





پایان نامه کارشناسی ارشد
مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

عنوان:

تحقیق تجربی اثر بادهای محیطی بر عملکرد برجهای خنک کن خشک

اساتید راهنما:

دکتر محمد حسن کیهانی

دکتر محمد محسن شاه مردان

استاد مشاور:

دکتر محمد علی اردکانی

دانشجو:

رسول محبی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع:

عنوان پایان نامه:

تحقیق تجربی اثر بادهای محیطی بر عملکرد برجهای خنک کن خشک

دانشجو:

رسول محبی - ۸۴۴۰۳۱۱

جلسه دفاع پایان نامه فوق در تاریخ با حضور اساتید زیر برگزار گردید و با

ارزیابی گردید.

۱- دکتر محمد حسن کیهانی استاد راهنما ۱

۲- دکتر محمد محسن شاه مردان استاد راهنما ۲

۳- دکتر محمد علی اردکانی استاد مشاور

۴- دکتر محمد جواد مغربی استاد داور

۵- دکتر محمود فرزانه گرد استاد داور

۶- دکتر محمود شریعتی نماینده تحصیلات تکمیلی

تقدیم :

با سپاس فراوان از خداوند منان که تا به امروز مرا یاری نموده است این پایان نامه را به عزیزترین عزیزانم، پدر و مادرم تقدیم می کنم.

تقدیر و تشکر:

پس از حمد و ستایش خداوند یکتا وظیفه خود می دانم که تشکر و قدرانی خود را از جناب آقای دکتر محمد حسن کیهانی و جناب آقای دکتر محمد محسن شاه مردان که در انجام پروژه مرا یاری نمودند و با راهنمایی های ایشان انجام پروژه مقدر گردید و زحمات بی شائبه دکتر محمد علی اردکانی که راهنمایی ها و حمایت های ارزنده شان همواره راهگشا و روشنی بخش پیشبرد اهداف این پایان نامه بود، ابراز نمایم.

چکیده

برج های خنک کن خشک یکی از متداول ترین برج ها در اکثر نیروگاههای موجود در مناطق کم آب می باشند. از جمله مهمترین عواملی که در رابطه با عملکرد این برج ها همواره مورد توجه بوده است، اثر شرایط محیطی بویژه وزش باد است که باعث کاهش بازدهی برج ها می گردد. وزش باد منجر به تغییر فشار استاتیکی در ورودی برج شده و بر بازدهی برج تاثیر می گذارد.

جهت بررسی این اثر می توان از روشهای عددی، تجربی و میدانی استفاده نمود. هر کدام از این روشها دارای مزایا و معایب مربوط به خود بوده و مکمل هم می باشند. با توجه به مشکلات روشهای میدانی و نیاز به بررسی صحت نتایج عددی، استفاده از روشهای تجربی از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

در این پایان نامه با مدلسازی یک برج خنک کن و استفاده از تونل باد، توزیع فشار در ورودی برج بررسی می گردد. همچنین جهت کاهش اثر نامطلوب باد، استفاده از دیواره های باد شکن پیشنهاد شده و اثرات آن مورد بررسی قرار گرفته است.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
تقديم	أ
تقدير و تشكر	ب
چكیده	ج
فهرست مطالب	د
فهرست علائم و نشانه ها	ی
فهرست جداول	م
فهرست اشكال	ن
فصل اول - مقدمه	۱
۱-۱- سیستم های خنک کن	۲
۱-۱-۱- سیستم خنک کن تر	۳

- ۴-۱-۱- سیستم خنک کن خشک ۴
- الف - سیستم های خنک کن خشک مستقیم ۴
- ب - سیستم های خنک کن خشک غیر مستقیم ۵
- ۳-۱-۱- تقسیم بندی برجهای خنک کن ۷
- الف - برج خنک کن جابجایی طبیعی ۷
- ب - برج خنک کن جابجایی مکانیکی ۸
- الف - برج خنک کن جریان مخالف ۹
- ب - برج خنک کن جریان متقاطع ۱۰
- ۲-۱- اثر شرایط محیطی ۱۰
- ۱-۲-۱- دمای محیط ۱۱
- ۲-۲-۱- رطوبت نسبی ۱۲
- ۳-۲-۱- سرعت باد ۱۲
- ۱۴- فصل دوم - هدف از انجام پایان نامه ۱۴
- ۱-۲- هدف از انجام این پایان نامه ۱۵
- ۲-۲- روش های تحقیق در زمینه برج خنک کن ۱۵
- ۳-۲- مبانی تئوریک تحقیق ۱۷
- الف - اثر باد بر هوای ورودی به برج و عدم توزیع یکنواخت جریان هوا
در سطوح خنک کننده ۱۷
- ب - انحراف در مسیر هوای خروجی از برج ۱۸
- ۱۹- فصل سوم - تاریخچه ۱۹

- ۳-۱- مروری بر اقدامات انجام گرفته ۲۰
- فصل چهارم - تئوری و اصول عملکرد دستگاه جریان سنج سیم داغ ۳۱
- ۴-۱- کمیت‌های مهم جریان سیال ۳۲
- ۴-۲- ویژگی‌های دستگاه جریان سنج سیم داغ ۳۴
- ۴-۲- ویژگی‌های دستگاه جریان سنج سیم داغ ۳۴
- ۴-۳- اجزای تشکیل دهنده دستگاه جریان سنج سیم داغ ۳۶
- ۴-۴- مدار الکترونیکی دستگاه جریان سنج سیم داغ ۳۷
- ۴-۴-۱- مدار الکترونیکی دما ثابت ۳۷
- ۴-۴-۲- نسبت فراگرمایی ۳۹
- ۴-۵- اصول عملکرد دستگاه جریان سنج سیم داغ ۴۰
- ۴-۶- انتقال حرارت ۴۲
- ۴-۶-۱- انتقال حرارت از سیمی با طول محدود (سنسور سیم داغ) ۴۳
- ۴-۷- پاسخ فرکانسی دستگاه جریان سنج سیم داغ ۴۶
- ۴-۷-۱- پاسخ فرکانسی سنسور سیم داغ ۴۷
- ۴-۷-۲- پاسخ فرکانسی جریان سنج سیم داغ ۴۷
- ۴-۸- اثر دما بر روی اندازه گیری دستگاه جریان سنج سیم داغ ۴۹
- ۴-۸-۱- روش‌های کاهش اثر دما بر اندازه‌گیری سرعت جریان سیال ۵۳
- الف- اصلاح اثر دما به صورت خودکار ۵۳
- ب- اصلاح اثر دما به صورت تحلیلی ۵۵
- ۴-۹- اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان سیال ۵۷

- ۴-۹-۱- رابطه سرعت جریان سیال و ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ.....۵۷
- ۴-۹-۲- اندازه‌گیری جریان سیال یک بعدی.....۵۹
- ۴-۹-۳- تبدیل ولتاژ به سرعت لحظه‌ای و تجزیه و تحلیل آن.....۵۹
- ۴-۹-۴- تجزیه و تحلیل سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری شده.....۶۱
- ۴-۹-۵- بررسی اثر شدت اغتشاشهای جریان سیال در اندازه‌گیری
- سرعت جریان سیال.....۶۴
- فصل پنجم - تونل باد.....۶۸**
- ۵-۱- آزمایشهای تونل باد.....۶۹
- ۵-۲- تاریخچه تونل باد.....۷۱
- ۵-۳- انواع تونل باد.....۷۳
- ۵-۳-۱- ویژگیهای تونل باد مدار باز.....۷۸
- ۵-۳-۲- ویژگیهای تونل باد مدار بسته.....۷۹
- ۵-۴- اجزای تونل باد.....۸۰
- ۵-۴-۱- اتاق آزمون.....۸۱
- ۵-۴-۲- دیفیوزر.....۸۱
- ۵-۴-۳- نازل.....۸۳
- ۵-۴-۴- گوشه.....۸۴
- ۵-۴-۵- اتاق آرامش.....۸۵
- ۵-۴-۶- فن.....۸۷
- الف- فن محوری.....۸۹

- ب- فن سانتریفوژ ۹۰
- ۵-۵- تونل باد ویژه با سرعت کم ۹۱
- ۵-۵-۱- تونل باد لایه مرزی ۹۱
- ۵-۶- تشابه جریان در تونل باد ۹۳
- ۵-۶-۱- آنالیز ابعادی ۹۳
- ۵-۶-۲- پارامترهای مهم در جریان سیال ۹۵
- ۵-۶-۳- تشابه هندسی، سینماتیکی و دینامیکی ۹۷
- ۵-۶-۴- معادله‌های اساسی حرکت جریان سیال ۹۸

فصل ششم - اجزای جانبی بکار رفته در آزمایش و کالیبراسیون دستگاه

- جریان سنج سیم داغ ۱۰۰
- ۶-۱- پراب سیم داغ ۱۰۱
- ۶-۲- سنسور سیم داغ ۱۰۳
- ۶-۳- پراب یک بعدی ۱۰۵
- ۶-۴- مکانیزم انتقال دهنده پراب ۱۰۷
- ۶-۵- لوله استاتیکی پیتوت و مبدل الکتریکی فشار ۱۰۹
- ۶-۶- اندازه‌گیری ناحیه ویک با استفاده از رک فشار ۱۱۱
- ۶-۷- تطبیق دهنده سیگنال ۱۱۲
- ۶-۸- جمع‌آوری و دریافت داده‌ها ۱۱۵
- ۶-۹- نرم‌افزار ۱۱۷
- ۶-۹-۱- مدیریت داده‌ها ۱۱۷

- ۱۱۷.....تنظیم سخت‌افزار جریان سنج سیم داغ.....۲-۹-۶
- ۱۱۸.....توانایی حرکت پراب.....۳-۹-۶
- ۱۱۹.....انجام آزمایش اولیه.....۴-۹-۶
- ۱۱۹.....انجام آزمایش دقیق.....۵-۹-۶
- ۱۲۰.....کالیبراسیون دستگاه جریان سنج سیم داغ.....۱۰-۶
- ۱۲۱.....معادله کالیبراسیون.....۱-۱۰-۶
- ۱۲۱.....الف - تقریب نمودن با روش معادله توانی (King).....
- ۱۲۲.....ب - تقریب نمودن با روش اسپلاین (Spline).....
- ۱۲۳.....ج - تقریب نمودن با روش چند جمله‌ای.....
- ۱۲۴.....**فصل هفتم - اندازه گیری نیروها**.....
- ۱۲۶.....۱-۷- اندازه گیری نیرو به روش اندازه گیری ممنتوم.....
- ۱۳۲.....۲-۷- اندازه گیری نیرو به روش اندازه گیری توزیع فشار.....
- ۱۳۴.....۳-۷- اندازه گیری نیروها و گشتاور ها توسط بالانس ها.....
- ۱۳۷.....**فصل هشتم - روش انجام آزمایش و بررسی نتایج**.....
- ۱۳۸.....۱-۸- مشخصات تونل باد.....
- ۱۴۵.....۲-۸- مدل آزمایش.....
- ۱۴۵.....۱-۲-۸- مدل استوانه.....
- ۱۴۶.....۲-۲-۸- مدل برج خنک کن.....
- ۱۴۸.....۳-۸- نتایج حاصل از مدل استوانه.....
- ۱۵۴.....۴-۸- نتایج حاصل از مدل برج خنک کن.....

- فصل نهم - بحث و نتیجه گیری ۱۶۱
- ۱-۹-۱- ارائه راه حل ۱۶۲
- ۲-۹- دیواره های باد شکن در پایین برج ۱۶۳
- ۳-۹- دیواره های باد شکن ۳ cm ۱۶۴
- ۱-۳-۹- استفاده از دو دیوار باد شکن با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم ۱۶۴
- ۲-۳-۹- استفاده از دو دیوار باد شکن با زاویه ۱۸۰ درجه نسبت به هم ۱۶۹
- ۳-۳-۹- استفاده از چهار دیوار باد شکن با زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم ۱۷۴
- ۴-۳-۹- استفاده از هشت دیوار باد شکن با زاویه ۴۵ درجه نسبت به هم ۱۷۹
- ۴-۹- دیواره های باد شکن ۶ cm ۱۸۳
- ۱-۴-۹- استفاده از دو دیوار باد شکن با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم ۱۸۳
- ۲-۴-۹- استفاده از دو دیوار باد شکن با زاویه ۱۸۰ درجه نسبت به هم ۱۸۷
- ۳-۴-۹- استفاده از چهار دیوار باد شکن با زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم ۱۹۱
- ۴-۴-۹- استفاده از هشت دیوار باد شکن با زاویه ۴۵ درجه نسبت به هم ۱۹۵
- ۵-۹- پیشنهادات ۱۹۸
- منابع ۱۹۹

فهرست علائم و نشانه ها

ضریب توزیع فشار	C_p
فشار میانگین	P_θ
فشار استاتیک جریان ورودی	P
دانسیته هوا	ρ
لزجت سینماتیکی	μ

سرعت جریان هوا	U
دمای جریان سیال	T
نوع زبری	S
نسبت ارتفاع نقطه مورد آزمایش به کل ارتفاع مدل	ζ
ارتفاع نقطه مورد آزمایش	z
ارتفاع مدل	H
سرعت لحظه‌ای جریان سیال	$\vec{V}(t)$
جریان الکتریکی	I
مقاومت در پل وتسون	R
مقاومت پراب	R_p
مقاومت سنسور	R_w
مقاومت کابل پراب	R_L
مقاومت سنسور حساس به دما	R_c
دمای سنسور در مقاومت R_w	T_w
ولتاژ بالای پل وتسون	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 پранتل	Pr
عدد ناسلت	Nu
عدد ماخ	M
عدد گرافش	Gr
سرعت صوت	c
ضریب انبساط حجمی سیال	β
عدد ناوسن	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

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	Tu
انحراف معیار سرعت جریان سیال	u_{rms}
چولگی	S
برجستگی	K
قطر کره	d_c
نیروی پسا	D
جرم سیال	m
شتاب سیال	a
مشخصه بعد طول سیال	L
شتاب گرانش	g
مولفه بردار سرعت در جهت x	U
مولفه بردار سرعت در جهت y	V
مولفه بردار سرعت در جهت z	W
مولفه x نیروی برآیند در جهت x	F_x
قطر استوانه	d

l	طول استوانه
S	مساحت جانبی استوانه
C_D	ضریب نیروی پسا
τ	تنش برشی
C_f	ضریب اصطکاک پوسته ای
α	زاویه بین دو دیواره بادشکن
β	زاویه چرخش برج نسبت به محور گذرنده از مرکز آن
η	نرخ افزایش میانگین توزیع فشار در برج

فهرست جداول

عنوان صفحه

جدول (۱-۴) نسبت سرعت اندازه گیری شده به سرعت واقعی در شدت اغتشاشهای

مختلف جریان ۶۶

جدول (۱-۵) طبقه بندی انواع تونل باد بر حسب سرعت جریان هوا در اتاق آزمون ۷۴

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل (۱-۱) سیستم خنک کن یک بار گذر	۳
شکل (۲-۱) سیستم خنک کن خشک مستقیم	۵
شکل (۳-۱) برج خنک کن خشک غیر مستقیم و کندانسور تماس مستقیم	۶
شکل (۴-۱) برج خنک کن جابجایی طبیعی	۷
شکل (۵-۱) برج خنک کن دمشی	۸
شکل (۶-۱) برج خنک کن مکشی	۹

