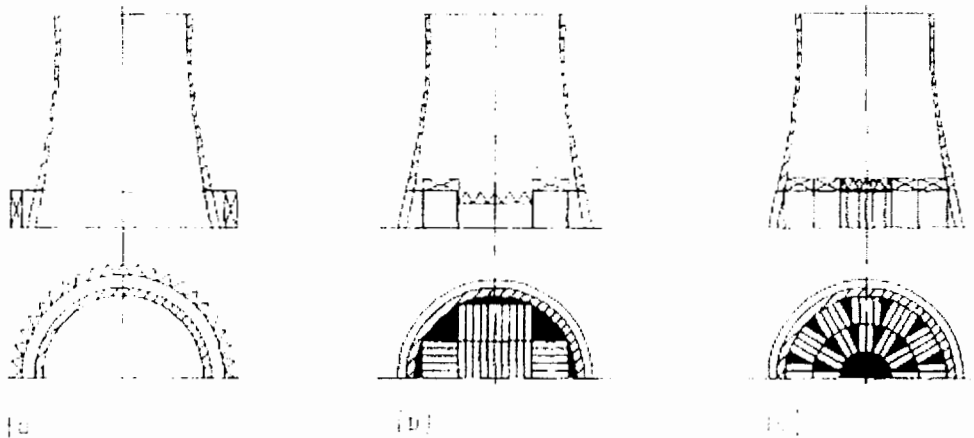
سطوح خنک کننده

میزان انحراف جریان هوا و همچنین توزیع فشار استاتیکی بر پوسته پایینی برج در اثر باد، در برجهای خنک کن بسته به شکل هندسی برج و همچنین آرایش خنک کننده ها متغیر است. بطور کلی از دو نوع آرایش سطوح حرارتی در برجهای خشک بیشتر استفاده می شود. در نوع اول سطوح حرارتی در محیط خارجی بصورت عمودی جاسازی می گردند، در این صورت جریان انتقال حرارت بین دو سیال هوا و آب خنک کننده بصورت عمود بر یکدیگر^۱ بوده ولی در نوع دوم سطوح حرارتی در داخل محوطه برج بر روی اسکلت فلزی بصورت افقی (مستطیلی یا شعاعی) نصب می گردند که جریان انتقال حرارت بین دو سیال هوا و آب خنک کننده بصورت موازی یکدیگر^۲ می شود. در شکل (۱-۲) این آرایش نشان داده شده است.

حساسیت برجهای خنک کن با مبدلهای افقی در داخل نسبت به باد کمتر از برجهای با مبدلهای عمودی در بیرون است. وزش باد منجر به تخریب پروفیل سرعت از میان مبدلهای شده و باعث ایجاد توزیع فشار نامطلوب در ورودی برج می شود. با وزش باد، فشار استاتیکی اطراف پوسته برج تغییر می کند بطوریکه در بعضی نقاط اختلاف فشار داخل و خارج منفی گشته و فشار استاتیکی بیرونی کمتر از فشار مکش در داخل برج می گردد. در این هنگام در نقاط فوق جریان هوای گرم از درون برج به بیرون هدایت خواهد شد. با توجه به کاهش کارائی خنک کننده ها در دمای بالا و کارکرد بخشی از خنک کننده ها در دمای فوق به علت جریان معکوس هوا، کارائی کلی برج از مقدار اسمی آن کمتر می گردد، بطوریکه در سرعت خیلی بالای وزش باد، کاهش فشار استاتیکی در بعضی نقاط می تواند به قدری زیاد گردد که عملاً مکش برج را حذف نماید.

^۱ Cross Flow

^۲ Counter Flow



شکل (۱-۲) آرایش مختلف خنک کننده ها (a) عمودی (b) افقی مستطیلی (c) افقی شعاعی [۱۴]

ب - انحراف در مسیر هوای خروجی از برج

بطور کلی فرض بر این است که توزیع جریان هوا در داخل برج بصورت یکنواخت بوده و هوای گرم بالا رونده بصورت متقارن حرکت خواهد کرد. اگرچه سرعت غیر یکنواخت باد و افت فشارهای اضافی به مقدار جزئی حرکت متقارن هوای داخل برج را تحت تاثیر قرار می دهد، اما در هر حال حرکت هوا در داخل برج کم و بیش متقارن می باشد. با افزایش سرعت باد، توزیع یکنواخت جریان هوا و حرکت متقارن آن از بین می رود.

موضوع دیگر در رابطه با تاثیر باد بر جریان هوای خروجی، ایجاد پدیده درپوش در بالای برج است. این پدیده ناشی از تفاوت اندازه حرکت و جهت سیال خروجی از برج و سیالی است که به طور موازی با افق حرکت می کند. این پدیده نیز منجر به کاهش مکش برج و نهایتاً کاهش دبی هوای خنک کن عبوری از برج می شود. در این تحقیق تاثیر باد بر دبی، توزیع سرعت خروجی از دهانه برج، توزیع فشار در گلوگاه و استفاده از دیواره های بادشکن، جهت بهبود کارایی آن بصورت تجربی، بررسی گردیده است.

فصل سوم

مروری بر اقدامات انجام گرفته

۳-۱- مروری بر اقدامات انجام گرفته

به منظور بررسی اثر بادهای جانبی بر روی عملکرد برجهای خنک کن، تا کنون مطالعات عددی، تجربی و میدانی فراوانی انجام گرفته است. در این فصل بر اقدامات انجام شده و نتایج بدست آمده در این زمینه مروری می گردد.

در سال ۱۹۷۶ هولدر^۱ مطالعات فراوانی در زمینه تاثیر آرایش مختلف مبدلها، در ورودی برجهای خنک کن جابجایی طبیعی، بر زوی جریان داخلی برج و همچنین حساسیت آنها نسبت به بادهای جانبی انجام داد. وی از تونل بادی با طول ۴ m و عرض ۲ m در آزمایشات خود استفاده نمود. نتایج وی حاکی از آن بود که آرایش مناسب مبدلها، منجر به کاهش اثرات نامطلوب بادهای عرضی می شود. [۱۰]

فارل^۲ نیز به بررسی تاثیر المانهای زبری نصب شده بر روی برجهای خنک کن هذلولی بر توزیع فشار جانبی پرداخت. در این تحقیق مشخص گردید که با افزایش المانهای زبری نصب شده بر روی سطح خارجی برج، میزان فشار جانبی منفی کاهش می یابد. [۱۵]

در سال ۱۹۸۳ دکتر یوشی هیرو^۳ مطالعات تجربی، بر روی توزیع فشار باد در طراحی برجهای خنک کن هذلولی انجام داد. تونل باد مورد استفاده در این آزمایش از نوع تونل باد لایه مرزی با ابعاد ۱×۱m و طول ۶/۵ m بود. توزیع فشار در سمت رو به باد مثبت و در طرفین و سمت پشت به باد منفی بدست آمد. [۱۶]

یان داچون^۴ و لیچنکسین^۵ در سال ۱۹۸۷ مطالعات تجربی خود را در زمینه تاثیر باد بر روی یک گروه برجهای خنک کن مرتفع با فاصله برابر از هم، در تونل باد سرعت پایین دانشگاه پکینگ^۶ انجام

^۱ Holder

^۲ Farell

^۳ Yoshihiro

^۴ Yan Dachun

^۵ Li Chenxin

^۶ Peking University

دادند. این تحقیق به علت متلاشی شدن برجهای خنک کن در نیروگاه فری بریج^۱ انجام گرفت. این نیروگاه متشکل از ۸ برج در دو ستون پشت سر هم بود، که سه برج واقع در پایین دست جریان بر اثر تند باد تخریب شدند، اما برجهای واقع در بالادست جریان سالم باقی ماندند. علت تخریب تداخل آیرودینامیکی گزارش شد. از نقطه نظر آیرودینامیک، تداخل آیرودینامیک بین برجها، مرتبط با توزیع سرعت و پارامترهای اغتشاش جریان ورودی، جهت باد و ترتیب قرارگیری برجهاست.

در آرایش برجهای کنار هم اگر فاصله بین دو برج بیش از حد کوچک باشد، اثر گرایش سیالات برای چسبیدن به سطح جامد^۲ غالب می‌شود. در آرایش برجهای پشت سر هم، اثر دنباله^۳ و جدایی^۴ برج بالادست جریان نقش مهمی دارد. در آرایش شطرنجی که برجهای پایین دست جریان در ناحیه جانبی دنباله پشت برجهای بالا دست جریان قرار می‌گیرند، اثر مکش^۵ گردابه‌های بزرگ^۶ در لایه اختلاطی^۷، بر روی برجهای پایین دست جریان تأثیر می‌گذارد.

جهت شبیه سازی بین مدل با برج اصلی بایستی ضریب توزیع فشار پیرامونی مدل و برج اصلی یکسان باشد.

$$C_p(\theta, h)_{model} = C_p(\theta, h)_{prototype} \quad (1-3)$$

ضریب توزیع فشار نیز با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$C_p(\theta, h) = (P_\theta - P_\infty) / \frac{1}{2} \rho_\infty U_\infty^2 \quad (2-3)$$

که P_θ فشار میانگین و P_∞ فشار استاتیک جریان ورودی، ρ_∞ دانسیته هوا و U_∞ سرعت جریان هوا است. در این تحقیق مقدار عدد رینولدز در برج اصلی در محدوده $10^7 - 10^9$ و در مدل تنها 10^5 بود؛ به طور شگفت انگیزی در نتایج یان داچون و لیچنکسین میزان ضریب توزیع فشار در مدل بسیار مشابه مدل اصلی بدست آمد.

در آزمایشات آنها از دو نوع مدل مختلف، مدل بدون المان زبری (مدل صاف) و مدل با المان زبری استفاده گردید. در مدل زبر جهت شبیه سازی از برجستگی های ابریشمی با قطر ۰/۱۱ mm و تعداد

^۱ Ferrybridge

^۲ Coanda effect

^۳ wake

^۴ separation

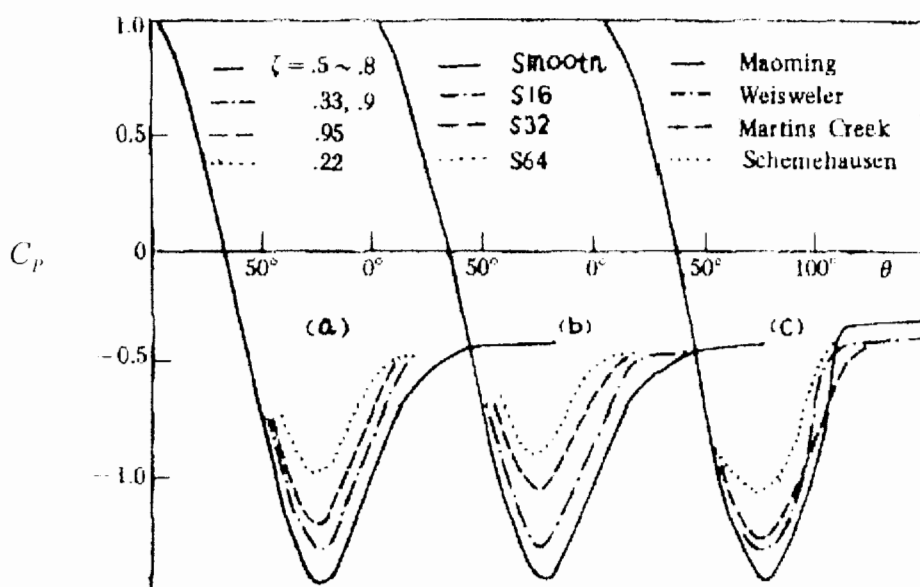
^۵ Induction effect

^۶ Eddy

^۷ Mixing layer

۱۶، ۳۲ و ۶۴ المان، در امتداد خط نصف‌النهار برج استفاده شده بود. نتایج بدست آمده در توزیع فشار مطابق شکل (۱-۳) گزارش شد.

حرف S نشان دهنده نوع زبری و $\zeta = \frac{z}{H}$ بیان کننده نسبت ارتفاع نقطه مورد آزمایش به کل ارتفاع مدل است.



شکل (۱-۳) توزیع فشار برجها و مدل‌های آنها (a) در ارتفاعات مختلف (b) با زبریهای مختلف (c) اندازه گیری میدانی

[۱۷]

آزمایشات دیگری نیز بر روی یک گروه برج با فاصله برابر از هم جهت شبیه‌سازی نیروگاه فری بریج^۱ انجام گرفت و نشان داد که آرایش شطرنجی بمراتب خطرناک‌تر از آرایش کنار هم یا پشت سر هم است. [۱۷]

روشکو^۲ توزیع فشار در اطراف یک سیلندر، در عدد رینولدز 8.4×10^6 را اندازه گیری نمود. نمودار وی در شکل (۲-۳) با [۶۱RO۱] نشان داده شده است. لوو^۳، کریستفر^۴ و راجوی^۵ به ترتیب نمودارهای [۶۴LO۱] و [۶۹CH۱] و [۸۲RU۱] را برای توزیع فشار در ورودی برج خنک کن در تونل باد بدست

^۱ Ferrybridge

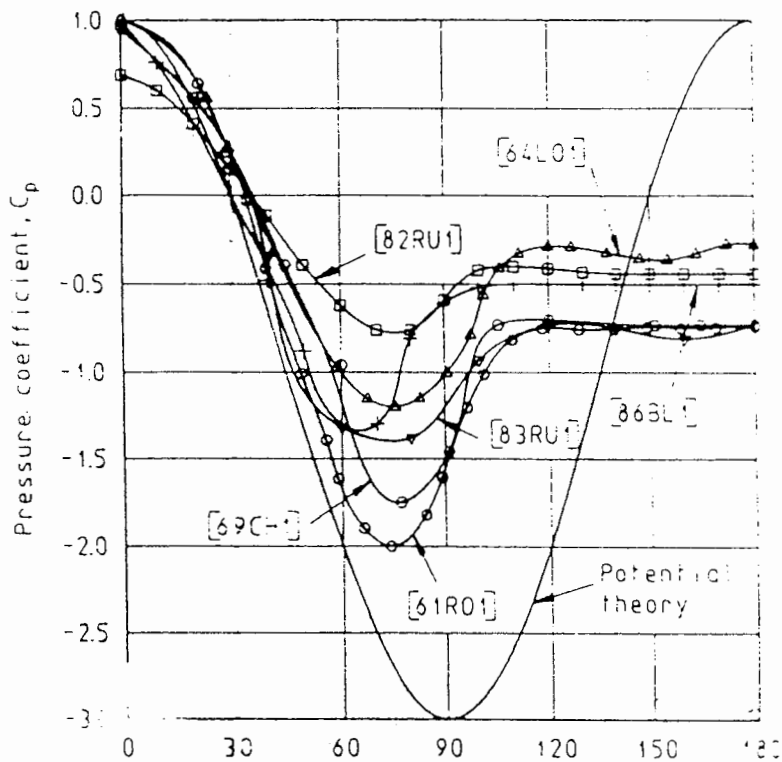
^۲ Roshko

^۳ Lowe

^۴ Christopher

^۵ Ruscheweyh

آوردند. در مدل روشکو^۱، مبدلهای حرارتی به صورت افقی قرار داشتند و در دو آزمایش دیگر، مبدلهای به صورت عمودی قرار گرفته بودند.



شکل (۲-۳) توزیع فشار برجهای خنک کن [۹]

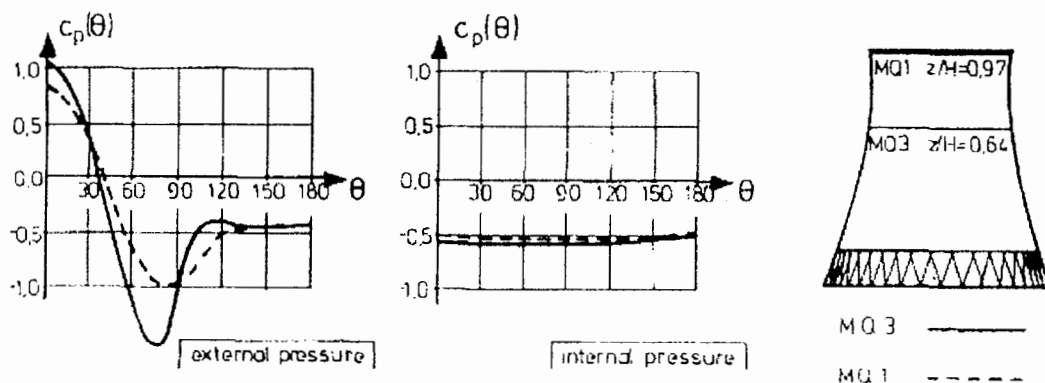
بعضی اندازه گیریهای انجام شده بر روی یک برج واقعی مطابق نمودارهای [۸۶BL۱] و [۸۳RU۱] گزارش شد. در نقطه ای که باد به طور عمود بر مبدلهای حرارتی می وزد (نقطه سکون^۲)، ضریب فشار دارای مقدار ماکزیمم است. این مطلب برای برجهایی که مبدلهای حرارتی آنها به صورت عمودی نصب شده صادق می باشد. از این نقطه میزان هوای خنک کننده بیشتری جریان می یابد. [۹]

در سال ۱۹۸۸ کاسپرسکی^۳ مطالعات خود را بر روی تاثیر باد بر عملکرد برجهای خنک کن جابجایی طبیعی انجام داد. تونل باد این آزمایش از نوع تونل باد لایه مرزی و مدل مورد استفاده به ارتفاع ۸۵۴/۷ mm بکار رفت و توزیع فشار خارج و داخل برج در ارتفاعات مختلف بررسی گردید. شکل (۳-۳) توزیع فشار داخلی و خارجی برج را نشان می دهد. [۱۸]

^۱ Roshko

^۲ Stagnation Point

^۳ Kasperski



شکل (۳-۳) توزیع فشار داخلی و خارجی برج [۱۸]

کروگر^۱ و پرز^۲ در سال ۱۹۹۲ مطالعات میدانی فراوانی بر برجهای خنک کن نیروگاه کندال^۳ در جنوب آفریقا انجام دادند و نتایج خود را با روش عددی توسط نرم افزار Phoenics بررسی نمودند.

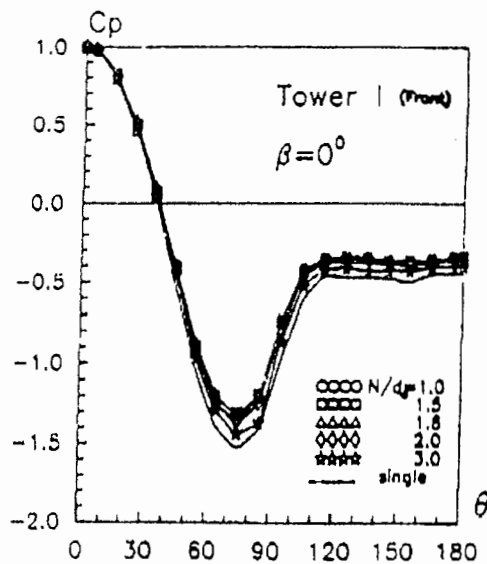
این مطالعات بر روی مبدل‌های افقی و عمودی انجام گرفت. [۱۹]

سان^۴ و زو^۵ به مطالعات میدانی و تجربی، بر روی دو برج مجاور هم پرداختند. این مطالعات بر روی توزیع فشار پیرامون دو برج هذلولی با فواصل مختلف از هم و جهات وزش باد مختلف در تونل باد لایه مرزی اتمسفریک با ابعاد $1/2 \times 1 \times 8/5$ m انجام گرفت. در این تحقیق عدد رینولدز در برج با مقیاس اصلی از مرتبه 10^8 و در مدل آزمایش از مرتبه 10^5 بود، لذا جهت رسیدن به توزیع فشاری برابر با برج اصلی از ۷۲ المان زبری به شکل نوارهایی با عرض $1/5$ mm و ارتفاع $0/321$ mm استفاده شده بود، به گونه ای که مینیمم مقدار ضریب فشار ($C_p \min = -1.5$) در رینولدز 1.42×10^5 در مدل آزمایش، معادل ضریب فشار مینیمم ($C_p \min = -1.47$) برج اصلی در رینولدز 7.5×10^7 بدست آمد.

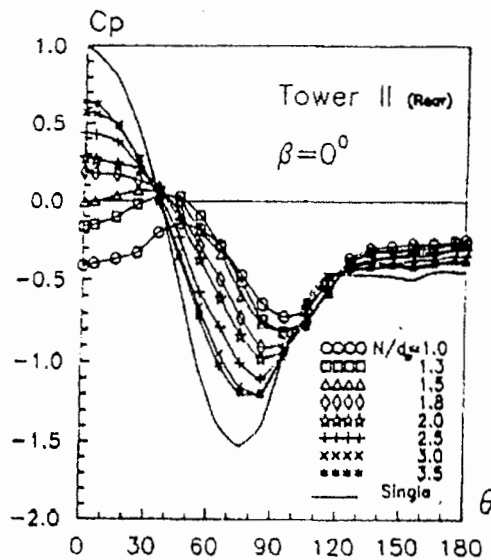
در این آزمایشات توزیع فشار در ارتفاع $\frac{z}{H} = 0.5$ و حالت‌های مختلف انجام گرفت. نتایج حاصل

برای آرایش دو برج پشت سر هم با فواصل مختلف از هم مطابق شکل (۳-۴) است. [۲۰]

^۱ Kroger
^۲ Preez
^۳ Kendal
^۴ Sun
^۵ Zhou



(a) Front Tower



(b) Rear Tower

شکل (۳-۴) توزیع فشار برای دو برج در آرایش پشت سر هم با فواصل مختلف از هم [۲۰]

برگسترام^۱ در سال ۱۹۹۳ مطالعات تجربی بر روی تاثیر باد در برجهای خنک کن انجام

داد. [۲۱]

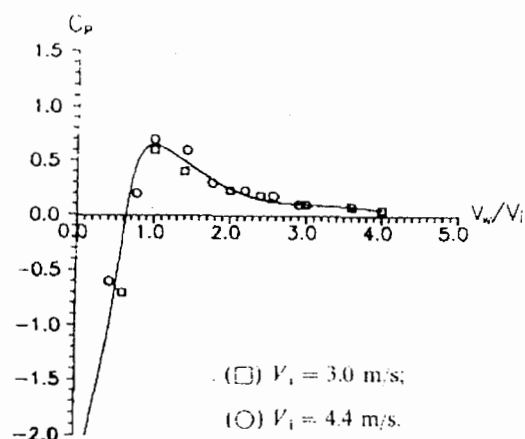
وی^۲ و زانگ^۳ در مورد اثر نامطلوب باد بر روی بازده برجهای خنک کن خشک، مطالعاتی انجام دادند و دریافتند که بازده برجهای به علت توزیع فشار نامطلوب در ورودی و از بین رفتن توده هوای گرم صعودی در برج، کاهش می یابد. در این آزمایشات از اندازه گیری میدانی، اندازه گیری در تونل باد با استفاده از سه مدل مختلف و مرئی سازی استفاده شده بود. تونل باد بکار رفته نیز از نوع تونل باد لایه مرزی با ابعاد $۸ \times ۱/۸ \times ۲/۴$ m بود.

در این تحقیق رابطه بین توزیع فشار داخلی برج در گلویی با نسبت سرعت جریان باد (V_w) به سرعت میانگین ورودی به رادیاتورها (V_r) مطابق شکل (۳-۵) بیان گردید. شکل بیان کننده این مطلب است که بادهای جانبی جریان جت برجهای خنک کن را شکسته و مانع جریان داخلی برج می شوند. [۲۲]

^۱ Bergstrom

^۲ Wei

^۳ Zhang



شکل (۳-۵) توزیع فشار در گلویی برج نسبت به سرعت جریان باد به سرعت میانگین ورودی به رادیاتورها [۲۲]

مجددا در سال ۱۹۹۵، سان^۱ و زو^۲ در راستای اقدامات قبلی، به بررسی آثار متقابل آیرودینامیکی دو سیلندر، در اعداد رینولدز زیر بحرانی^۳ و فوق بحرانی^۴ و اثر تداخلی گروه برجهای خنک کن پرداختند. [۲۳]

تاثیر اشکال مختلف پایه های نگهدارنده برج های خشک بر عملکرد آنها تحت تاثیر وزش باد، طی مطالعات عددی توسط کروگر^۵ و پریز^۶ انجام گرفت. [۲۴]

برگسترام^۷ در سال ۱۹۹۶ مطالعات دیگری بر روی تاثیر باد بر نرخ جریان ورودی به برج های تر انجام داد. آزمایشات تجربی وی در تونل بادی به ابعاد $۲/۴ \times ۳ \times ۷$ m انجام گرفت. [۲۵]

در سال ۱۹۹۸ تحقیقات وسیعی توسط کوپر^۸ و نیومن^۹ در آزمایشگاه تونل باد لایه مرزی در آلمان بر روی تاثیر ساختمانهای همجوار، بر روی اثر باد بر برجهای خنک کن انجام گرفت. این تحقیقات بطور کلی در مورد اثر تداخلی برجهای خنک کن و افزایش ارتفاع ساختمانهای همجوار نیروگاه بود.

^۱ Sun
^۲ Zhou
^۳ subcritical
^۴ supercritical
^۵ Kroger
^۶ Preez
^۷ Bergstrom
^۸ Kopper
^۹ Niemann

در مدل ساخته شده از المانهای زبری استفاده شده بود. در این آزمایشات تأثیر ساختمانها و وزش باد از جهات مختلف بر روی گروه برجهای خنک کن بررسی گردید. طبق نتایج اتخاذ شده، بیشترین اثر تداخلی بر روی برج واقع در پایین دست جریان اندازه‌گیری شد. [۲۶]

سو^۱ و فو^۲ با تحقیقات عددی انجام داده بر روی برجهای خنک کن و مقایسه آن با نتایج مقیاس اصلی، تحت شرایط بادهای محیطی، دریافتند که جریان سیال در اطراف برج، مشابه جریان در اطراف سیلندر دوار است. با وزش باد، سرعت مماسی در اطراف رادیاتورها خیلی بالا رفته و میزان فشار پایین می‌آید و در نتیجه جریان هوای گذرنده از رادیاتورها مختل شده و دمای آب داخل آنها افزایش می‌یابد. [۲۷]

ارلاندو^۳ در سال ۲۰۰۰، مطالعات عددی و تجربی خود را بر روی تأثیر تداخلی باد القایی بین دو برج مجاور هم در آزمایشگاه تونل باد لایه مرزی دانشگاه فلورنس^۴ ایتالیا انجام داد. این تحقیق بر روی الگوی فشار اندازه‌گیری شده بر روی دو برج همجوار هم، واقع در نیروگاه و اثر تداخلی برجهای با استفاده از نتایج مدل عددی انجام گرفت.

تونل باد بکار رفته از نوع مدار باز مکشی، با طول ۸ m و ابعاد اتاق آزمایش $2/4 \times 1/6$ m و مجهز به لوله‌های پیتوت، بادسنج‌ها و وسایل آشکار کننده جریان بود. مقیاس مدل بکار رفته $\frac{1}{300}$ مقدار اصلی در نظر گرفته شده بود. برای شبیه سازی عدد رینولدز، با توجه به اینکه مقدار سرعت رابطه معکوس با مقیاس مدل دارد، می‌بایست در تونل به سرعت ۳۰۰ برابر نمونه اصلی رسید، اما با توجه به غیر ممکن بودن این حالت از تکنیک زبری در آزمایش استفاده شد و ۲۴ نوار طولی با ارتفاع ۰/۴ mm در مدل نصب گردید.

این مدل مجهز به ۵۰ لوله فشار در پنج قسمت از سطح خارجی برج بود که به مبدل فشار متصل شده بودند. میزان ضریب فشار بدست آمده در ارتفاعات مختلف و مقایسه آن با نتایج نیمان^۵ مطابق شکل (۳-۶) گزارش شد.

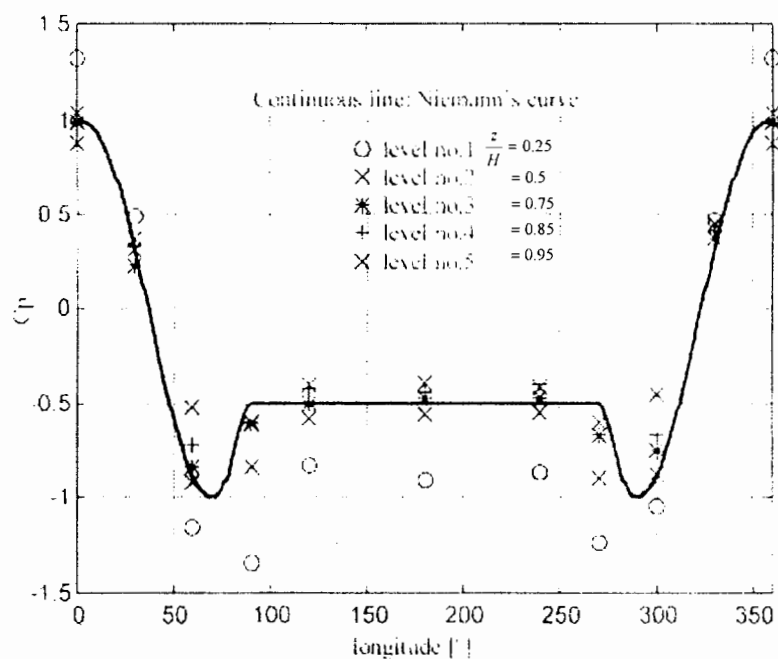
^۱ Su

^۲ Fu

^۳ Orlando

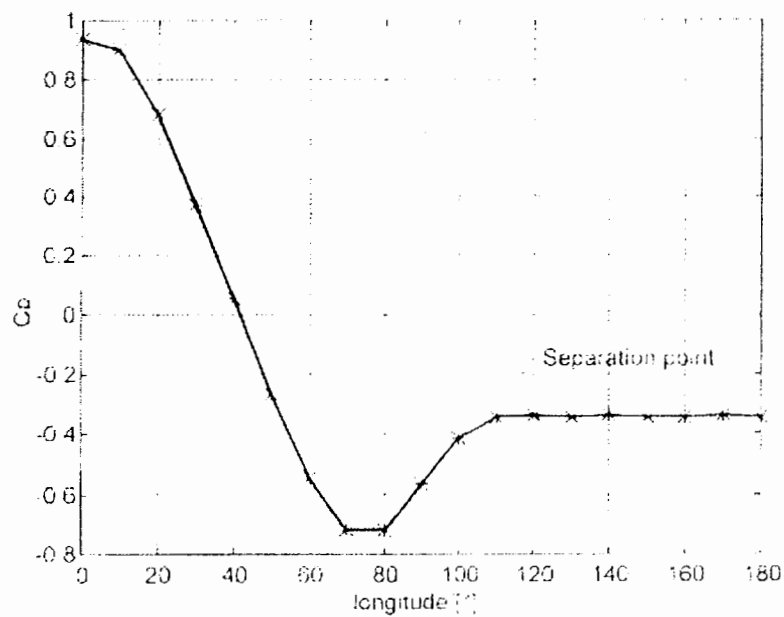
^۴ Florence

^۵ Niemann



شکل (۳-۶) مقایسه بین توزیع فشار بدست آمده در پیرامون برج با نتایج تئوری نیمان [۲۸]

میزان ضریب فشار میانگین در گلوبی مطابق شکل (۳-۷) بدست آمد و مشاهده گردید که جدایی در زاویه ۱۱۰ در برج رخ می‌دهد. همچنین اندازه‌گیری فشار برای دو برج پشت سر هم با زاویه و فاصله‌های مختلف از هم نیز انجام گرفت. [۲۸]



شکل (۳-۷) میزان ضریب فشار در گلوبی [۲۸]

در سال ۲۰۰۱ فو سانگ^۱ به تحقیق عددی در زمینه اثر معکوس باد بر روی انتقال حرارت دو برج در آرایش پشت سر هم پرداخت و دریافت که بادهای عرضی، جریان هوای شعاعی ورودی به برج را تخریب می کنند.

همچنین وی دریافت که نیروی هوای اطراف برج مشابه جریان اطراف سیلندر است، در نتیجه در بخشهای جانبی دو برج، سرعت مماسی خیلی بالا رفته و فشار پایین می آید و مانع از ورود هوای اطراف به برج و خنک شدن مبدلها می گردد. [۲۹]

مسعود بهنیا^۲ در سال ۲۰۰۳ به بررسی عددی عملکرد برجهای خنک کن تحت وزش باد و استفاده از دیواره های باد شکن در ورودی برج جهت بهبود کارایی برج پرداخت. [۳۰]

در سال ۲۰۰۵ تحقیقات عددی و تجربی دیگری توسط فو سانگ^۳ در مورد بهبود عملکرد برجهای خنک کن تحت شرایط بادهای محیطی با استفاده از دیواره بادشکن بر روی دو برج پشت سر هم انجام گرفت. مشخص شد که جریان هوا در اطراف دو بخش جانبی برجهای خنک کن مانع از ورود هوای سرد ورودی به برج شده و بر بازدهی برج تاثیر می گذارد. استفاده از دیواره های باد شکن در بخشهای جانبی برج، با به تاخیر انداختن جریان هوای جانبی و راندن هوا به داخل برج، منجر به بهبود بازدهی برج تا ۵۰٪ می گردد. تونل باد این تحقیق، با ابعاد ۶۰۰×۸۰۰ mm در دانشگاه تسینگ هو^۴ واقع شده بود. [۳۱]

رفقت الوکده^۵ در سال ۲۰۰۵ به بررسی استفاده از دیواره بادشکن در برجهای خنک کن خشک و همچنین محل قرارگیری و میزان تخلخل آنها بر عملکرد گرمایی برجهای خنک کن جابجایی طبیعی پرداخت. [۳۲]

مطالعات میدانی و تجربی امور^۶ در سال ۲۰۰۷ در دانشگاه سیدنی استرالیا بر روی تاثیر ساختمانها در نیروگاهها به عنوان یک مانع جهت جلوگیری از تأثیر باد در عملکرد برجهای خنک کن خشک، تاثیر مثبت آن را آشکار ساخت. [۳۳]

^۱ Fu Song

^۲ Masud Behnia

^۳ Fu Song

^۴ Tsinghua

^۵ Rafat Al-Waked

^۶ Amur

فصل چهارم

تئوری و اصول عملکرد دستگاه جریان
سنج سیم داغ

تئوری و اصول عملکرد دستگاه جریان سنج سیم داغ

با توجه به اینکه بخشی از نتایج بدست آمده در این پایان نامه با استفاده از جریان سنج سیم داغ بدست آمده است، در این فصل ویژگیهای دستگاه جریان سنج سیم داغ و اصول عملکرد آن بحث می شود.

۴-۱- کمیتهای مهم جریان سیال

برای بررسی جریان سیال و نحوه تأثیر آن بر محیط و کنترل رفتار آن، نیاز به اندازه‌گیری کمیتهای جریان سیال است. برای مثال در مهندسی سازه برای تعیین نحوه بارگذاری حاصل از نیروی باد و یا شناخت جریان هوا در اطراف سازه‌هایی نظیر ساختمانها، پلها، استادیومها و ... نیاز به مشخص نمودن توزیع فشار، توزیع سرعت، طیف اغتشاشهای جریان هوا و ضخامت لایه مرزی جریان هوا است. برای بررسی و اندازه‌گیری این کمیتهای نیاز به انجام آزمایش است، بدین ترتیب که مدل کوچکی از سازه مورد نظر را ساخته و با استفاده از تونل باد، رفتار جریان هوا در اطراف مدل بررسی می‌شود. آنچه که در این روش حائز اهمیت است، قرار گرفتن مدل در داخل لایه مرزی و ایجاد تشابه هندسی و دینامیکی میان جریان هوای درون تونل باد و جریان اتمسفری می‌باشد. این امر توسط پارامترهایی نظیر عدد رینولدز، نحوه توزیع سرعت در اطراف مدل و اندازه‌گیری طیف اغتشاشهای جریان هوا انجام می‌شود. به‌منظور بررسی رفتار ارتعاشی سازه‌ها اندازه‌گیری نوع فرکانس اغتشاشهای جریان هوا بسیار حائز اهمیت است. بنابراین مشاهده می‌شود که اندازه‌گیری دقیق کمیتهای جریان هوا در اطراف مدل بسیار پر اهمیت بوده و هرگونه اشتباه و خطایی در مقادیر اندازه‌گیری شده می‌تواند باعث اشتباه در طراحی شود.

یکی از کمیتهای مهم جریان سیال، سرعت لحظه‌ای جریان سیال است. سرعت لحظه‌ای جریان سیال را می‌توان به شکل برداری $\vec{V}(t)$ نشان داد که دارای مؤلفه‌های $W(t), V(t), U(t)$ به ترتیب در راستای مختصات دکارتی است. سرعت لحظه‌ای در یک نقطه را می‌توان به صورت مجموع سرعت متوسط و اغتشاشهای سرعت نشان داد:

$$\begin{aligned}
 U(t) &= \bar{U} + u(t) \\
 V(t) &= \bar{V} + v(t) \\
 W(t) &= \bar{W} + w(t)
 \end{aligned}
 \tag{۱-۴}$$

اندازه‌گیری مؤلفه‌های اغتشاشی u ، v ، w و تغییرات آنها در حوزه زمان و یا فرکانس، در شناخت جریان سیال و کنترل آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. فرکانس اغتشاشهای سرعت جریان سیال، از چند هرتز در جریان آرام تا چندین کیلوهرتز در جریان آشفته تغییر کرده و به عدد رینولدز بستگی دارد. همچنین اثر متقابل u و v بر روی یکدیگر نیز بسیار حائز اهمیت است.

در روشهای تجربی، تعیین سرعت جریان سیال به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم انجام می‌شود. در روش غیرمستقیم، سرعت جریان سیال به وسیله اندازه‌گیری فشار و با استفاده از قوانین مکانیک سیالات و در روش مستقیم با استفاده از دستگاههایی نظیر جریان‌سنج لیزری، جریان‌سنج سیم داغ و ... اندازه‌گیری می‌شود. در روش مستقیم، خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم داغ که معمولاً به صورت ولتاژ می‌باشد، باید در ابتدا کالیبره شده، سپس با استفاده از ولتاژ خروجی و معادله‌های کالیبراسیون، سرعت جریان سیال اندازه‌گیری شود.

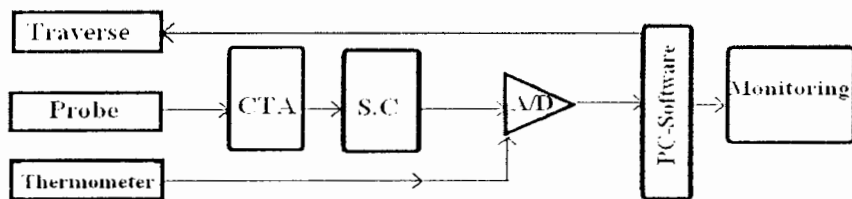
در روش غیر مستقیم با استفاده از لوله استاتیکی پیتوت، فشار دینامیکی جریان سیال اندازه‌گیری و با استفاده از قوانین مکانیک سیالات، سرعت متوسط جریان سیال تعیین می‌شود. در این روش، اغتشاشهای جریان سیال را نمی‌توان اندازه‌گیری کرد. از طرف دیگر، پاسخ فرکانسی دستگاههای اندازه‌گیر فشار، بالا نبوده و با استفاده از این روش، فقط می‌توان سرعت لحظه‌ای را با فرکانس چند صد سیکل در ثانیه اندازه‌گیری نمود. برای اندازه‌گیری سرعتهای لحظه‌ای با فرکانس بالا و همچنین هنگامی که پاسخ سریع وسیله اندازه‌گیر در مقابل تغییرات جریان سیال مد نظر باشد، از دستگاه جریان‌سنج سیم داغ و یا از دستگاه جریان‌سنج لیزری استفاده می‌شود.

دستگاه جریان‌سنج سیم داغ^۱، ابزاری است که به وسیله آن می‌توان سرعت لحظه‌ای جریان سیال را با فرکانس بسیار بالا اندازه‌گیری نمود و با استفاده از سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری شده، سرعت متوسط، اغتشاشهای جریان سیال، تنشهای رینولدز، زاویه جریان (در صورت استفاده از سیم داغ دو و یا سه بعدی)، دمای جریان، جهت حرکت جریان (بخصوص در جریانهای معکوس)، کمیت‌های جریان دو فازی و ... را اندازه‌گیری نمود.

^۱ Hot-Wire Anemometry

۴-۳- اجزای تشکیل دهنده دستگاه جریان سنج سیم داغ

شکل (۴-۱) شماتیک سیستم دستگاه جریان سنج سیم داغ به همراه تجهیزات جانبی آن را نشان می‌دهد. اجزای اصلی دستگاه جریان سنج سیم داغ، شامل پراب^۱، مدار الکترونیکی دما ثابت^۲ (CT)، مدار الکترونیکی تطبیق دهنده سیگنال^۳ (SC)، برد^۴ (DAQ) و نرم‌افزار مربوطه می‌باشند. به منظور اصلاح تأثیر دما بر اندازه‌گیری دستگاه جریان سنج سیم داغ، نیاز به استفاده از دماسنج برای اندازه‌گیری دما است. همچنین به منظور اندازه‌گیری توزیع و تغییرات محلی سرعت جریان سیال نیاز به مکانیزم انتقال دهنده پراب و برای کالیبره نمودن دستگاه جریان سنج سیم داغ نیاز به تونل باد و یا دستگاه کالیبراتور می‌باشد. بنابراین برای اندازه‌گیری و بررسی تجربی پدیده‌های سیالاتی علاوه بر دستگاه جریان سنج سیم داغ نیاز به تجهیزات جانبی بویژه مکانیزم انتقال دهنده پراب می‌باشد. بدون مکانیزم انتقال دهنده پراب نمی‌توان بسیاری از طرحهای پژوهشی را انجام داد. در فصل ۶ در مورد اجزای اصلی دستگاه جریان سنج سیم داغ بحث خواهد شد.



شکل (۴-۱) شماتیک سیستم دستگاه جریان سنج سیم داغ به همراه تجهیزات جانبی [۱]

۴-۴- مدار الکترونیکی دستگاه جریان سنج سیم داغ

نوع مدار الکترونیکی دستگاه جریان سنج سیم داغ از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. برای اندازه‌گیری سرعت جریان سیال، سه نوع مدار الکترونیکی وجود دارد:

^۱ Probe

^۲ Constant Temperature

^۳ Signal Conditioner

^۴ Data Acquisition

- ۱- مدار الکترونیکی جریان ثابت^۱ (CC)، با استفاده از این مدار الکترونیکی، جریان الکتريکی عبور کننده از سنسور سیم داغ را ثابت نموده و سرعت جریان سیال اندازه‌گیری می‌شود.
- ۲- مدار الکترونیکی ولتاژ ثابت^۲ (CV)، در این حالت مدار الکترونیکی، ولتاژ بالای سنسور سیم داغ را ثابت نگه داشته و سرعت جریان سیال اندازه‌گیری می‌شود.
- ۳- مدار الکترونیکی دما ثابت^۳ (CT)، با استفاده از این مدار الکترونیکی، مقاومت سنسور سیم داغ را ثابت نگه داشته و سرعت جریان سیال اندازه‌گیری می‌شود.
- مدارهای الکترونیکی CT و CV دارای حلقه بازخورد^۴ بوده و به‌طور خودکار برای اندازه‌گیری سرعت جریان سیال قابل تنظیم است، ولی مدار الکترونیکی CC دارای حلقه بازخورد نبوده و باید به صورت دستی آن را برای اندازه‌گیری سرعت جریان سیال تنظیم نمود.

۴-۴-۱- مدار الکترونیکی دما ثابت

مدار الکترونیکی دما ثابت، CT، یکی از قسمتهای اصلی دستگاه جریان‌سنج سیم داغ است، شکل (۴-۲) این مدار را به‌طور شماتیک نشان می‌دهد. مدار الکترونیکی دما ثابت CT شامل پیل وتسون، تقویت‌کننده تفاضلی، تنظیم‌کننده پاسخ فرکانسی و تقویت‌کننده جریان است.

پیل وتسون، شامل چهار مقاومت است که مقاومتهای R_1 و R_2 آن ثابت، مقاومت R_3 متغیر و مقاومت چهارم آن R_w سنسور است. مدار الکترونیکی دما ثابت CT، طوری طراحی شده است که به‌طور خودکار پیل وتسون را متوازن می‌کند، به‌صورتی که در حالت توازن $(E_1 - E_2)$ نزدیک به صفر است. با استفاده از مقاومت متغیر R_3 ، سنسور دستگاه جریان‌سنج سیم داغ R_w گرم شده و مقاومت سنسور سیم داغ طبق رابطه $R_w = (R_3 \cdot R_1) / R_2$ محاسبه می‌شود.

^۱ Constant Current
^۲ Constant Voltage
^۳ Constant Temperature
^۴ Feedback

جریان الکتریکی عبور کننده از سنسور را کاهش داده و در نتیجه پل وتسون دوباره متوازن می‌شود. با تغییر جریان الکتریکی عبور کننده از سنسور، ولتاژ اعمالی E به بالای پل وتسون تغییر کرده و با استفاده از این ولتاژ، می‌توان تغییرات سرعت جریان سیال را اندازه‌گیری نمود. با استفاده از تنظیم کننده پاسخ فرکانسی که شامل تقویت‌کننده و فیلتر می‌باشد، پاسخ فرکانسی دستگاه جریان‌سنج سیم داغ به همراه سنسور آن بهینه می‌شود.

۴-۴-۲- نسبت فراگرمایی^۱

نسبت فراگرمایی معادل با نسبت $(R_w - R_a)/R_a$ تعریف می‌شود که R_w مقاومت سنسور در دمای عملکرد و R_a مقاومت سنسور در دمای محیط است. به منظور اصلاح اثر تغییرات دمای محیط بر اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای، لازم است اندازه دقیق نسبت فراگرمایی $(R_w - R_a)/R_a$ مشخص شود، در نتیجه می‌بایست R_w و T_w تعیین شوند. برای یک سنسور از جنس تنگستن، نسبت فرا گرمایی، معمولاً حدود ۰/۶-۱ انتخاب می‌شود.

همان‌طور که بیان شد، هر چه دمای سنسور بالاتر باشد، حساسیت آن نسبت به تغییرات سرعت بیشتر خواهد بود. ولی هنگامی که از سنسور با جنس تنگستن استفاده می‌شود، برای جلوگیری از اکسید شدن سنسور لازم است که دمای سنسور در هر نقطه‌ای از آن کمتر از $350^\circ C$ باشد.

مقاومت پراب متشکل از مقاومت سنسور R_s و مقاومت اتصالات و کابل R_l است که طبق رابطه $R_p = R_s + R_l$ بیان می‌شود. برای اندازه‌گیری مقاومت پراب از اهمیت استفاده می‌شود، برای اندازه‌گیری صحیح مقاومت پراب باید جریان الکتریکی عبوری از سنسور کمتر از $1 mA$ باشد تا موجب گرم شدن سنسور و در نتیجه، تغییر مقاومت آن نشود. در انتخاب نسبت فراگرمایی باید دقت شود که فقط مقاومت سنسور R_s ، در نظر گرفته شود. در صورتی که مقاومت پراب R_p یعنی مقاومت سنسور، اتصالات و کابل آن در نظر گرفته شود، احتمال سوختن سنسور وجود دارد.

^۱ Overheat Ratio

۴-۵- اصول عملکرد دستگاه جریان سنج سیم داغ

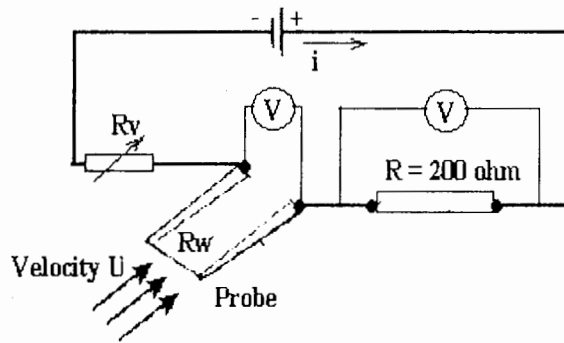
دستگاه جریان سنج سیم داغ برای اندازه‌گیری سرعت و دمای لحظه‌ای جریان سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد. این اندازه‌گیریها توسط محاسبه میزان تبادل حرارت بین سنسور سیم داغ و یا فیلم داغ و محیط انجام می‌شوند. با استفاده از تغییرات انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری که ناشی از تغییر سرعت است، می‌توان سرعت جریان سیال را اندازه‌گیری نمود. نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی از سیم داغ در دمای T_w به هوا در دمای T_a ، به صورت $Q = h(T_w - T_a)$ بیان می‌شود. در این جا Q نرخ انتقال حرارت در واحد سطح و h نیز ضریب همرفت هوا می‌باشد.

تغییر نرخ انتقال حرارت از سیم داغ به جریان سیال، سبب تغییر مقاومت الکتریکی سیم داغ (یا فیلم داغ) R_w و یا مقدار جریان الکتریکی I که باعث گرم شدن سیم می‌شود، همچنین تغییر ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ می‌شود. به کمک معادله کالیراسیون مورد نظر، تغییرات سرعت و یا دمای جریان سیال اندازه‌گیری می‌شوند.

دستگاه جریان سنج سیم داغ دارای سنسوری از جنس تنگستن، پلاتین و یا آلیاژهای پلاتین است که با استفاده از جریان الکتریکی آن را گرم نموده و با توجه به مقدار انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری، سرعت سیال اندازه‌گیری می‌شود. نرخ انتقال حرارت به پارامترهای مختلفی نظیر جنس، شکل، ابعاد سنسور و همچنین مشخصه‌های سیال بستگی دارد.

مطابق شکل (۴-۳)، سنسوری از جنس تنگستن به قطر $5 \mu m$ و طول $1/25 \text{ mm}$ را بر روی پراب نصب و جریان الکتریکی کنترل شده‌ای از آن عبور داده می‌شود. با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی سنسور در سرعت‌های مختلف، منحنی مشخصه عملکرد سنسور تعیین می‌شود.

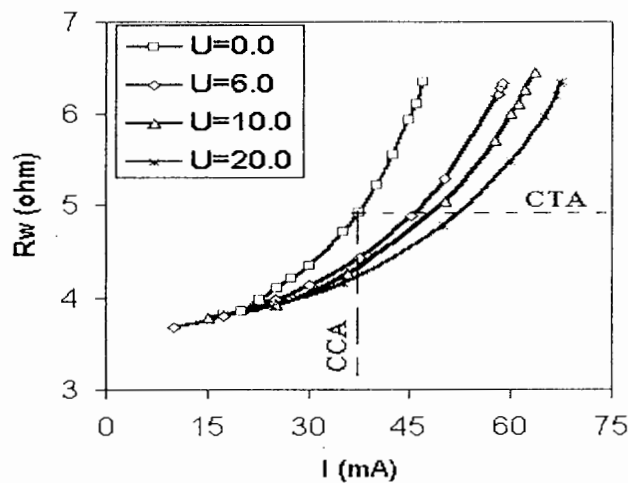
شکل (۴-۴) تغییرات مقاومت الکتریکی سنسور سیم داغ را بر حسب جریان الکتریکی نشان می‌دهد که با افزایش جریان الکتریکی، مقاومت الکتریکی سنسور نیز افزایش می‌یابد. این رابطه خطی نبوده و می‌توان آن را با منحنی درجه ۲ تقریب نمود. با افزایش سرعت جریان سیال، منحنی مشخصه عملکرد سیم داغ تغییر می‌کند. در حالت $U=0$ ، مکانیزم انتقال حرارت از سنسور به صورت جابه‌جایی آزاد بوده و با افزایش سرعت، انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد نسبت به انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری ناچیز می‌شود.



شکل (۳-۴) شماتیک مدار اندازه‌گیر منحنی مشخصه سنسور سیم داغ [۱]

برای اندازه‌گیری سرعت جریان سیال دو روش اصلی وجود دارد:

۱ - مقدار مقاومت سنسور سیم داغ R_w ثابت فرض می‌شود، در این حالت با تغییر سرعت جریان سیال، مقدار جریان الکتریکی عبور کننده از سنسور تغییر می‌کند. در این حالت تغییرات جریان الکتریکی و سرعت جریان سیال مطابق خط افقی در شکل (۴-۴) است.



شکل (۴-۴) منحنی مشخصه پراب با سنسور سیم داغ از جنس تنگستن به قطر $5 \mu m$ و طول $1/25 mm$ در

سرعت‌های مختلف جریان هوا [۱]

مدارهای الکترونیکی که به این روش کار می‌کنند، جریان سنج دما ثابت^۱ نامیده می‌شوند. در حال حاضر اکثر جریان‌سنج‌های سیم داغ در این وضعیت کار می‌کنند و با استفاده از این روش، سرعت لحظه‌ای جریان سیال اندازه‌گیری می‌شود.

^۱ Constant Temperature Anemometer

۲- در روش دوم مقدار جریان الکتریکی عبور کننده از سنسور ثابت است و با تغییر سرعت جریان سیال، مقاومت الکتریکی سنسور تغییر می کند. این تغییرات به صورت خط عمودی در شکل (۴-۴) نشان داده شده است. با افزایش سرعت جریان سیال، مقاومت الکتریکی سنسور کاهش یافته و با اندازه گیری آن می توان سرعت جریان سیال را تشخیص داد. مدارهای الکترونیکی که با این روش کار می کنند، جریان سنج جریان ثابت^۱ نامیده می شوند. در حال حاضر با استفاده از این روش تنها تغییرات دما را اندازه گیری می کنند.

۴-۶- انتقال حرارت

همان گونه که بیان شد، عملکرد جریان سنج سیم داغ بر اساس نرخ انتقال حرارت جابه جایی از سنسور سیم داغ به جریان سیال می باشد که این سنسور توسط جریان الکتریکی I گرم می شود. نرخ انتقال حرارت بر واحد سطح که با رابطه $Q = h \cdot (T_w - T_a)$ بیان می شود، به عواملی همچون مشخصه های سیال مانند چگالی ρ ، لزجت سینماتیکی μ ، ضریب هدایت گرمایی k ، گرمای ویژه C_p ، ضریب پخش حرارتی α ، سرعت جریان سیال U ، دمای جریان سیال T ، هندسه سنسور سیم داغ مانند قطر d ، طول l و دمای سیم داغ T_w بستگی دارد. مجموعه این عوامل را می توان در اعداد بی بعد زیر خلاصه نمود:

$Re = \rho U d / \mu$: عدد رینولدز در واقع برابر با نسبت نیروی اینرسی سیال به نیروی لزجی سیال

می باشد که با افزایش عدد رینولدز، مقدار نرخ انتقال حرارت جابه جایی نیز افزایش می یابد.

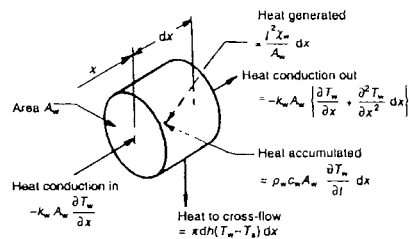
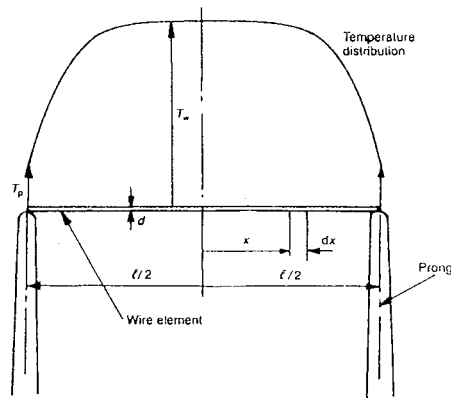
$Pr = \mu C_p / k$: عدد پرانتل برابر با نسبت پخش اندازه حرکت سیال به پخش حرارتی سیال است

و در واقع میدان سرعت سیال را به میدان دما در سیال مربوط می کند. هر چه عدد پرانتل بیشتر باشد، پخش حرارتی کوچک تر بوده و انتقال حرارت بیشتری از طریق جابه جایی صورت می گیرد.

$Nu = h d / k$: عدد ناسلت برابر با نسبت انتقال حرارت جابه جایی به انتقال حرادت هدایت است

که با افزایش عدد ناسلت مقدار انتقال حرارت جابه جایی در سیم داغ نیز افزایش می یابد.

^۱ Constant Current Anemometer



شکل (۴-۵) هندسه سنسور سیم داغ و توازن انرژی برای المان سنسور سیم داغ [۱]

- $d\dot{Q}_e$: نرخ تولید حرارت به وسیله جریان الکتریکی
- $d\dot{Q}_{fc}$: نرخ انتقال حرارت به طریق جابه جایی اجباری
- $d\dot{Q}_c$: نرخ انتقال حرارت به طریق هدایت
- $d\dot{Q}_r$: نرخ انتقال حرارت به طریق تشعشع
- $d\dot{Q}_s$: نرخ ذخیره گرما در سیم

در این حالت نرخ حرارت تولید شده به وسیله جریان الکتریکی I برای یک المان محدود از سنسور سیم داغ برابر است با:

$$d\dot{Q}_e = \frac{I^2 \chi_w}{A_w} dx \quad (۳-۴)$$

χ_w مقاومت ویژه الکتریکی سنسور سیم داغ در دمای T_w و A_w سطح مقطع سنسور سیم داغ است.

نرخ انتقال حرارت به طریق جابه جایی اجباری برای المان محدود طبق معادله (۴-۴) بیان می شود:

$$d\dot{Q}_{fc} = \pi dh(T_w - T_a) dx \quad (۴-۴)$$

نرخ انتقال حرارت از طریق هدایت برای المان محدود طبق معادله (۵-۴) بیان می شود:

$$d\dot{Q}_c = -k_w A_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} dx \quad (5-4)$$

k_w ضریب هدایت گرمایی سیم در دمای T_w می‌باشد. نرخ انتقال حرارت به‌طریق تشعشی برابر است با:

$$d\dot{Q}_r = \pi d \sigma \varepsilon (T_w^4 - T_a^4) dx \quad (6-4)$$

σ ثابت استفان - بولتزمن، ε ضریب نشر سنسور و T_a دمای محیط می‌باشد. در بیشتر موارد $d\dot{Q}_r$ (میزان انتقال حرارت به‌طریق تشعشع) در مقایسه با انتقال حرارت از طریق جابه‌جایی و هدایت، بسیار کوچک و قابل صرف‌نظر کردن است. نرخ گرمای ذخیره شده در المان سنسور سیم داغ برابر است با:

$$d\dot{Q}_s = \rho_w c_w A_w \frac{\partial T_w}{\partial t} dx \quad (7-4)$$

ρ_w چگالی سنسور سیم داغ و c_w گرمای ویژه سنسور سیم داغ در واحد جرم است. با جایگذاری معادله‌های نرخ انتقال حرارت در معادله (۲-۴) می‌توان نوشت:

$$k_w A_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} + \frac{I^2 \chi_w}{A_w} - \pi dh (T_w - T_a) - \rho_w c_w A_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = 0 \quad (8-4)$$

در حالت پایا $\partial T_w / \partial t = 0$ است و با فرض این‌که دمای $(T_w - T_a)$ ثابت باشد، معادله فوق را می‌توان به‌صورت معادله زیر نوشت:

$$\frac{d^2 T_l}{dx^2} + K_1 T_l + K_2 = 0$$

که در آن K_1, T_l و K_2 عبارتند از:

$$T_l = T_w - T_a$$

$$K_1 = \frac{I^2 \chi_a \alpha_a}{k_w \cdot A_w^2} - \frac{\pi dh}{k_w \cdot A_w}$$

$$K_2 = \frac{I^2 \chi_a}{k_w \cdot A_w^2}$$

با در نظر گرفتن مقداری ثابت برای h و ثابت بودن $T_w - T_a$ ، مقدار K_1 نیز ثابت خواهد بود. در بیشتر کاربردهای سنسور سیم داغ مقدار K_1 منفی است، بنابراین معادله توزیع دما برای سنسور سیم داغ به طول l ، به صورت معادله (۹-۴) به دست می‌آید (Davies & Fisher ۱۹۶۴):

$$T_w(x) = \frac{K_2}{|K_1|} \left[1 - \frac{\cosh(|K_1|^{1/2} x)}{\cosh(|K_1|^{1/2} l/2)} \right] + T_a \quad (9-4)$$

با انتگرال گیری از رابطه (۹-۴) دمای متوسط سنسور سیم داغ $T_{w,m}$ به صورت معادله (۱۰-۴) به دست می آید:

$$T_{w,m} = \frac{K_2}{|K_1|} \left[1 - \frac{\tanh(|K_1|^{1/2} l/2)}{|K_1|^{1/2} l/2} \right] + T_a \quad (10-4)$$

۴-۷- پاسخ فرکانسی دستگاه جریان سنج سیم داغ

یکی از مزایای قابل توجه دستگاه جریان سنج سیم داغ، اندازه گیری سرعت لحظه ای و اغتشاشهای سرعت جریان سیال می باشد. فرکانس اغتشاشهای سرعت جریان سیال دارای بازه گسترده ای بوده و بسته به عدد رینولدز و نوع جریان سیال از چند هرتز تا ده ها کیلو هرتز تغییر می کند. این اغتشاشهای سرعت جریان سیال را می توان ترکیبی از موجهای سینوسی با فرکانس و دامنه متفاوت دانست. برای اندازه گیری صحیح اغتشاشهای سرعت جریان سیال، دستگاه جریان سنج سیم داغ باید قادر به اندازه گیری سرعت لحظه ای با فرکانس بالا باشد.

قابلیت اندازه گیری اغتشاشهای سرعت جریان سیال با استفاده از دستگاه جریان سنج سیم داغ تا فرکانس مشخصی است. فراتر از این فرکانس، نسبت دامنه ورودی اغتشاشهای سرعت جریان سیال به دامنه ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ کاهش یافته و اختلاف فاز آنها نیز به شدت تغییر می کند. بنابراین دستگاه جریان سنج سیم داغ قادر به اندازه گیری صحیح اغتشاشهای سرعت جریان سیال با فرکانس بالاتر از آن نیست. این فرکانس مشخص را فرکانس قطع، f_c می نامند. با تنظیم دستگاه جریان سنج سیم داغ می توان فرکانس قطع، f_c را بهینه نمود. عواملی همچون نوع مدار الکترونیکی دما ثابت (CT)، شرایط جریان سیال (بویژه سرعت آن)، نوع سنسور و مقدار نسبت فراگرمایی سنسور بر توانایی دستگاه جریان سنج سیم داغ در اندازه گیری صحیح اغتشاشهای جریان سیال، تأثیر خواهند داشت. به منظور اندازه گیری صحیح، باید تمام این مجموعه عوامل در کنار هم بهینه شده و پاسخ فرکانسی بهینه ای را برای دستگاه جریان سنج سیم داغ تنظیم نمود.

۴-۷-۱- پاسخ فرکانسی سنسور سیم داغ

به علت وجود لختی حرارتی، سنسور سیم داغ نمی تواند سریعاً به تغییرات به وجود آمده در شرایط جریان سیال پاسخ دهد. پاسخ فرکانسی سنسور سیم داغ با فرض این که طول سنسور به اندازه کافی بلند باشد، مورد بررسی قرار می گیرد. در این حالت انتقال حرارت هدایتی از دو انتهای سیم داغ به پایه ها ناچیز است و دما در طول سیم داغ به صورت یکنواخت خواهد بود. معادله توازن حرارتی وقتی که لختی حرارتی در نظر گرفته می شود به صورت معادله زیر بیان می شود:

$$\frac{C_w}{\alpha_0 R_0 (A + BU^n - I^2)} \frac{dR_w}{dt} + R_w = \frac{(A + BU^n)}{(A + BU^n - I^2)} R_a \quad (۴-۱۱)$$

که در آن $C_w = \rho_w c_w (\pi/4) d^2 \ell$ برابر با ظرفیت حرارتی سنسور سیم داغ می باشد. معادله بالا، یک معادله دیفرانسیل مرتبه اول است که ضرایب آن ثابت نبوده و تابعی از شکل هندسی، جنس سنسور و شرایط جریان سیال نظیر سرعت U ، دما T و جریان الکتریکی عبوری از سنسور می باشد. ثابت زمانی سنسور سیم داغ به صورت زیر تعریف می شود:

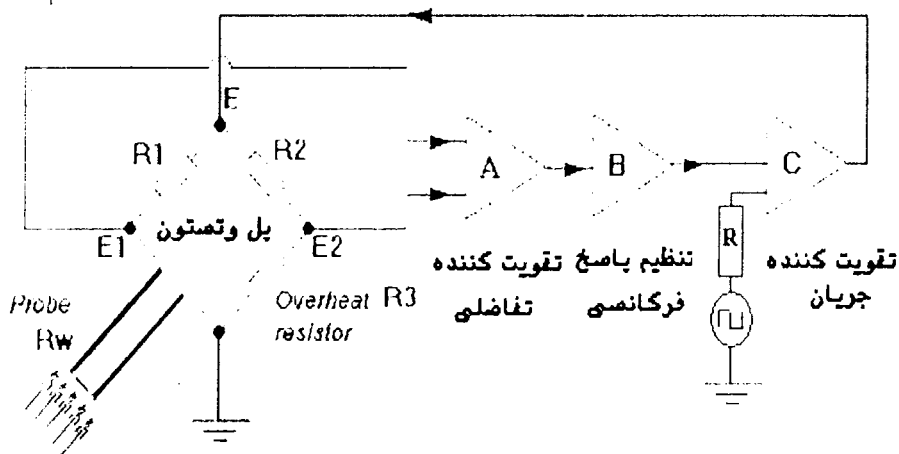
$$M = \frac{C_w}{\alpha_0 R_0 (A + BU^n - I^2)} \quad (۴-۱۲)$$

۴-۷-۲- پاسخ فرکانسی جریان سنج سیم داغ

با توجه به این که ثابت زمانی سنسور سیم داغ بالا بوده و برای اندازه گیری جریانهای آشفته مناسب نمی باشد. از اینرو به منظور اندازه گیری جریانهای آشفته نیاز است که پاسخ فرکانسی دستگاه جریان سنج سیم داغ افزایش یابد که این امر با استفاده از مدار الکترونیکی دما ثابت CT ، انجام می شود.

پاسخ فرکانسی دستگاه جریان سنج سیم داغ به اغتشاشهای جریان سیال در مدار الکترونیکی دما ثابت CT به روشهای تئوری و تجربی تعیین می شود. در روش تئوری، پاسخ فرکانسی دستگاه جریان سنج سیم داغ با استفاده از مدل ریاضی سنسور سیم داغ به همراه مدار الکترونیکی به دست می آید. در روش تجربی با ایجاد اغتشاش سیالاتی و یا الکترونیکی، پاسخ فرکانسی دستگاه جریان سنج سیم داغ تعیین می شود.