- شکل (۷-۱) برج خنک کن جریان مخالف ۱۰
- شکل (۸-۱) برج خنک کن جریان متقاطع ۱۰
- شکل (۱-۲) آرایش مختلف خنک کننده ها ۱۸
- شکل (۱-۳) توزیع فشار برجها و مدلهای آنها ۲۲
- شکل (۲-۳) توزیع فشار برجهای خنک کن ۲۳
- شکل (۳-۳) توزیع فشار داخلی و خارجی برج ۱۷
- شکل (۴-۳) توزیع فشار برای دو برج در آرایش پشت سر هم با فواصل مختلف از هم ۲۵
- شکل (۵-۳) توزیع فشار در گلوبی برج نسبت به سرعت جریان باد به سرعت میانگین ورودی به رادیاتورها ۲۶
- 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 ۲۹
- شکل (۱-۴) شماتیک سیستم دستگاه جریان سنج سیم داغ به همراه تجهیزات جانبی ۳۶
- شکل (۲-۴) مدار الکترونیکی دما ثابت CT ۳۸
- شکل (۳-۴) شماتیک مدار اندازه گیر منحنی مشخصه سنسور سیم داغ ۴۱
- شکل (۴-۴) منحنی مشخصه پراب با سنسور سیم داغ از جنس تنگستن به قطر $5 \mu m$ و طول $1/25 \text{ mm}$ در سرعتهای مختلف جریان هوا ۴۱
- شکل (۵-۴) هندسه سنسور سیم داغ و توازن انرژی برای المان سنسور سیم داغ ۴۴
- 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 (۴-۸) کاهش ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ برای سنسور
 فیلم داغ بر اثر افزایش دمای محیط در نسبت فراگرمایی ۰/۴ ۵۰
- شکل (۴-۹) روند کاهش ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ برای سنسور
 فیلم داغ بر اثر افزایش دمای محیط در سرعت $U = 10 \text{ m/s}$ ۵۱
- 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... ۵۲
- شکل (۴-۱۱) نحوه‌ی قرارگیری پراب سنسور سیم داغ به همراه مقاومت جبران کننده
 در مدار الکترونیکی دما ثابت CT ۵۴
- شکل (۴-۱۲) بردار سرعت و مؤلفه‌های آن نسبت به مختصات سنسور ۵۸
- شکل (۴-۱۳) بررسی سرعت لحظه‌ای ۶۳
- شکل (۴-۱۴) سنسور سیم داغ در جریان یک بعدی با شدت اغتشاشهای بالا ۶۴
- شکل (۴-۱۵) ضریب اصلاح سرعت متوسط جریان سیال ناشی از شدت اغتشاشهای
 جریان سیال ۶۶
- شکل (۴-۱۶) اثر شدت اغتشاشهای جریان سیال بر مقادیر اندازه‌گیری شده
 تنشهای رینولدز ۶۷
- شکل (۵-۱) تونل باد ساخت برادران رایت در سال ۱۹۰۱ ۷۳
- شکل (۵-۲) محدوده ماخ برای انواع وسایل آیرودینامیکی ۷۴
- شکل (۵-۳) تونل باد مدار باز مکنده ۷۵
- شکل (۵-۴) تونل باد مدار باز دمنده ۷۶
- شکل (۵-۵) تونل باد مدار بسته با اتاق آزمون بسته ۷۶

- شکل (۵-۶) تونل باد مدار بسته با اتاق آزمون باز..... ۷۶
- شکل (۵-۷) نمای شماتیک از تونل باد مدار بسته با اتاق آزمون باز..... ۷۷
- شکل (۵-۸) اتاق آزمون نیمه باز..... ۷۸
- شکل (۵-۹) دیفیوزر تونل باد مدار بسته که در پایین دست فن قرار دارد..... ۸۲
- شکل (۵-۱۰) نازل تونل باد شرکت مزدا، ژاپن..... ۸۳
- شکل (۵-۱۱) گوشه به ارتفاع ۱۲ متر و پره های راهنما (تونل باد شرکت مزدا)..... ۸۴
- شکل (۵-۱۲) اتاق آرامش تونل باد..... ۸۵
- شکل (۵-۱۳) لانه زنبوری..... ۸۶
- شکل (۵-۱۴) فن به قطر ۸ متر (تونل باد شرکت مزدا)..... ۸۸
- شکل (۵-۱۵) نمونه ای از یک فن جریان محوری..... ۹۰
- شکل (۵-۱۶) نمونه ای از فن سانتریفوژ..... ۹۱
- شکل (۵-۱۷) لایه مرزی باد بر روی یک ناحیه..... ۹۲
- شکل (۵-۱۸) استفاده از انواع زبری در ابتدای اتاق آزمون تونل باد لایه مرزی..... ۹۳
- شکل (۶-۱) نمایی از پراب..... ۱۰۱
- شکل (۶-۲) پراب با سنسور روکش دار و بدون روکش..... ۱۰۵
- شکل (۶-۳) پراب مایل SY (فراسنجش صبا WU11)..... ۱۰۶
- شکل (۶-۴) پراب لایه مرزی (فراسنجش صبا WP13)..... ۱۰۶
- شکل (۶-۵) مکانیزم انتقال دهنده پراب..... ۱۰۸
- شکل (۶-۶) مکانیزم انتقال دهنده پراب که بر روی سقف اتاق آزمون نصب شده است..... ۱۰۹
- شکل (۶-۷) لوله استاتیکی پیتوت..... ۱۱۰

- شکل (۶-۸) رک فشار ۱۱۲
- شکل (۶-۹) مدار شماتیک تطبیق دهنده سیگنال ۱۱۳
- شکل (۶-۱۰) منحنی کالیبراسیون و ولتاژ خروجی قسمت‌های مختلف واحد تطبیق دهنده سیگنال ۱۱۴
- شکل (۶-۱۱) نمونه‌هایی از کارت (Data Acquisition) DAQ ۱۱۶
- شکل (۷-۱) ناحیه دنباله در پشت یک استوانه ۱۲۸
- شکل (۷-۲) ایجاد اوریفیس بر روی یک ایرفویل برای اندازه‌گیری توزیع فشار استاتیکی روی سطح آن ۱۳۲
- شکل (۷-۳) استوانه عمود بر جریان ۱۳۳
- شکل (۸-۱) شماتیک تونل باد دانشگاه صنعتی شاهرود ۱۳۸
- شکل (۸-۲) نمایی از تونل باد دانشگاه صنعتی شاهرود ۱۳۹
- شکل (۸-۳) منحنی کالیبراسیون جریان سنج سیم داغ ۱۴۰
- شکل (۸-۴) محور مختصات انتخابی ۱۴۱
- شکل (۸-۵) توزیع سرعت در فاصله ۷۵۰ mm از ابتدای اتاق آزمون بر حسب y, z ۱۴۱
- شکل (۸-۶) توزیع سرعت در فاصله ۷۵۰ mm از ابتدای اتاق آزمون بر حسب y, z ۱۴۲
- شکل (۸-۷) توزیع سرعت در فاصله ۱۵۰۰ mm از ابتدای اتاق آزمون بر حسب y, z ۱۴۲
- شکل (۸-۸) توزیع سرعت در فاصله ۱۵۰۰ mm از ابتدای اتاق آزمون بر حسب y, z ۱۴۳
- شکل (۸-۹) توزیع شدت اغتشاشات در سرعت 4 m/s در مرکز تونل باد و در طول اتاق آزمون ۱۴۳
- شکل (۸-۱۰) توزیع شدت اغتشاشات بر حسب سرعت در مرکز اتاق آزمون ۱۴۴

- شکل (۸-۱۱) توزیع سرعت در تونل باد برحسب فرکانس موتور فن مورد استفاده ۱۴۴
- شکل (۸-۱۲) مدل استوانه مورد استفاده در آزمایش ۱۴۶
- شکل (۸-۱۳) برج خنک کن نیروگاه منتظر قائم ۱۴۷
- شکل (۸-۱۴) مدل برج خنک کن مورد استفاده در آزمایش ۱۴۸
- شکل (۸-۱۵) آفست گیری انجام گرفته قبل از شروع هر آزمایش ۱۴۸
- شکل (۸-۱۶) منحنی ضریب پسا استوانه بر حسب عدد رینولدز ۱۴۹
- شکل (۸-۱۷) تشکیل لایه مرزی در حالت رینولدز زیر بحرانی ۱۵۰
- شکل (۸-۱۸) تشکیل لایه مرزی در حالت رینولدز فوق بحرانی ۱۵۰
- شکل (۸-۱۹) توزیع فشار بدست آمده در مدل استوانه برای عدد رینولدز
 $(Re = 8.1 * 10^3)$ ۱۵۱
- شکل (۸-۲۰) توزیع فشار بدست آمده در مدل استوانه برای عدد رینولدز
 $(Re = 3.3 * 10^4)$ ۱۵۱
- شکل (۸-۲۱) توزیع فشار بدست آمده در مدل استوانه برای عدد رینولدز
 $(Re = 5.2 * 10^4)$ ۱۵۲
- شکل (۸-۲۲) توزیع فشار بدست آمده در مدل استوانه برای عدد رینولدز
 $(Re = 8.4 * 10^4)$ ۱۵۲
- شکل (۸-۲۳) مقایسه بین توزیع فشارهای بدست آمده در مدل استوانه برای
اعداد رینولدز مختلف ۱۵۳
- شکل (۸-۲۴) منحنی ضریب پسای استوانه مورد آزمایش برحسب عدد رینولدز ۱۵۳
- شکل (۸-۲۵) آفست گیری انجام گرفته در مدل برج خنک کن ۱۵۴

- شکل (۲۶-۸) توزیع فشار بدست آمده در مدل برج خنک کن برای عدد رینولدز
 ۱۵۴..... (Re = 3.7*10⁴)
- شکل (۲۷-۸) توزیع فشار بدست آمده در مدل برج خنک کن برای عدد رینولدز
 ۱۵۵..... (Re = 6.7*10⁴)
- شکل (۲۸-۸) توزیع فشار بدست آمده در مدل برج خنک کن برای عدد رینولدز
 ۱۵۵..... (Re = 1.1*10⁵)
- شکل (۲۹-۸) توزیع فشار بدست آمده در مدل برج خنک کن برای عدد رینولدز
 ۱۵۶..... (Re = 1.5*10⁵)
- شکل (۳۰-۸) مقایسه بین توزیع فشارهای بدست آمده در مدل برج خنک کن
 برای اعداد رینولدز مختلف.....
 ۱۵۶.....
- شکل (۳۱-۸) مقایسه بین توزیع فشارهای بدست آمده در استوانه با مدل
 برج خنک کن.....
 ۱۵۷.....
- شکل (۳۲-۸) دیاگرام قطبی توزیع فشار بدست آمده در مدل برج خنک کن
 برای عدد رینولدز (Re = 3.7*10⁴).....
 ۱۵۸.....
- شکل (۳۳-۸) دیاگرام قطبی توزیع فشار بدست آمده در مدل برج خنک کن
 برای عدد رینولدز (Re = 1.1*10⁵).....
 ۱۵۸.....
- شکل (۳۴-۸) دیاگرام قطبی توزیع فشار بدست آمده در مدل برج خنک کن
 برای عدد رینولدز (Re = 1.7*10⁵).....
 ۱۵۹.....
- شکل (۳۵-۸) تاثیر افزایش عدد رینولدز با توزیع فشار میانگین گیری شده
 در برج خنک کن.....
 ۱۶۰.....

- شکل (۹-۱) شماتیک قرار گیری دیواره های بکار رفته در مدل ۱۶۴
- شکل (۹-۲) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر
- ($\alpha = 120^0, \beta = 0$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره ۱۶۵
- شکل (۹-۳) دیاگرام قطبی توزیع فشار بدست آمده برای دیواره های ۳ cm
- با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم ۱۶۶
- شکل (۹-۴) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر
- ($\alpha = 120^0, \beta = 15$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره ۱۶۶
- شکل (۹-۵) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر
- ($\alpha = 120^0, \beta = 30$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره ۱۶۷
- شکل (۹-۶) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر
- ($\alpha = 120^0, \beta = 45$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره ۱۶۷
- شکل (۹-۷) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر
- ($\alpha = 120^0, \beta = 60$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره ۱۶۸
- شکل (۹-۸) نرخ افزایش میانگین توزیع فشار در برج برای دو دیواره ۳ cm
- ($\alpha = 120$) بر حسب زاویه β ۱۶۹
- شکل (۹-۹) شماتیک قرار گیری دیواره ها ۱۷۰
- شکل (۹-۱۰) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر
- ($\alpha = 180^0$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره ۱۷۰
- شکل (۹-۱۱) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر
- ($\alpha = 180^0, \beta = 15$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره ۱۷۱

- شکل (۹-۱۲) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر
 ($\alpha = 180^0, \beta = 30$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره ۱۷۱
- شکل (۹-۱۳) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر
 ($\alpha = 180^0, \beta = 45$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره ۱۷۲
- شکل (۹-۱۴) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر
 ($\alpha = 180^0, \beta = 60$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره ۱۷۲
- شکل (۹-۱۵) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر
 ($\alpha = 180^0, \beta = 75$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره ۱۷۳
- شکل (۹-۱۶) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر
 ($\alpha = 180^0, \beta = 90$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره ۱۷۳
- شکل (۹-۱۷) نرخ افزایش میانگین توزیع فشار در برج برای دو دیواره ۳ cm
 ($\alpha = 180$) بر حسب زاویه β ۱۷۴
- شکل (۹-۱۸) شماتیک قرار گیری دیواره ها ۱۷۴
- شکل (۹-۱۹) توزیع فشار بدست آمده برای چهار دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر
 ($\alpha = 90^0$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره ۱۷۵
- شکل (۹-۲۰) توزیع فشار بدست آمده برای چهار دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر
 ($\alpha = 90^0, \beta = 15$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره ۱۷۵
- شکل (۹-۲۱) توزیع فشار بدست آمده برای چهار دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر
 ($\alpha = 90^0, \beta = 30$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره ۱۷۶
- شکل (۹-۲۲) توزیع فشار بدست آمده برای چهار دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر

۱۷۶..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 90^0, \beta = 45)$

شکل (۲۳-۹) توزیع فشار بدست آمده برای چهار دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر

۱۷۷..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 90^0, \beta = 60)$

شکل (۲۴-۹) توزیع فشار بدست آمده برای چهار دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر

۱۷۷..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 90^0, \beta = 75)$

شکل (۲۵-۹) توزیع فشار بدست آمده برای چهار دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر

۱۷۸..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 90^0, \beta = 90)$

شکل (۲۶-۹) نرخ افزایش میانگین توزیع فشار در برج برای چهار دیواره ۳ cm

۱۷۸..... β بر حسب زاویه $(\alpha = 90)$

۱۷۹..... شماتیک قرار گیری دیواره ها $(\alpha = 90)$

شکل (۲۸-۹) توزیع فشار بدست آمده برای هشت دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر

۱۸۰..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 45^0, \beta = 0)$

شکل (۲۹-۹) توزیع فشار بدست آمده برای هشت دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر

۱۸۰..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 45^0, \beta = 15)$

شکل (۳۰-۹) توزیع فشار بدست آمده برای هشت دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر

۱۸۱..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 45^0, \beta = 30)$

شکل (۳۱-۹) توزیع فشار بدست آمده برای هشت دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر

۱۸۱..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 45^0, \beta = 45)$

شکل (۳۲-۹) نرخ افزایش میانگین توزیع فشار در برج برای هشت دیواره ۳cm

۱۸۲..... β بر حسب زاویه $(\alpha = 45)$

- شکل (۳۳-۹) مقایسه بین نتایج حاصل از دیواره های ۳ cm ۱۸۲
- شکل (۳۴-۹) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر
- ۱۸۳..... ($\alpha = 120^0, \beta = 0$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره
- شکل (۳۵-۹) دیاگرام قطبی توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم ۱۸۴
- شکل (۳۶-۹) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر
- ۱۸۴..... ($\alpha = 120^0, \beta = 15$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره
- شکل (۳۷-۹) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر
- ۱۸۵..... ($\alpha = 120^0, \beta = 30$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره
- شکل (۳۸-۹) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر
- ۱۸۵..... ($\alpha = 120^0, \beta = 45$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره
- شکل (۳۹-۹) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر
- ۱۸۶..... ($\alpha = 120^0, \beta = 60$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره
- شکل (۴۰-۹) نرخ افزایش میانگین توزیع فشار در برج برای دو دیواره ۶ cm
- ۱۸۶..... بر حسب زاویه β ($\alpha = 120$)
- شکل (۴۱-۹) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر
- ۱۸۷..... ($\alpha = 180^0, \beta = 0$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره
- شکل (۴۲-۹) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر
- ۱۸۷..... ($\alpha = 180^0, \beta = 15$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره
- شکل (۴۳-۹) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر

۱۸۸..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 180^0, \beta = 30)$

شکل (۴۴-۹) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر

۱۸۸..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 180^0, \beta = 45)$

شکل (۴۵-۹) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر

۱۸۹..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 180^0, \beta = 60)$

شکل (۴۶-۹) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر

۱۸۹..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 180^0, \beta = 75)$

شکل (۴۷-۹) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر

۱۹۰..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 180^0, \beta = 90)$

شکل (۴۸-۹) نرخ افزایش میانگین توزیع فشار در برج برای دو دیواره ۶ cm

۱۹۰..... بر حسب زاویه β $(\alpha = 180)$

شکل (۴۹-۹) توزیع فشار بدست آمده برای چهار دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر

۱۹۱..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 90^0, \beta = 0)$

شکل (۵۰-۹) توزیع فشار بدست آمده برای چهار دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر

۱۹۱..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 90^0, \beta = 15)$

شکل (۵۱-۹) توزیع فشار بدست آمده برای چهار دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر

۱۹۲..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 90^0, \beta = 30)$

شکل (۵۲-۹) توزیع فشار بدست آمده برای چهار دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر

۱۹۲..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 90^0, \beta = 45)$

شکل (۵۳-۹) توزیع فشار بدست آمده برای چهار دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر

۱۹۳..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 90^0, \beta = 60)$

شکل (۵۴-۹) توزیع فشار بدست آمده برای چهار دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر

۱۹۳..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 90^0, \beta = 75)$

شکل (۵۵-۹) توزیع فشار بدست آمده برای چهار دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر

۱۹۴..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 90^0, \beta = 90)$

شکل (۵۶-۹) نرخ افزایش میانگین توزیع فشار در برج برای چهار دیواره ۶cm

۱۹۴..... بر حسب زاویه β $(\alpha = 90)$

شکل (۵۷-۹) توزیع فشار بدست آمده برای هشت دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر

۱۹۵..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 45^0, \beta = 0)$

شکل (۵۸-۹) توزیع فشار بدست آمده برای هشت دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر

۱۹۵..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 45^0, \beta = 15)$

شکل (۵۹-۹) توزیع فشار بدست آمده برای هشت دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر

۱۹۶..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 45^0, \beta = 30)$

شکل (۶۰-۹) توزیع فشار بدست آمده برای هشت دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر

۱۹۶..... و مقایسه آن با حالت نبود دیواره $(\alpha = 45^0, \beta = 45)$

شکل (۶۱-۹) نرخ افزایش میانگین توزیع فشار در برج برای هشت دیواره ۶cm

۱۹۷..... بر حسب زاویه β $(\alpha = 45)$

۱۹۷..... مقایسه بین نتایج حاصل از دیواره های ۶ cm

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 چراکه 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

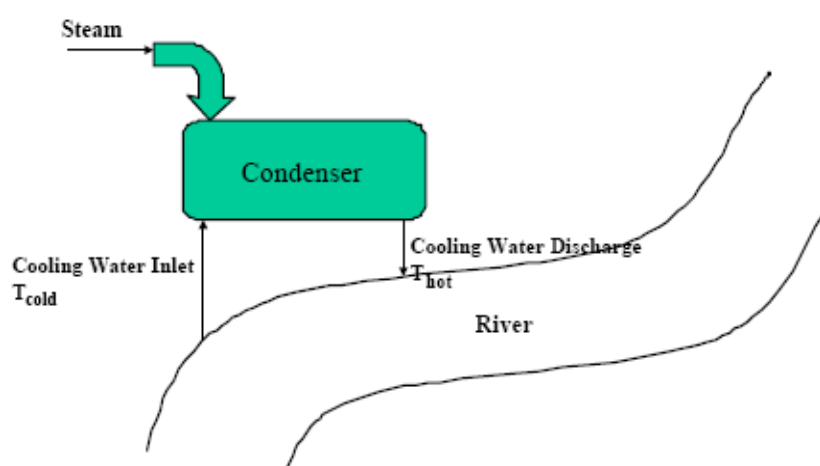
ج - سیستم خنک کن خشک^۳

¹ Once Through Cooling System

² Wet Cooling System

³ Dry Cooling System

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.



شکل (۱-۱) سیستم خنک کن یک بار گذر [10]

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 مابین 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 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^۴

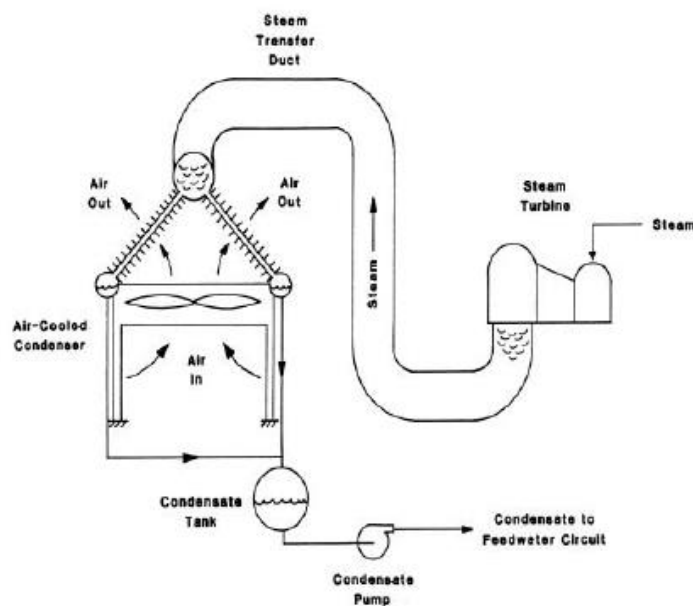
ب - سیستم های خنک کن خشک غیر مستقیم یا هلر^۵

^۴ Air Cooled Condenser

^۵ Heller

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 (۲-۱) نشان داده شده است.



شکل (۲-۱) سیستم خنک کن خشک مستقیم [10]

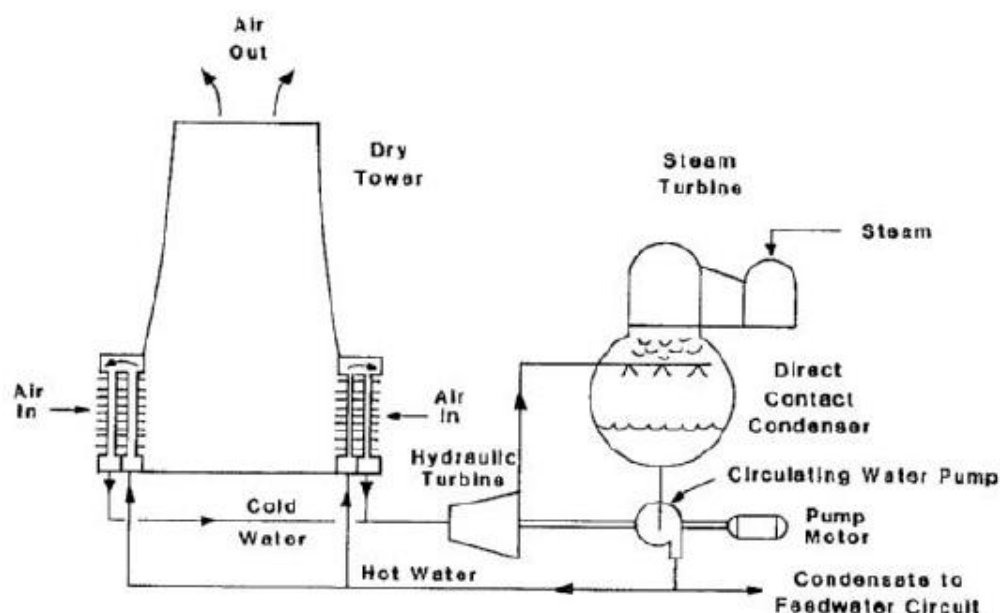
ب - سیستم های خنک کن خشک غیر مستقیم

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 سرمایشی 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^۶ 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 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 پره های صفحه ای مشهور به فورگو^۷ 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 (۱-۳) یک نمونه از این برجها را نشان می دهد.



⁶ Lazlo Heller

⁷ Forgo Type

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، شازند اراک و نیروگاه سیکل ترکیبی منتظر قائم کرج گسترش یافت.

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^۸

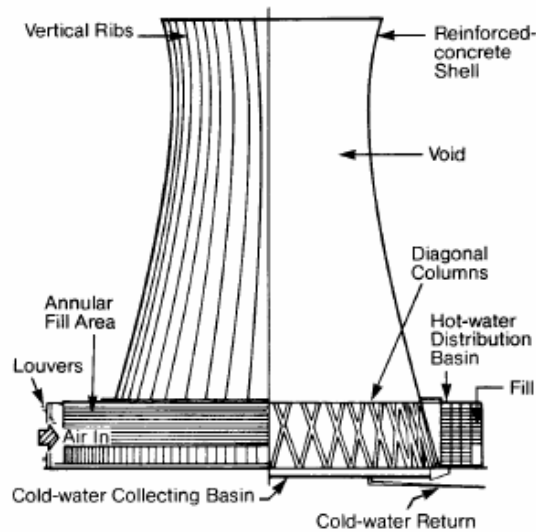
ب - برج خنک کن جابجایی مکانیکی^۹

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.

^۸ Natural Draft Cooling tower

^۹ Mechanical Draft Cooling Tower



شکل (۴-۱) برج خنک کن جابجایی طبیعی [12]

ب - برج خنک کن جابجایی مکانیکی

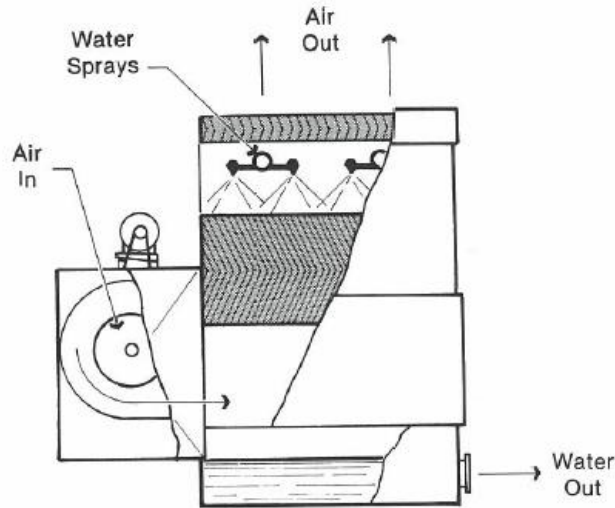
در برجهای خنک کن جابجایی مکانیکی، از فن جهت کشیدن هوا به داخل برج استفاده شده و در نتیجه اثر سرعت باد و هوای محیط کمتر می شود. این برجها به فضای کمتری نسبت به برجهای خنک کن جابجایی طبیعی نیازمندند. این برجها به دو دسته دمشی^{۱۰} و مکشی^{۱۱} تقسیم بندی می شوند.

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 .

¹⁰ Forced Draft

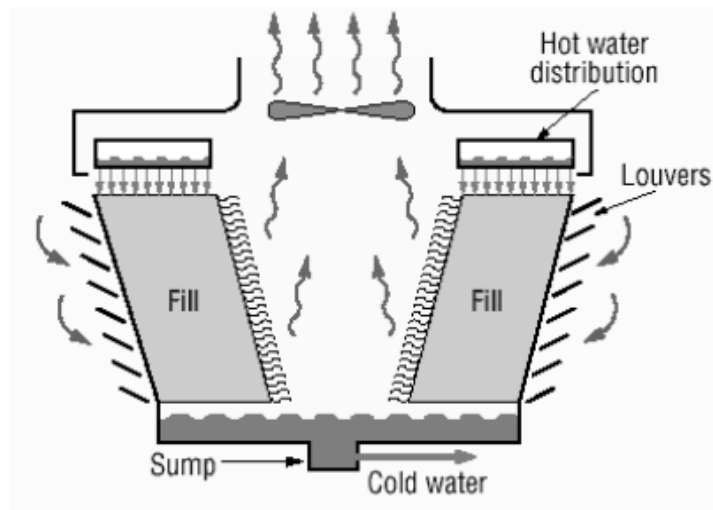
¹¹ Induced Draft



شکل (۵-۱) برج خنک کن دمشی [7]

اما 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 [11]

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

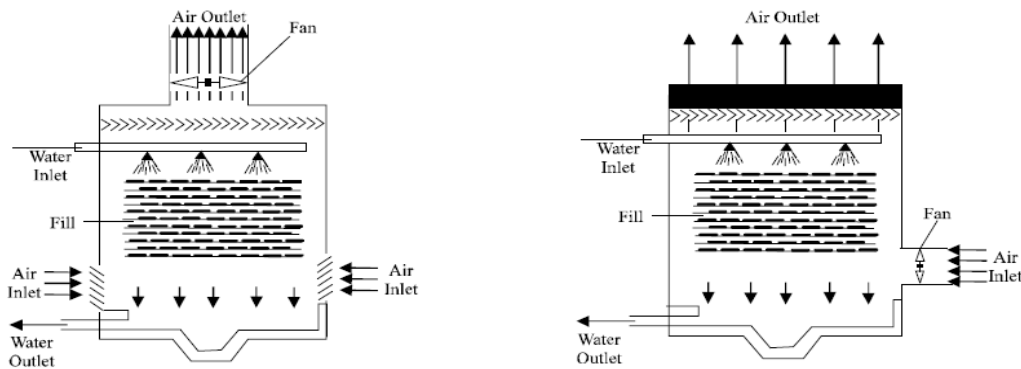
الف - برج خنک کن جریان مخالف^{۱۲}

ب - برج خنک کن جریان متقاطع^{۱۳}

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.