در روش تجربی، برای تعیین پاسخ فرکانسی دستگاه جریان سنج سیم داغ به اغتشاشهای جریان سیال از دو روش سیالاتی و الکترونیکی استفاده می‌شود. در روش سیالاتی، اغتشاش کوچکی به جریان سیالی که پراب در آن قرار دارد، اعمال می‌شود و سپس پاسخ فرکانسی دستگاه جریان سنج سیم داغ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این اغتشاش ممکن است به وسیله جریانهای نوسانی، تغییر دما و حتی با تکان دادن خود پراب ایجاد شود. آزمایش مستقیم به وسیله ایجاد اغتشاش در جریان سیال تا حدودی مشکل بوده و معمولاً با استفاده از روشهای الکترونیکی، پاسخ فرکانسی دستگاه جریان سنج سیم داغ تعیین می‌شود. در روش الکترونیکی، یک سیگنال اغتشاش الکترونیکی e_1 به مدار الکترونیکی دما ثابت CT اعمال می‌شود (شکل ۴-۶). با اعمال این سیگنال، خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ که به صورت ولتاژ بوده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

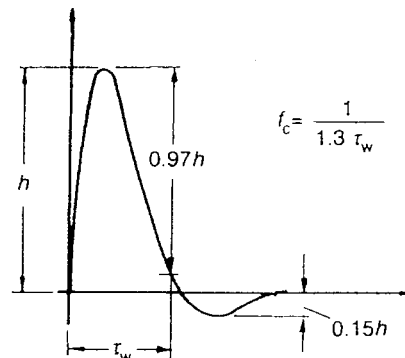


شکل (۴-۶) اعمال سیگنال موج مربعی به مدار الکترونیکی دما ثابت CT [۱]

برای ایجاد پاسخ فرکانسی بهینه، کنترل‌های مدار الکترونیکی دما ثابت آن قدر تغییر داده می‌شوند تا پاسخ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ مشابه شکل (۴-۷) شود. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، پاسخ فرکانسی دستگاه جریان سنج سیم داغ به سیگنال موج مربعی دارای مقدار منفی نسبت به مبنای موج مربعی می‌باشد که مقدار آن حدود 0.15 بیشترین مقدار خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ است. τ_{11} مدت زمانی است که ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ از زمان آغاز اعمال سیگنال موج مربعی شروع شده و تا 0.3 مقدار ماکزیمم خود نسبت به محور t نزول می‌کند. با تعیین τ_{11} ، فرکانس قطع f_c از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$f_c = \frac{l}{1.3\tau_w}$$

(۱۳-۴)



شکل (۴-۷) پاسخ فرکانسی پراب سیم داغ در مدار الکترونیکی CT نسبت به سیگنال موج مربع [۱]

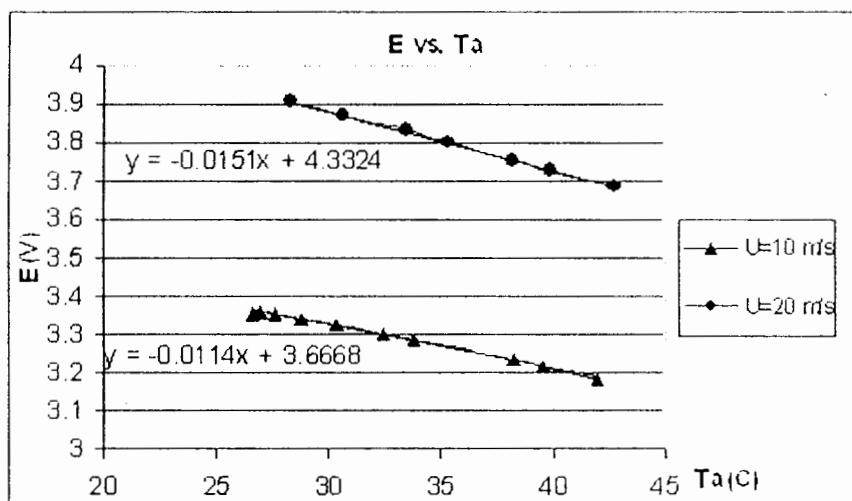
۴-۸- اثر دما بر روی اندازه گیری دستگاه جریان سنج سیم داغ

ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ به نرخ انتقال حرارت از سنسور سیم داغ به سیال بستگی دارد. نرخ انتقال حرارت به عدد ناسلت Nu و اختلاف دمای سنسور سیم داغ و دمای محیط $(T_w - T_a)$ ، همچنین سرعت جریان سیال وابسته است. برای اندازه گیری سرعت جریان سیال، فرض بر این است که اختلاف دمای سنسور سیم داغ و سیال ثابت است.

در بسیاری از جریانها، دمای سیال T_a ممکن است با زمان تغییر کند. این تغییر دما، ممکن است به علت توان الکتریکی موتور فن در یک تونل باد مدار بسته باشد. در این حالت ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ با تغییر دمای محیط، T_a ، تغییر کرده و سبب بروز خطا می شود، به طوری که برای هر درجه افزایش دما در اندازه گیری جریان هوا، میزان خطا برابر $1/96$ ٪ و در جریان آب به میزان 12 ٪ است. تأثیر دمای جریان سیال بر اندازه گیری سرعت جریان سیال، توسط پژوهشگران بسیاری با استفاده از روشهای تحلیلی و تجربی بررسی شده است. با افزایش دمای محیط، ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ نیز کاهش می یابد. این کاهش بستگی به سرعت جریان سیال، نوع سنسور و نسبت فراگرمایی دارد.

شکل (۴-۸)، نحوه ی کاهش ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ را برای سنسور فیلم داغ در نسبت فرا گرمایی $0/4$ نشان می دهد. این منحنیها برای دو سرعت مختلف 20 m/s و 10 m/s رسم شده اند. نکته قابل توجهی که در این منحنیها مشاهده می شود، این است که با افزایش سرعت

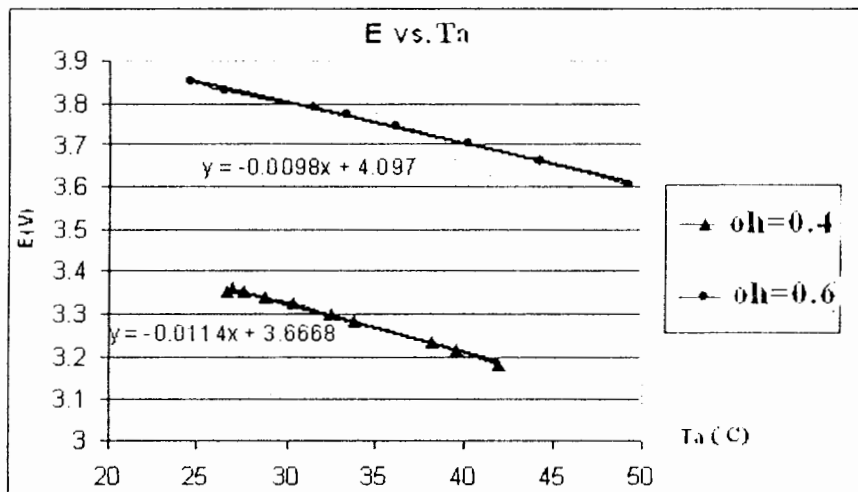
جریان سیال، نرخ کاهش ولتاژ نیز افزایش می‌یابد. (توضیحات جامع در مورد سنسور سیم داغ و فیلم داغ در فصل ۶ آمده است).



شکل (۴-۸) کاهش ولتاژ خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم داغ برای سنسور فیلم داغ بر اثر افزایش دمای محیط در

نسبت فراگرمایی ۰,۴ برای سرعت‌های $U=10 \text{ m/s}$ و $U=20 \text{ m/s}$ [۱]

به عبارت دیگر هر چه سرعت سیال افزایش یابد، شیب خط کاهش ولتاژ خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم داغ، E ، نیز افزایش می‌یابد. علت این امر را می‌توان در کاهش مقدار T_{11} و حساس‌تر شدن سنسور نسبت به دمای محیط دانست. هر چه سرعت افزایش یابد، میزان ولتاژ خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم داغ نیز افزایش یافته و در نتیجه با توجه به ثابت بودن بهره مدار الکترونیکی، مقدار ΔE پل و تسون نسبت به تقویت کننده افزایش می‌یابد. نتیجه این امر، کاهش R_{11} و T_{11} می‌باشد. شکل (۴-۹) نشان‌دهنده منحنی کاهش E بر حسب دمای محیط سیال T_a برای سنسور فیلم داغ در سرعت 10 m/s و در دو نسبت فراگرمایی $0/4$ و $0/6$ می‌باشد. همان‌گونه که در شکل (۴-۹) مشاهده می‌شود، با کاهش مقدار نسبت فراگرمایی، ولتاژ بالای پل E با شیب تندتری کاهش می‌یابد، به طوری که برای نسبت فراگرمایی $0/6$ این کاهش با نرخ منفی $0/0098$ و برای نسبت فراگرمایی $0/4$ این کاهش با نرخ منفی $0/0114$ همراه است.



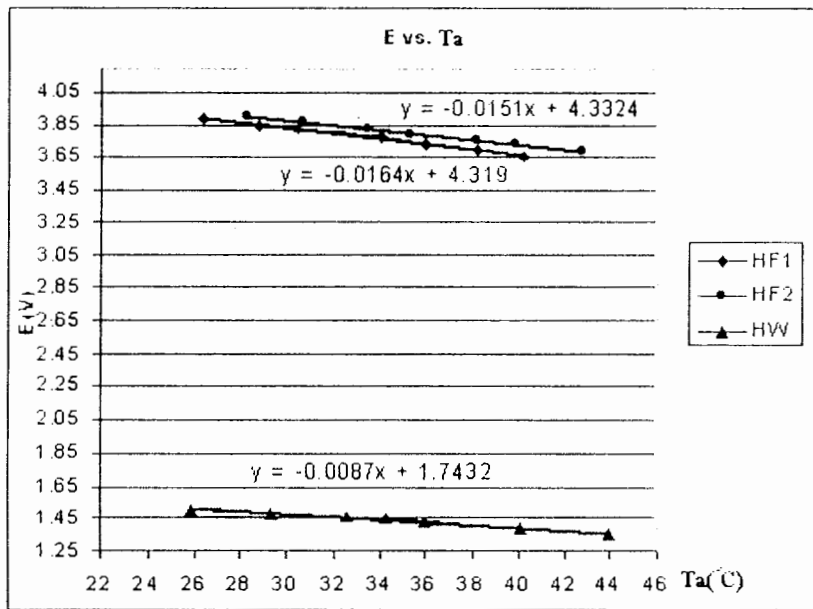
شکل (۴-۹) روند کاهش ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ برای سنسور فیلم داغ بر اثر افزایش دمای محیط

در سرعت $U = 10 \text{ m/s}$ و دونسبت فراگرمایی 0.4 و 0.6 [۱]

هنگامی که نسبت فراگرمایی کاهش می‌یابد، در واقع T_w کاهش یافته و در نتیجه اختلاف $T_w - T_a$ نیز کم می‌شود. کم شدن اختلاف، سبب حساس شدن سنسور به تغییرات دمای جریان سیال T_a شده و ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ با نرخ بیشتری شروع به کاهش می‌کند.

شکل (۴-۱۰) اثر دما بر کاهش ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ را برای سنسور فیلم داغ و سنسور سیم داغ نشان داده و مقایسه می‌نماید. این شکل نشان‌دهنده، نحوه کاهش ولتاژ E بر حسب T_a برای هر دو سنسور سیم داغ و فیلم داغ می‌باشد.

این مقایسه در سرعت ثابت $U = 10 \text{ m/s}$ و نسبت فراگرمایی 0.6 انجام شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نرخ کاهش ولتاژ E بر حسب دمای T_a برای سنسور سیم داغ کمتر از سنسور فیلم داغ است. با توجه به این که فیلم داغ از جنس نیکل بوده و دارای ضریب دمایی مقاومت (α) بالاتری نسبت به تنگستن است، بنابراین در یک نسبت فراگرمایی ثابت، دمای سنسور سیم داغ بیشتر از دمای سنسور فیلم داغ می‌باشد.



شکل (۴-۱۰) مقایسه شیب کاهش ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ برای سنسور فیلم داغ ▲ و سنسور سیم داغ ● در سرعت $U = 10 \text{ m/s}$ و نسبت فراگرمایی ۰.۶ [۱]

بنابراین با توجه به این که دمای T_w سنسور فیلم داغ نسبت به سنسور سیم داغ کمتر است، اختلاف $T_w - T_a$ کوچکتر شده و تغییرات دمای جریان سیال T_a تأثیر بیشتری را بر نرخ انتقال حرارت و در نتیجه کاهش ولتاژ خروجی جریان سنج سیم داغ خواهد داشت. با توجه به مباحث فوق می توان دریافت که کاهش ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ بستگی به نسبت فراگرمایی، سرعت جریان هوا و جنس سنسور دارد.

۴-۸-۱- روشهای کاهش اثر دما بر اندازه گیری سرعت جریان سیال

در صورتی که دمای سیال T_a در هنگام کالیبراسیون و اندازه گیری تغییر کند، سبب بروز خطا در اندازه گیری سرعت جریان سیال می شود و باید آن را اصلاح نمود. روشهای کاهش اثر دما در اندازه گیری سرعت جریان سیال به دو صورت انجام می پذیرد:

الف) سخت افزاری (خودکار)

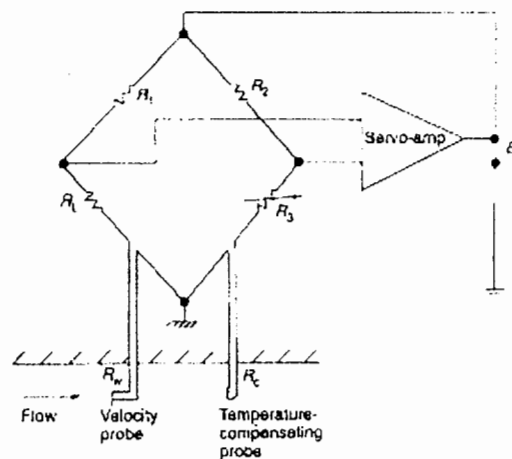
ب) نرم افزاری (تحلیلی).

الف - اصلاح اثر دما به صورت خودکار

اگر اختلاف دمای سنسور سیم داغ و دمای سیال ثابت باشد، خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ صحیح بوده و نیازی به اصلاح آن نیست. با تغییر دمای جریان سیال، در صورتی که به همان میزان دمای سنسور نیز تغییر کند و اختلاف دمای سنسور و جریان هوا ($T_w - T_a$) ثابت باشد، اثر دما بر اندازه‌گیری سرعت جریان سیال قابل اغماض است. با توجه به این که مقاومت سنسور سیم داغ و در نتیجه دمای آن با نسبت فراگرمایی مشخص می‌شود، بنابراین با تغییر این نسبت می‌توان دمای سنسور سیم داغ را طوری تنظیم نمود که همواره مقدار ($T_w - T_a$) ثابت باشد.

در این روش، یک سنسور حساس به دما مطابق شکل (۴-۱۱) در پل و تسون قرار می‌گیرد، به طوری که مقاومت متغیر با سنسور حساس به دما به صورت سری می‌باشد. سنسور جبران کننده دما باید طوری عمل کند که فقط به تغییرات دمای سیال حساس باشد. همچنین اندازه آن باید به اندازه کافی بزرگ باشد، به گونه‌ای که وقتی جریان الکتریکی از آن عبور می‌کند، هیچ‌گونه حرارتی تولید نکرده و مقاومت الکتریکی آن نیز ثابت باشد.

در روش خودکار نیازی به اندازه‌گیری دما نبوده و با افزایش دمای سیال، مقاومت المان حس کننده افزایش می‌یابد. در نتیجه نسبت فراگرمایی سنسور سیم داغ افزایش یافته و مقدار ($T_w - T_a$) ثابت می‌ماند. با ثابت نگه داشتن مقدار ($T_w - T_a$) ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ نیز با تغییر دمای جریان سیال ثابت می‌ماند. به منظور ثابت نگه داشتن مقدار ($T_w - T_a$)، باید مقدار ($R_w - R_a$) نیز ثابت باشد.



شکل (۴-۱۱) نحوه‌ی قرارگیری پراب سنسور سیم داغ به همراه مقاومت جبران کننده در مدار الکترونیکی

دما ثابت CT [1]

با توجه به رابطه توازن پل وتسون برای شکل (۴-۱۱)، می‌توان نوشت:

$$\frac{R_w + R_L}{R_1} = \frac{R_3 + R_c}{R_2} \quad (۴-۱۴)$$

$$R_w = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)(R_3 + R_c) - R_L \quad (۴-۱۵)$$

در معادله‌های فوق R_L مقاومت کابل پراب و R_c مقاومت سنسور حساس به دما می‌باشد. با فرض خطی بودن رابطه دما و مقاومت سنسور سیم داغ $(R_w = R_0(1 + \alpha_0(T_w - T_0)))$ ، در صورتی که دمای جریان سیال به اندازه ΔT تغییر کند، تغییرات مقاومت سنسور ناشی از تغییر دمای جریان سیال برابر است با:

$$\Delta R = R_0 \alpha_0 \Delta T \quad (۴-۱۶)$$

به‌منظور ثابت نگه‌داشتن مقدار $(T_w - T_a)$ باید مقدار ΔR به مقاومت سنسور سیم داغ، R_w ، اضافه شود که این امر با استفاده از سنسور حساس به دما انجام می‌شود.

ب- اصلاح اثر دما به‌صورت تحلیلی

در حال حاضر با توجه به رشد سریع رایانه‌ها، اصلاح اثر دما بر سرعت جریان سیال به‌صورت تحلیلی انجام می‌شود. در این روش دمای سیال با استفاده از دماسنج‌هایی نظیر نوع NTC و یا PTC اندازه‌گیری شده و از طریق کارت DAQ و یا درگاه سریال به رایانه ارسال می‌شود. ولتاژ خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم داغ نیز با توجه به دمای جریان سیال اصلاح و سپس با استفاده از معادله‌های کالیبراسیون، سرعت جریان سیال مشخص می‌شود. با توجه به این‌که پاسخ زمانی دماسنج‌های فوق حدود چند ثانیه است، بنابراین استفاده از این روش برای جریان سیالی که تغییرات دمای آن سریع است، مناسب نمی‌باشد. در این روش پس از اندازه‌گیری دمای سیال، ضریب اصلاح طبق معادله (۴-۱۷) مشخص می‌شود (Kanevce & Oka ۱۹۷۳):

$$\left(\frac{T_w - T_r}{T_w - T_a}\right)^n \quad (۴-۱۷)$$

T_r دمای مرجع، T_a دمای جریان سیال و T_w دمای سنسور سیم داغ است. در صورتی که بازه تغییرات دما حدود $5^\circ \pm$ باشد، مقدار n نزدیک به 0.5 در نظر گرفته می‌شود. هنگامی که تغییرات دما

بالا باشد مقدار n به $0.4 \sim 0.3$ کاهش می‌یابد. با توجه به معادله (۴-۱۷) دانستن مقدار T_w مهم است. برای مشخص نمودن آن باید نسبت فراگرمایی، همچنین مقاومت سنسور و یا مقاومت کابل و جوش پرآب را به‌طور دقیق دانست.

پس از اندازه‌گیری ولتاژ خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم داغ، ولتاژ را در ضریب اصلاح فوق ضرب نموده:

$$E_{w,r} = E_w \left(\frac{T_w - T_r}{T_w - T_a} \right)^n \quad (18-4)$$

سپس از معادله‌های کالیبراسیون برای اندازه‌گیری سرعت جریان سیال استفاده می‌شود. با استفاده از این روش، می‌توان خطای اندازه‌گیری به ازای هر درجه تغییر دما را به کمتر از 0.045% کاهش داد.

ضریب اصلاح دما را می‌توان به‌صورت معادله (۴-۱۹) نیز بیان نمود (Dantec ۲۰۰۴):

$$\left(\frac{T_w - T_r}{T_w - T_a} \right)^{0.5(1 \pm m)} \quad (19-4)$$

در معادله فوق $m = (T_f / T_a)^{-0.17}$ می‌باشد و علامت (+) برای حالتی است که $T_a > T_r$ و علامت (-) برای $T_a < T_r$ است. ضریب اصلاح فوق برای معادله کالیبراسیون از نوع چندجمله‌ای می‌باشد. این ضریب در ولتاژ خروجی دستگاه جریان‌سنج ضرب شده و با استفاده از معادله کالیبراسیون سرعت جریان سیال محاسبه می‌شود.

در صورتی که از معادله توانی (King) $E^2 = A + BU^n$ استفاده شود، A و B ضرایب کالیبراسیون در دمای مرجع می‌باشند که با توجه به معادله‌های زیر اصلاح می‌شوند (DANTEC ۲۰۰۴):

$$A_{corr} = ((T_w - T_a) / (T_w - T_r))^{(1 \pm m)} (k_{fa} / k_{fr}) (pr_{fa} / pr_{fr})^{0.2} A \quad (20-4)$$

$$B_{corr} = ((T_w - T_a) / (T_w - T_r))^{(1 \pm m)} (k_{fa} / k_{fr}) (pr_{fa} / pr_{fr})^{0.33} (\rho_{fa} / \rho_{fr})^n (\mu_{fa} / \mu_{fr})^{-n} B \quad (21-4)$$

زیرنویسهای f_r و f_a مشخص کننده دمای فیلم بوده و طبق معادله‌های $T_{fr} = (T_w + T_r) / 2$ و $T_{fa} = (T_w + T_a) / 2$ مشخص می‌شوند. سپس ولتاژ خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم داغ طبق معادله زیر به سرعت جریان سیال تبدیل می‌شود:

$$U = [(E^2 - A_{corr}) / B_{corr}]^{1/n} \quad (22-4)$$

با استفاده از این روشها، می‌توان خطای اندازه‌گیری ناشی از تغییرات دمای جریان سیال را به کمتر از $\pm 0.1\%$ کاهش داد. (Mayle & Anderson ۱۹۹۱) برای کاهش اثر دما در اندازه‌گیری سرعت جریان سیال، معادله کالیبراسیون را به صورت معادله (۲۳-۴) پیشنهاد دادند:

$$U = B_0 + B_1 \left[\frac{E}{\Delta T} \right]^2 + B_2 \left[\frac{E}{\Delta T} \right]^3 + B_3 \left[\frac{E}{\Delta T} \right]^4 \quad (23-4)$$

که در آن $\Delta T = T_w - T_a$ می‌باشد. ضرایب ثابت B ، با استفاده از منحنی کالیبراسیون به دست می‌آیند.

۹-۴- اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان سیال

هدف از به کارگیری دستگاه جریان‌سنج سیم داغ، اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان سیال است.

۹-۴-۱- رابطه سرعت جریان سیال و ولتاژ خروجی دستگاه جریان‌سنج

سیم داغ

همان‌گونه که بیان شد، اصول عملکرد دستگاه جریان‌سنج سیم داغ بر اساس انتقال حرارت از یک سنسور سیم/فیلم داغ به جریان سیال است. به منظور اندازه‌گیری سرعت جریان سیال باید اثر عوامل مؤثر در انتقال حرارت، به غیر از سرعت جریان سیال را به حداقل رسانده و یا تأثیر آن را در نظر داشته و اصلاحات لازم را انجام داد. باید توجه داشت که، انتقال حرارت از سنسور سیم داغ یک کمیت اسکالر است، درحالی‌که سرعت جریان سیال یک کمیت برداری است.

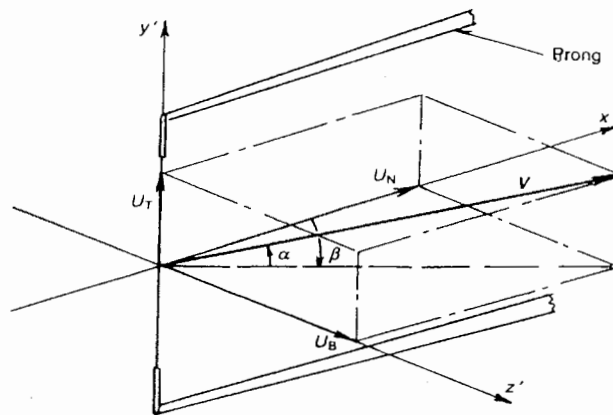
معادله توانی (King) $E^2 = A + BU^n$ رابطه سرعت جریان سیال و مقدار انتقال حرارت از سنسور سیم داغ را بیان می‌کند. معادله فوق با فرض یک بعدی بودن جریان سیال به دست آمده است که

در این حالت با دانستن جهت جریان سیال، اندازه U یک کمیت اسکالر خواهد بود. در صورتی که جهت جریان سیال مشخص نباشد، معادله فوق را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$E^r = A + BV_e^n \quad (24-4)$$

در این حالت V_e سرعت مؤثر نامیده می‌شود که کمیتی اسکالر است و مقدار آن برابر مقدار سرعت جریان سیال نیست. بردار سرعت $\vec{V} = (U, V, W)$ در شکل (۴-۱۲) نشان داده شده است، که می‌توان مؤلفه‌های آن را نسبت به مختصات کارتزین واقع در مرکز سنسور به صورت $\vec{V} = (U_N, U_T, U_B)$ یا $\vec{V} = (|\vec{V}|, \alpha, \beta)$ بیان نمود.

U_N مؤلفه سرعت عمود بر سنسور و موازی با ساقه پراب، U_T مؤلفه سرعت مماس با سنسور، U_B مؤلفه سرعت عمود بر صفحه U_N و U_T است. $|\vec{V}|$ اندازه بردار سرعت، α زاویه یاو و β زاویه پیچ است.



شکل (۴-۱۲) بردار سرعت و مؤلفه‌های آن نسبت به مختصات سنسور [۱]

با توجه به شکل (۴-۱۲) رابطه بردار سرعت با مؤلفه‌های آن به صورت زیر بیان می‌شود:

$$U_N = |\vec{V}| \cos \alpha \cos \beta \quad \text{الف (۴-۲۵)}$$

$$U_B = |\vec{V}| \cos \alpha \sin \beta \quad \text{ب (۴-۲۶)}$$

$$U_T = |\vec{V}| \sin \alpha \quad \text{ج (۴-۲۷)}$$

با توجه به این که مؤلفه‌های بردار سرعت جریان سیال، اثر یکسانی بر روی انتقال حرارت

ندارند، سرعت مؤثر ناشی از انتقال حرارت طبق معادله (Jørgensen ۱۹۷۱) بیان شد:

$$V_e^2 = U_N^2 + k^2 U_T^2 + h^2 U_B^2 \quad (28-4)$$

ضرایب k و h ، حساسیت سنسور نسبت به زوایای یو α و پیچ β می باشد. در صورتی که جریان سیال یک بعدی و موازی پایه های پراب سنسور سیم داغ باشد، مقادیر U_T و U_B برابر صفر است و $V_e = U_N$ خواهد بود. در این حالت می توان با استفاده از پراب یک بعدی به همراه یک دستگاه جریان سنج سیم داغ، سرعت جریان سیال را اندازه گیری نمود. برای جریان دو بعدی در صورتی که سنسورها و پایه های پراب در یک صفحه قرار داشته باشند، $U_B = 0$ بوده و $V_e^2 = U_N^2 + k^2 U_T^2$ است. در این حالت با دانستن مقدار k که از کالیبراسیون جهت تعیین شده است و با استفاده از پراب دو بعدی، می توان U_T و U_N را به طور همزمان به دست آورد. همچنین با دانستن ضرایب حساسیت k و h نسبت به زوایای یو α و پیچ β و با استفاده از یک پراب سه مؤلفه ای می توان مؤلفه های بردار سرعت را به طور همزمان به دست آورد.

۴-۹-۲- اندازه گیری جریان سیال یک بعدی

در جریان یک بعدی $V = W = 0$ است، بنابراین $V_e = U$ بوده و می توان سرعت را با استفاده از یک پراب یک بعدی اندازه گیری نمود. در چنین حالتی ابتدا باید جهت جریان مشخص شود. جهت برخی از جریانها مانند جریان خروجی از نازل و یا جریان در لایه مرزی بر روی صفحه تخت مشخص است، اما جهت جریان در بسیاری از پژوهش ها نامشخص می باشد.

در صورتی که جریان دو بعدی باشد، پراب را در صفحه جریان سیال قرار داده با تغییر زاویه یو α ، ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ اندازه گیری می شود. همان گونه که بیان شد، به منظور افزایش دقت اندازه گیری سرعت جریان سیال با استفاده از مدار تطبیق دهنده سیگنال، ولتاژ خروجی مدار CT را آفست نموده و بهره G متناسب با بازه سرعت جریان سیال به ولتاژ آفست شده، اعمال می شود. بنابراین در اندازه گیری سرعت در جریانی که جهت آن مشخص است، پس از دریافت داده ها $E_G(n)$ از طریق کارت DAQ (به صورت نرم افزاری) مطابق معادله زیر:

$$E(n) = \frac{1}{G} E_G(n) + E_{off} \quad (29-4)$$

ولتاژ خروجی از مدار تطبیق دهنده دستگاه جریان سنج سیم داغ را بر بهره اعمالی تقسیم نموده و مقدار آفست به آن اضافه می شود. سپس اثر دما بر روی ولتاژ $E(n)$ اعمال شده و ولتاژ خروجی $E(n)$

اصلاح می‌شود. مقدار $E_c(n)$ ولتاژ دستگاه جریان سنج سیم داغ بوده که رابطه غیرخطی با سرعت جریان سیال دارد. با استفاده از معادله‌های کالیبراسیون به دست آمده، ولتاژ خروجی $E_c(n)$ به سرعت جریان سیال تبدیل می‌شود.

۴-۹-۳- تبدیل ولتاژ به سرعت لحظه‌ای و تجزیه و تحلیل آن

ولتاژ $E_c(n)$ که رابطه غیر خطی با سرعت مؤثر V_e دارد به دو روش به سرعت مؤثر V_e قابل تبدیل است:

۱- با استفاده از مدارهای الکترونیکی و به صورت آنالوگ

۲- با استفاده از نرم‌افزار و یا روشهای دیجیتالی.

البته در حال حاضر با توجه به رشد سریع رایانه‌ها و میکروکنترلرها روش اول منسوخ شده است. با استفاده از معادله کالیبراسیون $E = f(U)$ و معادله $U = f^{-1}(E)$ می‌توان ولتاژ $E_c(n)$ را که به صورت دیجیتالی از طریق کارت DAQ وارد رایانه شده است را به سرعت مؤثر جریان سیال تبدیل نمود. اگر معادله کالیبراسیون به صورت توانی ($King$) باشد، سرعت مؤثر طبق معادله زیر تعیین می‌شود:

$$U(n) = V_e(n) = \left(\frac{E_c^2(n) - A}{B} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (30-4)$$

A ، B و n ضرایب کالیبراسیون می‌باشند که با انجام کالیبراسیون سرعت مشخص می‌شوند. اگر معادله کالیبراسیون به صورت چند جمله‌ای به دست آمده باشد، طبق معادله زیر ولتاژ به سرعت لحظه‌ای جریان سیال تبدیل می‌شود:

$$U(n) = V_e(n) = C_0 + C_1 E_c(n) + C_2 E_c^2(n) + C_3 E_c^3(n) + C_4 E_c^4(n) + C_5 E_c^5(n) \quad (31-4)$$

برای تبدیل ولتاژ به سرعت، نیاز به ۲۵ محاسبه ضرب و جمع است که زمانی طولانی در محاسبه رایانه محسوب می‌شود. لیکن با رشد سریع رایانه‌ها این زمان مشکلی در تبدیل ولتاژ لحظه‌ای به سرعت لحظه‌ای ایجاد نمی‌کند.

زمان محاسبه چند جمله‌ای با درجه ۴، معادل با محاسبه معادله معکوس توانی (۴-۳۰) است. به‌منظور کاهش زمان محاسبه با استفاده از رایانه‌های جدید، می‌توان از روش جستجو در آرایه استفاده نمود. در این روش از یک آرایه دو بعدی استفاده می‌شود که بعد اول آرایه مربوط به ولتاژ $E_c(n)$ و بعد دوم آرایه مربوط به سرعت جریان سیال $U(n)$ می‌باشد. تعداد عضوهای این آرایه 2^n است که n تعداد بیت کارت DAQ است. با توجه به مقادیر صحیح I از ۰ تا $(2^n - 1)$ ، مقادیر متناظر $E_{out}(I)$ محاسبه شده و با استفاده از معادله کالیبراسیون (توانی، چند جمله‌ای و یا اسپلاین) مقادیر سرعت جریان سیال که بعد دوم آرایه دو بعدی می‌باشند، به‌ازای هر مقدار ولتاژ $E_{out}(I)$ به‌دست می‌آیند. برای یک کارت DAQ که ۱۲ بیتی است، آرایه دو بعدی از ۰ شروع شده و به ۴۰۹۵ ختم می‌شود. بعد اول آرایه، مقدار ولتاژ خروجی کارت DAQ است که متناظر با شماره آرایه است. با فرض این‌که بازه ولتاژ کارت DAQ بین ۱۰- و ۱۰ ولت باشد، ولتاژ خروجی کارت DAQ که به‌صورت دیجیتال است، طبق معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$E_{out}(I) = -10 + (I) \frac{20}{4095} \quad (0 \leq I \leq 4095) \quad (۴-۳۲)$$

هر مقدار $E_{out}(I)$ متناظر با عدد صحیح I است. بعد دوم آرایه فوق، سرعت متناظر با ولتاژ خروجی کارت DAQ است که این مقدار با توجه به معادله کالیبراسیون به‌دست می‌آید. آرایه فوق در قسمت RAM رایانه ذخیره شده و هنگامی که ولتاژ خروجی کارت DAQ وارد رایانه می‌شود، طبق معادله (۴-۳۲) عدد صحیح I محاسبه شده و با استفاده از آرایه متناسب با I ، مقدار سرعت جریان سیال مشخص می‌شود. با استفاده از این روش فقط با ۳ محاسبه می‌توان ولتاژ خروجی از دستگاه جریان‌سنج سیم داغ را به سرعت لحظه‌ای جریان سیال تبدیل نمود. با تبدیل ولتاژ $E_c(n)$ به $U(n)$ و با مشخص بودن نرخ نمونه برداری، می‌توان سرعت جریان سیال را به‌صورت آماری و لحظه‌ای بررسی نمود.