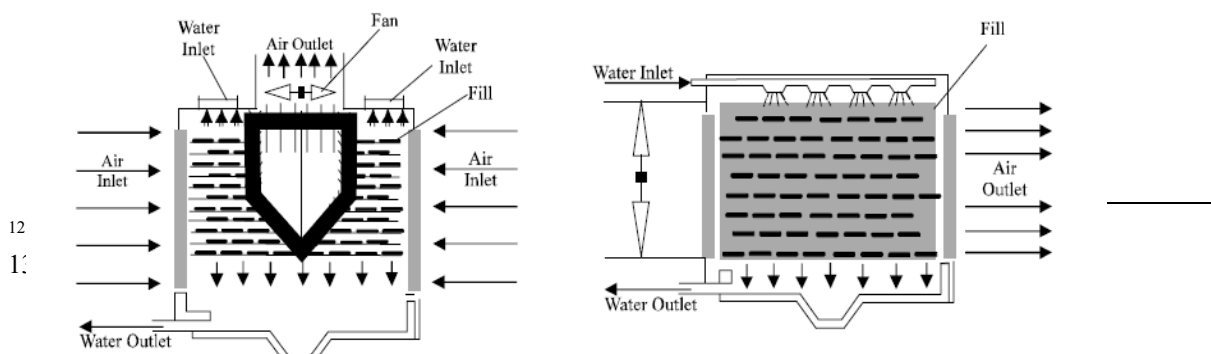
مطابق شکل این برجها هم به صورت مکشی و هم به صورت دمشی مورد استفاده قرار می گیرند.



شکل (۷-۱) برج خنک کن جریان مخالف [11]

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 [11]

۱-۲ اثر شرایط محیطی

عملکرد تمام مبدل‌های حرارتی که با هوا خنک می‌شوند 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 می‌گذارد. 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 می‌گردد. با توجه به مساله کم آبی در کشور بخصوص در فلات داخلی، سیستم خنک کن نیروگاه‌های حرارتی اکثراً از نوع خشک انتخاب می‌گردد در نتیجه بررسی شرایط محیطی در عملکرد آنها حائز اهمیت است.

۱-۲-۱-۱-دمای محیط

یکی از عوامل مهمی که نقش مهمی در عملکرد برج‌های خنک کن دارد، دمای محیط می‌باشد. در طی زمانهایی که درجه حرارت محیط خیلی کم است، یخ زدن آب داخل رادیاتورها مشکلات جدی ایجاد می‌کند اما ابزار و روش‌های مختلفی از جمله تعبیه لوور^{۱۴} در ورودی برج جهت جلوگیری از یخ زدگی رادیاتورها روش مفیدی خواهد بود.

¹⁴ Louver

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 کننده های اضطراری استفاده می شود. این خنک کننده ها، برجهای خنک کن کوچکی هستند که در داخل برجهای خنک 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.

۱-۲-۲-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 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.

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 بود.

فصل دوم

هدف از انجام پایان نامه

۲-۱- 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^{۱۵}

ب - تجربی^{۱۶}

ج - تحقیقات میدانی^{۱۷}

در روش عددی با شبیه‌سازی جریان هوا در اطراف برج خنک کن و استفاده از معادله‌های حاکم بر جریان هوا نظیر معادلات بقای جرم، بقای انرژی و با در نظر گرفتن شرایط مرزی و 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 می‌گیرد.

در روش تجربی، مدل مشابه برج خنک کن ساخته شده و با استفاده از تجهیزاتی همچون تونل باد، جریان هوایی مشابه باد طبیعی ایجاد می‌شود و در نتیجه جریان هوای اطراف مدل اندازه‌گیری و مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این روش مدل نسبت به جسم واقعی بسیار کوچکتر می‌باشد.

در روش تحقیقات میدانی نیز با اندازه‌گیری 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 می‌گیرد.

هر سه روش دارای مزایا و معایب مربوط به خود می‌باشند به عنوان مثال در روش عددی پس از مدل‌سازی و حل معادلات مربوطه، داده‌های به دست آمده را می‌توان در شرایط مختلف به سادگی بررسی نمود اما صحت داده‌های بدست آمده بایستی بررسی گردد. با مدل‌سازی برج خنک کن و قرار دادن آن در تونل باد، جریان هوای اطراف مدل اندازه‌گیری شده و در نتیجه صحت نتایج عددی بررسی می‌گردد.

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

¹⁵ Numerical

¹⁶ Experimental

¹⁷ Field Research

در این تحقیق سعی شده بررسی تجربی اثر بادهای محیطی بر عملکرد برجهای خنک کن خشک انجام شود.

۲-۳- مبانی تئوریک تحقیق

اثر باد بر عملکرد برجهای خنک کن خشک با مکش طبیعی مانند سیستم هلر در 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

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 برج در اثر باد، در برجهای خنک کن بسته به شکل هندسی برج و همچنین آرایش خنک کننده ها متغییر است. بطور کلی از دو نوع آرایش سطوح حرارتی در برجهای خشک بیشتر استفاده می شود.

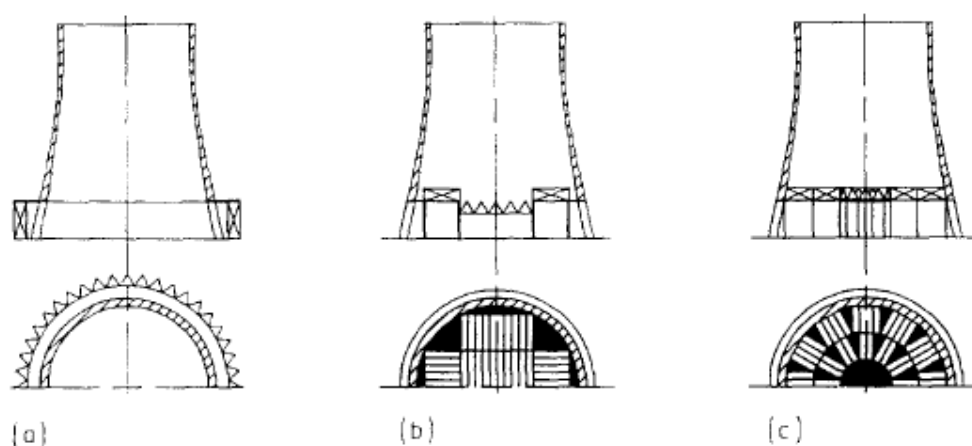
در نوع اول سطوح حرارتی در محیط خارجی بصورت عمودی جاسازی می گردند، در این صورت جریان انتقال حرارت بین دو سیال هوا و آب خنک کننده بصورت عمود بر یکدیگر^{۱۸} بوده ولی در نوع دوم سطوح حرارتی در داخل محوطه برج بر روی اسکلت فلزی بصورت افقی (مستطیلی یا شعاعی) نصب می گردند که جریان انتقال حرارت بین دو سیال هوا و آب خنک کننده بصورت موازی یکدیگر^{۱۹} می شود. در شکل (۱-۲) این آرایش نشان داده شده است.

¹⁸ Cross Flow

¹⁹ Counter Flow

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 مبدل‌ها شده و باعث ایجاد توزیع فشار نامطلوب در ورودی برج می‌شود.

با وزش باد، فشار استاتیکی اطراف پوسته برج تغییر می‌کند بطوریکه در بعضی نقاط اختلاف فشار داخل و خارج منفی گشته و فشار استاتیکی بیرونی کمتر از فشار مکش در داخل برج می‌گردد. در این هنگام در نقاط فوق جریان هوای گرم از درون برج به بیرون هدایت خواهد شد. با توجه به کاهش کارایی خنک کننده‌ها در دمای بالا و کارکرد بخشی از خنک کننده‌ها در دمای فوق به علت جریان معکوس هوا، کارایی کلی برج از مقدار اسمی آن کمتر می‌گردد، بطوریکه در سرعت خیلی بالای وزش باد، کاهش فشار استاتیکی در بعضی نقاط می‌تواند به قدری زیاد گردد که عملاً مکش برج را حذف نماید.



شکل (۱-۲) آرایش مختلف خنک کننده‌ها (a) عمودی (b) افقی مستطیلی (c) افقی شعاعی [13]

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 می‌دهد، اما در هر حال حرکت هوا در داخل برج کم و بیش متقارن می‌باشد. با افزایش سرعت باد، توزیع یکنواخت جریان هوا و حرکت متقارن آن از بین می‌رود.

موضوع دیگر در رابطه با تاثیر باد در جریان هوای خروجی، ایجاد پدیده درپوش^{۲۰} 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 توزیع فشار استاتیکی ورودی برج و استفاده از دیواره های بادشکن، جهت بهبود کارایی برج بررسی گردیده است.

فصل سوم

تاریخچه

²⁰ Wind Cover

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^{۲۱} مطالعات فراوانی در زمینه تاثیر آرایش مختلف مبدلها، در ورودی برجهای خنک کن جابجایی طبیعی، بر روی 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. [۹]

فارل^{۲۲} 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. [14]

در سال ۱۹۸۳ دکتر یوشی هیرو^{۲۳} 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*۱ m و طول ۶,۵ بود. توزیع فشار در سمت رو به باد مثبت و در طرفین و سمت پشت به باد منفی بدست آمد. [15]

یان داچون^{۲۴} و لیچنکسین^{۲۵} در سال ۱۹۸۷ مطالعات تجربی وسیع خود را در زمینه تاثیر بادهای جانبی بر روی یک گروه برجهای خنک کن مرتفع با فاصله برابر از هم، در تونل باد سرعت پایین دانشگاه پکینگ^{۲۶} انجام دادند. این تحقیق به علت متلاشی شدن برجهای خنک کن در نیروگاه فری بریج^{۲۷} 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 برجهای مرتب 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^{۲۸} غالب می شود. در آرایش برجهای پشت سر هم، اثر دنباله^{۲۹} و جدایی³⁰ برج بالادست جریان

21 Holder

22 Farell

23 Yoshihiro

24 Yan Dachun

25 Li Chenxin

26 Peking University

27 Ferrybridge

28 Coanda effect

29 wake

30 Separation

نقش مهمی دارد. در آرایش شطرنجی که برجهای پایین دست جریان در ناحیه جانبی دنباله پشت برجهای بالا دست جریان قرار می‌گیرند، اثر مکش^{۳۱} گردابه‌های بزرگ^{۳۲} در لایه اختلاطی^{۳۳}، 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.

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

ضریب توزیع فشار نیز با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$C_p(\theta, h) = (P_\theta - P) / \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (2-3)$$

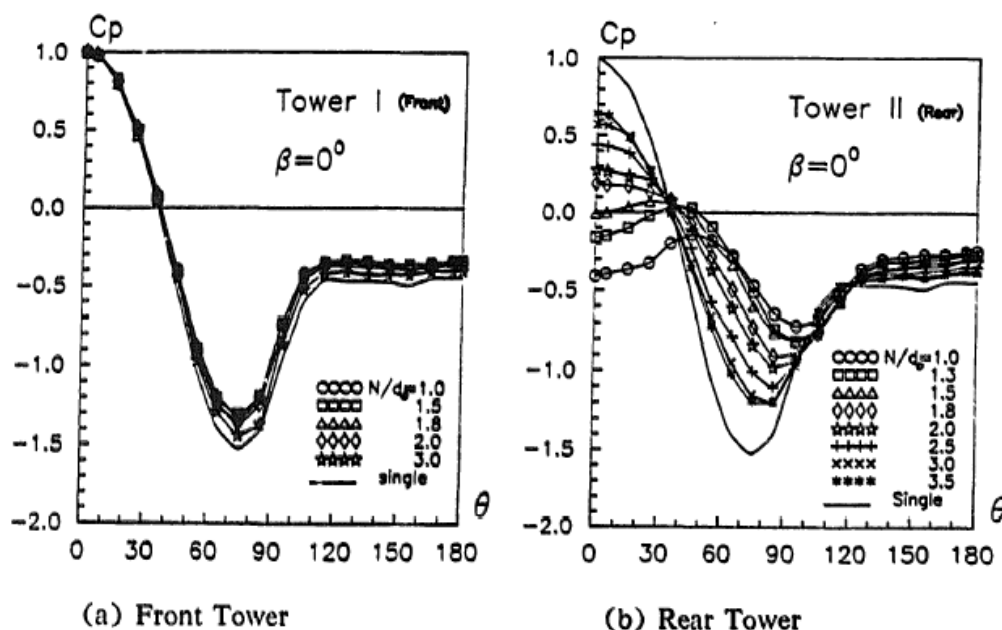
که P_θ فشار میانگین و P فشار استاتیک جریان ورودی، ρ دانسیته هوا و U سرعت جریان هوا است. در این تحقیق مقدار عدد رینولدز در برج اصلی در محدوده $10^7 - 10^9$ و در مدل تنها 10^5 بوده؛ به طور شگفت‌انگیزی در نتایج یان داچون و لیچنکسین میزان ضریب توزیع فشار در مدل بسیار مشابه مدل اصلی بدست آمد.

³¹ Induction effect

³² Eddy

³³ Mixing layer

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. [19]



شکل (۳-۴) توزیع فشار برای دو برج در آرایش پشت سر هم با فواصل مختلف از هم [19]

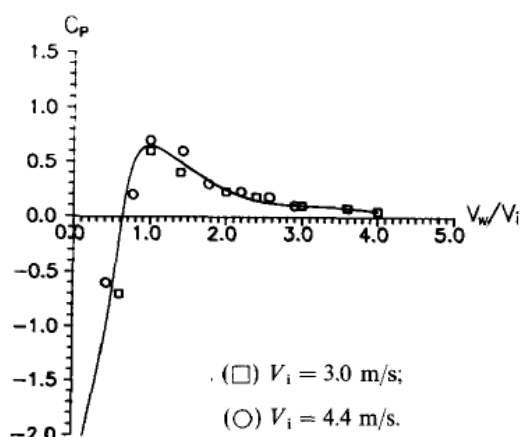
برگسترام^{۳۴} در سال ۱۹۹۳ مطالعات تجربی بر روی روی تاثیر باد در برجهای خنک کن انجام داد. [20] وی^{۳۵} و زانگ^{۳۶} در مورد اثر نامطلوب باد بر روی بازده برجهای خنک کن خشک، مطالعاتی انجام دادند و دریافتند که بازده برجها به علت توزیع فشار نامطلوب در ورودی و از بین رفتن توده هوای گرم صعودی در برج، کاهش می یابد. در این آزمایشات از اندازه گیری میدانی، اندازه گیری در تونل باد با استفاده از سه مدل مختلف استفاده شده بود. تونل باد بکار رفته نیز از نوع تونل باد لایه مرزی با ابعاد ۸*۲,۴* ۱,۸ m بود.

³⁴ Bergstrom

³⁵ Wei

³⁶ Zhang

در این تحقیق رابطه بین توزیع فشار داخلی برج در گلوبی با نسبت سرعت جریان باد (V_w) به سرعت میانگین ورودی به رادیاتورها (V_i) 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 می‌شوند. [21]



شکل (۳-۵) توزیع فشار در گلوبی برج نسبت به سرعت جریان باد به سرعت میانگین ورودی به رادیاتورها [21]

مجددا در سال ۱۹۹۵، سان^{۳۷} و زو^{۳۸} در راستای اقدامات قبلی، به بررسی آثار متقابل آیرودینامیکی دو سیلندر، در اعداد رینولدز زیر بحرانی^{۳۹} و فوق بحرانی^{۴۰} و اثر تداخلی گروه برجهای خنک کن پرداختند. [22]

تاثیر اشکال مختلف پایه های نگهدارنده برج های خشک بر عملکرد آنها تحت تاثیر وزش باد، طی مطالعات عددی توسط کروگر^{۴۱} و پرز^{۴۲} انجام گرفت. [23]

برگسترام^{۴۳} 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 m * ۳ * ۷ انجام گرفت. [24]

³⁷ Sun

³⁸ Zhou

³⁹ subcritical

⁴⁰ supercritical

⁴¹ Kroger

⁴² Preez

⁴³ Bergstrom

در سال ۱۹۹۸ تحقیقات وسیعی توسط کوپر^{۴۴} و نیومن^{۴۵} در آزمایشگاه تونل باد لایه مرزی در آلمان بر روی تأثیر 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.