۴-۹-۴- تجزیه و تحلیل سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری شده

پس از اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان سیال نیاز به تجزیه و تحلیل آن می‌باشد که به دو صورت آماری و زمانی انجام می‌شود.

تجزیه و تحلیل آماری: همان گونه که بیان شد، دستگاه جریان سنج سیم داغ سرعت جریان را به طور لحظه‌ای اندازه‌گیری می‌کند. به منظور بررسی کمی و کیفی جریان سیال نیاز است تا مقادیر آماری مشخص شود. یکی از مهمترین شاخصه‌های آماری جریان سیال، سرعت متوسط است که طبق معادله زیر تعریف می‌شود:

$$U_{mean} = \frac{1}{N} \sum_1^N U(n) \quad (33-4)$$

N تعداد نمونه‌های اندازه‌گیری شده، $U(n)$ سرعت لحظه‌ای و U_{mean} سرعت متوسط جریان سیال است. با استفاده از سرعت متوسط و تغییر موقعیت مکانی پراب به کمک مکانیزم انتقال دهنده پراب، می‌توان توزیع سرعت جریان سیال نظیر لایه مرزی، دنباله و ... را اندازه‌گیری نمود. انحراف معیار سرعت جریان سیال که مشخص‌کننده شدت اغتشاشهای جریان سیال است طبق معادله زیر تعریف می‌شود:

$$u_{rms} = \left(\frac{1}{N-1} \sum_1^N (U(n) - U_{mean})^2 \right)^{0.5} \quad (34-4)$$

با استفاده از انحراف معیار سرعت جریان سیال، می‌توان شدت اغتشاشهای جریان سیال^۱ را به صورت زیر تعریف نمود:

$$Tu = \frac{u_{rms}}{U_{mean}} \% \quad (35-4)$$

شدت اغتشاشهای جریان سیال می‌تواند بیانگر نوع جریان سیال، نوع لایه مرزی و غیره باشد. این پارامتر در بررسی کیفیت جریان تونل باد در اتاق آزمون بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. شدت اغتشاشهای جریان سیال در لایه مرزی آرام معمولاً کمتر از ۰.۲٪ و در لایه مرزی آشفته بیشتر از ۰.۵٪ می‌باشد. شدت اغتشاشها در لایه مرزی به عدد رینولدز و شرایط بالا دست جریان بستگی دارد. انحراف از معیار ریشه دوم واریانس است که طبق معادله زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma^2 = \sum_1^N \frac{(U(n) - U_{mean})^2}{N-1} \quad (36-4)$$

دو پارامتر مهم دیگر که در بررسی کیفی جریانهای سیال از آنها استفاده می‌شود، چولگی^۲ و برجستگی است.

^۱ Turbulence Intensity

^۲ Skewness

$$S = \sum_1^N \frac{(U(n) - U_{mean})^3}{N \cdot \sigma^3} \quad (37-4)$$

$$K = \sum_1^N \frac{(U(n) - U_{mean})^4}{N \cdot \sigma^4} \quad (38-4)$$

مقدار چولگی بیان‌کننده مقدار تقارن سرعت لحظه‌ای نسبت به سرعت متوسط جریان سیال است.

در حالی که مقدار برجستگی بیان‌کننده میزان صافی سرعت لحظه‌ای و توزیع آن .

تجزیه و تحلیل زمانی: بررسی سرعت لحظه‌ای جریان سیال را می‌توان در حوزه زمان و

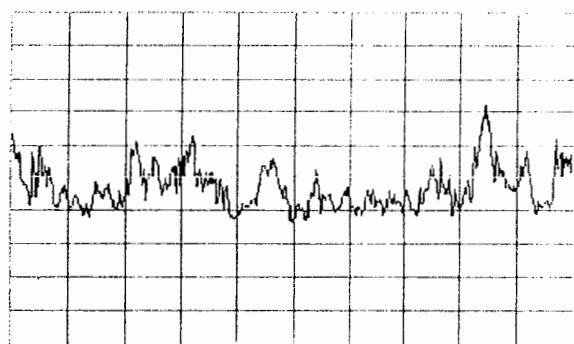
فرکانس نیز انجام داد. در حوزه زمان، نمایش سرعت لحظه‌ای به صورت اسیلوگرام است (شکل ۴-۱۳)

الف. با استفاده از اسیلوگرام سرعت جریان سیال می‌توان تغییرات سرعت لحظه‌ای جریان سیال را

نسبت به زمان بررسی کرد. به منظور بررسی دقیق سرعت لحظه‌ای، بهتر است آن را مطابق شکل

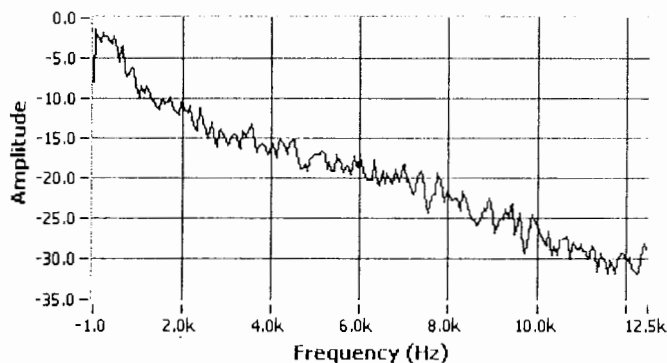
(۴-۱۳) ب در حوزه فرکانس بررسی نمود. سپس مقدار انرژی اغتشاشهای سرعت جریان سیال را

در فرکانس خاص مشخص نموده و کیفیت جریان سیال را تعیین نمود.



Time

الف



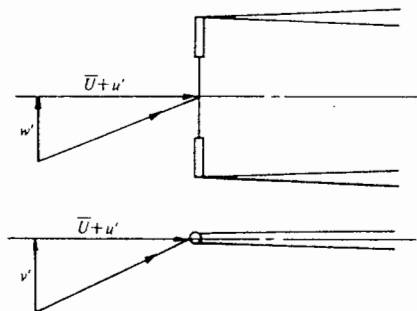
ب

شکل (۴-۱۳) بررسی سرعت لحظه‌ای (الف) در حوزه زمان (ب) در حوزه فرکانس [۱]

۴-۹-۵- بررسی اثر شدت اغتشاشهای جریان سیال در اندازه‌گیری سرعت

جریان سیال

معمولاً اغتشاشهای موجود در جریان سیال به صورت سه بعدی است، اگر شدت اغتشاشهای جریان سیال کم باشد، برای جریان سیال یک بعدی، مؤلفه‌های سرعت عمود بر جهت جریان سیال برابر صفر است، $V = W = 0$ ، در نتیجه $V_e(n) = U(n)$ می‌شود. سری زمانی سرعت لحظه‌ای است که می‌توان برای شدت اغتشاشهای کم، سرعت جریان سیال را طبق رابطه $U(n) = \bar{U} + u(n)$ بیان نمود، در این حالت از اثر اغتشاشهای سرعت جریان سیال v و w در جهت عمود بر جریان سیال صرف‌نظر شده است، اما برای جریانهای یک بعدی نظیر جریان در لایه مرزی آشفته، ناحیه دنباله^۱ اجسام و ... مقدار اغتشاشهای سرعت جریان سیال (u, v, w) کوچک نبوده و باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری سرعت می‌شود. برای شدت اغتشاشهای متوسط و یا بالا، اگر چه جریان سیال یک بعدی است و مقادیر متوسط $\bar{V} = \bar{W} = 0$ است، اما اغتشاشهای سرعت v و w محسوس بوده (شکل ۴-۱۴) و بر روی انتقال حرارت تأثیر خواهد گذاشت.



شکل (۴-۱۴) سنسور سیم داغ در جریان یک بعدی با شدت اغتشاشهای بالا [۱]

با توجه به این که مقدار $k^2 \ll h^2$ است، بنابراین اغتشاشهای جریان سیال در جهت مؤلفه سرعت V ، تأثیری بر اندازه‌گیری سرعت متوسط جریان سیال U نخواهد گذاشت. با توجه به این که سرعت لحظه‌ای را می‌توان ترکیبی از سرعت متوسط و اغتشاش سرعت $U(t) = \bar{U} + u(t)$ در نظر گرفت. در صورتی که جریان سیال یک بعدی باشد $\bar{V} = \bar{W} = 0$ می‌توان نوشت:

^۱ Wake

$$V_e^2 = U^2 + k^2 v^2 + h^2 w^2 \quad (39-4)$$

$$V_e = ((U+u)^2 + k^2 v^2 + h^2 w^2)^{\frac{1}{2}} \quad (40-4)$$

با بسط معادله فوق معادله (41-4) به صورت زیر تعریف می شود:

$$V_e = ((\bar{U} + u) + (\frac{1}{2}) \frac{k^2 v^2 + h^2 w^2}{U+u} - (\frac{1}{8}) \frac{(k^2 v^2 + h^2 w^2)^2}{8(U+u)^3} + \dots) \quad (41-4)$$

با توجه به این که $k^2 \ll h^2$ می باشد، معادله (41-4) به صورت زیر ساده می شود:

$$V_e = \bar{U} [1 + \frac{u}{\bar{U}} + (\frac{1}{2}) \frac{h^2 w^2}{\bar{U}(\bar{U} + u)} + \dots]$$

با فرض کوچک بودن u نسبت به U می توان نوشت:

$$\bar{U}_m = \bar{U} \left(1 + \frac{1}{2} h^2 \frac{w^2}{\bar{U}^2} \right) \quad (42-4)$$

همچنین با بسط معادله (40-4) می توان معادله را برای شدت اغتشاشهای اندازه گیری شده بیان

نمود:

$$\overline{u_m^2} = \overline{u^2} (1 + h^2 R_{uw^2} Tu) \quad (43-4)$$

$$R_{uw^2} = \frac{\overline{uw^2}}{(\overline{u^2})^2}$$

$$Tu = \frac{(\overline{u^2})^{1/2}}{\bar{U}}$$

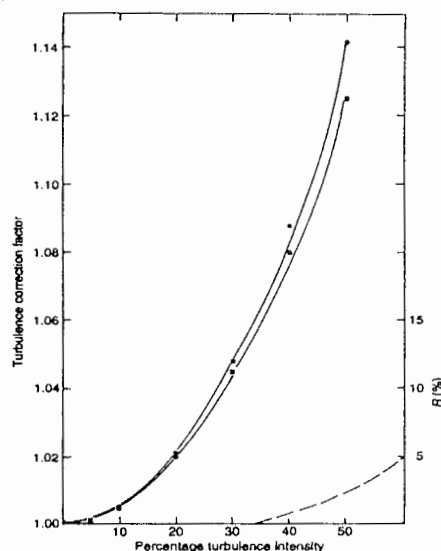
در معادله های فوق \bar{U}_m و $\overline{u_m^2}$ به ترتیب مقدار سرعت متوسط و شدت اغتشاشهای سرعت اندازه گیری شده و \bar{U} و $\overline{u^2}$ به ترتیب سرعت متوسط و شدت اغتشاشهای واقعی جریان است. با توجه به معادله های (42-4) و (43-4) می توان دریافت، هنگامی که شدت اغتشاشهای سرعت جریان سیال بالا است، مقدار سرعت اندازه گیری شده و سرعت واقعی با یکدیگر تفاوت دارند. با فرض همگن بودن اغتشاشهای جریان سیال $\overline{u^2} = \overline{v^2} = \overline{w^2}$ ، خطای ناشی از شدت اغتشاشها بر روی سرعت متوسط طبق جدول (1-4) به دست می آید (Bruun 1976):

جدول (۱-۴) نسبت سرعت اندازه‌گیری شده به سرعت واقعی در شدت اغتشاشهای مختلف جریان [۱]

$Tu(\%)$	\bar{U}_m / \bar{U}
۱۰	۱/۰۰۶
۲۰	۱/۰۲
۳۰	۱/۰۵

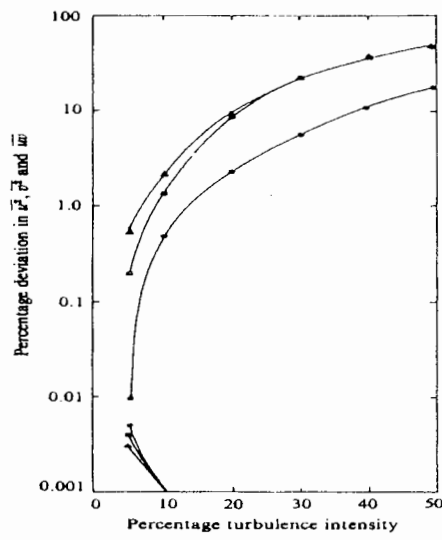
مطابق جدول (۱-۴)، مقدار \bar{U}_m / \bar{U} در شدت اغتشاشهای پایین ناچیز بوده و هنگامی که مقدار آن به ۳۰٪ می‌رسد، مقدار \bar{U}_m / \bar{U} برابر ۱/۰۵ خواهد بود. شکل (۱۵-۴) ضریب اصلاح شدت اغتشاشهای جریان سیال را برای سرعت متوسط U نشان می‌دهد (Swaminathan et al. ۱۹۸۶). مقادیر منحنی شکل (۱۵-۴) هم‌خوانی مناسبی با جدول (۱-۴) دارند.

شکل (۱۶-۴)، تأثیر شدت اغتشاشهای جریان سیال را بر اندازه‌گیری تنشهای رینولدز $\overline{u^2}$ ، $\overline{v^2}$ و \overline{uv} نشان می‌دهد. هنگامی که شدت اغتشاشها کمتر از ۱۵٪ است، خطای ناشی از اندازه‌گیری تنش رینولدز پایین بوده و هنگامی که شدت اغتشاشهای جریان سیال بیش از ۱۵٪ است، مقدار خطا به شدت افزایش می‌یابد.



شکل (۱۵-۴) ضریب اصلاح سرعت متوسط جریان سیال ناشی از شدت اغتشاشهای جریان سیال

(Swaminathan et al. ۱۹۸۶) [۱]



شکل (۴-۱۶) اثر شدت اغتشاشهای جریان سیال بر مقادیر اندازه گیری شده تنشهای رینولدز.

[۱] (Swaminathan et al. ۱۹۸۶)

فصل پنجم

تونل باد

تونل باد

از آنجائیکه تونل باد از جمله تجهیزات اصلی بکار رفته در این آزمایش است، لذا آشنایی با آن ضروری بوده و در این فصل توضیحات جامعی در مورد آن ارائه می گردد.

۵-۱- آزمایشهای تونل باد

تونل باد، جریان هوای کنترل شده‌ای را ایجاد کرده که از اطراف مدل مورد نظر عبور می‌کند و بدین ترتیب اطلاعات لازم از چگونگی عبور جریان هوا از اطراف مدل به دست می‌آید. بنابراین استفاده از تونل باد یکی از بهترین و ارزان‌ترین روشهای تجربی برای پژوهشها در زمینه علم آیرودینامیک است. با استفاده از تونل باد می‌توان آزمایش‌ها و پژوهش‌های وسیعی را در علوم مختلف نظیر هوا فضا، مکانیک سیالات، محیط زیست، مهندسی عمران و سازه و همچنین صنایع نظامی و غیر نظامی انجام داد.

صنعت هوا و فضا و هوانوردی: یکی از کاربردهای مهم تونل باد، انجام آزمایش بر روی انواع مختلف هواپیما اعم از نظامی است. یکی از مزیت‌های تونل باد در این صنعت این است که می‌توان اجزاء هواپیما را به صورت مستقل مورد آزمایش و بررسی قرار داد.

صنایع خودرو سازی: در صنعت خودرو سازی و طراحی انواع خودروها، تونل بادها کاربرد فراوانی دارند. آزمایشاتی که بر روی خودروها انجام می‌گیرد شامل:

- بررسی و مطالعه نیروهای آیرودینامیکی وارد بر خودرو نظیر نیروی درگ و لیفت
- بررسی پایداری خودرو در هنگام حرکت بر روی جاده
- بررسی سیستم خنک کاری موتور خودرو و بخشهای دیگر سیستم محرک خودرو

- بررسی و مطالعه صدای ناشی از حرکت باد
- بررسی تاثیر شرایط مختلف محیط نظیر باران، بادهای جانبی، کولاک و ... بر عملکرد خودرو
- بررسی سیستم تهویه مطبوع در اتاق سرنشینان خودرو

صنعت دریانوردی: در وسایل دریانوردی، آزمایشات تونل باد به دو گروه طبقه بندی می شود:

- الف- انجام آزمایش وسایلی که بر روی آب هستند،
- ب- انجام آزمایشی که وسایل در زیر آب هستند. به طور کلی، آزمایشات در صنعت دریانوردی شامل موارد زیر است:

- تعیین بارگذاری باد بر روی کشتی ها
- مطالعه اثر وزش باد بر روی دود خروجی از موتور خانه کشتی
- راحتی و آسایش مسافری کشتی
- مطالعه اثر وزش باد بر روی پرواز هواپیماها از روی کشتی
- بررسی بخش محرک زیر آب کشتی ها
- بررسی و مطالعات آکوستیک
- مطالعه زیردریائی ها و بررسی نیروها، ممانها

مهندسی باد: یکی از کاربردهای وسیع تونل باد، استفاده از آن در مطالعه اثرات جریان باد بر روی سازه های عمرانی نظیر ساختمانهای بلند، برجها، پل های معلق و همچنین اثر این گونه سازه ها بر روی محیط اطرافشان است. به طور کلی، نمونه آزمایشاتی که در تونل بادهای مهندسی باد انجام می گیرد عبارتند از:

- بررسی نیروهای باد بر سازه
- بررسی ایجاد گردابه های ناشی از سازه و اثر آن بر سازه ها و هوای پیرامونشان
- بررسی ارتعاش های ناشی از جریان هوا بر روی سازه
- بررسی جریان باد بر روی پل ها، استادیوم ها
- بررسی عوامل مختلف در محیط زیست و اثرات باد بر روی محیط زیست

تحقیقات پایه: از دیگر کاربردهای تونل باد، استفاده از آن در تحقیقات پایه در مکانیک سیالات و آیرودینامیک می‌باشد که به عنوان نمونه می‌توان به آزمایشهای زیر اشاره کرد:

- بررسی و مطالعه بر روی لایه مرزی آرام و در هم بر روی سطوح منحنی شکل
- بررسی پدیده دنباله اجسام و جدایش جریان هوا در ایرفویل‌ها
- تعیین ضرایب پسا و برا برای انواع مختلف اجسام نظیر استوانه، کره
- مطالعه فیزیک جریان هوا در ناحیه گذار از لایه مرزی آرام به آشفته

علاوه بر کاربردهای ذکر شده، از تونل باد در موارد متعدد دیگری نیز ممکن است استفاده شود. از اینرو ملاحظه می‌شود که تونل باد نقش مهمی در مطالعه جریان هوا در علوم مختلف را دارد. به طور کلی، با توجه به پیچیدگی و فشار جریان هوا در شرایط مختلف، می‌توان دریافت که استفاده از تونل باد مختص به علم هوا و فضا نمی‌باشد بلکه در هر موردی که می‌خواهیم جریان هوا را مورد مطالعه و بررسی قرار دهیم، می‌توان از انواع مختلف تونل بادها استفاده کرد.

۵-۲- تاریخچه تونل باد

مبنای اصلی آزمایشهای تونل باد بر اساس نظریه لئوناردو داوینچی^۱ و ایزاک نیوتن^۲ است. طبق این نظریه، رفتار جریان سیال برای جسمی که در سیال حرکت می‌کند و یا این که سیال از روی جسم ساکن عبور کند، یکسان است. بنابراین با فرض این که مدل ساکن و جریان هوا از روی آن عبور می‌کند، می‌توان نیروهای آیرودینامیکی را به دست آورد.

اولین تونل بادی که به منظور شبیه سازی مسئله پرواز به کار گرفته شد، توسط فرانسیس^۳ در سال ۱۸۷۱ میلادی در انگلستان ساخته شد. عامل اصلی که سبب شد این وسیله به عنوان یک ابزار مهم پژوهشها در علم آیرودینامیک شناخته شود، احساس نیازی بود که طراحان ساخت وسایل پرنده با آن مواجه بودند. عدم وجود روشهای تئوری مناسب برای پیش بینی رفتار جسم در جریان هوا، سبب شد که نیاز به آزمایشهای تجربی احساس شود. بهترین مصداق بر این مدعی تاریخچه ساخت

^۱ Leonardo Davinchi

^۲ Isaak Nyuton

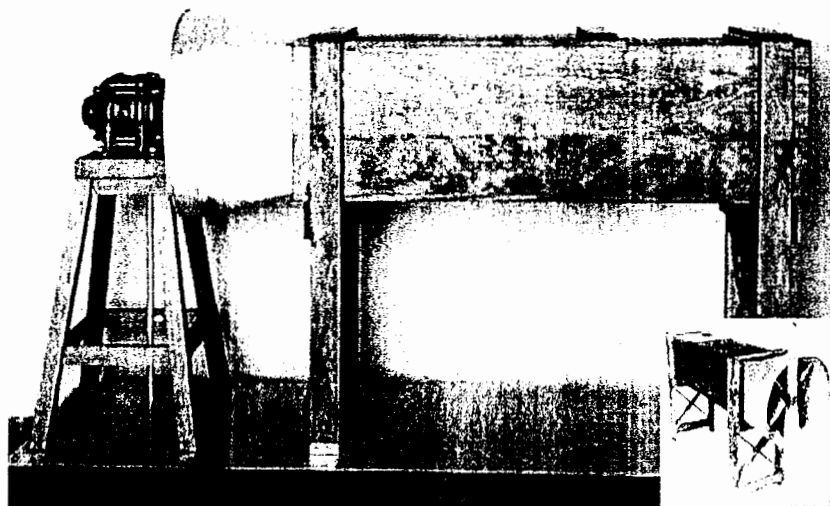
^۳ Fransis

اولین هواپیمای ملخ دار یا موتوری به دست برادران رایت است. برادران رایت در سال ۱۹۰۰ میلادی با استفاده از اطلاعات آیرودینامیکی حاصل از پژوهشهای تئوریک، اولین هواپیمای گلایدر خود را طراحی نمودند. ولی این هواپیما نتوانست نیروی مورد نظر برای پرواز را ایجاد کند. در سال ۱۹۰۱ میلادی برادران رایت با افزایش سطح بال هواپیما و مقدار انحنای اتاق ایرفیل، دومین بار آزمایش پرواز را انجام دادند که با شکست روبرو شد. بنابراین در این مرحله بود که برای آنها نیاز به آزمایشهای تونل باد آشکار شد. برادران رایت در سال ۱۹۰۱ میلادی یک تونل باد با اتاق ۴۱ سانتیمتر مربع (۱۶ اینچ مربع) ساختند که با یک ملخ دو پره‌ای و موتور بنزینی جریان هوای مورد نیاز را ایجاد می‌کرد شکل (۵-۱). در این تونل باد آنها انواع مختلف بال هواپیما را مورد آزمایش قرار داده و در بهار سال ۱۹۰۲ هواپیمای گلایدر خود را با موفقیت ساختند و با تجربه‌های کسب شده بر روی هواپیمای گلایدر و اطلاعات به دست آمده از تونل باد توانستند در سال ۱۹۰۳ اولین هواپیمای موتوری را در تاریخ بشر بسازند.

با توجه به تاریخچه اولین هواپیما معلوم شد که با استفاده از روشهای تئوریک نمی‌توان اطلاعات لازم برای طراحی هواپیما را به دست آورد. بدین ترتیب طراحان مجبور به استفاده از روشهای تجربی و تونل باد شدند. به منظور کسب نتایج دقیق‌تر در آزمایشهای تونل باد، بهتر است که شرایط آزمایش را تا حد امکان به شرایط واقعی نزدیک‌تر نموده و شدت اغتشاشهای جریان هوا را نیز کاهش داد. این امر سبب پیشرفت تونلهای باد شد. پس از تاسیس ^۱ NACA در سال ۱۹۱۵ در زمینه طراحی تونلهای باد کوششهای فراوانی انجام شد.

در سال ۱۹۲۰ اولین تونل باد در مرکز NACA واقع در پژوهشهای لانگلی ویرجینیا^۲ ساخته شد که قطر آن ۱/۵ متر (۵ فوت) بود. در سال ۱۹۲۳ به منظور شبیه سازی اعداد رینولدز بالا، اولین تونل باد با چگالی متغیر که فشار آن می‌توانست تا ۲۰ اتمسفر افزایش یابد در لانگلی ساخته شد. در سال ۱۹۳۱ تونل بادی با سطح اتاق ۹×۱۸ متر (۳۰×۶۰ فوت) در لانگلی به منظور آزمایش بر روی مدل‌های مقیاس واقعی ساخته شد.

^۱ NACA: National Advisory Committee for Aeronautics
^۲ Langley Virginia



شکل (۱-۵) تونل باد ساخت برادران رایت در سال ۱۹۰۱ [۲]

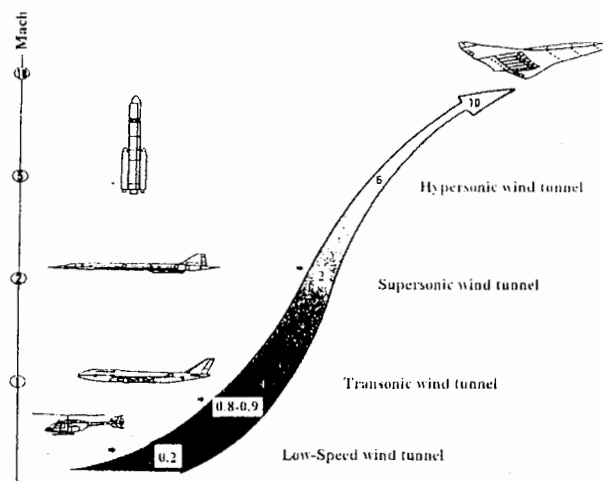
از این پس تونل بادهای متعددی در جهان ساخته شد و با گذشت زمان و پیشرفت تکنولوژی و همچنین ورود کامپیوترها، استفاده از تونل باد وارد مرحله جدیدی گردید که می توان به افزایش کیفیت جریان در تونل باد و کاهش شدت اغتشاشات، ساخت دستگاههای اندازه گیری جدید که دقت بالاتر و خطای کمتر و فرکانس اندازه گیری بالاتر و پاسخ زمانی بهتر داشتند، ورود دستگاههای جمع-آوری داده ها که به صورت خودکار عمل می کردند و باعث افزایش سرعت آزمایش ها می شدند، افزایش قدرت تحلیل داده ها توسط کامپیوترها و ساخت انواع مختلف تونل باد برای کاربردهای مختلف اشاره نمود.

۵-۳- انواع تونل باد

تونل های باد از لحاظ سرعت جریان هوا در اتاق آزمون، مسیر حرکت جریان هوا و ابعاد، طبقه بندی می شوند. جدول (۱-۵)، طبقه بندی انواع تونل باد را برحسب سرعت جریان هوا در اتاق آزمون نشان می دهد. در شکل (۲-۵) نیز به صورت شماتیک محدوده عدد ماخ تونل باد و اجسام پرنده متناظر با آن آمده است.

جدول (۱-۵) طبقه‌بندی انواع تونل باد بر حسب سرعت جریان هوا در اتاق آزمون [۲]

سرعت در اتاق آزمون بر حسب عدد ماخ	نوع تونل باد
$M=0 \sim 0.3$	تونل باد مادون صوت با جریان تراکم‌ناپذیر (با سرعت پایین) ^۱
$M=0.3 \sim 0.18$	تونل باد مادون صوت با جریان تراکم‌پذیر
$M=0.18 \sim 1/2$	تونل باد در محدوده سرعت صوت ^۲
$M=1/2 \sim 5$	تونل باد مافوق صوت ^۳
$M \geq 5$	تونل باد ماورای صوت ^۴



شکل (۲-۵) محدوده ماخ برای انواع وسایل آیرودینامیکی [۲]

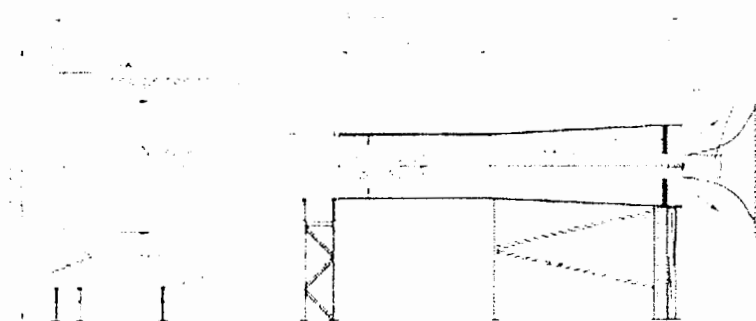
^۱ Low Speed Wind Tunnel
^۲ Transonic Wind Tunnel
^۳ Supersonic Wind Tunnel
^۴ Hypersonic Wind Tunnel

تونل باد با سرعت کم از لحاظ مسیر جریان هوا به دو گروه تونل باد مدار باز^۱ و تونل باد مدار بسته^۲ تقسیم‌بندی می‌شود. تونل باد مدار باز به دو دسته مکنده و دمنده تقسیم می‌گردد. مطابق شکل (۳-۵)، در تونل باد مدار باز مکنده، فن در پایین دست اتاق آزمون قرار دارد. با ایجاد فشار منفی توسط فن، هوا از محیط مکیده شده و پس از عبور از توری و لانه زنبوری و نازل، وارد اتاق آزمون می‌شود و سپس مجدداً به محیط بازگردانده می‌شود.

در تونل باد مدار باز دمنده (شکل ۴-۵)، فن در بالا دست اتاق آزمون قرار دارد و جریان هوا پس از عبور از دیفیوزر زاویه باز، توری، لانه زنبوری و نازل وارد اتاق آزمون شده و پس از آن در محیط تخلیه می‌شود. در تونل باد مدار باز، جریان هوای ورودی و خروجی با یکدیگر ارتباطی نداشته و در نتیجه بر هم تاثیری نمی‌گذارند.

در تونل باد مدار بسته، جریان هوا از کانالی که ابتدا و انتهای آن به هم متصل است عبور می‌کند، به عبارت دیگر مسیر جریان هوا در این نوع تونل باد بسته است و جریان هوا در تونل باد گردش دارد. شکل (۵-۵) نمونه‌ای از تونل باد مدار بسته را نشان می‌دهد.

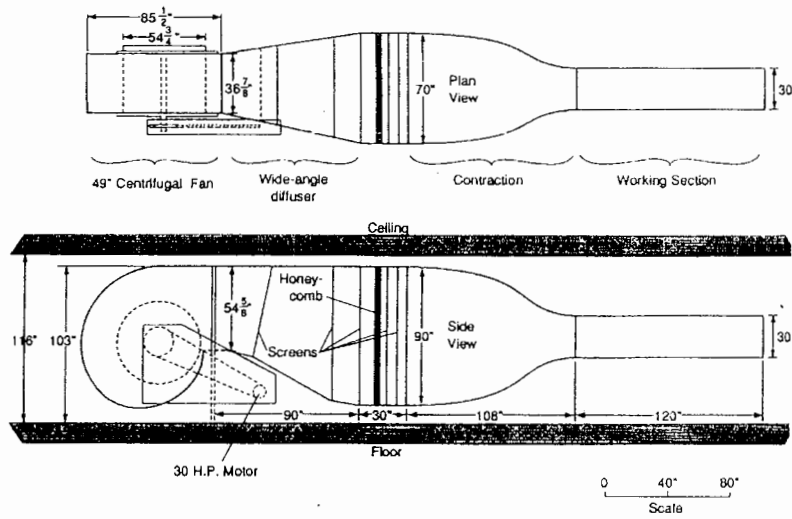
تونل باد مدار بسته دارای دو نوع اتاق آزمون باز و اتاق آزمون بسته است. در نوع اتاق آزمون بسته (شکل ۵-۵) هیچ یک از قسمت‌های تونل باد با محیط ارتباط نداشته و اتاق آزمون هم دارای دیوار است. در تونل باد مدار بسته با اتاق آزمون باز (شکل ۶-۵) تمام قسمت‌های تونل باد بجز اتاق آزمون با محیط ارتباط نداشته و اتاق آزمون آن فاقد دیوار است.