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 اندازه گیری شد. [25]

شکل (۳-۶) مقایسه بین توزیع فشار بدست آمده در پیرامون برج با نتایج تئوری نیمان [27]

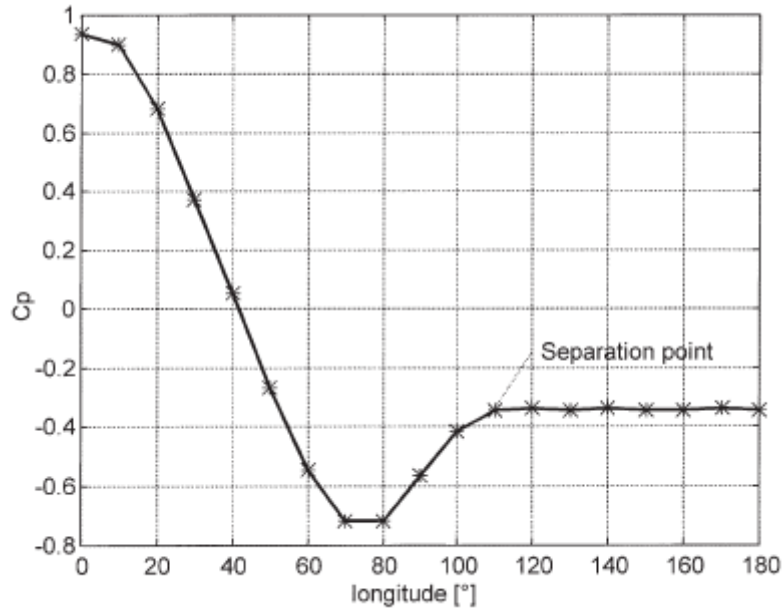
میزان ضریب فشار میانگین در گلویی مطابق شکل (۳-۷) بدست آمد و مشاهده گردید که جدایی در زاویه ۱۱۰ در برج رخ می دهد. همچنین اندازه گیری فشار برای دو برج پشت سر هم با زاویه و فاصله های مختلف از هم نیز انجام گرفت. [27]

در سال ۲۰۰۱ فو سانگ^{۴۶} 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. [28]

⁴⁴ Kopper

⁴⁵ Niemann

⁴⁶ Fu Song



شکل (۷-۳) میزان ضریب فشار در گلوبی [27]

مسعود بهنیا^{۴۷} 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. [29]

در سال ۲۰۰۵ تحقیقات عددی و تجربی دیگری توسط فو سانگ^{۴۸} 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 800* 600 mm در دانشگاه تسینگ هو^{۴۹} واقع شده بود. [30]

رقت الوکد^{۵۰} 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. [31]

⁴⁷ Masud Behnia

⁴⁸ Fu Song

⁴⁹ Tsinghua

⁵⁰ Rafat Al-Waked

مطالعات میدانی و تجربی أمور⁵¹ 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. [32]

⁵¹ 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:

$$\begin{aligned} U(t) &= \bar{U} + u(t) \\ V(t) &= \bar{V} + v(t) \\ W(t) &= \bar{W} + w(t) \end{aligned} \quad (1-4)$$

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 جریان سنج سیم داغ^{۵۲}، ابزاری است که به وسیله آن می توان سرعت لحظه ای جریان سیال را با فرکانس بسیار بالا اندازه گیری نمود و با استفاده از سرعت لحظه ای اندازه گیری 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)، کمیت های جریان دو فازی و ... را اندازه گیری نمود.

اساس کار دستگاه جریان سنج سیم داغ، انتقال حرارت از یک سیم گرم با قطر بسیار پایین (در حدود چند میکرومتر) از جنس تنگستن، پلاتین و یا آلیاژهای پلاتین است. این سیم داغ بر روی دو پایه نصب شده و در مسیر جریان سیال قرار می گیرد. هر تغییری که در شرایط جریان سیال ایجاد شود و بر روی نرخ انتقال حرارت از سیم اثر بگذارد، به وسیله دستگاه جریان سنج سیم داغ مشخص می شود. قابل ذکر است هنگامی که سرعت جریان سیال کاهش می یابد، حساسیت روشهای دیگر به تغییر شرایط جریان، کم می شود. ولی حساسیت دستگاه جریان سنج سیم داغ با کاهش سرعت، افزایش می یابد. بنابراین بهتر است برای اندازه گیری و مطالعه جریان سیال در سرعت های پایین، از دستگاه جریان سنج سیم داغ استفاده شود.

۴-۲- ویژگیهای دستگاه جریان سنج سیم داغ

همان طور که در بخش قبل بیان شد، دستگاه جریان سنج سیم داغ، به عنوان یکی از ابزارهای اصلی اندازه گیری سرعت لحظه ای جریان سیال می باشد. با توجه به ویژگیهای منحصر به فرد این دستگاه، اصلی ترین و عمده ترین کاربرد آن در انجام آزمایشهای جریانهای آشفته گاز و یا هوا است. البته اندازه گیری به وسیله این دستگاه در جریانهایی با اغتشاشهای کم یا متوسط (کمتر از ۲۵٪) از دقت بالاتری نسبت به سایر دستگاههای اندازه گیری برخوردار است. عمده امتیازات دستگاه جریان سنج سیم داغ عبارتند از:

۱- استفاده از دستگاه آسان بوده و کالیبراسیون دستگاه جریان سنج سیم داغ، جمع آوری داده ها و تجزیه و تحلیل آنها به سادگی انجام می پذیرد.

۲- با کاهش سرعت، دقت دستگاههای اندازه گیری سرعت جریان سیال به شدت پایین می آید، این در حالی است که دقت دستگاه جریان سنج سیم داغ با کاهش سرعت افزایش می یابد.

⁵² Hot-Wire Anemometry

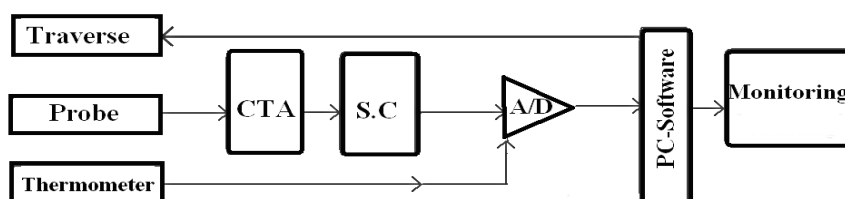
- ۳- دستگاه جریان سنج سیم داغ دارای قابلیت اندازه‌گیری سرعت جریان سیال در محدوده وسیعی است.
- ۴- دقت دستگاه جریان سنج سیم داغ در شرایط مناسب حدود 0.2% - 0.1% است.
- ۵- پاسخ فرکانسی دستگاه جریان سنج سیم داغ حدود 50 kHz می‌باشد که می‌توان پاسخ فرکانسی را تا چند صد کیلوهرتز افزایش داد.
- ۶- در دستگاه جریان سنج سیم داغ نسبت سیگنال به نویز کم می‌باشد.
- ۷- خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ به صورت یک ولتاژ آنالوگ پیوسته است و تجزیه و تحلیل آن به سادگی انجام می‌پذیرد.
- ۸- سنسورهای سیم داغ متداول با قطر $5\ \mu\text{m}$ و طول $1/25\ \mu\text{m}$ فضای کمی را اشغال می‌کنند. ۹- جریان سنج سیم داغ، را می‌توان در سیالات دو فازی همانند مایع / گاز به کار برد. در این حالت با توجه به تفاوت مقدار ضریب انتقال حرارت گاز و مایع می‌توان دو فاز جریان را تشخیص داد.
- ۱۰- با استفاده از قرار دادن دو یا تعداد بیشتری پراب دستگاه جریان سنج سیم داغ در نقاط مختلف جریان آشفته، علاوه بر محاسبه سرعت لحظه‌ای، می‌توان تغییرات آن را نیز نسبت به مکانهای مختلف بررسی نمود. هنگام استفاده از دستگاه جریان سنج سیم داغ ممکن است با مشکلاتی مواجه شد که روشهای رفع آنها در زیر ارایه شده است:
- الف- آلودگیهای موجود در جریان، روی سنسور اثر گذاشته در نتیجه انتقال حرارت تغییر می‌کند و مشخصه‌های کالیبراسیون را تغییر می‌دهد. در این حالت باید پراب را تمیز نموده و دوباره کالیبراسیون را انجام داد.
- ب- سنسور جریان سنج سیم داغ بسیار ظریف است و به سادگی از بین می‌رود، اما در صورتی که با دقت از آن استفاده شود، مدت زمان طولانی قابل استفاده خواهد بود. در مطالعات جریان هوا با سرعت کم، مهمترین عاملی که سبب از بین رفتن سنسور می‌شود بی‌تجربگی کاربر است.
- ج- در جریانهای با سرعت بالا، ممکن است سنسور سیم داغ در اثر برخورد ذرات ریز موجود در جریان سیال پاره شود، که این مشکل را می‌توان با قرار دادن فیلتر در مسیر جریان رفع نمود. بالا رفتن دمای سنسور از حد مجاز نیز باعث سوختن آن می‌شود.

د- پراب سیم داغ هنگامی که در جریان قرار می‌گیرد، اغتشاشهایی در جریان سیال ایجاد می‌کند که با طراحی مناسب پراب می‌توان خطاهای آن را به حداقل رساند.

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^{۵۳}، مدار الکترونیکی دما ثابت^{۵۴} (CT)، مدار الکترونیکی تطبیق دهنده سیگنال^{۵۵} (SC)، برد^{۵۶} (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 [1]

⁵³ Probe

⁵⁴ Constant Temperature

⁵⁵ Signal Conditioner

⁵⁶ Data Acquisition

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- مدار الکترونیکی جریان ثابت^{۵۷} (CC)، با استفاده از این مدار الکترونیکی، جریان الکتریکی عبور کننده از سنسور سیم داغ را ثابت نموده و سرعت جریان سیال اندازه‌گیری می‌شود.

۲- مدار الکترونیکی ولتاژ ثابت^{۵۸} (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^{۵۹} (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^{۶۰} 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 جریان سنج سیم داغ است، شکل (۴-۲) این مدار را به‌طور شماتیک نشان می‌دهد. مدار الکترونیکی دما ثابت CT شامل پل وتسون، تقویت‌کننده تفاضلی، تنظیم‌کننده پاسخ فرکانسی و تقویت‌کننده جریان است.

پل 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 پل وتسون

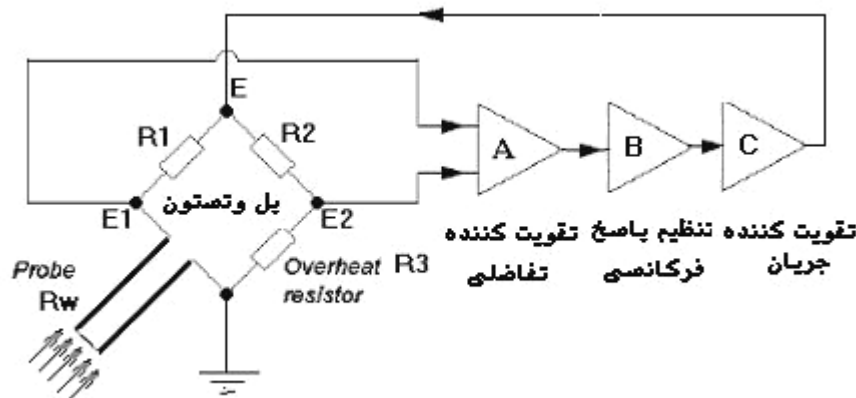
⁵⁷ Constant Current

⁵⁸ Constant Voltage

⁵⁹ Constant Temperature

⁶⁰ Feedback

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.



شکل (۲-۴) مدار الکترونیکی دما ثابت CT [1]

دمای سنسور در مقاومت R_w نیز طبق معادله $(T_w - T_a) = (R_w / R_a - 1) / \alpha_a$ محاسبه می‌شود که در آن T_a دمای محیط، R_a مقاومت سنسور در دمای محیط و α_a ضریب دمایی مقاومت سنسور در دمای T_a است.

در انتخاب و تنظیم مقاومت متغیر R_3 باید دقت نمود تا اندازه آن طوری انتخاب شود که باعث افزایش شدید دمای سنسور و سوختن سنسور از جنس تنگستن، نشود. نسبت مقاومت‌های R_2 / R_1 را نسبت پل می‌نامند. با توجه به این که جریان الکتریکی باید بیشتر از شاخه‌ای از پل وتسون که شامل سنسور سیم داغ است عبور کند، بنابراین نسبت پل حدود ۵ الی ۲۰ انتخاب می‌شود. در مواردی که فاصله سنسور تا مدار الکترونیکی CT طولانی است و همچنین برای به‌دست آوردن پاسخ فرکانسی بالا از پل وتسون با نسبت $R_2 / R_1 = 1$ نیز استفاده می‌شود.

هنگامی که سنسور در جریان سیال قرار می‌گیرد، مقاومت سنسور کاهش یافته و پل وتسون از حالت توازن خارج می‌شود در نتیجه اندازه $(E_1 - E_2)$ افزایش می‌یابد. این افزایش توسط تقویت‌کننده تفاضلی، تقویت شده و با استفاده از تقویت‌کننده جریان، به‌طور خودکار به پل وتسون جریان الکتریکی بیشتری اعمال

می‌شود. بنابراین ولتاژ بالای پل E افزایش یافته و این ولتاژ با سرعت جریان سیال طبق معادله $E^2 = A + BU^n$ نیز مشخص می‌شود که A و B ثابتند.

در این حالت، اگرچه مقدار $(E_1 - E_2)$ نزدیک به صفر است، اما با افزایش سرعت جریان سیال این مقدار نیز افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش سرعت جریان سیال، مقاومت سنسور افزایش یافته و در نتیجه پل و تسون از توازن خارج شده در این حالت تقویت کننده ولتاژ و جریان به طور خودکار میزان جریان الکتریکی عبور کننده از سنسور را کاهش داده و در نتیجه پل و تسون دوباره متوازن می‌شود. با تغییر جریان الکتریکی عبور کننده از سنسور، ولتاژ اعمالی E به بالای پل و تسون 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 تقویت کننده و فیلتر می‌باشد، پاسخ فرکانسی دستگاه جریان سنج سیم داغ به همراه سنسور آن بهینه می‌شود.

۴-۴-۲- نسبت فراگرمایی^{۶۱}

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 فراگرمایی، معمولاً حدود $0.1 \sim 0.6$ 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_w و مقاومت اتصالات و کابل R_L است که طبق رابطه $R_p = R_w + R_L$ بیان می‌شود. برای اندازه‌گیری مقاومت پراب از اهم‌متر 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_w

⁶¹ Overheat Ratio

، 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.

۴-۵- اصول عملکرد دستگاه جریان سنج سیم داغ

دستگاه جریان سنج سیم داغ برای اندازه گیری سرعت و دمای لحظه ای جریان سیال مورد استفاده قرار می گیرد. این اندازه گیریها توسط محاسبه میزان تبادل حرارت بین سنسور سیم داغ و یا فیلم داغ و محیط انجام می شوند. با استفاده از تغییرات انتقال حرارت جابه جایی اجباری که ناشی از تغییر سرعت است، می توان سرعت جریان سیال را اندازه گیری نمود. نرخ انتقال حرارت جابه جایی از سیم داغ در دمای T_w به هوا در دمای T_a ، به صورت $Q = h(T_w - T_a)$ بیان می شود. در این جا Q نرخ انتقال حرارت در واحد سطح و h نیز ضریب همرفت هوا می باشد.

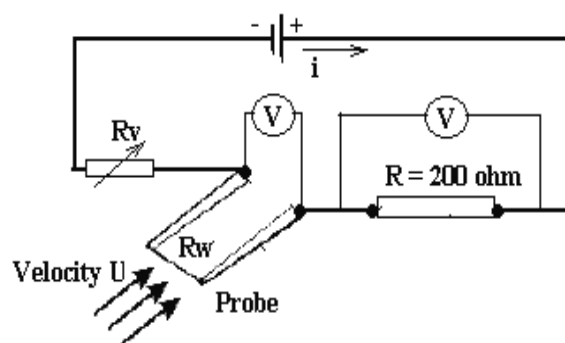
تغییر نرخ انتقال حرارت از سیم داغ به جریان سیال، سبب تغییر مقاومت الکتریکی سیم داغ (یا فیلم داغ) R_w و یا مقدار جریان الکتریکی I که باعث گرم شدن سیم می شود، همچنین تغییر ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ می شود. به کمک معادله کالیبراسیون مورد نظر، تغییرات سرعت و یا دمای جریان سیال اندازه گیری می شوند.

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 جابه جایی اجباری، سرعت سیال اندازه گیری می شود. نرخ انتقال حرارت به پارامترهای مختلفی نظیر جنس، شکل، ابعاد سنسور و همچنین مشخصه های سیال بستگی دارد.

مطابق شکل (۳-۴)، سنسوری از جنس تنگستن به قطر $5 \mu m$ و طول $1/25 mm$ را بر روی پراب نصب و جریان الکتریکی کنترل شده ای از آن عبور داده می شود. با اندازه گیری مقاومت الکتریکی سنسور در سرعت های مختلف، منحنی مشخصه عملکرد سنسور تعیین می شود.

شکل (4-4) تغییرات مقاومت الکتریکی سنسور سیم داغ را بر حسب جریان الکتریکی نشان می دهد که با افزایش جریان الکتریکی، مقاومت الکتریکی سنسور نیز افزایش می یابد. این رابطه خطی نبوده و می توان آن را

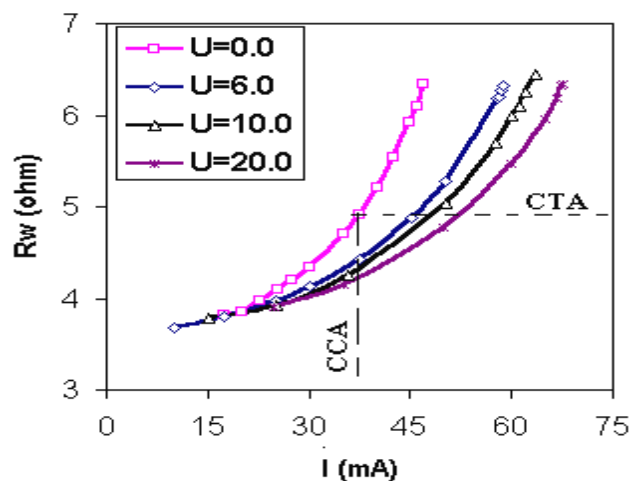
با منحنی درجه ۲ تقریب نمود. با افزایش سرعت جریان سیال، منحنی مشخصه عملکرد سیم داغ تغییر می‌کند. در حالت $U = 0$ ، مکانیزم انتقال حرارت از سنسور به صورت جابه‌جایی آزاد بوده و با افزایش سرعت، انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد نسبت به انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری ناچیز می‌شود.



شکل (۳-۴) شماتیک مدار اندازه‌گیر منحنی مشخصه سنسور سیم داغ [1]

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 ۵ و طول mm μm در سرعت‌های مختلف جریان هوا [1]

مدارهای الکترونیکی که به این روش کار می‌کنند، جریان سنج دما ثابت^{۶۲} 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.

۲- در روش دوم مقدار جریان الکتریکی عبور کننده از سنسور ثابت است و با تغییر سرعت جریان سیال، مقاومت الکتریکی سنسور تغییر می‌کند. 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 اندازه‌گیری آن می‌توان سرعت جریان سیال را تشخیص داد. مدارهای الکترونیکی که با این روش کار می‌کنند، جریان‌سنج جریان ثابت^{۶۳} نامیده می‌شوند. در حال حاضر با استفاده از این روش تنها تغییرات دما را اندازه‌گیری می‌کنند.

۴-۶- انتقال حرارت

همان‌گونه که بیان شد، عملکرد جریان‌سنج سیم داغ بر اساس نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی از سنسور سیم داغ به جریان سیال می‌باشد که این سنسور توسط جریان الکتریکی I گرم می‌شود. نرخ انتقال حرارت بر واحد سطح که با رابطه $Q = h \cdot (T_w - T_a)$ بیان می‌شود، به عواملی همچون مشخصه‌های سیال مانند چگالی ρ ، لزجت سینماتیکی، ضریب هدایت گرمایی k ، گرمای ویژه C_μ ، ضریب پخش حرارتی α ، سرعت جریان سیال U ، دمای جریان سیال T ، هندسه سنسور سیم داغ مانند قطر d_w ، طول l_w و دمای سیم داغ T_w بستگی دارد. مجموعه این عوامل را می‌توان در اعداد بی‌بعد زیر خلاصه نمود:

$Re : \mu \rho U d_w / \mu$: عدد رینولدز در واقع برابر با نسبت نیروی اینرسی سیال به نیروی لزجی سیال می‌باشد که با افزایش عدد رینولدز، مقدار نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی نیز افزایش می‌یابد.

μ

⁶² Constant Temperature Anemometer

⁶³ Constant Current Anemometer

$Pr = \mu C_p / k$: 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 می‌کند. هر چه عدد پرانتل بیشتر باشد، پخش حرارتی کوچک‌تر بوده و انتقال حرارت بیشتری از طریق جابه‌جایی صورت می‌گیرد.

$Nu = hd_w / k$: عدد ناسلت برابر با نسبت انتقال حرارت جابه‌جایی به انتقال حرارت هدایت است که با افزایش عدد ناسلت مقدار انتقال حرارت جابه‌جایی در سیم داغ نیز افزایش می‌یابد.

$M = U / C$: عدد ماخ برابر نسبت سرعت جریان سیال U به سرعت صوت C در دمای سیال است. در جریان هوایی که سرعت آن بیش از 100 m/s است، اثر تراکم پذیری مشاهده شده و اثر تراکم پذیری در انتقال حرارت تأثیرگذار خواهد بود.

$Gr = g\rho^2 d_w^3 \beta (\mu - T_a) / \mu^2$: عدد گراشف که در آن β ضریب انبساط حجمی سیال است و برابر با نسبت نیروی شناوری به نیروی لزجی می‌باشد. در جریانهای با سرعتهای پایین که انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد اهمیت می‌یابد، عدد گراشف نقش مهمی را ایفا می‌کند.

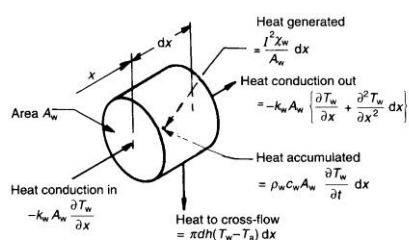
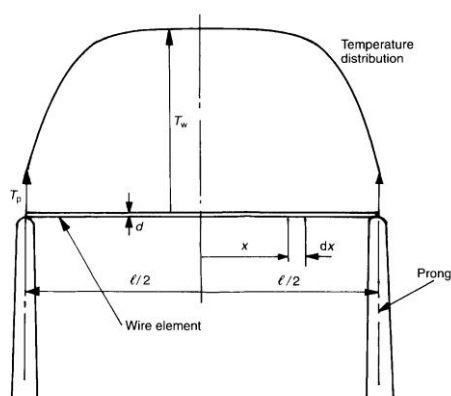
$Kn = \lambda / d_w$: عدد نوسن که در آن λ برابر مسیر آزاد بین مولکولی است. در جریانهای سیال با چگالی پایین این عدد در انتقال حرارت نقش مهمی را ایفا می‌کند.

۴-۶-۱- انتقال حرارت از سیمی با طول محدود (سنسور سیم داغ)

انتقال حرارت از سنسور سیم داغ با طول محدود، با انتقال حرارت از سیم داغ با طول بی‌نهایت متفاوت بوده به طوری که در این حالت انتقال حرارت هدایتی از دو پایه سنسور نیز قابل توجه می‌باشد. سنسور سیم داغ دارای طول محدودی بوده که دو سر آن به پایه‌های پراب متصل می‌باشد. پایه‌های پراب در مقایسه با المان سنسور سیم داغ حجیم‌تر بوده و دمای آن، T_p ، نزدیک به دمای سیال است. با توجه به این که دمای سنسور سیم داغ، T_w ، بیشتر از دمای پایه‌ها است، بنابراین انتقال حرارت از سنسور سیم داغ به پایه‌ها از طریق هدایت صورت می‌گیرد و منجر به یک گرادیان دما در سنسور سیم داغ می‌شود. توزیع دما را می‌توان با نوشتن معادله توازن انرژی برای المان کوچکی از سنسور، به طول dx به دست آورد (شکل ۴-۵).

$$d\dot{Q}_e = d\dot{Q}_{fc} + d\dot{Q}_c + d\dot{Q}_r + d\dot{Q}_s \quad (۲-۴)$$

پارامترهای به کار رفته در رابطه بالا بدین صورت تعریف می گردند:



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

- $d\dot{Q}_e$: 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
برابری است با:

$$d\dot{Q}_e = \frac{I^2 \chi_w}{A_w} dx \quad (3-4)$$

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 جابه‌جایی اجباری برای المان محدود طبق معادله (۴-۴) بیان می‌شود:

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

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

$$d\dot{Q}_c = -k_w A_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} dx \quad (۵-۴)$$

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

$$d\dot{Q}_r = \pi d_w \sigma \varepsilon (T_w^4 - T_a^4) dx \quad (۶-۴)$$

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

$$d\dot{Q}_s = \rho_w c_w A_w \frac{\partial T_w}{\partial t} dx \quad (۷-۴)$$

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:

$$k_w A_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} + \frac{I^2 \chi_w}{A_w} - \pi d_w h(T_w - T_a) - \rho_w c_w A_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = 0 \quad (۸-۴)$$

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

$$\frac{d^2 T_1}{dx^2} + K_1 T_1 + K_2 = 0$$

که در آن K_1, T_1 و K_2 عبارتند از:

$$T_1 = T_w - T_a$$

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

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

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 می آید (Davies & Fisher 1964):

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

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 اندازه‌گیری اغتشاش‌های سرعت جریان سیال با استفاده از دستگاه جریان‌سنج سیم داغ تا فرکانس مشخصی است. فراتر از این فرکانس، نسبت دامنه ورودی اغتشاش‌های سرعت جریان سیال به دامنه ولتاژ خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم داغ کاهش یافته و اختلاف فاز آنها نیز به شدت تغییر می‌کند. بنابراین دستگاه جریان‌سنج سیم داغ قادر به اندازه‌گیری صحیح اغتشاش‌های سرعت جریان سیال با فرکانس بالاتر از آن نیست. این فرکانس مشخص را فرکانس قطع، f_c ، می‌نامند. با تنظیم دستگاه جریان‌سنج سیم داغ می‌توان 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 جریان‌سنج سیم داغ در اندازه‌گیری صحیح اغتشاش‌های جریان سیال، تأثیر خواهند داشت. به‌منظور اندازه‌گیری صحیح، باید تمام این مجموعه عوامل در کنار هم بهینه شده و پاسخ فرکانسی بهینه‌ای را برای دستگاه جریان‌سنج سیم داغ تنظیم نمود.

۴-۷-۱- پاسخ فرکانسی سنسور سیم داغ

سنسور سیم داغ معمولاً نمی‌تواند سریعاً به تغییرات به‌وجود آمده در شرایط جریان سیال پاسخ دهد. پاسخ فرکانسی سنسور سیم داغ با فرض این‌که طول سنسور به اندازه کافی بلند باشد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این حالت انتقال حرارت هدایتی از دو انتهای سیم داغ به پایه‌ها ناچیز است و دما در طول سیم داغ به‌صورت یکنواخت خواهد بود. معادله توازن حرارتی وقتی که لختی حرارتی در نظر گرفته می‌شود به‌صورت معادله زیر بیان می‌شود:

$$\frac{C_w}{\alpha_0 R_0 (A + BU^n - I^2)} \frac{dR_w}{dt} + R_w = \frac{(A + BU^n)}{(A + BU^n - I^2)} R_a \quad (11-4)$$

که در آن $C_w = \rho_w c_w (\pi/4) d^2 \ell$ برابر با ظرفیت حرارتی سنسور سیم داغ می‌باشد.

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 می‌باشد. ثابت زمانی سنسور سیم داغ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

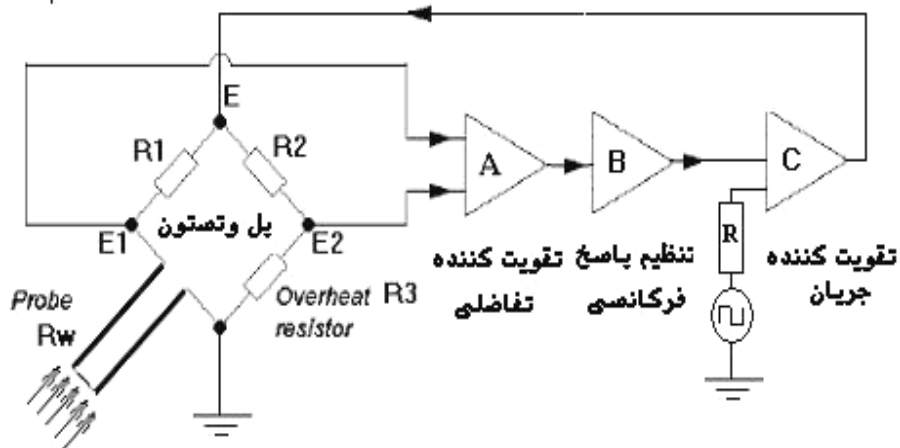
$$M = \frac{C_w}{\alpha_0 R_0 (A + BU^n - I^2)} \quad (12-4)$$

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.