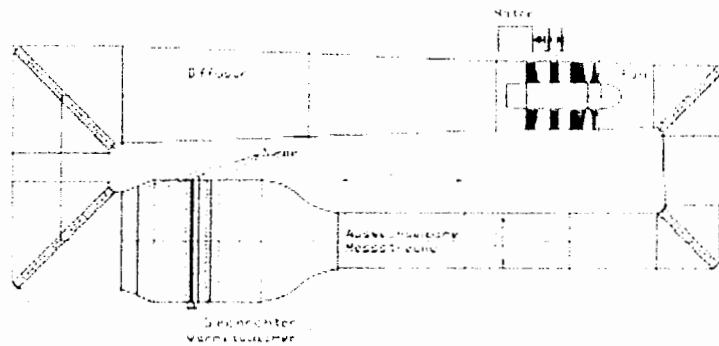
شکل (۳-۵) تونل باد مدار باز مکنده [۲]

^۱ Eiffel Type

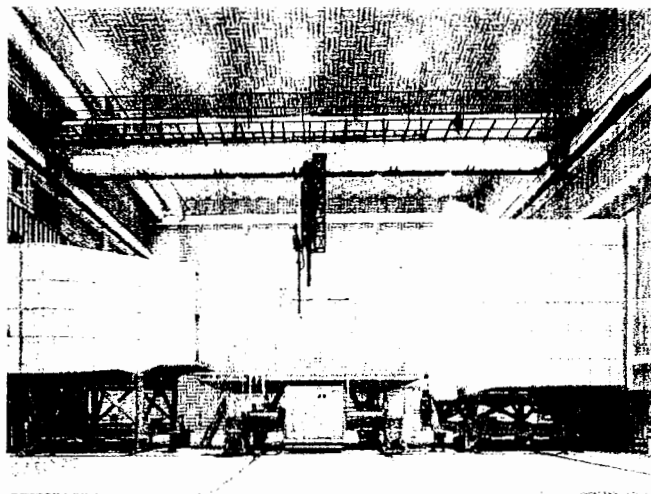
^۲ Prandtl or Gottingen Type



شکل (۴-۵) تونل باد مدار باز دمنده [۲]

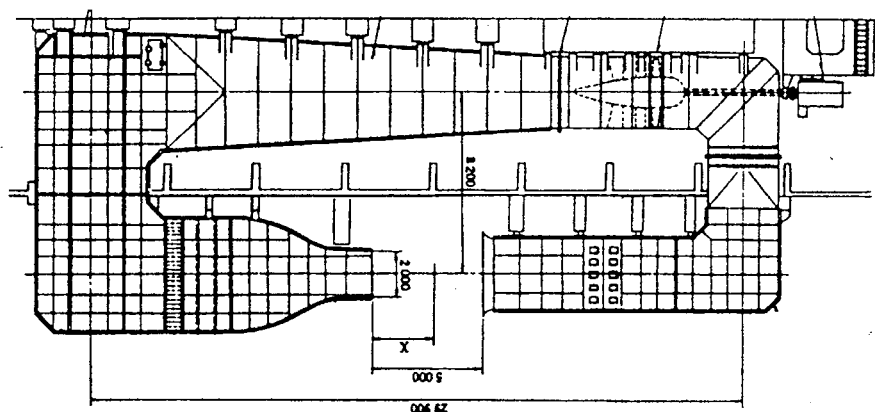


شکل (۵-۵) تونل باد مدار بسته با اتاق آزمون بسته [۲]



شکل (۶-۵) تونل باد مدار بسته با اتاق آزمون باز [۲]

بنابراین مدل را می‌توان آزادانه و بدون وجود آثار دیوار آزمایش نمود. شکل (۷-۵) نیز شماتیک یک تونل باد مدار بسته با اتاق آزمون باز را نشان می‌دهد.

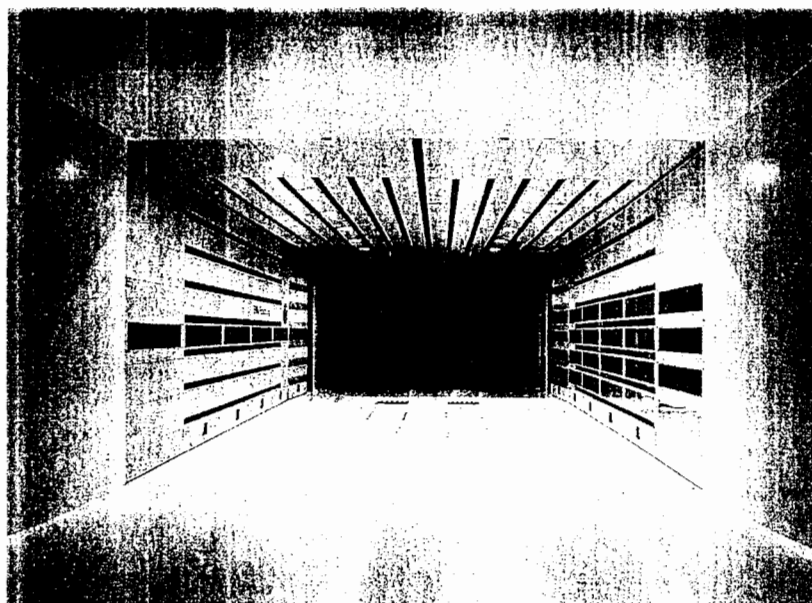


شکل (۷-۵) نمای شماتیک از تونل باد مدار بسته با اتاق آزمون باز [۲]

در تونل باد مدار بسته دو نوع اتاق آزمون دیگر نیز وجود دارد که اتاق آزمون نیمه باز و اتاق آزمون $3/4$ باز است. اتاق آزمون نیمه باز (شکل ۵-۸) مشابه اتاق آزمون بسته است، با این تفاوت که در دیواره‌های اتاق آزمون شکاف‌های طولی وجود دارد. این شکاف‌ها باعث کاهش محدودیت دیواره اتاق آزمون بر خطوط جریان هوا می‌شوند. اتاق آزمون $3/4$ باز نیز مشابه اتاق آزمون باز است، با این تفاوت که اتاق آزمون دارای کف می‌باشد. از اتاق آزمون $3/4$ باز در آزمایش‌های خودرو استفاده می‌شود.

نکته قابل ذکر در تونل باد مدار باز مکشی این است که در تونل باد مدار باز مکشی با اتاق آزمون بسته، فشار استاتیکی جریان هوای داخل تونل باد از فشار اتمسفر خارج از تونل باد کمتر است در نتیجه هوای محیط می‌تواند از طریق محفظه و یا سوراخهایی وارد تونل باد شود. به همین علت استفاده از تونل باد مدار باز مکنده با اتاق آزمون بسته غیر ممکن است، مگر آن‌که در اطراف اتاق آزمون، محفظه بزرگتری ایجاد شود تا فشار استاتیکی در اتاق آزمون برابر با فشار استاتیکی جریان هوا شود. برای کاهش اثر محیط بر روی ناپایداری و غیر یکنواختی جریان در اتاق آزمون تونل باد مدار باز، بهتر است آن‌را در داخل ساختمان و یا سوله قرار داد. این‌گونه تونل بادها را می‌توان به صورت نیمه

مدار بسته در نظر گرفت. لازم به ذکر است که در این گونه تونل بادها فشار استاتیکی ساختمان و یا سوله را باید کنترل نمود.



شکل (۵-۸) اتاق آزمون نیمه باز [۲]

۵-۳-۱- ویژگیهای تونل باد مدار باز

تونل باد مدار باز دارای کاربردهای مختلفی می باشد، از ویژگی های این نوع تونل می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- با توجه به این که مدار برگشت در این گونه تونل بادها وجود ندارد، زمان و هزینه ساخت آن کمتر است.
- ۲- مسئله خنک سازی در این گونه تونل بادها مشکل نبوده و نیاز به مبدل حرارتی ندارد.
- ۳- در روشهای مرئی سازی که فاز دیگری از سیال نظیر روغن، دود و غیره وارد جریان هوا می شود، استفاده از تونل باد با مدار باز مناسب است. در ضمن از آنجایی که هوای آلوده از تونل باد خارج می شود تونل باد فوق قابلیت آزمایش موتور جت، توربین و غیره را دارا است.
- ۴- ابعاد کلی این نوع تونل باد نسبت به تونل باد مدار بسته کمتر بوده و به مکان کوچکتری احتیاج است.
- ۵- تغییرات شرایط جوی، اثر نامطلوبی بر روی جریان هوا در اتاق آزمون دارد.

۶- در مقایسه با تونل باد مدار بسته برای سرعت جریان و اندازه مشخص در اتاق آزمون، توان مورد نیاز این گونه تونل بادها بالاتر بوده (بویژه برای تونل باد دمنده) در نتیجه هزینه انرژی مصرفی آن بالاتر خواهد بود. بنابراین استفاده از آن برای مدت زیاد نسبت به تونل باد مدار بسته مقرون به صرفه نیست.

۷- بر اثر مکش هوا از محیط و تخلیه آن به محیط اتمسفر، تونل باد فوق دارای صدای بالاتری نسبت به نوع مدار بسته می‌باشد، بنابراین برای تونل بادهای با سطح اتاق آزمایش بزرگتر از $6.5 m^2$ مناسب نبوده و سبب ایجاد آلودگی صوتی می‌شود.

۸- با توجه به این که فشار استاتیکی در اتاق آزمون تونل باد مدار باز مکنده منفی است، بنابراین آزمایش با این گونه تونل بادها که سطح مقطع اتاق آزمون آن کوچک است با مشکلاتی نظیر نحوه نصب سیستم انتقال دهنده پراب و ... همراه است.

۵-۳-۲- ویژگی‌های تونل باد مدار بسته

۱- مصرف انرژی در آن برای سرعت معین جریان هوا و ابعاد مشخص اتاق آزمون، کمتر از تونل باد مدار باز دمنده است، بنابراین استفاده از آن برای آزمایش با زمان طولانی مناسب است.

۲- تونل باد مدار بسته هنگام کار دارای صدای کمتری است.

۳- برای ساختن مسیر برگشت و پره‌های راهنما هزینه اولیه بیشتری مورد نیاز است.

۴- اگر از روش‌های مرئی‌سازی استفاده شود، استفاده از مواد مرئی ساز نظیر دود و ... باعث آلودگی جریان هوا شده و در نتیجه مشکلاتی را برای تونل باد و شرایط آزمایش ایجاد می‌نماید.

۵- در تونل بادهای بزرگ با توان بالا، برای آزمایش در زمانهای طولانی، نیاز به مبدل حرارتی است. تونل بادهای بزرگ معمولاً به صورت مدار بسته ساخته می‌شوند و در آزمایشگاه‌های کوچک از تونل باد مدار باز استفاده می‌شود. در آزمایشگاه‌هایی که مرئی‌سازی در جریان هوا نیز انجام می‌گیرد، تونل باد را معمولاً به صورتی می‌سازند که قابلیت تبدیل از نوع مدار بسته به مدار باز باشد.

۵-۴- اجزای تونل باد

هدف اصلی در طراحی یک تونل باد و استفاده از آن، ایجاد جریان دلخواه و مناسب در اتاق آزمون است. علی‌رغم ابعاد مختلف تونل بادها با سرعت کم ($M=0.3$)، اصول طراحی و اجزای این نوع

تونل باد یکسان بوده و تفاوت‌های آن ناشی از نوع استفاده از تونل باد و لوازم جانبی آن می‌باشد. شکل (۳-۵)، نوع ساده‌ای از تونل باد مدار باز مکنده را نشان می‌دهد که جریان هوا توسط فن از محیط به داخل تونل باد مکیده می‌شود. جریان هوا در ابتدا وارد محفظه آرامش که شامل توری و لانه زنبوری است، می‌شود و سپس از طریق نازل که سطح مقطع آن بتدریج کاهش می‌یابد، وارد اتاق آزمون می‌شود. اتاق آزمون مکانی است که در آن جریان به صورت دلخواه بوده و می‌توان مدلها را در آن مورد آزمایش قرارداد. جریان هوا در پایین دست اتاق آزمون وارد دیفیوزر می‌شود. سطح مقطع دیفیوزر به آرامی بزرگ می‌شود و سرعت جریان هوا به آرامی کاهش و بازدهی فن افزایش می‌یابد. فن در انتهای دیفیوزر نصب شده و سرعت جریان هوا با کنترل سرعت دورانی آن قابل تنظیم است.

شکل (۵-۵) نمونه‌ای از تونل باد مدار بسته با اتاق آزمون بسته را نشان می‌دهد که جریان هوا توسط فن دارای انرژی شده و در یک مسیر بسته حرکت می‌کند. سرعت جریان هوا را می‌توان با تنظیم سرعت دورانی فن، کنترل کرد. جریان هوا پس از عبور از فن در امتداد یک دیفیوزر حرکت کرده و سرعت آن کاهش می‌یابد سپس وارد گوشه سوم شده و توسط پره‌های موجود در آن، جریان هوا 90° چرخیده و پس از عبور از یک کانال و یا یک دیفیوزر وارد گوشه چهارم می‌شود و دوباره جریان هوا 90° می‌چرخد. پس از گوشه چهارم جریان هوا وارد محفظه آرامش می‌شود که شامل توری و لانه زنبوری است. سپس از طریق نازل، جریان هوا وارد اتاق آزمون می‌شود. در اتاق آزمون، آزمایش‌های مورد نظر انجام می‌گیرد و بعد از آن جریان هوا از طریق دیفیوزر وارد گوشه اول و پس از 90° چرخش، از طریق کانال یا دیفیوزری وارد گوشه دوم شده و سپس وارد فن می‌شود. بدین ترتیب جریان هوا توسط چهار گوشه، 360° چرخیده و یک سیکل کامل را طی می‌کند. برای کنترل دمای جریان هوا در تونلهای بزرگ، جریان هوا از یک مبدل حرارتی که بین گوشه سوم و چهارم و یا گوشه چهارم و محفظه آرامش قرار گرفته است، عبور می‌کند. بنابراین مدار تونل باد بسته شامل قسمت‌های زیر می‌باشد. ۱- اتاق آزمون ۲- دیفیوزر ۳- گوشه‌ها به همراه پره‌های راهنما ۴- فن ۵- مسیر برگشت ۶- مبدل حرارتی ۷- محفظه آرامش (لانه زنبوری و توری) ۸- نازل. در ادامه هر کدام از این اجزا توضیح داده شده اند.

۵-۴-۱- اتاق آزمون

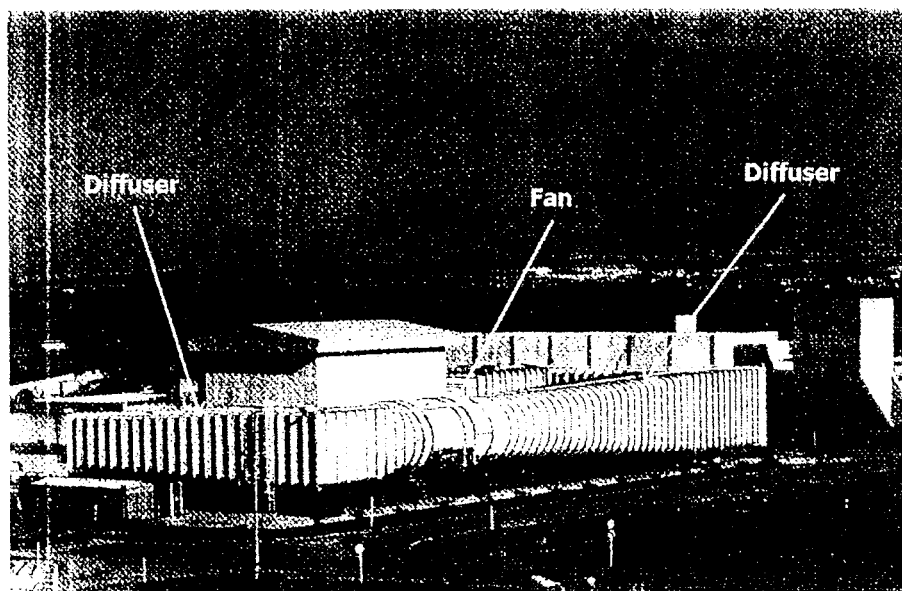
اتاق آزمون^۱ مکانی است که در آن مدل قرار گرفته و آزمایشهای مورد نظر در آن انجام می‌شود. اتاق آزمون به دو صورت اتاق آزمون باز، شکل (۵-۷) و اتاق آزمون بسته وجود دارد. اتاق آزمون بسته دارای افت کمتری نسبت به اتاق آزمون باز است. در سرعت‌های بالا، به‌منظور کاهش توان مورد نیاز فن، بهتر است از اتاق آزمون بسته استفاده شود. تونل باد ایده‌آل، تونل بادی است که بتوان مدل را به اندازه جسم واقعی آزمایش نمود. بنابراین اندازه اتاق آزمون هر چقدر بزرگتر باشد به واقعیت نزدیکتر و بهتر است. سطح مقطع اتاق آزمون برابر سطح مقطع خروجی نازل بوده که به‌صورت باز یا بسته است. با توجه به اینکه نصب و دسترسی به مدل در اتاق آزمون بسته آسان‌تر بوده و از آنجائیکه توان مورد نیاز فن با افزایش سرعت درون اتاق آزمون، افزایش می‌یابد. بنابراین برای بهینه کردن انرژی مصرفی فن، بهتر است از اتاق آزمون بسته استفاده شود. از اینرو، اکثر تونل‌بادهای بزرگ، دارای اتاق آزمون بسته می‌باشند. برای کاهش اثرات دیواره اتاق آزمون بر روی داده‌های حاصل از اندازه‌گیری، سطح اتاق آزمون را به شکل مستطیل طراحی می‌کنند. طول اتاق آزمون بسته، به نوع آزمایش و مدل مورد استفاده، بستگی دارد. طول اتاق آزمون برای آزمایشهای مورد نیاز هواپیما ۱/۵ تا ۲ برابر قطر مؤثر اتاق آزمون، برای موشکها ۲ تا ۴ قطر مؤثر و برای موارد کاربردی در زمینه محیط زیست، بیش از ۵ برابر قطر مؤثر است.

۵-۴-۲- دیفیوزر

دیفیوزر تونل باد، کانالی است که سطح اتاق آن بتدریج افزایش یافته و انرژی جنبشی خروجی از اتاق آزمون را به انرژی پتانسیل (فشار) تبدیل می‌کند. در تونلهای مدار بسته، برای کاهش تلفات انرژی ناشی از اصطکاک که متناسب با مجذور سرعت جریان هوا است، نیاز به دیفیوزر است که مطابق شکل (۵-۹) در پایین دست فن قرار می‌گیرد. عملکرد دیفیوزر یعنی تبدیل انرژی جنبشی به انرژی پتانسیل (فشار)، به اندازه و نحوه توزیع سرعت در سطح مقطع ورودی، زاویه دیفیوزر و همچنین نسبت سطوح ورودی به خروجی وابسته است.

^۱ Test Section

دیفیوزرهای مورد استفاده در تونل بادها به دو نوع دیفیوزر با زاویه کم و دیفیوزر با زاویه باز تقسیم بندی می‌شوند. در دیفیوزر با زاویه کم، زاویه مخروطی دیفیوزر حدود 5° بوده و جهت تبدیل انرژی جنبشی هوا به انرژی فشار و کاهش تلفات استفاده می‌شود. در تونل‌های مدار بسته، دیفیوزر از اتاق آزمون شروع شده و تا اتاق آرامش امتداد می‌یابد و توسط فن به دو قسمت تقسیم می‌شود. معمولاً بین اتاق آزمون و گوشه اول را دیفیوزر با زاویه کم و قسمت دوم را مسیر برگشت می‌نامند.



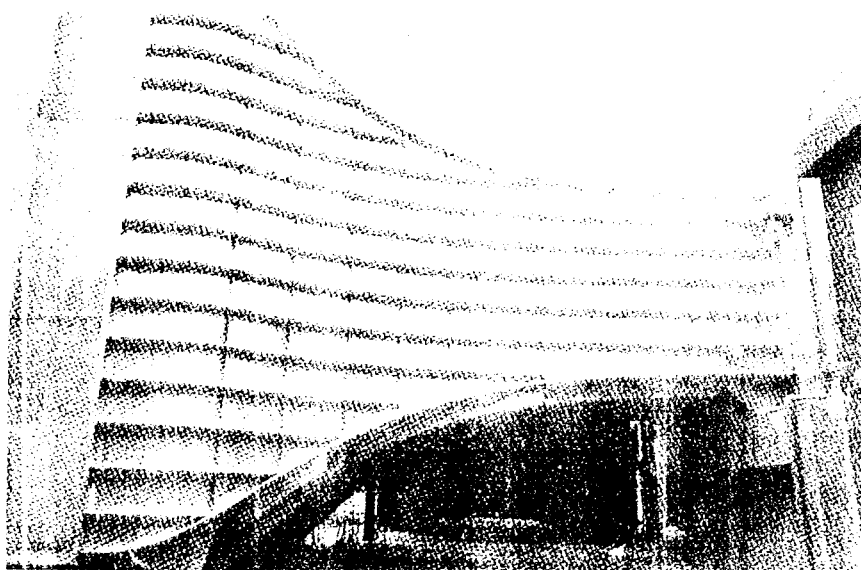
شکل (۵-۹) دیفیوزر تونل باد مدار بسته که در پایین دست فن قرار دارد [۲]

طول دیفیوزر با توجه به زاویه آن و ابعاد و فضای تونل باد مشخص می‌شود. نوع دیگر دیفیوزر، دیفیوزر با زاویه باز است که در تونل بادهای مدار باز دمنده، بین فن و اتاق آرامش و در تونل بادهای مدار بسته بین گوشه چهارم و اتاق آرامش قرار دارد. با استفاده از این دیفیوزر در یک فاصله طولی کوتاه، سطح مقطع تونل باد را به مقدار زیادی افزایش می‌دهند. برای جلوگیری از جدایش جریان هوا در این نوع دیفیوزر، در داخل آن توری نصب می‌شود.

۵-۴-۳- نازل

وظیفه اصلی نازل شتاب دادن به جریان با سرعت کم در محفظه آرامش، به سرعت مورد نیاز در اتاق آزمون است، شکل (۵-۱۰). با توجه به این که سطح اتاق نازل بتدریج کاهش پیدا می‌کند جریان

خروجی از نازل دارای غیر یکنواختی و اغتشاشهای کمتری است. شکل و ابعاد نازل نه تنها میزان سرعت را تعیین می کند، بلکه میزان یکنواختی جریان خروجی از آنرا نیز تعیین می کند. شکل و ابعاد نازل همچنین بر روی افت انرژی در داخل نازل که بیشتر به علت اصطکاک دیواره ها است نیز تاثیر می گذارد. برای جلوگیری از افت فشار زیاد در نازل، سرعت ورودی به نازل در تونل بادهای سرعت پائین (حداکثر سرعت ۱۰۰ تا 150 m/s)، حدود ۱۰ تا 25 m/s است. پروفیل نازل نیز براساس ایجاد توزیع یکنواخت سرعت در خروجی نازل طراحی می شود. تغییرات سرعت در امتداد طول دیواره های نازل باید به گونه ای باشد که جدایش در آنها رخ ندهد.



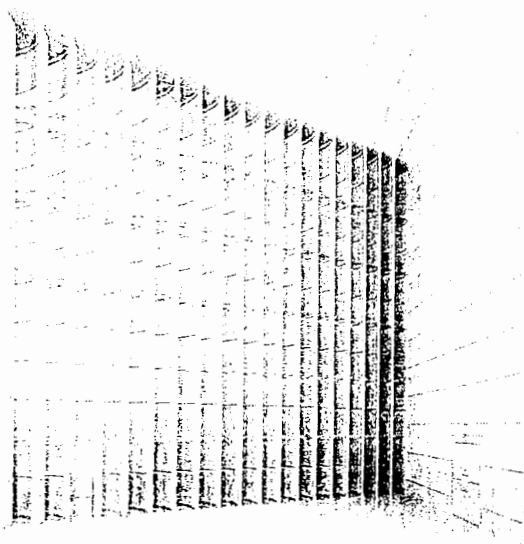
شکل (۵-۱۰) نازل تونل باد شرکت مزدا، ژاپن [۲]

۵-۴-۴- گوشه^۱

در تونلهای مدار بسته، جریان خروجی از اتاق آزمون، دوباره به اتاق آزمون هدایت می شود، به عبارت دیگر جریان هوا 360° می چرخد که این عمل به کمک چهار گوشه انجام می شود. طراحی گوشه از لحاظ افت انرژی و یکنواختی جریان مهم است. با توجه به بالا بودن سرعت جریان هوا در گوشه های اول و دوم، بنابراین افت انرژی در این گوشه ها مهم می باشند. از طرفی گوشه چهارم اثر قابل توجهی بر روی یکنواختی جریان هوا دارد. به همین جهت در گوشه ها تعدادی پره قرار می دهند تا

^۱ Corner

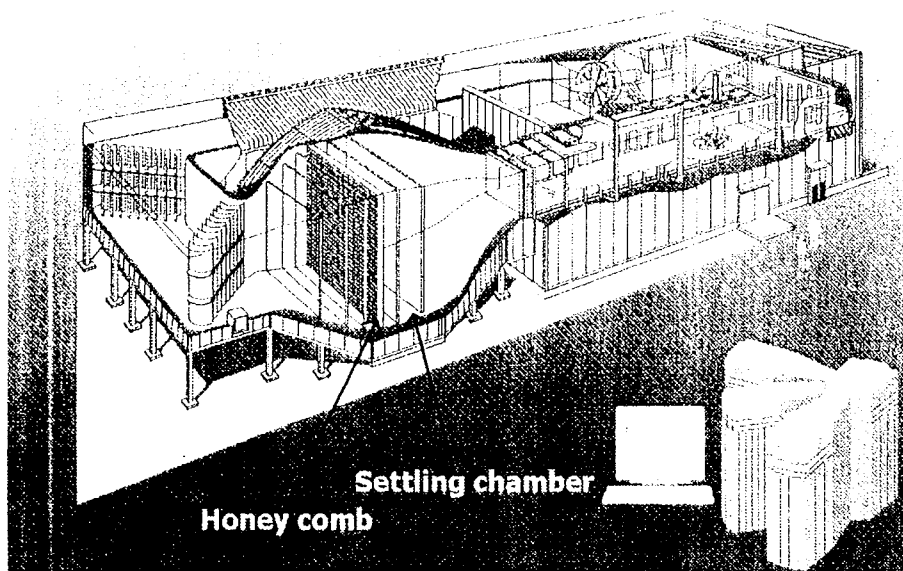
بتوان با راندمان و کیفیت بهتری جریان هوا را در مسیر بسته به گردش درآورد. شکل (۱۱-۵)، بخش گوشه (به همراه پره‌های درون آن) تونل باد شرکت نیسان را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که ارتفاع این گوشه 12 m می‌باشد.



شکل (۱۱-۵) گوشه به ارتفاع ۱۲ متر و پره‌های راهنما (تونل باد شرکت مزدا) [۲]

۵-۴-۵- اتاق آرامش^۱

محفظه آرامش، مکانی است که در آن سرعت جریان هوا به حداقل رسیده و در آن با استفاده از لانه زنبوری و توریها انحراف و شدت اغتشاشهای جریان هوا کاهش می‌یابد. این محفظه معمولاً پس از گوشه چهارم و دیفیوزر زاویه باز و در صورت عدم وجود دیفیوزر پس از گوشه چهارم قرار می‌گیرد. محفظه آرامش، جریان خروجی گوشه چهارم را مستقیم و شدت اغتشاشهای آن را کم می‌نماید و جریان هوا از طریق نازل وارد اتاق آزمون می‌شود. طول محفظه آرامش حدود ۱/۵ تا ۲ برابر پهنای آن می‌باشد. شکل (۵-۱۲) اتاق آرامش را نشان می‌دهد.



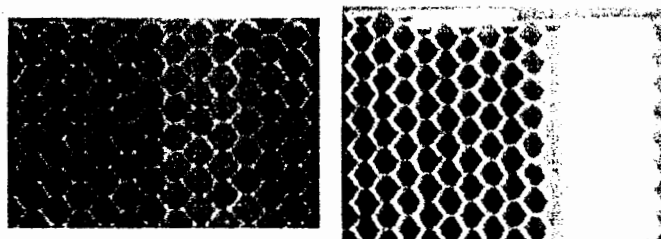
شکل (۵-۱۲) اتاق آرامش تونل باد [۲]

شبكة لانه زنبوری که معمولاً در محفظه آرامش قرار می‌گیرد و در شکل (۵-۱۳) نشان داده شده است، دارای خانه هائی با مقاطع شش گوش مربعی و یا دایروی است و از آلومینیوم و حتی در مواردی ممکن است از مقوا ساخته شود. لانه زنبوری جریان هوا را به حالت یک بعدی در آورده و علاوه بر آن، اغتشاش‌های عرضی^۲ در جریان هوا را کاهش می‌دهد. اما لانه زنبوریه‌ها اغتشاش‌های محوری جریان هوا (ناشی از ناحیه دنباله دیواره سلول) را افزایش می‌دهند. از این رو، مکان لانه زنبوری‌ها در اتاق

^۱ Settling chamber

^۲ Lateral turbulence

آرامش، باید طوری باشد که این اغتشاش‌ها قبل از ورود به نازل کم شوند برای بدست آوردن یک اثر مطلوب، طول خانه های لانه زنبوری باید حداقل ۶ تا ۸ برابر قطر موثر خانه ها باشد تا زاویه چرخش جریان از مقدار مجاز 10° بیشتر نشود. اندازه سلول و سطح مقطع لانه زنبوری مهم نبوده و بستگی به امکانات دارد. معمولاً قطر سلول حدود ۰/۲۵ اینچ است.



شکل (۵-۱۳) لانه زنبوری [۲]

طریقه ساختن لانه زنبوریه‌ها به این ترتیب است که ورقه های بسیار نازک آلومینیوم را بوسیله چسب در مقاطع مشخصی به هم می چسبانند و سپس بوسیله نیروی کششی از هم جدا شده و بصورت سلول در می آورند. افت فشار لانه زنبوریه‌ها کمتر از توریها می باشد، لذا اثر آنها بر روی کاهش اغتشاشات محوری کمتر است، اما با توجه به طولشان، می توانند سرعتهای جانبی را کاهش دهند. در برخی تونلها که برای کاهش اغتشاشات از توری استفاده می شود، بهتر است سلولهای لانه زنبوری را کوچکتر طراحی نمود که عملکرد توری را داشته باشد.

از آنجاییکه ممکن است توری و یا لانه زنبوری کثیف و یا دچار گرفتگی شوند، از این رو اتاق آرامش را باید طوری ساخت که بتوان وارد آن شد و نسبت به تمیز کردن و یا تعویض توری و یا لانه زنبوری اقدام کرد.

مکانیزم کار توری بدین صورت است که، گردابه های موجود در جریان هوا که بزرگتر از سوراخ های توری هستند، پس از عبور از توری، خرد شده و به گردابه های کوچکتری تقسیم می شوند. این گردابه های کوچک نیز در فاصله بین توریها، از بین می روند. توریها اغتشاشات محوری^۱ را بهتر از اغتشاشات عرضی کم می کنند. توری سبب تغییر انرژی بین اغتشاشات در محور های گوناگون شده و در نتیجه جریان خروجی را تقریباً همگن می سازد. در اتاق آرامش ممکن است از یک یا چند توری

^۱ Axial Turbulence

استفاده کنند. فاصله بین توریها سبب می‌شوند که گردابه های ایجاد شده توسط توری بالادست، قبل از رسیدن به توری پائین دستی از بین برود.

توری‌های مورد استفاده در تونلهای باد، معمولاً از سیمهای فلزی بافته شده (نظیر برنج، فسفر، برنز و فولاد) تشکیل شده اند و اغلب دارای سوراخهایی به شکل مستطیل یا مربع هستند. یک توری را معمولاً با عددی به نام مش^۱ و قطر سیمی که از آن بافته شده است، مشخص می‌کنند. مش به تعداد سوراخ‌های توری در یک اینچ از طول اطلاق می‌شود.

توری‌ها افت نسبتاً زیادی در مسیر جریان هوا ایجاد می‌کنند که این افت برای سرعت‌های بالاتر بیشتر است. از اینرو جریان در پائین دست توری دارای سرعت یکنواخت تری است. با این حال، اگر چه توریها در اتاق آرامش که کمترین سرعت را دارند، قرار دارند ولی استفاده از آنها، توان مصرفی فن را افزایش می‌دهد. مشکل دیگری که توریها در تونل باد ایجاد می‌کنند، کثیف شدن آنهاست که منجر به افزایش افت فشار می‌شود. در ضمن، با توجه به اینکه گردوغبار روی تور یکنواخت نبوده، کیفیت جریان کاهش می‌یابد و با زمان تغییر می‌کند. در صورت استفاده از روشهای مرئی سازی^۲ و استفاده از روغن، خاک چینی و غیره، مشکل فوق افزایش می‌یابد، لذا اتاق آرامش باید طوری طراحی گردد که بتوان توریها را به راحتی تمیز نمود.