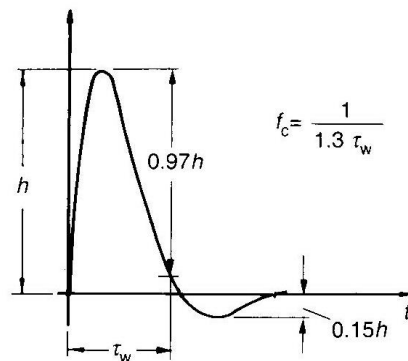
در روش تجربی، برای تعیین پاسخ فرکانسی دستگاه جریان سنج سیم داغ به اغتشاشهای جریان سیال از دو روش سیالاتی و الکترونیکی استفاده می شود. در روش سیالاتی، اغتشاش کوچکی به جریان سیالی که پراب در آن قرار دارد، اعمال می شود و سپس پاسخ فرکانسی دستگاه جریان سنج سیم داغ مورد ارزیابی قرار می گیرد. این اغتشاش ممکن 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 می شود. در روش الکترونیکی، یک سیگنال اغتشاش الکترونیکی e_t به مدار الکترونیکی دما ثابت CT اعمال می شود (شکل ۴-۶). با اعمال این سیگنال، خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ که به صورت ولتاژ بوده مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل (۴-۶) اعمال سیگنال موج مربعی به مدار الکترونیکی دما ثابت CT [1]

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 ۰/۱۵ بیشترین مقدار خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ است. τ_w مدت زمانی است که ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ از زمان آغاز اعمال سیگنال موج مربعی شروع شده و تا ۳٪ مقدار ماکزیمم خود نسبت به محور t نزول می‌کند. با تعیین τ_w ، فرکانس قطع f_c از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$f_c = \frac{1}{1.3\tau_w} \quad (۴-۱۳)$$



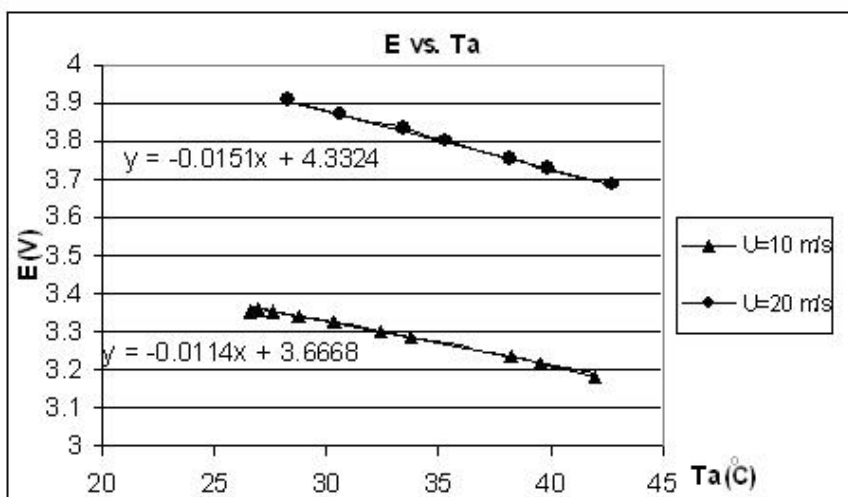
شکل (۴-۷) پاسخ فرکانسی پراب سیم داغ در مدار الکترونیکی CT نسبت به سیگنال موج مربع [1]

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.

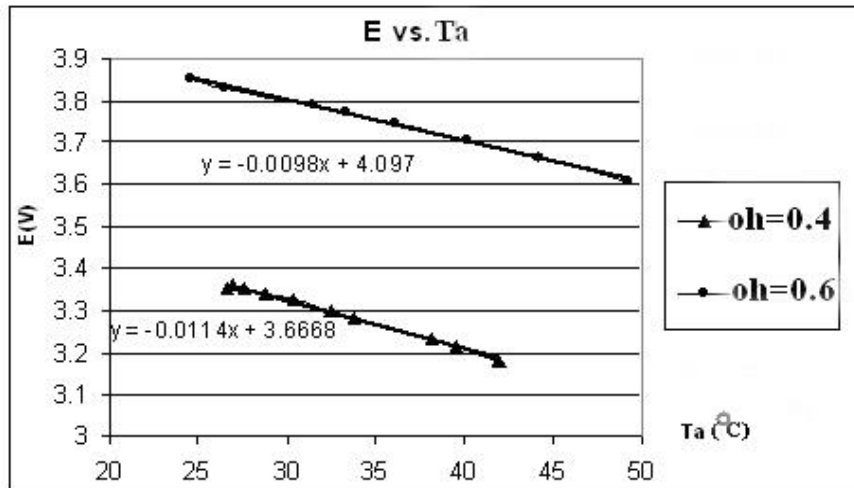
در بسیاری از جریانها، دمای سیال T_a ممکن است با زمان تغییر کند. این تغییر دما، ممکن است به علت توان الکتریکی موتور فن در یک تونل باد مدار بسته باشد. در این حالت ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ با تغییر دمای محیط، T_a ، تغییر کرده و سبب بروز خطا می شود، به طوری که برای هر درجه افزایش دما در اندازه 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 فراگرمایی $0/4$ 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 می یابد. (توضیحات جامع در مورد سنسور سیم داغ و فیلم داغ در فصل ۶ آمده است.)



شکل (۴-۸) کاهش ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ برای سنسور فیلم داغ بر اثر افزایش دمای محیط در نسبت فراگرمایی ۰/۴ برای سرعتهای $U=10\text{ m/s}$ و $U=20\text{ m/s}$ [1]

به عبارت دیگر هر چه سرعت سیال افزایش یابد، شیب خط کاهش ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ، E ، نیز افزایش می یابد. علت این امر را می توان در کاهش مقدار T_w و حساس تر شدن سنسور نسبت به دمای محیط دانست. هر چه سرعت افزایش یابد، میزان ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج 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 می یابد. نتیجه این امر، کاهش R_w و T_w می باشد. شکل (۴-۹) نشان دهنده منحنی کاهش E بر حسب دمای محیط سیال T_a برای سنسور فیلم داغ در سرعت 10 m/s و در دو نسبت فراگرمایی ۰/۴ و ۰/۶ می باشد. همان گونه که در شکل (۴-۹) مشاهده می شود، با کاهش مقدار نسبت فراگرمایی، ولتاژ بالای پل E با شیب تندتری کاهش می یابد، به طوری که برای نسبت فراگرمایی ۰/۶ این کاهش با نرخ منفی ۰/۰۰۹۸ و برای نسبت فراگرمایی ۰/۴ این کاهش با نرخ منفی ۰/۰۱۱۴ همراه است.

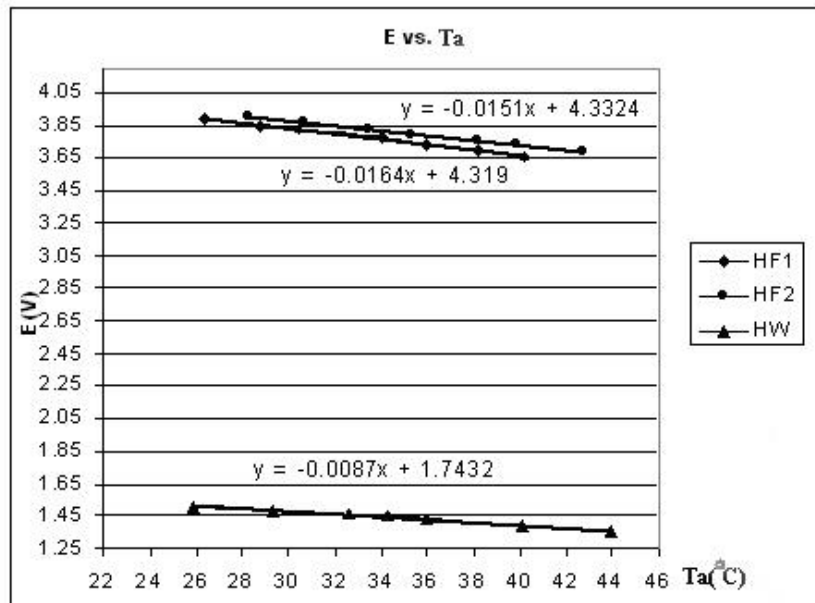


شکل (۴-۹) روند کاهش ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ برای سنسور فیلم داغ بر اثر افزایش دمای محیط در سرعت $U = 10 \text{ m/s}$ و دونسبت فراگرمایی 0.4 و 0.6 [1]

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_w) 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 [1]

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)

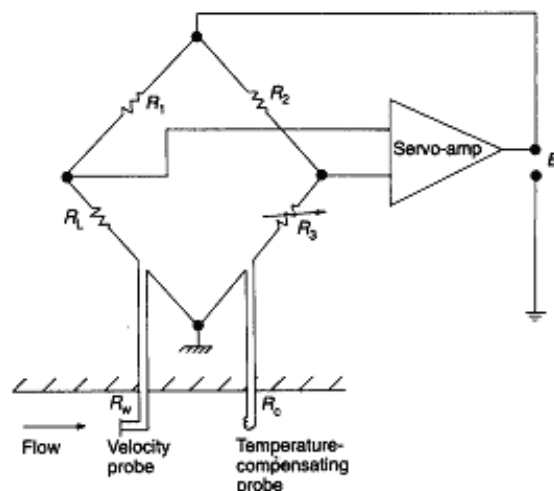
ب (نرم افزاری (تحلیلی).

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 اندازه گیری سرعت جریان سیال قابل اغماض است. با توجه به این که مقاومت سنسور سیم داغ و در نتیجه دمای آن با نسبت فراگرمایی مشخص می شود، بنابراین با تغییر این نسبت می توان 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 وتسون قرار می گیرد، به طوری که مقاومت متغیر با سنسور حساس به دما به صورت سری می باشد. 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 گونه ای که وقتی جریان الکتریکی از آن عبور می کند، هیچ گونه حرارتی تولید نکرده و مقاومت الکتریکی آن نیز ثابت باشد.

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



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

دما ثابت CT [1]

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

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

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

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:

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

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 به صورت تحلیلی

در حال حاضر با توجه به رشد سریع رایانه‌ها، اصلاح اثر دما بر سرعت جریان سیال به صورت 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 این که 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 1973):

$$\left(\frac{T_w - T_r}{T_w - T_a}\right)^n \quad (17-4)$$

T_r دمای مرجع، T_a دمای جریان سیال و T_w دمای سنسور سیم داغ است. در صورتی که بازه تغییرات دما حدود $\pm 5^\circ$ 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 پراب را به‌طور دقیق دانست. پس از اندازه‌گیری ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج 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 $0/45\%$ کاهش داد. ضریب اصلاح دما را می‌توان به‌صورت معادله (۴-۱۹) نیز بیان نمود (Dantec 2004):

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

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 جریان سنج 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 2004):

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

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

زیرنویسهای fa و fr 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 جریان سنج 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 ۱٪ کاهش داد. \pm کاهش داد. (Mayle & Anderson 1991) 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 به‌کارگیری دستگاه جریان سنج سیم داغ، اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان سیال است.

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

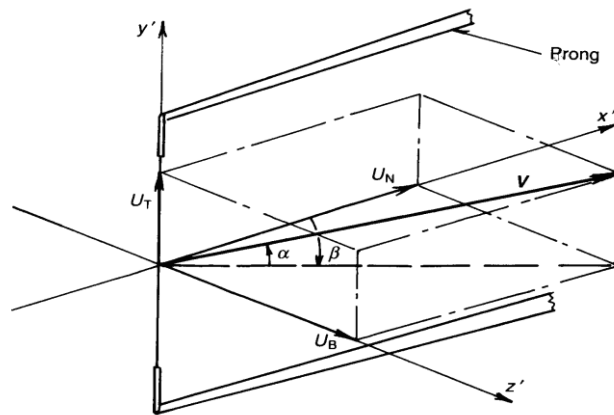
داغ

همان‌گونه که بیان شد، اصول عملکرد دستگاه جریان سنج سیم داغ بر اساس انتقال حرارت از یک سنسور سیم/فیلم داغ به جریان سیال است. به‌منظور 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 $E^2 = A + BU^n$ (King) رابطه سرعت جریان سیال و مقدار انتقال حرارت از سنسور سیم داغ را بیان می‌کند. معادله فوق با فرض یک بعدی بودن جریان سیال به‌دست آمده است که در این حالت با دانستن جهت جریان سیال، اندازه U یک کمیت اسکالر خواهد بود. در صورتی‌که جهت جریان سیال مشخص نباشد، معادله فوق را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

$$E^2 = A + BV_e^n \quad (4-24)$$

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 کارتیزین واقع در مرکز سنسور به‌صورت $\vec{V} = (U_N, U_T, U_B)$ 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 یاب و β زاویه پیچ است.



شکل (۴-۱۲) بردار سرعت و مؤلفه‌های آن نسبت به مختصات سنسور [1]

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

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

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

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

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 (Jorgensen 1971) بیان شد:

$$V_e^2 = U_N^2 + k^2 U_T^2 + h^2 U_B^2 \quad \text{(۲۸-۴)}$$

ضرایب \$k\$ و \$h\$، حساسیت سنسور نسبت به زوایای یا \$\alpha\$ و پیچ \$\beta\$ می‌باشد. در صورتی که جریان سیال یک بعدی و موازی پایه‌های پراب سنسور سیم داغ باشد، مقادیر \$U_T\$ و \$U_B\$ برابر صفر است و \$V_e = U_N\$ خواهد بود. در این حالت می‌توان با استفاده از پراب یک بعدی به همراه یک دستگاه جریان سنج سیم داغ، سرعت جریان سیال را اندازه‌گیری نمود. برای جریان دو بعدی در صورتی که سنسورها و پایه‌های 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، می‌توان \$U_T\$ و \$U_N\$ را به طور همزمان به دست آورد.

همچنین با دانستن ضرایب حساسیت k و h نسبت به زوایای α و β و با استفاده از یک پراب سه مؤلفه‌ای می‌توان مؤلفه‌های بردار سرعت را به‌طور همزمان به‌دست آورد.

۴-۹-۲- اندازه‌گیری جریان سیال یک بعدی

در جریان یک بعدی $V = W = 0$ است، بنابراین $V_e = U$ بوده و می‌توان سرعت را با استفاده از یک پراب یک بعدی اندازه‌گیری 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 پژوهشها نامشخص می‌باشد.

در صورتی که جریان دو بعدی باشد، پراب را در صفحه جریان سیال قرار داده با تغییر زاویه α ، ولتاژ خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم داغ اندازه‌گیری می‌شود. همان‌گونه که بیان شد، به‌منظور افزایش دقت اندازه‌گیری 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 می‌شود. بنابراین در اندازه‌گیری سرعت در جریانی که جهت آن مشخص است، پس از دریافت داده‌ها $E_G(n)$ از طریق کارت DAQ (به‌صورت نرم افزاری) مطابق معادله زیر:

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

ولتاژ خروجی از مدار تطبیق دهنده دستگاه جریان‌سنج سیم داغ را بر بهره اعمالی تقسیم نموده و مقدار آفست به آن اضافه می‌شود. سپس اثر دما بر روی ولتاژ $E(n)$ اعمال شده و ولتاژ خروجی $E(n)$ اصلاح می‌شود. مقدار $E_c(n)$ ولتاژ دستگاه جریان‌سنج سیم داغ بوده که رابطه غیرخطی با سرعت جریان سیال دارد. با استفاده از معادله‌های کالیبراسیون به‌دست 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:

$$U(n) = V_e(n) = \left(\frac{E_c^2(n) - A}{B} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (۳۰-۴)$$

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:

$$U(n) = V_e(n) = C_0 + C_1 E_c(n) + C_2 E_c^2(n) + C_3 E_c^3(n) + C_4 E_c^4(n) + C_5 E_c^5(n) \quad (۳۱-۴)$$

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. به منظور 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 0 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 0 شروع شده و به 4095 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 -10 و 10 ولت باشد، ولتاژ خروجی کارت DAQ که به‌صورت دیجیتال است، طبق معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$E_{out}(I) = -10 + (I) \frac{20}{4095} \quad (0 \leq I \leq 4095) \quad (32-4)$$

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 (۳۲-۴) 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: همان‌گونه که بیان شد، دستگاه جریان‌سنج سیم داغ سرعت جریان را به‌طور لحظه‌ای اندازه‌گیری می‌کند. به‌منظور 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^{۶۴} 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 ۲٪ و در لایه مرزی آشفته بیشتر از 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^{۶۵} و برجستگی^{۶۶} است.