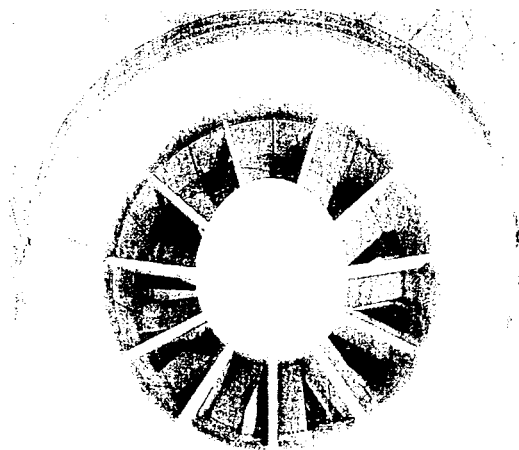
۵-۴-۶- فن

برای ایجاد جریان هوا در تونل باد، باید به هوا انرژی داده شود که این کار توسط فن انجام می‌شود. به عبارت دیگر، فن انرژی لازم برای جریان هوا و رساندن آن به سرعت مورد نظر در اتاق آزمون را تامین می‌کند. از اینرو وظیفه فن، جبران تلفاتی است که برای جریان هوا ایجاد می‌شود که این تلفات متناسب با توان سوم سرعت جریان هوا می‌باشد. فن‌های مورد استفاده در تونل بادهای مدار بسته دارای پره‌های ثابت می‌باشند. وجود این پره‌های ثابت به این علت است که جریان هوای خروجی از فن دارای زاویه و انحراف نسبت به محور فن می‌باشد، بنابراین برای هدایت مجدد جریان هوا در جهت محور افقی فن و جلوگیری از برخورد جریان هوا با دیواره‌های تونل باد و اتلاف انرژی جنبشی آن از این پره‌های ثابت استفاده می‌کنند. در تونل باد مدار باز مکنده، از فن‌های بدون پره ثابت هم

^۱ Mesh

^۲ Visualization

می‌توان استفاده کرد، ولی در تونل باد مدار بسته باید حتماً از این پره‌های ثابت که در بالا دست فن نصب می‌شوند، استفاده کرد. موتور فن ممکن است که در نازل فن قرار داشته باشد و یا این که خارج از تونل باد قرار گیرد. هنگامی که موتور فن خارج از مدار تونل باد قرار می‌گیرد، برای انتقال نیروی محرکه مورد نیاز از موتور فن از یک شفت (محور) بلند استفاده می‌شود که این محور از گوشه دوم به خارج از تونل باد هدایت می‌شود. در بالادست برخی از فن‌ها نیز پره‌های ثابت نصب می‌شود. فن باید در پایین دست گوشه دوم قرار گیرد و امروزه، دیگر به ندرت فن را بین گوشه اول و گوشه دوم قرار می‌دهند. اگر فن در جایی باشد که سرعت هوا در آنجا زیاد باشد، بازده فن بهبود یافته و از طرفی دیگر، هزینه‌های مربوط به فن با مجذور قطر آن کاهش می‌یابد. نسبت مساحت سطح مقطع فن به اتاق آزمون معمولاً در بازه ۲ الی ۳ است. شکل (۵-۱۴) فن تونل باد شرکت نیشان را نشان می‌دهد. قطر این فن ۸ m می‌باشد.



شکل (۵-۱۴) فن به قطر ۸ متر (تونل باد شرکت مزدا) [۲]

فن‌های به کار رفته در تونل باد به دو دسته زیر تقسیم می‌شوند.

الف- فن محوری^۱

ب- فن سانتریفوژ

^۱ Axial Flow Fan

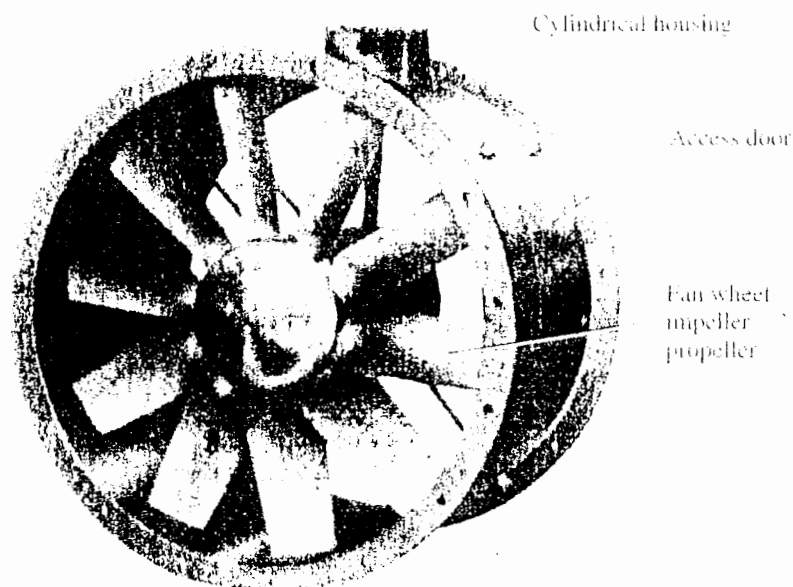
الف - فن محوری

فن جریان محوری با توجه به نام آن، به گونه‌ای عمل می‌کند که جریان هوا و در جهت محور فن حرکت می‌کند. اصول عملکرد فن‌های جریان محوری، انحراف جریان هوا بر روی پره‌ها و ایرفویل‌های فن است. از این رو هنگامی که جریان هوا از پره‌های فن عبور می‌کند، الگوی جریان به صورت الگوی مارپیچی^۱ است. در این حالت مولفه‌های سرعت جریان هوای خروجی از فن را می‌توان به دو مولفه سرعت محوری و سرعت مماسی تجزیه نمود. سرعت محوری، مولفه سرعت مفید است و در واقع این مولفه سرعت است که هوا را به جایی که ما می‌خواهیم هدایت می‌کند. مولفه مماسی سرعت باعث افت انرژی در فن‌های پروانه‌ای و فن‌های محوری کانال‌دار می‌شوند. البته باید به این نکته توجه داشت که در فن‌های پره محوری مولفه مماسی سرعت به طور کامل به افت تبدیل نمی‌شود و مقداری از مولفه سرعت مماسی به فشار استاتیکی تبدیل می‌شود.

برای اینکه راندمان فن محوری قابل قبول باشد، جریان هوای خروجی از یک فن محوری باید در تمامی سطح مقطع کاری فن به صورت یکنواخت توزیع شود به عبارت دیگر، سرعت محوری جریان هوا باید از هاب تا نوک پره‌ها یکسان باشد. اما توزیع سرعت خطی پره‌های فن یکنواخت نبوده و در مرکز فن، این سرعت کم و هرچه به سمت نوک پره‌ها حرکت کنیم، مقدار این سرعت افزایش می‌یابد. این گردایان سرعت باید به وسیله چرخش پره‌های فن جبران شود بدین معنی که زاویه حمله پره در نزدیکی مرکز فن باید زیاد بوده و با حرکت به سمت نوک پره‌ها این زاویه حمله کاهش یابد.

نمونه ای از فن جریان محوری در شکل (۵-۱۵) نشان داده شده است.

^۱ Helical pattern



شکل (۵-۱۵) نمونه‌ای از یک فن جریان محوری [۲]

ب- فن سانتریفوژ

همان‌طور که بیان شد، اصول کار فن‌های جریان محوری بدین صورت بود که در این فن‌ها، جریان هوا توسط پره‌های فن از جهت محوری به الگوی مارپیچی تغییر جهت می‌دادند. در فن‌های سانتریفوژ، اصول کارکرد فن ترکیبی از دو اثر است:

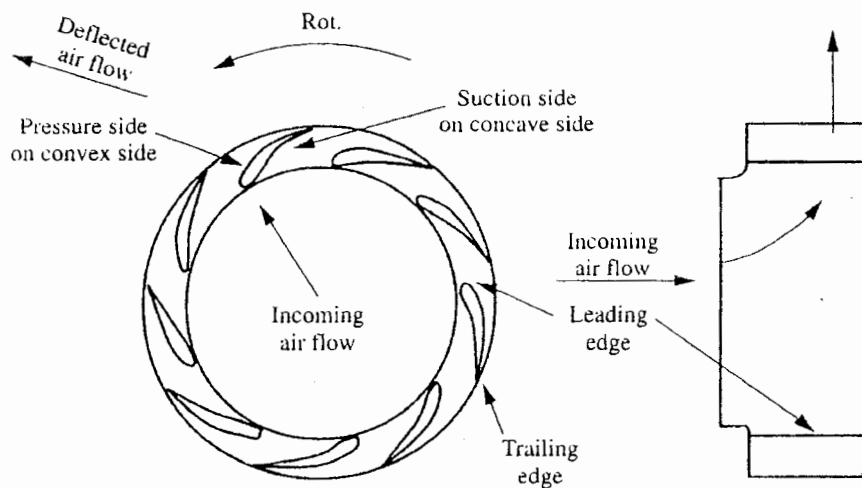
۱- نیروی گریز از مرکز

۲- انحراف جریان هوا به وسیله پره‌ها از جهت شعاعی به الگوی جریان مارپیچی

هنگامی که چرخ فن سانتریفوژ شروع به گردش می‌کند، هوایی که بین پره‌ها وجود دارد به همراه پره‌ها شروع به چرخش کرده و در نتیجه یک نیروی گریز از مرکز به آنها وارد می‌شود که این نیرو دلیل اصلی حرکت رو به بیرون جریان هوا است.

فن‌های سانتریفوژ معمولاً فشار استاتیکی بیشتری نسبت به فن‌های جریان محوری ایجاد می‌کنند. (در حالتی که قطر چرخ فن و سرعت rpm هر دو یکسان باشد) که علت آن وجود نیروی گریز از مرکز است که در فن جریان محوری وجود ندارد.

نمونه‌ای از این فن‌ها در شکل (۵-۱۶) نشان داده شده است.



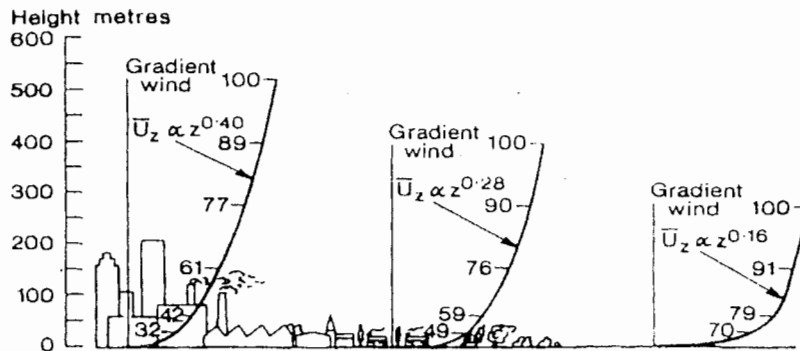
شکل (۵-۱۶) نمونه ای از فن سانتریفوژ [۲]

۵-۵- تونل باد ویژه با سرعت کم

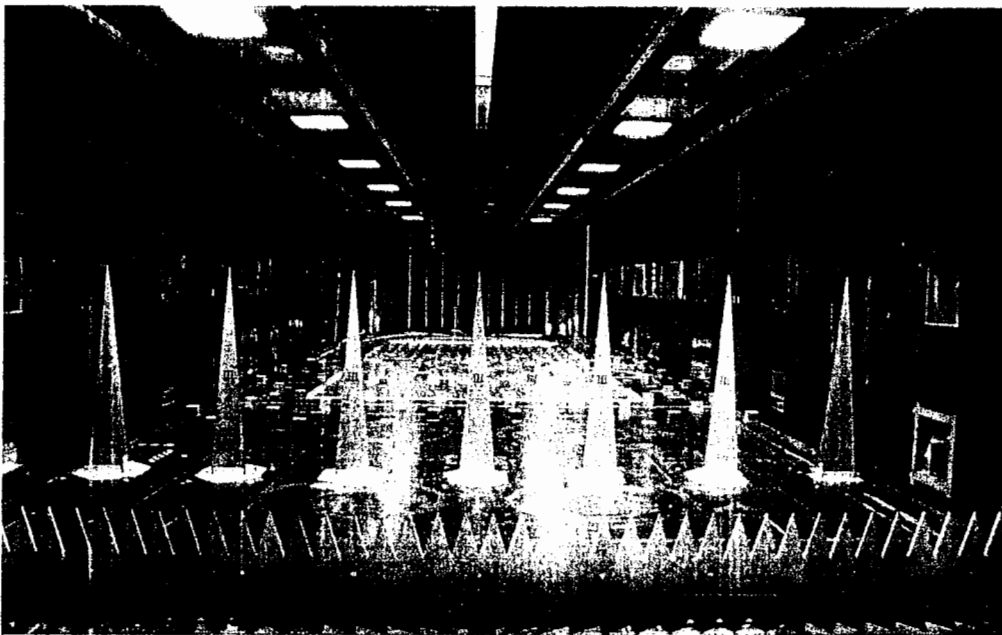
برای حل برخی از مشکلات آیرودینامیکی و یا مهندسی باد نیاز به برخی آزمایشهای ویژه است که این آزمایشهای ویژه نیاز به تونل بادهای ویژه ای از قبیل تونل باد با جریان چرخشی، پرواز آزاد، تونل باد با جریان هوای اغتشاش کم، تونل باد با جریان عمودی، تونل باد برای اتومبیل، تونل باد بدون صدا، تونل باد لایه مرزی و غیره است. این تونل بادهای استاندارد و جوه مشترک زیادی دارند، ولی از لحاظ طراحی لوازم جنبی، استفاده از آنها و وسایل آزمایش به طور قابل ملاحظه‌ای با تونل باد استاندارد متفاوتند. در اینجا تنها تونل باد لایه مرزی بررسی می گردد.

۵-۱-۵-تونل باد لایه مرزی

برای بررسی و مطالعه اثر جریان هوای باد بر روی سازه‌های ساختمانی نظیر پل‌ها و برج‌ها، پخش آلودگی محیطی و ... از تونل باد لایه مرزی استفاده می‌شود. مطابق شکل (۵-۱۷) جریان باد در سطح زمین تا ارتفاع مشخصی به صورت لایه مرزی آشفته است و از این‌رو پروفیل سرعت در اتاق آزمون این‌گونه تونل بادها باید به صورت لایه مرزی آشفته باشد. از این‌رو برای ایجاد لایه مرزی آشفته در اتاق آزمون و ضخیم کردن لایه مرزی و شبیه‌سازی جریان لایه مرزی هوا، در اتاق آزمون تونل باد لایه مرزی از زبری‌های مختلفی استفاده می‌شود که شکل (۵-۱۸) نمونه‌ای از این زبری‌ها را نشان می‌دهد. وجه تمایز این نوع تونل باد با تونل باد استاندارد، نوع جریان اتاق آزمون است. در تونل باد استاندارد، هدف ایجاد جریان هوای یکنواخت در اتاق آزمون است. ولی در تونل باد لایه مرزی، جریان اتاق آزمون، جریان لایه مرزی است. سرعت در کف اتاق آزمون برابر صفر بوده و پروفیل سرعت تا مرکز اتاق آزمون ادامه می‌یابد، بنابراین جریان لایه مرزی را باید به صورت مصنوعی در اتاق آزمون ایجاد نمود. مطابق شکل (۵-۱۸)، بدین منظور در مقطع ورودی اتاق آزمون از مانع‌های بزرگ هرمی شکل استفاده می‌شود و روی کف اتاق آزمون، قبل از مدل، بلوک‌های کوچکی نصب می‌شود که ضخامت لایه مرزی و پروفیل آن را به طور مصنوعی افزایش داده و جریان در اتاق آزمون به صورت لایه مرزی مورد نظر بدست می‌آید. با توجه به نوع جریان هوا در اتاق آزمون که به صورت لایه مرزی است، دیگر نیازی نیست که شدت اغتشاش‌های جریان هوا را همانند تونل باد استاندارد، کاهش داد. بنابراین نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی نازل بالا نبوده و ابعاد تونل باد کوچک‌تر و هزینه ساخت آن کمتر می‌شود. سرعت جریان هوا در این نوع تونل باد معمولاً کم و در بازه $20\text{ m/s} \sim 40\text{ m/s}$ است، بنابراین برای گردش هوا در تونل باد، فن با توان کمتری مورد نیاز است. به منظور ایجاد جریان لایه مرزی آشفته علاوه بر ایجاد لایه مرزی به طور مصنوعی توسط زبری‌ها، نیاز به اتاق آزمون به طول ۱۰ الی ۱۵ متر است.



شکل (۱۷-۵) لایه مرزی باد بر روی یک ناحیه [۲]



شکل (۱۸-۵) استفاده از انواع زبری در ابتدای اتاق آزمون تونل باد لایه مرزی [۲]

۵-۶- تشابه جریان در تونل باد

هدف از مطالعه جریان سیال، استفاده از نتایج این مطالعه در کاربردهای صنعتی و پژوهشی است. مطالعه جریان سیال به سه روش تحلیلی، عددی و تجربی انجام می‌شود. با توجه به این که جریان سیال دارای رفتار پیچیده‌ای است، بنابراین استفاده از روش‌های تحلیلی برای حل دقیق جریان سیالات تنها برای تعداد اندکی از شرایط جریان کاربرد دارد و سایر جریان‌ها با استفاده از روش‌های عددی و تجربی بررسی و مطالعه می‌شود. در این راه، روش‌های عددی و تجربی مکمل یکدیگر بوده و

از نتایج هر کدام از روش‌ها می‌توان در پیشرفت روش دیگر استفاده کرد. در روش‌های تجربی به‌منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها و بررسی آسان‌تر نتایج داده‌های تجربی از آنالیز ابعادی استفاده می‌شود.

۵-۶-۱- آنالیز ابعادی

با توجه به تنوع پارامترهای تأثیرگذار در رفتار سیال، استفاده از روش‌های تجربی زمان‌بر و پرهزینه بوده، بنابراین در مطالعه تجربی جریان سیال، یکی از اهداف، به‌دست آوردن بیشترین اطلاعات با انجام تعداد کمتری آزمایش است. یکی از ابزارهای مهم در رسیدن به این هدف، آنالیز ابعادی و شبیه‌سازی جریان سیال است. در روش آنالیز ابعادی، پارامترهای بی‌بعد بدست می‌آیند که با استفاده از آنها می‌توان جریان سیالات را شبیه‌سازی نموده و نتایج مطلوب را بدست آورد. به‌عنوان مثال، نیروی پسای وارد بر یک کره به شعاع d که در یک سیال تراکم‌ناپذیر در حال حرکت قرار دارد، به لزجت سیال μ ، چگالی سیال ρ ، سرعت سیال U ، قطر کره d ، بستگی دارد و آنرا می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$F_{drag} = D = f(d, v, \rho, \mu) \quad (۱-۵)$$

با انجام آزمایش بر روی کره‌ای به قطر d و با سرعت سیال U و خواص ρ, μ ، نیروی پسای D به‌دست می‌آید. اما اگر هر کدام از این پارامترها تغییر کنند، نیروی پسا دیگر D نیست. از این‌رو برای شرایط مختلف، تعداد بی‌شماری نمودار و جدول به‌دست می‌آید که بسیار پیچیده خواهند بود. فرض کنید که می‌خواهیم با انجام آزمایش، منحنی‌های نیروی پسا را بر حسب U, ρ, μ, d به‌دست آوریم. در مرحله اول ρ, μ, d را ثابت گرفته و منحنی D بر حسب U را می‌خواهیم بدست آوریم. برای بدست آوردن این منحنی حداقل باید مقادیر D را در ۱۰ نقطه (با U متفاوت) آزمایش و تعیین کنیم. برای بدست آوردن اثر قطر بر نیروی پسا، هر کدام از ۱۰ آزمایش بالا را باید حداقل در ۱۰ نقطه (۱۰ کره با قطرهای متفاوت) انجام دهیم که حاصل آن انجام ۱۰۰ (۱۰×۱۰) آزمایش می‌شود. اگر این روند را برای تعیین اثر μ و ρ بر روی نیروی پسا بخواهیم انجام دهیم، باید در نهایت ۱۰۰۰۰ آزمایش انجام دهیم. با فرض این‌که هر آزمایش یک ساعت طول بکشد و ما در هر روز ۸ ساعت کاری، آزمایش‌ها را انجام دهیم، در حدود ۵ سال طول می‌کشد تا منحنی‌های مربوط به اثر U, ρ, μ, d بر روی نیروی پسای کره را به‌دست آوریم. نکته جالب این است که در پایان این مدت،

با ۱۰۰۰۰ منحنی سر و کار داریم که استفاده از نتایج آنها بسیار دشوار است. اما با استفاده از آنالیز ابعادی، رابطه (۵-۱) به رابطه زیر تغییر می‌کند:

$$\frac{D}{\rho U^2 d^2} = f_1\left(\frac{\rho U d}{\mu}\right) \quad (۲-۵)$$

که با استفاده از این رابطه، تنها نیازمند به انجام ۱۰ آزمایش هستیم. قابل ذکر است که رابطه (۲-۵) تنها برای مواردی معتبر است که تنها نیروهای اصطکاکی و اینرسی بر روی کره (یا جسم) اعمال شوند. در جریان‌های مافوق صوت و جریان‌های سطحی آزاد به ترتیب نیروهای الاستیسیته و گرانشی اهمیت دارند، از این رو رابطه (۲-۵) دیگر معتبر نمی‌باشد. در این موارد نیروی پسا تابعی از عدد ماخ M (جریان مافوق صوت) و عدد فراد Fr (جریان‌های سطحی آزاد) نیز باشد. در مواردی، برای انجام آزمایش تجربی بر روی یک نمونه واقعی، ممکن است نتوان از نمونه واقعی برای انجام آزمایش‌ها استفاده کرد و یا این که استفاده از نمونه واقعی بسیار پر هزینه خواهد بود (که اغلب این گونه است). در این شرایط ساده ترین روش، استفاده از مدل نمونه واقعی در انجام آزمایش‌ها است. اگر می‌خواهیم با انجام آزمایش و اندازه‌گیری‌ها بر روی مدل، رفتار نمونه واقعی را در جریان سیال بررسی کنیم، به این نتیجه می‌رسیم که نمی‌توان هر آزمایشی را بر روی مدل انجام داد. در این حالت باید میان جریان عبوری از مدل و جریان نمونه واقعی تشابه برقرار باشد.

۵-۶-۲- پارامترهای مهم در جریان سیال

هنگامی که جسمی در یک سیال حرکت می‌کند، نیروی‌هایی که از طرف سیال به جسم وارد می‌شوند، ناشی از لزجت سیال، اینرسی سیال، الاستیسیته سیال و گرانش سیال است. نیروی اینرسی متناسب با جرمی از سیال است که با شتاب مشخص در حرکت بوده و مقدار آن طبق قانون دوم نیوتن برابر $F=ma$ است که m جرم سیال و a شتاب آن است. جرم سیال نیز برابر ρL^3 است که L^3 حجم سیال و L مشخصه بعد طول است. مقدار شتاب نیز برابر $a = \frac{DU}{Dt}$ است که $\frac{D}{Dt}$ مشتق کامل

است و برای جریان‌های پایا، داریم: $\frac{\partial U}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} = U \frac{\partial U}{\partial x}$ که $\frac{\partial U}{\partial x}$ برابر مقدار تغییرات سرعت در مختصات مکانی است. از این رو شتاب نیز متناسب است با:

$$a \sim \frac{U^2}{L} \quad (3-5)$$

و نیروی اینرسی به صورت رابطه زیر در می‌آید:

$$F = \rho L^3 \cdot \frac{U^2}{L} = \rho U^2 L^2 \quad (4-5)$$

سایر نیروها عبارتند از:

$$\tau \cdot A = \left(\mu \frac{\partial U}{\partial y} \cdot A \right) = \left(\mu \frac{U}{L} \cdot L^2 \right) = \mu UL \quad (5-5) \quad \text{نیروی لزجی}$$

$$mg \sim \rho g L^3 \quad (6-5) \quad \text{نیروی گرانش}$$

که A مساحت سطح و g شتاب گرانش است. مطابق تعریف، مدول حجمی یک سیال، مقدار تنشی است که برای ایجاد تغییر حجم واحد مورد نیاز است و آنرا با علامت E نشان می‌دهند. از این رو داریم:

$$EL^2 \sim \text{نیروی الاستیسیته} \quad (7-5)$$

از طرف دیگر مطابق معادله لاپلاس، سرعت صوت برابر با $c^2 = \frac{E}{\rho}$ است شلختینگ^۱ (۱۹۷۹).

بنابراین داریم:

$$\rho c^2 L^2 \sim \text{نیروی الاستیسیته} \quad (8-5)$$

در مکانیک سیالات و آیرودینامیک، نیروهای اینرسی مهم‌ترین نیروها می‌باشند و از این رو نسبت نیروی اینرسی به سایر نیروهایی که در بالا ذکر شده‌اند، گروهی از اعداد بی‌بعد را تشکیل می‌دهند که نقش مهمی را در مطالعه و بررسی جریان سیالات دارند. این اعداد بی‌بعد عبارتند از:

$$Re = \frac{\rho U^2 L^2}{\mu UL} = \frac{\rho U L}{\mu} = \frac{UL}{\nu} \quad (9-5) \quad \text{عدد رینولدز} = \frac{\text{نیروی اینرسی}}{\text{نیروی لزجی}}$$

$$M = \frac{U}{C} \quad (10-5) \quad \text{عدد ماخ} = \frac{\text{نیروی اینرسی}}{\text{نیروی الاستیسیته}}$$

^۱ Schlichting

$$Fr = \frac{\text{نیروی اینرسی}}{\text{نیروی لزجی}} = \frac{U^2}{Lg} \quad (۱۱-۵)$$

عدد فرود در تونل باد کاربردی ندارد. عدد ماخ نیز برای جریان‌های با سرعت بالا (بیش از 100 m/s) کاربرد داشته و نقش تعیین کننده‌ای در رفتار سیال دارد. در سرعت‌های پایین، آثار مربوط به عدد رینولدز بسیار بیشتر از عدد ماخ است و در این بازه سرعت، عدد ماخ کاربرد چندانی ندارد.

۵-۶-۳- تشابه هندسی، سینماتیکی و دینامیکی

همان‌طور که قبلاً بیان شد، در اکثر آزمایش‌های تونل باد، نیاز به استفاده از مدل به جای نمونه کامل داریم. برای انجام آزمایش بر روی مدل و استفاده از نتایج حاصل از آن برای اندازه‌گیری نیروها، ممان‌ها و نیروهای دینامیکی در حالت واقعی، باید بین شرایط جریان هوا در حالت مدل و در حالت واقعی، تشابه وجود داشته باشد. اولین اصل در تشابه، تشابه هندسی است. بدین معنی که مدل و نمونه واقعی باید از لحاظ هندسی مشابه باشند. برای اینکه تشابه هندسی بین مدل و نمونه واقعی برقرار شود، شکل مدل و نمونه واقعی باید یکسان باشد و نسبت تمامی ابعاد خطی مدل به ابعاد خطی متناظر در نمونه واقعی، باید برابر یک ضریب مقیاس ثابت باشد. دومین اصل در تشابه، تشابه سینماتیکی است. دو جریان سیال هنگامی تشابه سینماتیکی دارند که بردارهای سرعت در نقاط متناظر در دو جریان سیال، دارای جهت یکسانی بوده و نسبت اندازه این بردارها در دو حالت مدل به نمونه واقعی برابر یک ضریب مقیاس ثابت باشد. همچنین می‌توان گفت که دو جریان سیال هنگامی دارای تشابه سینماتیکی هستند که الگوی خطوط جریان آنها متناسب با یکدیگر باشد که ضریب تناسب آنها، یک ضریب مقیاس ثابت است. تشابه سینماتیکی، نیازمند آن است که رژیم هر دو جریان در حالت مدل و نمونه واقعی، یکسان باشد. سومین اصل، تشابه دینامیکی است. شرط برقراری تشابه دینامیکی این است که دو جریان باید با هم تشابه هندسی و تشابه سینماتیکی داشته باشند. برای برقرار ساختن شرایط تشابه دینامیکی، باید تمامی نیروهایی را که در جریان سیال مهم هستند را در نظر گرفت. شرایط آزمایش باید به گونه‌ای فراهم شود که نیروهای موجود در حالت مدل، با یک

ضریب مقیاس ثابت، با نیروهای متناظر موجود در حالت نمونه واقعی متناسب باشند. در تونل بادهای سرعت پایین، تشابه دینامیکی هنگامی برقرار است که:

$$\text{نمونه واقعی } (Re) = \text{مدل } (Re) \quad (۱۲-۵)$$

برای برابری عدد رینولدز مدل با عدد رینولدز نمونه واقعی در تونل باد از سه روش می‌توان استفاده کرد:

الف - اندازه مدل برابر با اندازه نمونه واقعی باشد.

ب - از تونل باد چگالی متغیر استفاده شده و مقدار ρ را افزایش داد.

ج - کاهش مقدار دما و در نتیجه کاهش مقدار ν (لزجت سینماتیکی) که نتیجه آن افزایش عدد رینولدز مدل است.

با توجه به این که هر کدام از روش‌های فوق مشکلاتی نظیر افزایش هزینه ساخت تونل‌ها، ... را به همراه دارند، بنابراین در آزمایش‌های تونل باد، سعی می‌شود علاوه بر ایجاد تشابه هندسی، رژیم‌های جریان نیز شبیه‌سازی شوند. در این حالت لایه مرزی تشکیل شده بر روی مدل و نمونه واقعی مشابه یکدیگر خواهند بود. سپس اندازه‌گیری‌ها بر روی مدل انجام شده و رفتار جریان در عدد رینولدز مدل، مطالعه می‌شود. آن‌گاه این رفتار جریان هوا برای اعداد رینولدز بالاتر تا رینولدز نمونه واقعی، برون‌یابی می‌شود.

۵-۶-۴- معادله‌های اساسی حرکت جریان سیال

معادله‌های اساسی حرکت جریان سیال، معادله‌های پیوستگی و ناویر-استوکس هستند که برای جریان سیال غیر قابل تراکم به صورت زیر است:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (۱۳-۵)$$

$$\rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} \right) = X - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) \quad (۱۴-۵)$$

$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} \right) = Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) \quad (۱۵-۵)$$

$$\rho \left(\frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} \right) = Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) \quad (۱۶-۵)$$

که در اینجا U, V, W به ترتیب مولفه‌های بردار سرعت در جهت‌های x, y, z و X, Y, Z مولفه‌های نیروهای جسمی در جهت‌های x, y, z می‌باشند. در حالت برداری، معادله‌های ناویر-استوکس را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \vec{F} - \text{grad}p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (17-5)$$

که:

$$\vec{V} = U\mathbf{i} + V\mathbf{j} + W\mathbf{k} \quad \text{و} \quad \vec{F} = X\mathbf{i} + Y\mathbf{j} + Z\mathbf{k}$$

از طرف دیگر، می‌توان این معادله‌ها را بی‌بعد ساخت. به عنوان مثال، شکل بی‌بعد معادله‌های ناویر-استوکس و پیوستگی برای جریان دو بعدی پایا تراکم ناپذیر در صفحه xy که تنها نیروی گرانش در جهت y بر آن تاثیر می‌کند به صورت زیر است:

$$\frac{\partial U^*}{\partial x^*} + \frac{\partial V^*}{\partial y^*} = 0 \quad (18-5)$$

$$U^* \frac{\partial U^*}{\partial x^*} + V^* \frac{\partial U^*}{\partial y^*} = -\frac{\partial p^*}{\partial x^*} + \frac{\mu}{\rho U_\infty L} \left(\frac{\partial^2 U^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 U^*}{\partial y^{*2}} \right) \quad (19-5)$$

$$U^* \frac{\partial V^*}{\partial x^*} + V^* \frac{\partial V^*}{\partial y^*} = -\frac{gL}{U_\infty^2} - \frac{\partial p^*}{\partial y^*} + \frac{\mu}{\rho U_\infty L} \left(\frac{\partial^2 V^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 V^*}{\partial y^{*2}} \right) \quad (20-5)$$

که در اینجا:

$$X^* = \frac{x}{L}, y^* = \frac{y}{L}, U^* = \frac{U}{U_\infty}, V^* = \frac{V}{U_\infty}, p^* = \frac{p}{\rho U_\infty^2}$$

است. U_∞ سرعت جریان آزاد و L طول مرجع می‌باشد.

از این معادله‌های بی‌بعد مشخص می‌شود که دو جریان سیال مشابه هستند، اگر و تنها اگر مقادیر

$$\frac{gL}{U_\infty^2}, \frac{\mu}{\rho U_\infty L}$$

برای هر دو جریان با هم برابر باشند. در تونل باد، مقدار $\frac{gL}{U_\infty^2}$ در نظر گرفته نمی‌شود،

بنابراین مشخص می‌شود که برای تشابه دو جریان مدل و نمونه واقعی، عدد رینولدز آنها باید با یکدیگر برابر باشد. در آزمایش‌های مربوط به اندازه‌گیری نیروی پسا در کشتی‌ها، نیاز است که هم

عدد Re و هم عدد Fr در مدل و نمونه واقعی، با هم برابر باشند.

فصل ششم

پیش فرض ها و روش انجام آزمایش

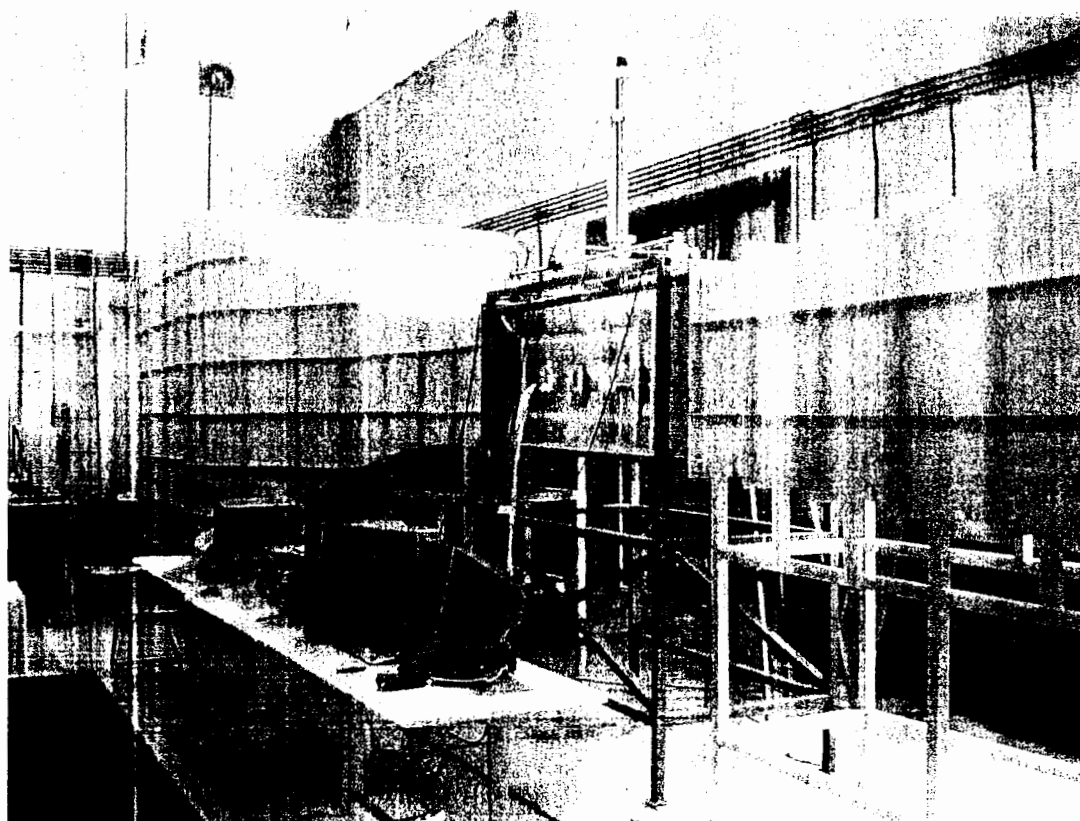
۱-۶- مشخصات تونل باد

نتایج بدست آمده در این تحقیق، در تونل باد دانشگاه صنعتی شاهرود انجام گرفت. این تونل باد از نوع مدار باز دمشی به طول تقریبی ۱۸ m و ابعاد اتاق آزمون ۲۰۰×۸۰×۸۰ cm و از جنس پلکسی گلاس^۱ است. این تونل مجهز به یک فن سانتریفوژ و موتور سه فاز ۴۵ kw است. حداکثر سرعت این تونل باد ۳۰ m/s بوده که با استفاده از یک کنترل کننده، سرعت جریان هوا قابل تنظیم است. شماتیک این تونل باد و نمایی از آن در شکل‌های (۱-۶) و (۲-۶) نشان داده شده است.



شکل (۱-۶) شماتیک تونل باد دانشگاه صنعتی شاهرود

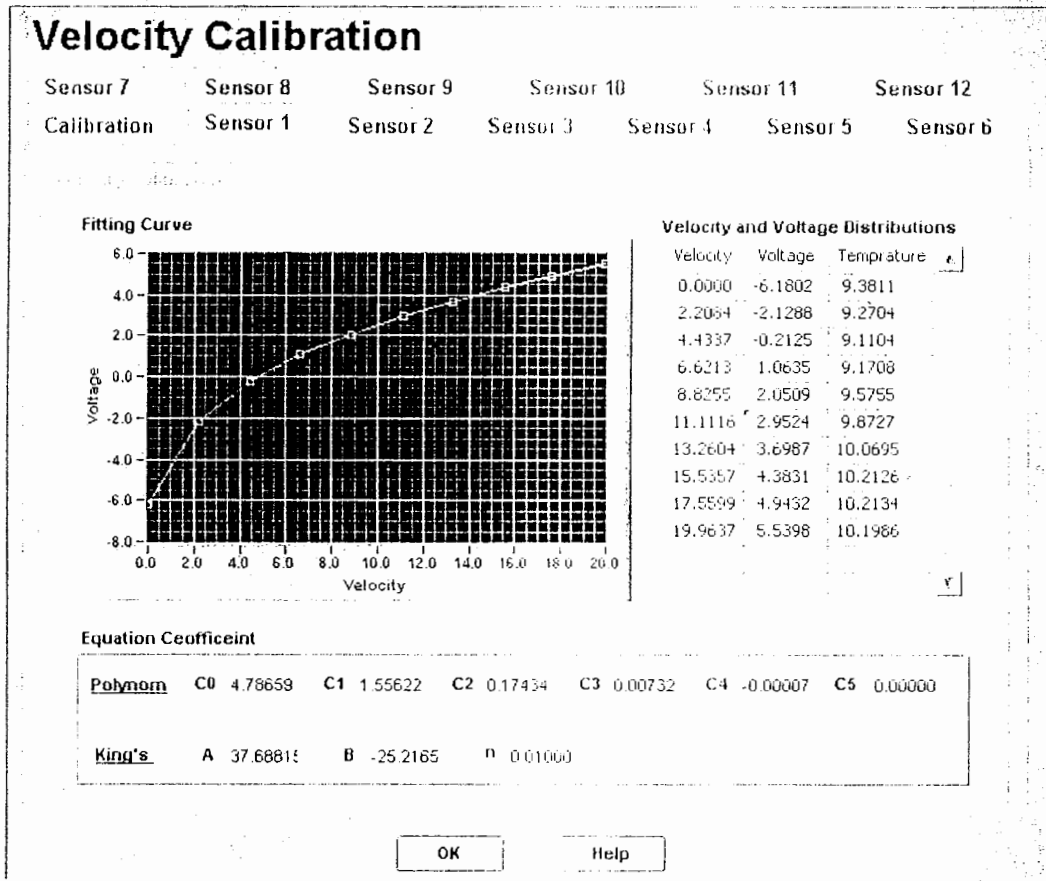
^۱ Plexiglass



شکل (۲-۶) نمایی از تونل باد دانشگاه صنعتی شاهرود

برای اندازه گیری توزیع سرعت در داخل تونل باد از دستگاه و نرم افزار جریان سنج سیم داغ یک بعدی، ساخت شرکت فراسنجش صبا استفاده شد. برای هر نقطه جریان، زمان نمونه برداری ۵ ثانیه انتخاب گردید.

کالیبراسیون پراب نیز در داخل تونل باد صورت گرفت که منحنی کالیبراسیون در شکل (۳-۶) آمده است. این کالیبراسیون برای سرعت 0 m/s تا 20 m/s و برای 10 نقطه انجام گرفت. مطابق شکل، به هر ولتاژ برداشت شده از جریان سنج سیم داغ، یک سرعت نسبت داده می شود و در نتیجه بوسیله اندازه گیری ولتاژ می توان سرعت لحظه ای جریان سیال را در هر نقطه از جریان برداشت نمود.



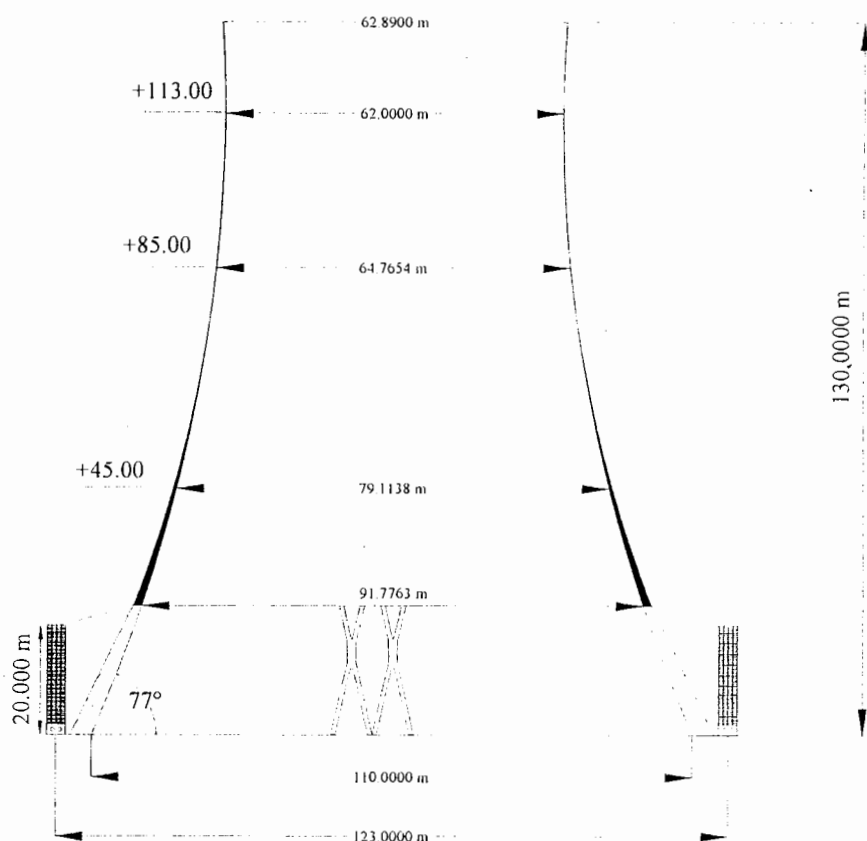
شکل (۳-۶) منحنی کالیبراسیون جریان سنج سیم داغ

۲-۶ - مدل برج خنک کن

برای اندازه گیری توزیع سرعت و فشار در گلوگاه برج خنک کن از این مدل استفاده گردید که مدلی از برج خنک کن واقع در نیروگاه شازند اراک است. ابعاد و اندازه های این برج بدین صورت است:

۱۳۰ m	ارتفاع برج
۱۱۰ m	قطر پائین برج
۶۲ m	قطر گلوگاه برج
۲۰ m	ارتفاع مبدلها

نمایی از برج، به همراه اندازه های آن در شکل (۴-۶) نشان داده شده است.



شکل (۴-۶) برج خنک کن نیروگاه سازند اراک

مدل ساخته شده با مقیاس $\frac{1}{640}$ از روی برج اصلی و از سفال ساخته شد. انتخاب مقیاس ذکر شده برای ساخت مدل به این مبنا بوده است که مدل ساخته شده نباید تصویر سطحی بیشتر از ۰/۰۵ مساحت محفظه آزمون داشته باشد. [۳۱]

۳-۶- بررسی شرایط، پیش فرض ها و مدلسازی

آزمایش و تحقیقات میدانی بر روس سازه های بزرگ نظیر برج های خنک کن خشک بسیار دشوار، هزینه بر، وقت گیر و حتی در برخی از موارد امری غیرممکن می باشد. این عوامل در اکثر موارد محققین را وادار به استفاده و ساخت مدلی کوچکتر و آزمایش آن در تونل باد می کند. برای

اینکه بتوان نتایج حاصل از آزمایش بر روی مدل را برای نمونه اصلی را استفاده کرد باید تشابه هندسی و سینماتیکی بین آنها برقرار باشد. در انجام این آزمایش سه پارامتر تشابهی بسیار مهم وجود دارد که عبارتند از :

$$Fr = \frac{V_i^2}{(\Delta\rho/\rho)gH} \quad (1-6) \text{ عدد فرود}$$

$$Re = \frac{V_i H}{\nu} \quad (2-6) \text{ عدد رینولدز}$$

$$a = \frac{V_w}{V_i} \quad (3-6) \text{ نسبت سرعت}$$

که V_i سرعت متوسط عبوری از گلوگاه برج، V_w سرعت باد عبوری از بالای برج، $\Delta\rho = \rho_a - \rho_i$ ، تفاضل بین دانسیته هوا ρ_a و دانسیته متوسطه هوای داخل برج ρ_i ، g شتاب گرانش، H ارتفاع برج و ν لزجت سینماتیکی می باشد.

از آنجا که در این آزمایش به منظور برقراری جریان داخلی از یک فن مکانیکی استفاده شده است و از طرفی دمای هوای خروجی از برج تاثیر بسزایی بر پدیده ی درپوشی در بالای برج ندارد نیازی به برقراری تشابه فراد نمی باشد.

بررسی عدد رینولدز و فراد نشان می دهد که برقراری این دو پارامتر به صورت همزمان در یک مدل کوچک امکان پذیر نیست. برای برقراری عدد رینولدز و فراد یکسان در مدل و نمونه اصلی، سرعت در پارامتر رینولدز باید به صورت معکوس با مقیاس مدل تغییر کند، درحالی که سرعت در پارامتر فراد به صورت مستقیم با ریشه ی دوم از مقیاس مدل تغییر می کند. برای مثال اگر سرعت هوای خروجی از گلوگاه برج اصلی ۱ متر بر ثانیه و مقیاس مدل ۰/۰۱ برج اصلی باشد، به منظور برقراری همان رینولدز V_i در مدل مورد آزمایش باید ۱۰۰ متر بر ثانیه باشد. درحالی که به منظور رسیدن به همان عدد فراد سرعت باید ۰/۱ متر بر ثانیه باشد.

عدد رینولدز در برج اصلی از مرتبه 10^7 می باشد. اگر بخواهیم به این میزان رینولدز در مدل برج دست یابیم، سرعت باید در گلوگاه برج مدل به ۱ کیلومتر بر ثانیه برسد که ایجاد یک جریان مافوق

صوت می کند که دسترسی به این سرعت با توجه به محدودیت های تونل باد دانشگاه صنعتی شاهرود غیرممکن است. از آنجا که هوای ورودی به داخل برج اصلی بعد از عبور از فین ها و پره های رادیاتور رژیم کاملاً درهم دارد، برقراری دقیق تشابه رینولدز در داخل برج مدل کاری غیر لازم به نظر می رسد و اگر جریان عبوری از داخل برج مدل جریانی مغشوش و درهم باشد دارای رژیمی شبیه به رژیم جریان در برج اصلی می باشد. چون در این آزمایش ما به دنبال نیروهای وارد بر سطوح داخلی برج نیستیم، برقراری رژیمی جریانی بدین شکل در برج مدل، ما را به خواسته مان نزدیک خواهد کرد و چون در برج مدل به منظور برقراری جریان داخلی برج از یک فن مکانیکی استفاده شده است، هوای عبوری از داخل برج کاملاً مغشوش و درهم است.

در مقاله ای از ژای و فو در سال ۲۰۰۵ میلادی با عنوان بهبود بازده برج های خنک کن خشک تحت باد های محیطی با استفاده از دیواره های باد شکن ذکر گردیده است که اگر میزان رینولدز جریان داخلی برج مدل از 3×10^4 فراتر رود، جریان هوا مستقل از پارامتر رینولدز می شود که در آزمایشات انجام گرفته در برخی از موارد، از این میزان رینولدز نیز عبور کردیم. [۳۱]

نسبت سرعت با توجه به میزان سرعت جریان داخل و خارج در برج اصلی و محدودیت های موجود در تونل باد و سرعت هوای داخلی ایجاد شده توسط فن در برج مدل برقرار گردید. از آنجایی که هوای عبوری از بالای برج اصلی تماسی با بدنه برج ندارد و شکل آن به صورت یک جریان یکنواخت می باشد، نیاز به تعریف عدد رینولدز خارجی نیست و برای شبیه سازی آن از هوای ایجاد شده توسط تونل باد در محفظه آزمون که ماهیتی بسیار شبیه به این جریان دارد استفاده شده است. اثرات باد بر برج های خنک کن خشک عبارت است از اثری که باد بر پایین برج با ایجاد توزیع فشار نامطلوب ایجاد می کند و اثری که باد با تغییر دادن پروفیل سرعت در دهانه خروجی و از بین بردن توده هوای گرم خروجی و کاهش دبی بر اثر پدیده درپوشی می گذارد. در این تحقیق از اثرات باد در پایین برج صرف نظر شده و تنها به اثرات باد بر بالای برج پرداخته شده است و چون بعد از ورود

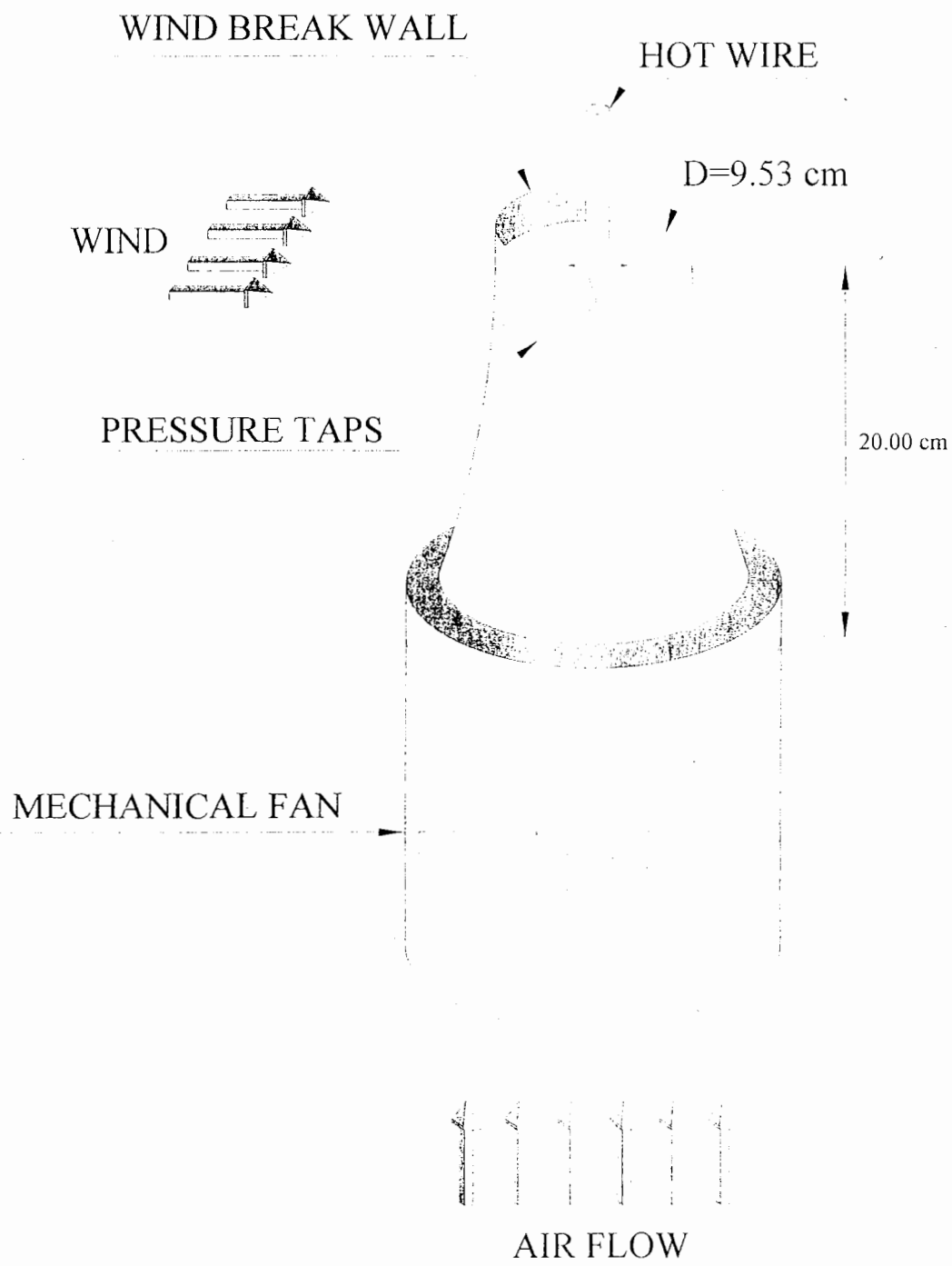
هوا به داخل برج بعد از طی مسیری در امتداد ارتفاع برج، پروفیل سرعت داخلی به صورت یکنواخت در می آید بررسی هر کدام از این پدیده ها به صورت جداگانه امکان پذیر می باشد. [۳]

۶-۴- روش انجام آزمایش

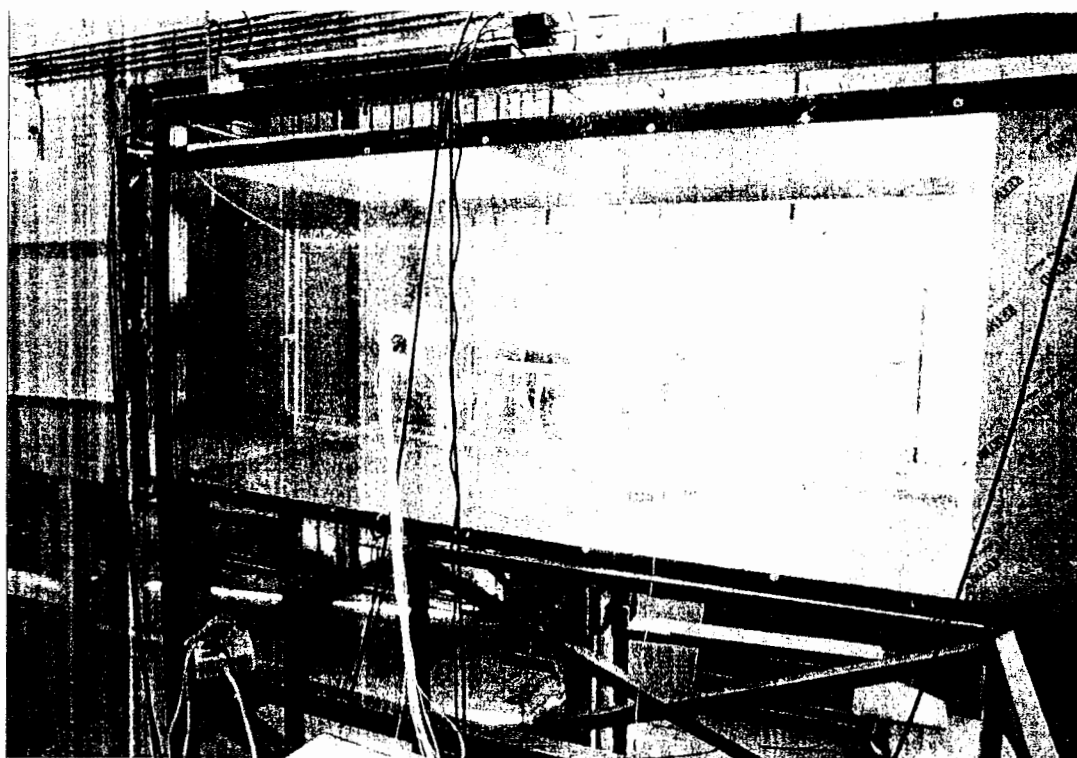
مدل را بر روی پایه ای چوبی نصب کرده و در داخل تونل قرار دادیم تا از تاثیرات لایه مرزی کف و دیواره ها دور بماند. به وسیله یک کانال انتهایی برج مدل را به یک فن مکانیکی دور ثابت متصل کردیم. به منظور بررسی توزیع سرعت در گلوگاه از یک پراب یک بعدی استفاده کردیم. پراب را به صورت موازی جهت جریان در داخل برج و در جهت مخالف با آن قرار دادیم، به طوری که جریان سنج سیم داغ عمود بر جریان قرار گیرد. با توجه به این شکل قرارگیری پراب، سرعتی را که جریان سنج سیم داغ ثبت می کند، جریان مطلق خروجی از دهانه برج است. به وسیله مکانیزم انتقال حرکت، پراب را در راستای جریان باد در تونل از دهانه جلویی تا دهانه پشتی در راستای قطر دهانه حرکت دادیم. تغییرات سرعت در دهانه خروجی برج مدل در راستای قطر عمود بر جریان باد قابل چشم پوشی می باشد و عمده تغییرات در راستای قطر موازی با جریان است.

به منظور بررسی توزیع فشار در داخل گلوگاه برج از ۱۲ لوله تعیین فشار در دور تا دور محیط بیرونی که با زاویه ۳۰ درجه نسبت به خط مرکزی برج قرار گرفتند، استفاده کردیم.

جهت بررسی تاثیر دیواره های باد شکن بر عملکرد برج های خنک کن خشک از دیواره هایی به شکل نیم استوانه از جنس پلاستیک به ارتفاع: ۱-۱/۵-۲-۲/۷-۳ و زاویه های محیطی متفاوت که دقیقاً در مقابل جهت وزش باد قرار گرفتند، استفاده کردیم. شماتیک و شکلی از چیدمان آزمایش در شکل های (۶-۵) و (۶-۶) آمده است.



شکل (۵-۶) شماتیک کلی انجام آزمایش



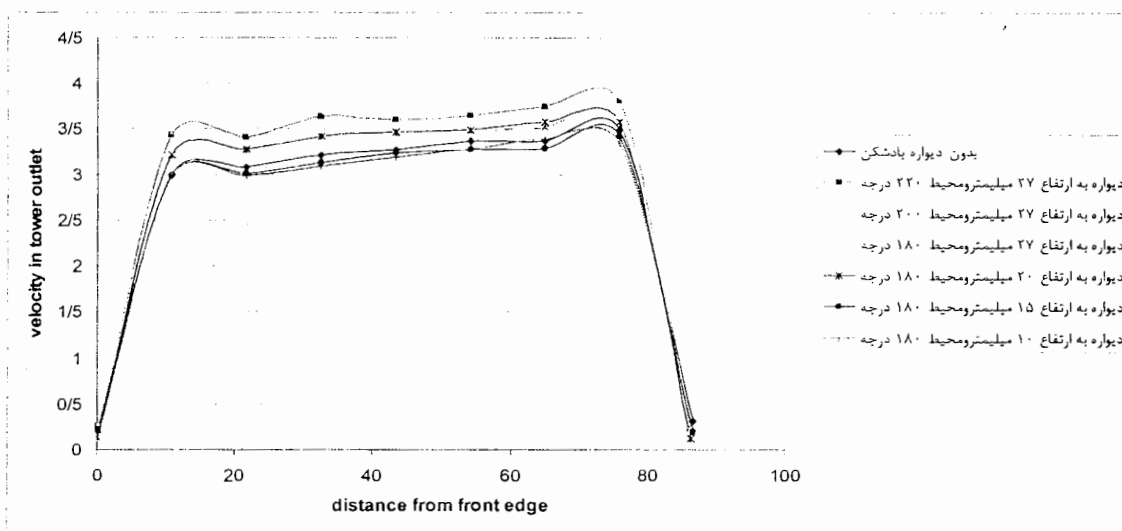
شکل (۶-۶) نمایی از چیدمان آزمایش

فصل هفتم

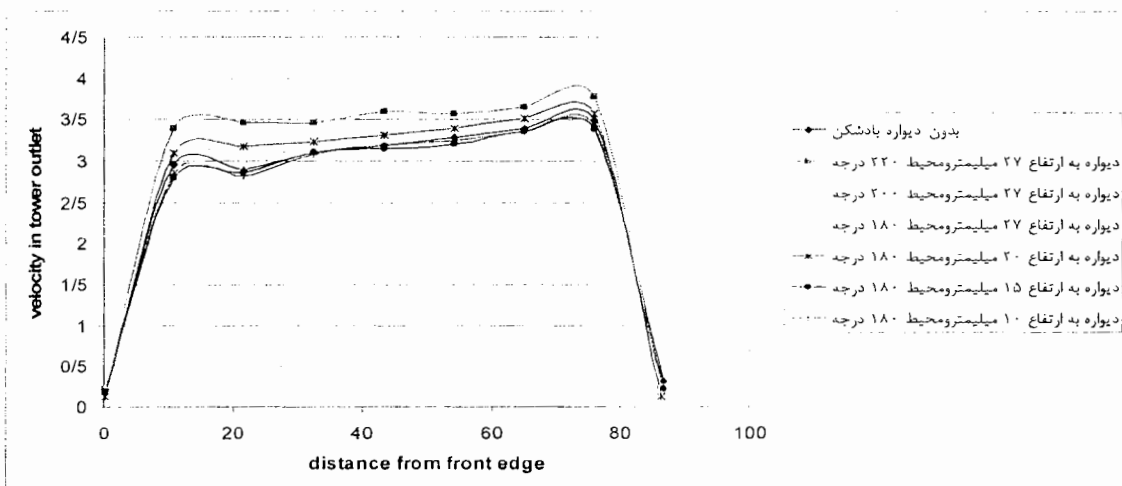
نتایج، بحث و نتیجه گیری

در این فصل به ذکر توزیع پروفیل سرعت و تغییرات فشار میانگین در گلوگاه برج مدل، همچنین نحوه تغییرات دبی جرمی جریان در مقابل سرعت های مختلف باد برای حالت ها و شکل های مختلف دیواره های بادشکن و مقایسه برخی از نتایج با داده های عددی می پردازیم.

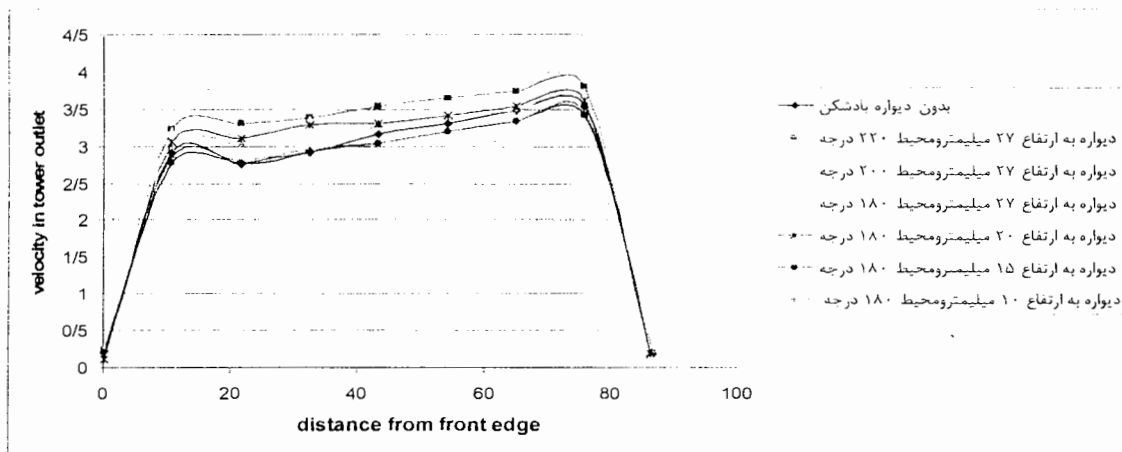
۱-۷- توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل



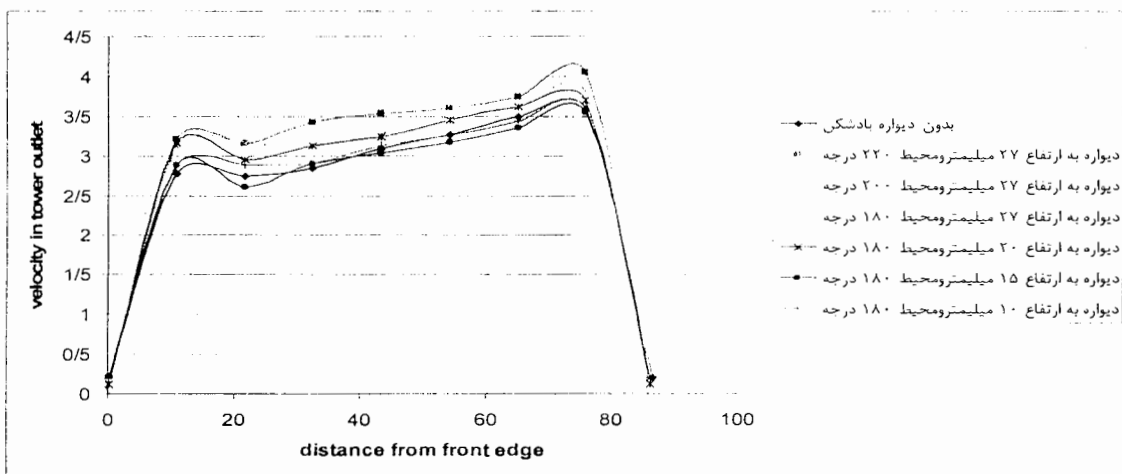
شکل (۱-۷) توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت ۱ متر بر ثانیه در دهانه خروجی و استفاده از دیواره های بادشکن با ابعاد مختلف



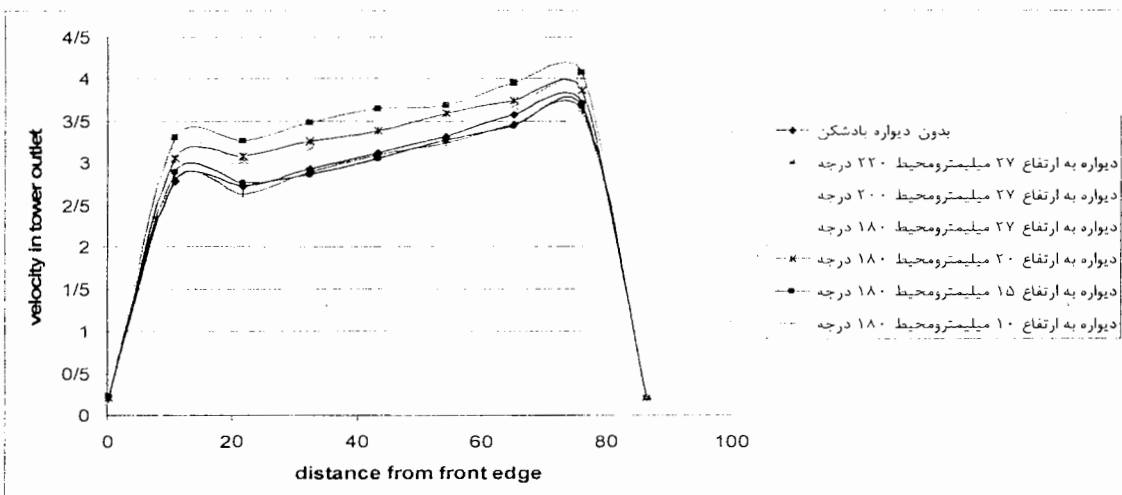
شکل (۲-۷) توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت ۲ متر بر ثانیه در دهانه خروجی و استفاده از دیواره های بادشکن با ابعاد مختلف



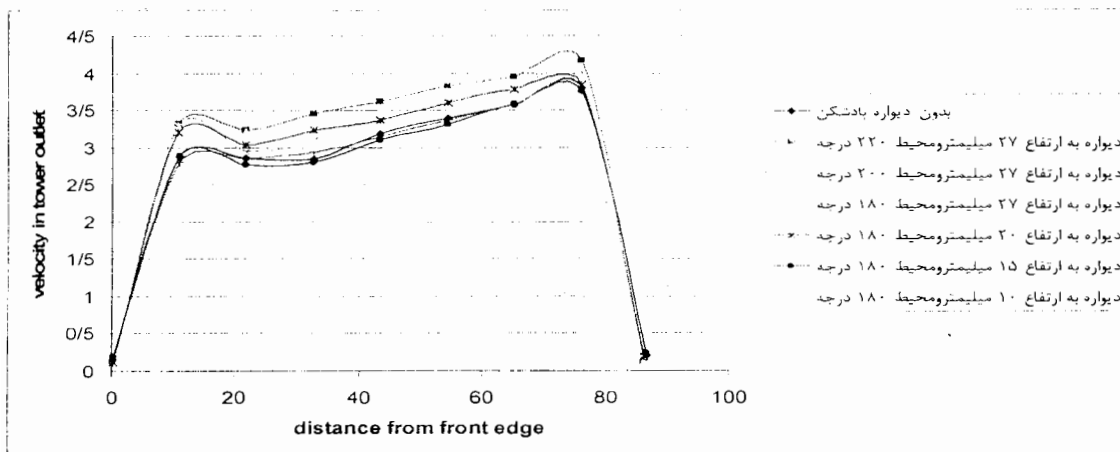
شکل (۳-۷) توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت ۳ متر بر ثانیه در دهانه خروجی و استفاده از دیواره های بادشکن با ابعاد مختلف



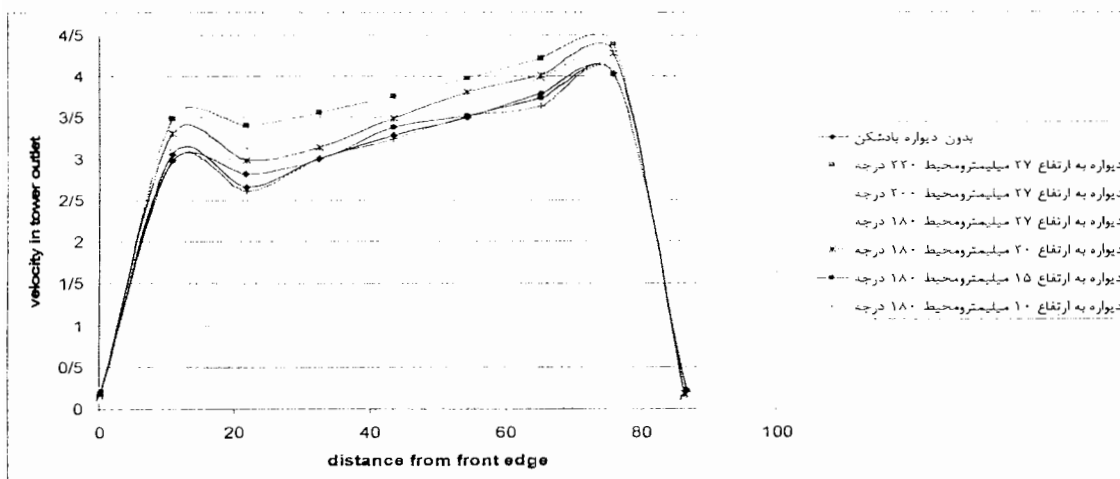
شکل (۴-۷) توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت ۴ متر بر ثانیه در دهانه خروجی و استفاده از دیواره های بادشکن با ابعاد مختلف



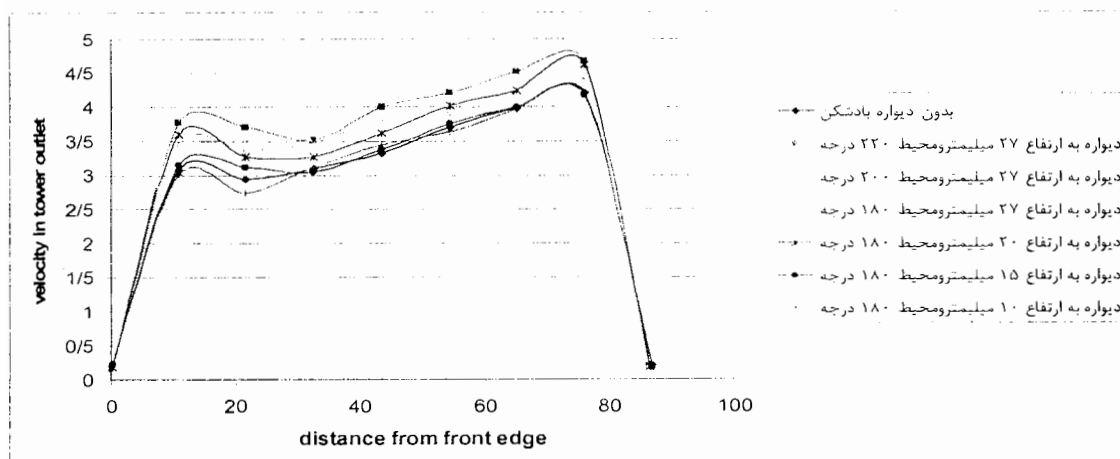
شکل (۵-۷) توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت ۵ متر بر ثانیه در دهانه خروجی و استفاده از دیواره های بادشکن با ابعاد مختلف



شکل (۶-۷) توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت ۶ متر بر ثانیه در دهانه خروجی و استفاده از دیواره های بادشکن با ابعاد مختلف



شکل (۷-۷) توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت ۷ متر بر ثانیه در دهانه خروجی و استفاده از دیواره های بادشکن با ابعاد مختلف



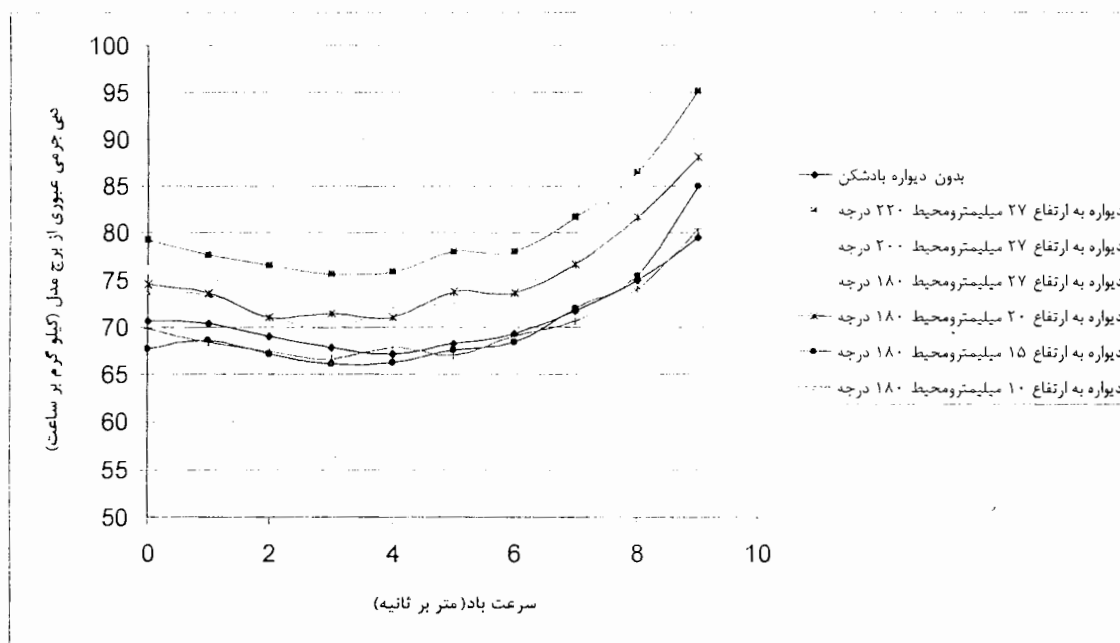
شکل (۸-۷) توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت ۸ متر بر ثانیه در دهانه خروجی و استفاده از دیواره های بادشکن با ابعاد مختلف

در شکل های (۷-۱) - (۷-۸) پدیده درپوشی به وضوح دیده می شود. جریان باد پروفیل سرعت یکنواخت خروجی از دهانه برج را، به جریانی غیر یکنواخت و شیب دار مبدل ساخته است. سرعت در نقاط نزدیک به لبه جلویی بطور کاملاً محسوس کاهش یافته است که این اثر به نوبه خود کاهش دبی خروجی از برج و از بین بردن توده هوای گرم خروجی را به همراه دارد. با افزایش سرعت جریان باد در بالای برج، این شیب بیشتر و بیشتر می گردد، همچنین در این شکل ها تاثیرات قرار گیری دیواره های باد شکن با ارتفاع ها وزوایای محیطی مختلف قابل رویت می باشد. همانطور که پیداست استفاده از دیواره های بادشکن تاثیرات پدیده درپوشی را کاهش داده و در مواردی که از دیواره استفاده شده، شیب پروفیل سرعت کمتر از مقداری است که مدل برج، فاقد دیواره است.

طبق آزمایشاتی که برای ارتفاع های گوناگون دیواره های بادشکن در مقابل جریان وزش باد بعمل آمد معلوم گردید که ارتفاع بهینه برای دیواره ها در حدود ۲۷ میلیمتر می باشد و استفاده از دیواره با ارتفاع کمتر از ۱۵ میلیمتر تاثیر چندانی بر عملکرد برج نخواهد داشت. همچنین معلوم گردید که استفاده از دیواره باد شکن با زاویه محیطی بین ۲۰۰ - ۲۲۰ درجه، مطلوب ترین عملکرد را برای آنها به همراه خواهد داشت.

۷-۲- تغییرات دبی جرمی عبوری از برج مدل

تغییرات دبی جرمی عبوری از برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت های مختلف در دهانه خروجی و استفاده از دیواره های بادشکن با ابعاد گوناگون که در شکل (۷-۹) آمده است نشان می دهد که استفاده از دیواره های بادشکن سبب افزایش دبی عبوری از برج می گردد، به عنوان مثال در صورت استفاده از دیواره به ارتفاع ۲۷ میلیمتر، میزان دبی جرمی عبوری از برج به میزان ۱۴٪ افزایش یافته است. نکته جالب توجه دیگر در این شکل آن است که وزش باد تا نسبت سرعت ۱/۵ باعث کاهش دبی جرمی جریان در برج می گردد و عبور از این میزان نسبت سرعت، افزایش دبی عبوری را به همراه خواهد داشت.



شکل (۷-۹) تغییرات دبی جرمی عبوری از برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت های مختلف در دهانه خروجی و استفاده از دیواره های بادشکن با ابعاد مختلف

۷-۳- مقایسه ای بین نتایج تجربی و عددی

در ادامه برخی از نتایج بدست آمده از آزمایش را همراه با نتایجی که توسط علی عباس نژاد با

استفاده از نرم افزار Fluent انجام گرفته است را به منظور مقایسه می آوریم. [۳]

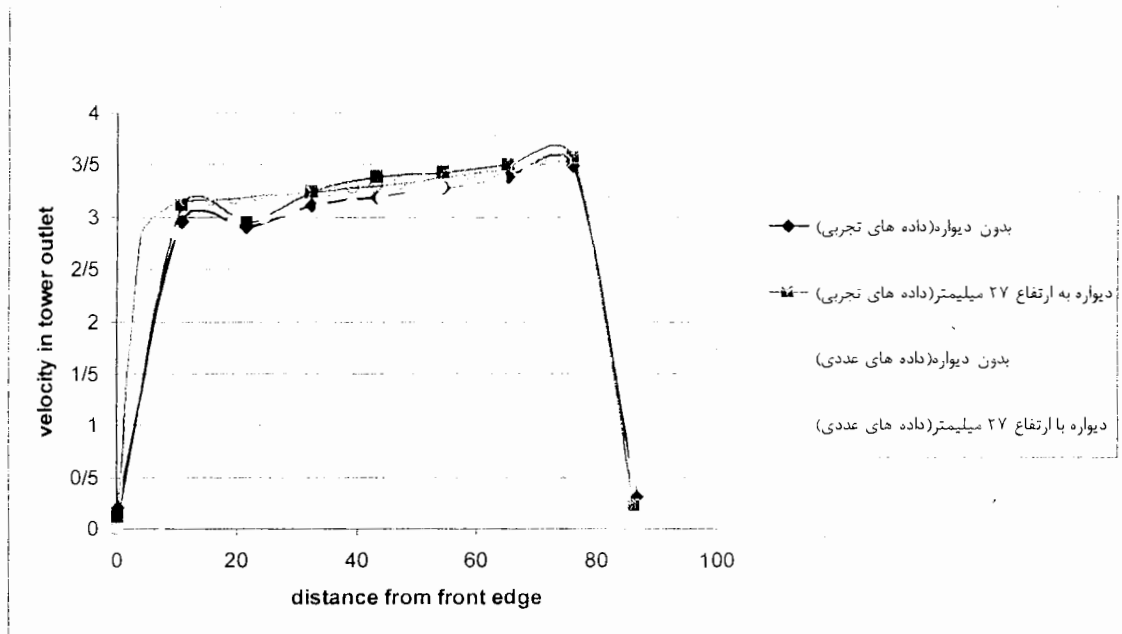
شکل های (۷-۱۰) - (۷-۱۲) این مقایسه را برای سرعت های ۲، ۵ و ۸ متر بر ثانیه نشان

می دهد. همانطور که مشاهده می گردد، پدیده درپوشی در داده های عددی نیز به خوبی قابل رویت

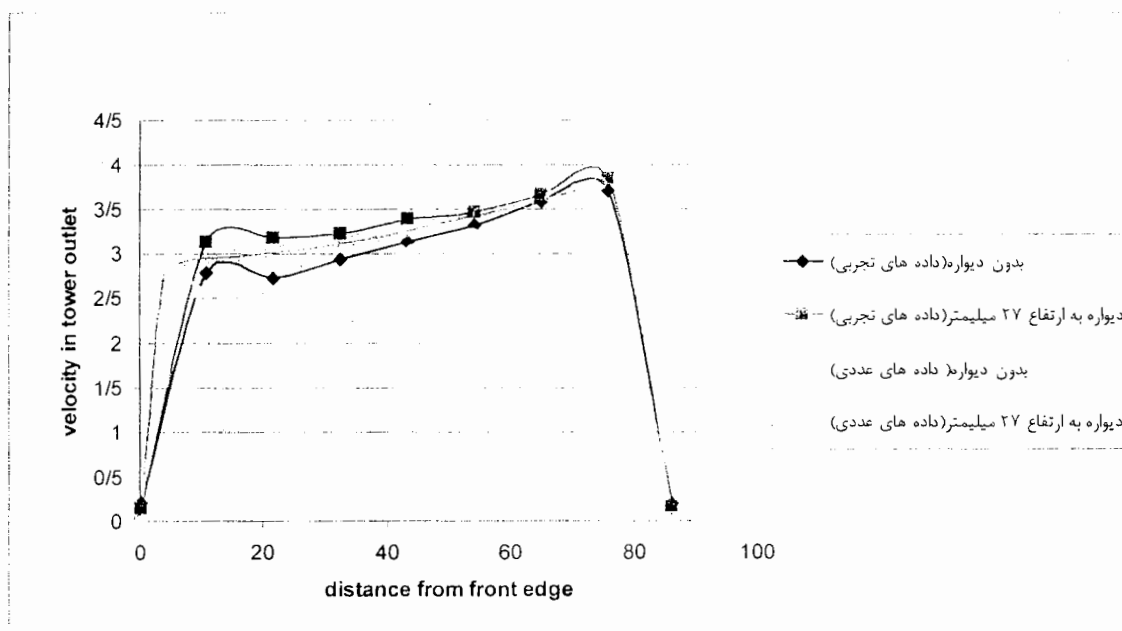
است و نمودارها از تشابه و همخوانی قابل قبول و نزدیک داده های تجربی و عددی خبر می دهند.

شکل های (۷-۱۳) و (۷-۱۴) بردارهای سرعت را در صفحه تقارن برج مدل در باد با سرعت ۹ متر بر

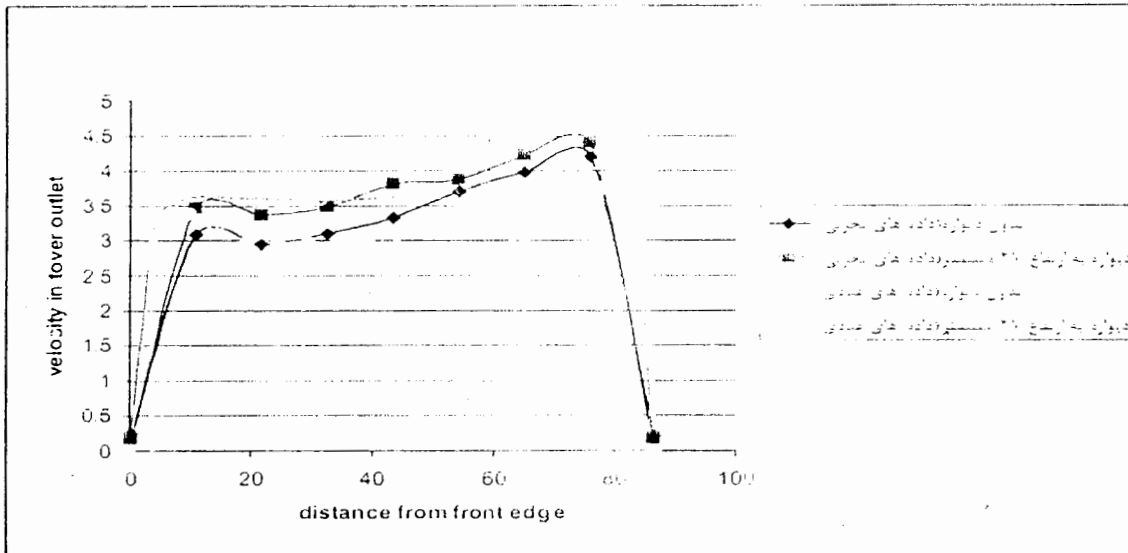
ثانیه نشان می دهد.



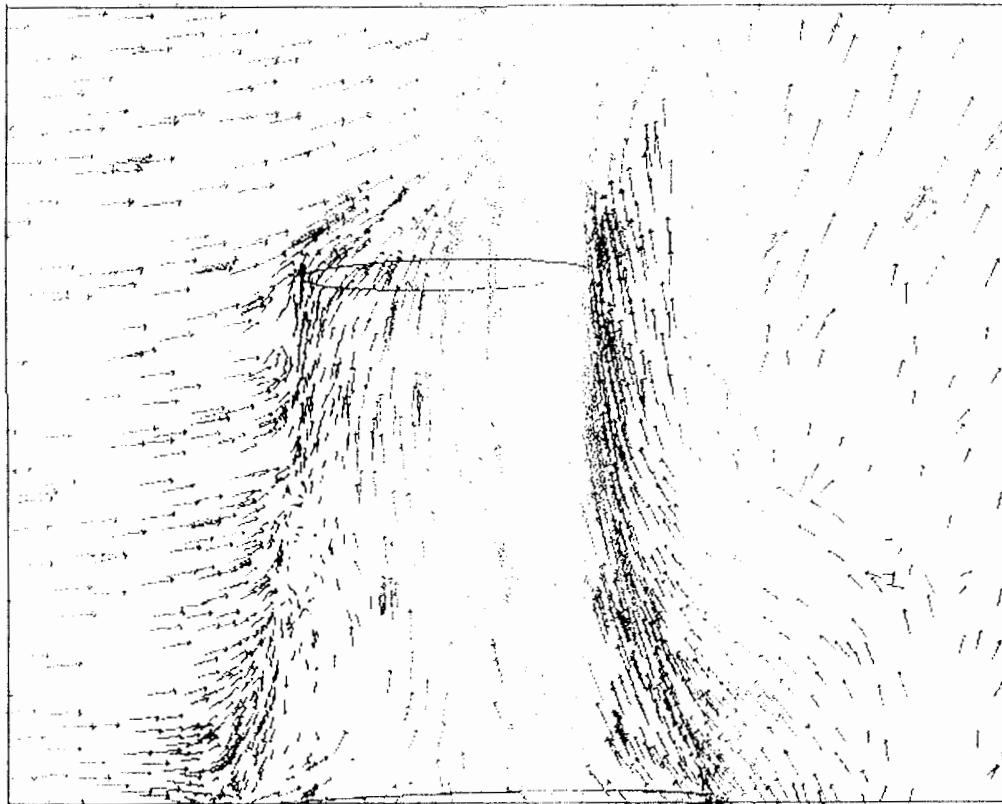
شکل (۷-۱۰) مقایسه توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت ۲ متر بر ثانیه در دهانه خروجی برج برای داده های تجربی و عددی



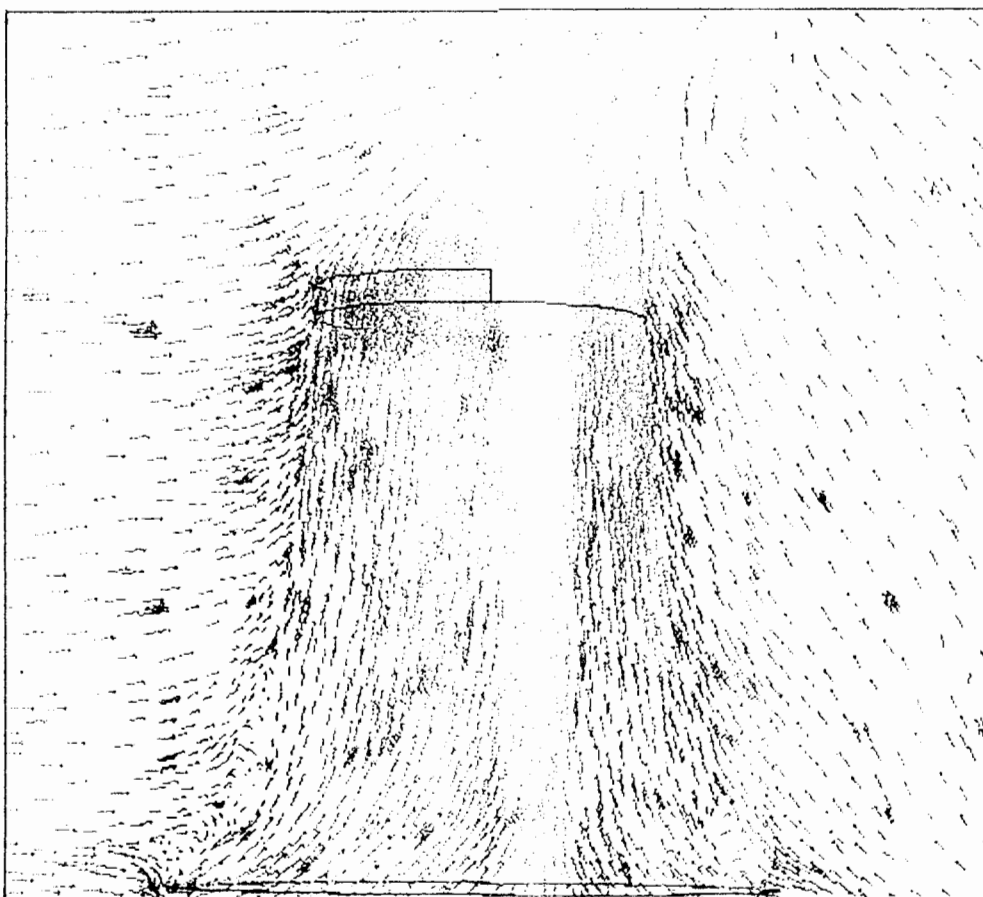
شکل (۷-۱۱) مقایسه توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت ۵ متر بر ثانیه در دهانه خروجی برج برای داده های تجربی و عددی



شکل (۷-۱۲) مقایسه توزیع سرعت در گلوگاه برج مدل، تحت تاثیر باد با سرعت ۸ متر بر ثانیه در دهانه خروجی برج برای داده های تجربی و عددی



شکل (۷-۱۳) بردارهای سرعت در صفحه تقارن برج مدل بدون دیواره بادشکن در مقابل باد با سرعت ۹ متر بر ثانیه [۳]



شکل (۷-۱۴) بردارهای سرعت در صفحه تقارن برج مدل با دیواره بادشکن در مقابل باد با سرعت ۹ متر بر ثانیه [۳]

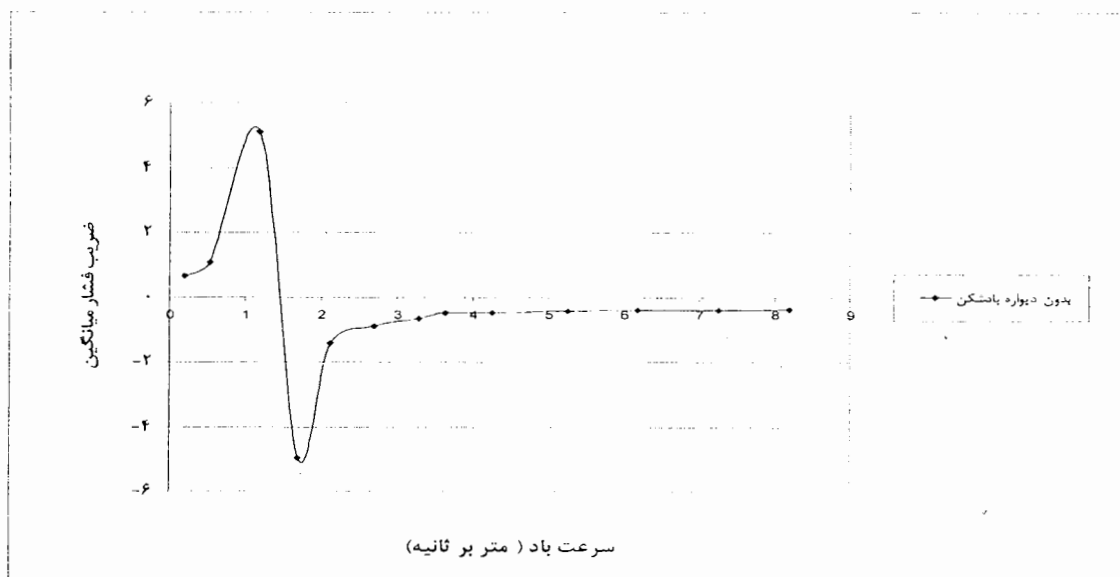
۷-۴- تغییرات ضریب فشار میانگین در گلوگاه برج مدل

نمودارهای مربوط به تغییرات ضریب فشار میانگین در گلوگاه برج مدل برای سرعت‌های متفاوت باد در بالای برج مدل در شکل‌های (۷-۱۵) و (۷-۱۶) آورده شده است. این مقادیر با میانگین‌گیری از ضریب فشار اندازه‌گیری شده توسط فشارسنج در گلوگاه برج مدل بدست آمده است. ضریب فشار عبارت است از:

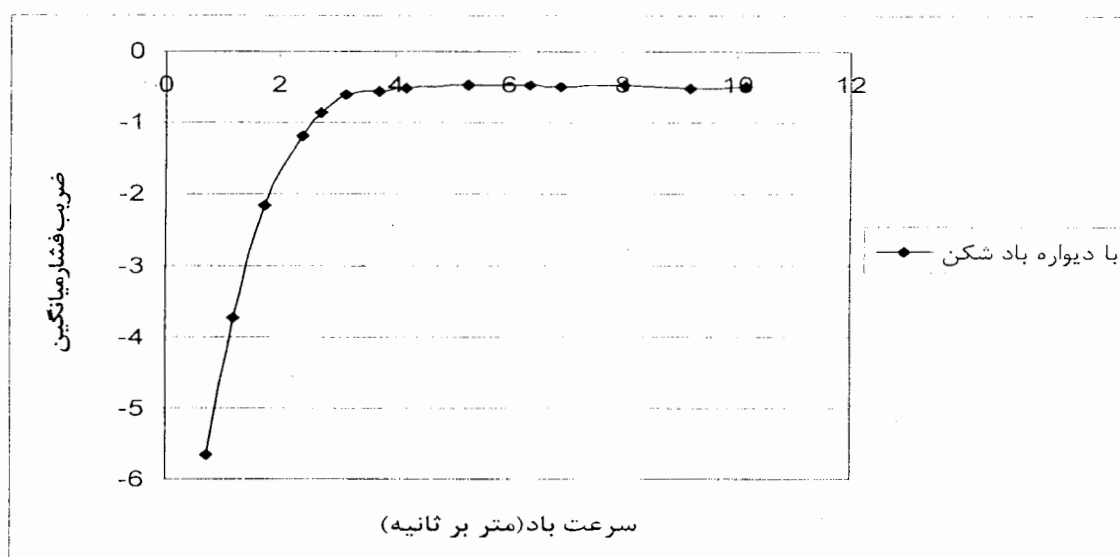
$$C_p(\theta, h) = (P_\theta - P_\infty) / \frac{1}{2} \rho_\infty V_i^2 \quad (۷-۱)$$

که P_θ فشار محیطی در گلوگاه برج مدل، P_∞ فشار استاتیک جریان هوای عبوری از برج، ρ_∞

دانشیته هوا و V_i سرعت متوسط جریان هوای عبوری از گلوگاه می باشد.



شکل (۷-۱۵) تغییرات ضریب فشار میانگین در گلوگاه برج مدل، بر حسب سرعت باد، بدون استفاده از دیواره بادشکن



شکل (۷-۱۶) تغییرات ضریب فشار میانگین در گلوگاه برج مدل، بر حسب سرعت باد، با استفاده از دیواره بادشکن

مقادیر مثبت ضریب فشار میانگین در شکل (۷-۱۵) برای برج فاقد دیواره بادشکن در سرعت های پائین باد، بیانگر کاهش سرعت در دهانه برج می باشد که افزایش فشار را به همراه دارد و این در حالی است که این کاهش سرعت در دهانه، برای برج دارای دیواره بادشکن در شکل (۷-۱۶) دیده نمی شود و وجود دیواره مانع از مسدود شدن دهانه توسط باد گردیده است. با افزایش سرعت باد، فشار در دهانه برج کاهش می یابد و این فشار منفی ایجاد شده سبب مکش در برج می گردد که همانطور که ذکر شد، افزایش دبی را هم برای برج با دیواره بادشکن و هم برج فاقد دیواره به همراه داشته است.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج ذکر شده، باد با ایجاد پدیده درپوشی در دهانه خروجی سبب کاهش دبی عبوری از برج می‌گردد که علت آن ناشی از تفاوت میان اندازه حرکت توده هوای گرم خروجی از برج و جریان باد است. بررسی‌های انجام گرفته نحوه تاثیر گذاری باد بر بالای برج خنک کن را به وضوح آشکار ساخت و مشخص گردید که استفاده از دیواره‌های باد شکن در بالای برج و در مقابل جریان باد غالب تا حد مطلوبی سبب کاهش این پدیده می‌گردد.

دو پارامتر تاثیر گذار در عملکرد دیواره‌های باد شکن عبارتند از:

۱- ارتفاع دیواره

۲- گستره محیطی

نتایج نشان داد که دیواره‌ای به شکل نیمه استوانه با ارتفاعی که حدوداً ۰/۱۳۵ ارتفاع برج اصلی است و دارای گستره محیطی به اندازه ۲۲۰ درجه است بهترین عملکرد را در کاهش پدیده درپوشی خواهد داشت.

Abstract

Natural draft dry cooling towers are a type of cooling towers which are used under certain conditions such as insufficient water supplies. It is found that the cooling efficiency depends on environmental conditions such as ambient temperature and speed of cross-winds.

Cross-wind can significantly reduce the cooling efficiency of natural-draft dry cooling towers. This dissertation investigates solutions that may improve cooling performance of cooling towers in windy days using the wind tunnel and hot-wire anemometer facilities.

Finally, changes in the shape of cooling tower (using wind-break walls) are introduced to improve the tower performance and effects of different wind break walls. The results show that using wind break walls at the outlet of the tower will improve the tower performance under cross-wind condition.

Keywords: Dry-cooling tower, Cross-wind, Wind-break walls, Wind tunnel, Hot-wire anemometer.



Shahrood University of Technology

**M.Sc. Dissertation
Mechanical Engineering - Energy Conversion**

Title:

**Experimental investigation of wind-break walls
on the top of natural draft dry cooling towers**

Supervisors:

**Dr. Mohammad Hassan Kayhani
Dr. Mohammad Mohsen Shahmardan**

**Student:
Amir Molavi**

Feb ۲۰۰۹