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

⁶⁴ Turbulence Intensity

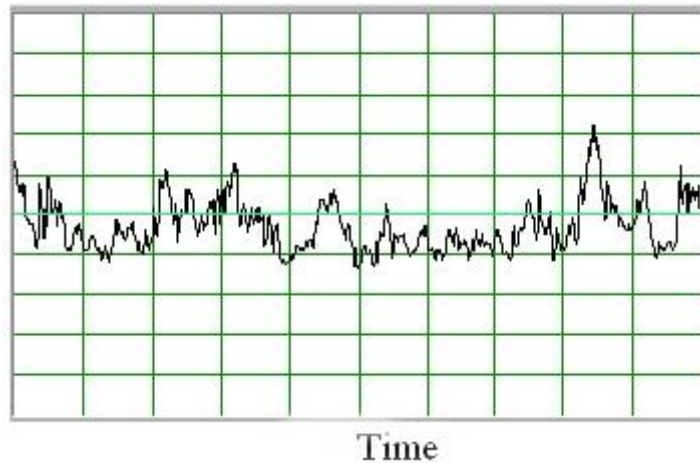
⁶⁵ Skewness

⁶⁶ Kurtosis

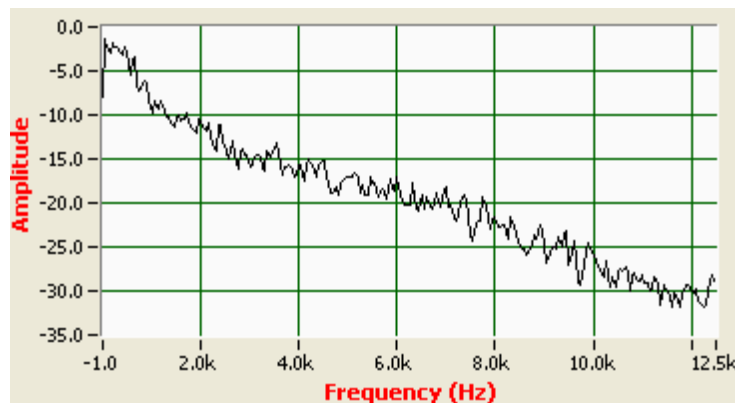
$$K = \sum_1^N \frac{(U(n) - U_{mean})^4}{N \cdot \sigma^4} \quad (38-4)$$

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.



الف



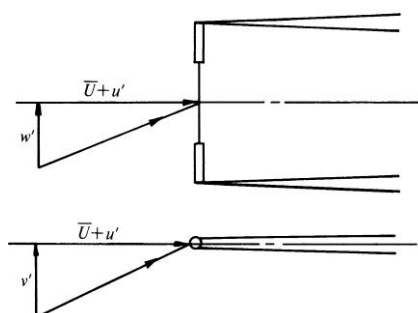
ب

شکل (۴-۱۳) بررسی سرعت لحظه‌ای (الف) در حوزه زمان (ب) در حوزه فرکانس [1]

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^{۶۷} 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 [1]

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:

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

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

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

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

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

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

با فرض کوچک بودن u نسبت به U می‌توان 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) می‌توان معادله را برای شدت اغتشاشهای اندازه‌گیری شده بیان نمود:

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

$$R_{uw^2} = \frac{\overline{uw^2}}{(\bar{u}^2)^{\frac{3}{2}}}$$

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

در معادله‌های فوق \bar{U}_m و \bar{u}_m^2 به ترتیب مقدار سرعت متوسط و شدت اغتشاشهای سرعت اندازه‌گیری شده و \bar{U} و \bar{u}^2 به ترتیب سرعت متوسط و شدت اغتشاشهای واقعی جریان است. با توجه به معادله‌های (42-4) و (43-4) می‌توان دریافت، هنگامی که شدت اغتشاشهای سرعت جریان سیال بالا است، مقدار سرعت اندازه‌گیری

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 (۴-۱) به دست می آید (Bruun 1976):

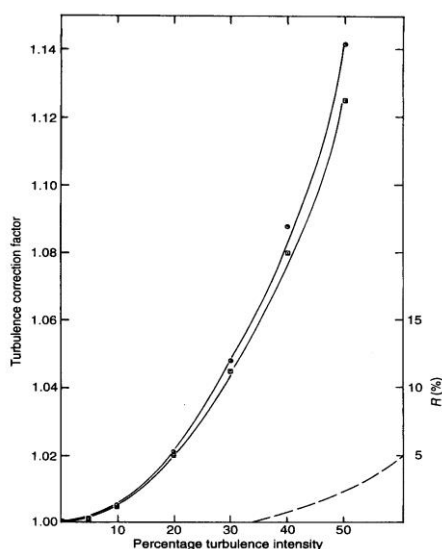
جدول (۴-۱) نسبت سرعت اندازه گیری شده به سرعت واقعی در شدت اغتشاشهای مختلف جریان [1]

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

مطابق جدول (۴-۱)، مقدار $\overline{U}_m / \overline{U}$ در شدت اغتشاشهای پایین ناچیز بوده و هنگامی که مقدار آن به ۳۰٪ می رسد، مقدار $\overline{U}_m / \overline{U}$ برابر ۱/۰۵ خواهد بود. شکل (۴-۱۵) ضریب اصلاح شدت اغتشاشهای جریان سیال را برای سرعت متوسط U نشان می دهد (Swaminathan et al. 1986).

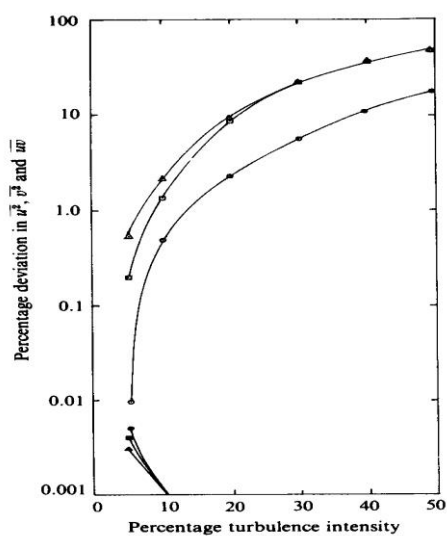
مقادیر منحنی شکل (۴-۱۵) هم خوانی مناسبی با جدول (۴-۱) دارند.

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



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

[1] (Swaminathan et al. 1986)



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

[1] (Swaminathan et al. 1986)

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^{۶۸} و ایزاک نیوتن^{۶۹} 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^{۷۰} 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

⁶⁸ Leonardo Davinchi

⁶⁹ Isaak Nyuton

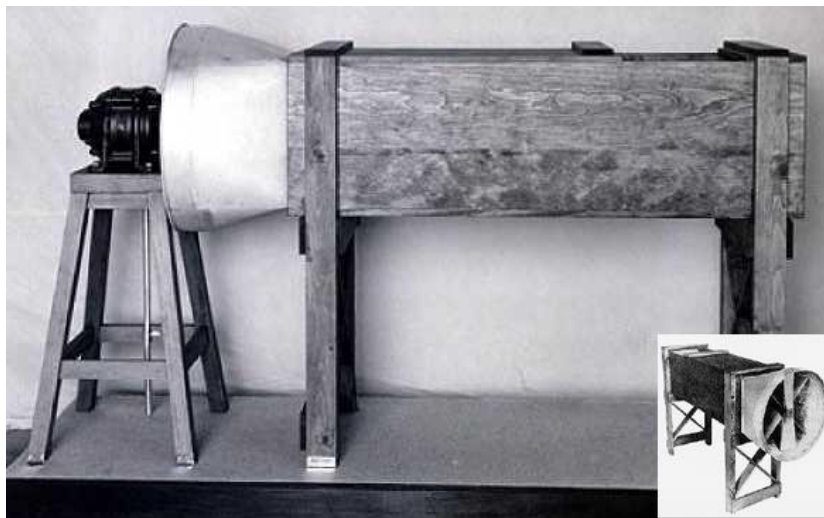
⁷⁰ Fransis

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 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 ایرفویل، 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 $NACA$ ^{۷۱} 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^{۷۲} 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

⁷¹ $NACA$: National Advisory Committee for Aeronautics

⁷² Langley Virginia

که فشار آن می‌توانست تا ۲۰ اتمسفر افزایش یابد در لانگلی ساخته شد. در سال ۱۹۳۱ تونل بادی با سطح اتاق ۱۸*۹ m در لانگلی به‌منظور آزمایش بر روی مدل‌های مقیاس واقعی ساخته شد.



شکل (۱-۵) تونل باد ساخت برادران رایت در سال ۱۹۰۱ [2]

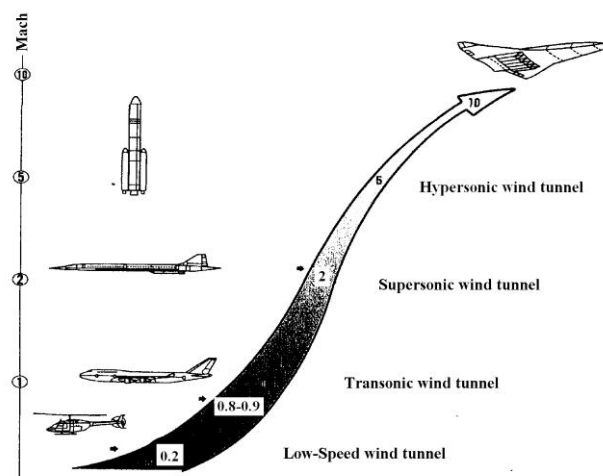
از این پس تونل بادهای متعددی در جهان ساخته شد و با گذشت زمان و پیشرفت تکنولوژی و همچنین ورود کامپیوترها، استفاده از تونل باد وارد مرحله جدیدی گردید که می‌توان به افزایش کیفیت جریان در تونل باد و کاهش شدت اغتشاشات، ساخت دستگاه‌های اندازه‌گیری جدید که دقت بالاتر و خطای کمتر و فرکانس اندازه‌گیری بالاتر و پاسخ زمانی بهتر داشتند، ورود دستگاه‌های جمع‌آوری داده‌ها که به صورت خودکار عمل می‌کردند و باعث افزایش سرعت آزمایش‌ها می‌شدند، افزایش قدرت تحلیل داده‌ها توسط کامپیوترها و ساخت انواع مختلف تونل باد برای کاربردهای مختلف اشاره نمود.

۵-۳- انواع تونل باد

تونل‌های باد از لحاظ سرعت جریان هوا در اتاق آزمون، مسیر حرکت جریان هوا و ابعاد، طبقه‌بندی می‌شوند. جدول (۱-۵)، طبقه‌بندی انواع تونل باد را برحسب سرعت جریان هوا در اتاق آزمون نشان می‌دهد. در شکل (۲-۵) نیز به‌صورت 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 [2]

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 ^{۷۳})
$M=0.3 \sim 0.8$	تونل باد مادون صوت با جریان تراکم‌پذیر
$M=0.8 \sim 1.2$	تونل باد در محدوده سرعت صوت ^{۷۴}
$M=1.2 \sim 5$	تونل باد مافوق صوت ^{۷۵}
$M \geq 5$	تونل باد ماورای صوت ^{۷۶}



شکل (۲-۵) محدوده ماخ برای انواع وسایل آیرودینامیکی [2]

⁷³ Low Speed Wind Tunnel

⁷⁴ Transonic Wind Tunnel

⁷⁵ Supersonic Wind Tunnel

⁷⁶ Hypersonic Wind Tunnel

تونل باد با سرعت کم از لحاظ مسیر جریان هوا به دو گروه تونل باد مدار باز^{۷۷} و تونل باد مدار بسته^{۷۸} 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.

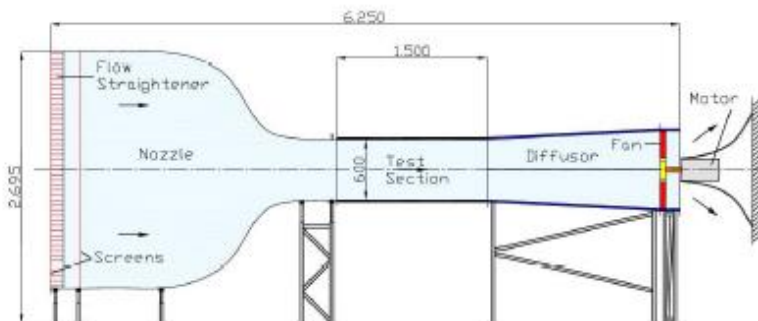
در تونل باد مدار بسته، جریان هوا از کانالی که ابتدا و انتهای آن به هم متصل است عبور می‌کند، به عبارت دیگر مسیر جریان هوا در این نوع تونل باد بسته است و جریان هوا در تونل باد گردش دارد. شکل (۵-۵) نمونه‌ای از تونل باد مدار بسته را نشان می‌دهد.

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

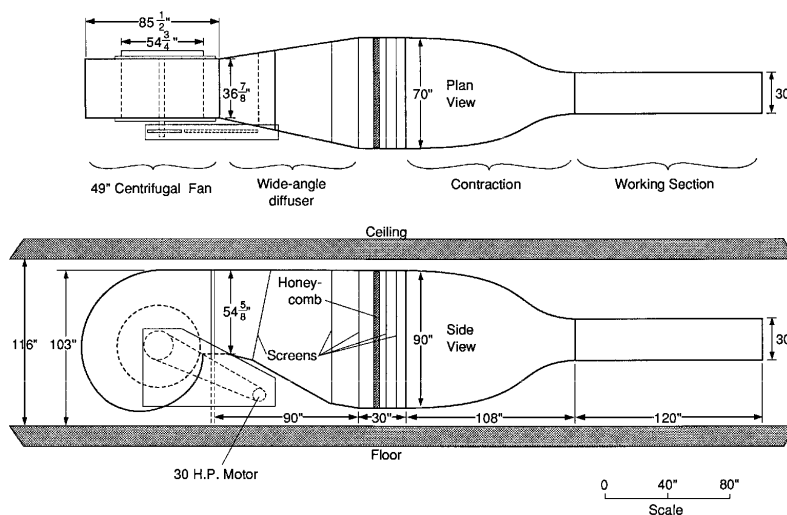
⁷⁷ Eiffel Type

⁷⁸ Prandtl or Gottingen Type

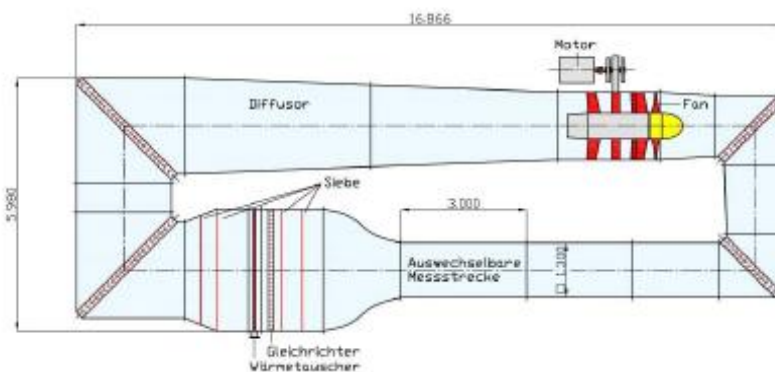
مدار بسته با اتاق آزمون باز (شکل ۵-۶) تمام قسمت‌های تونل باد بجز اتاق آزمون با محیط ارتباط نداشته و اتاق آزمون آن فاقد دیوار است.



شکل (۵-۳) تونل باد مدار باز مکند [2]



شکل (۵-۴) تونل باد مدار باز دمند [2]

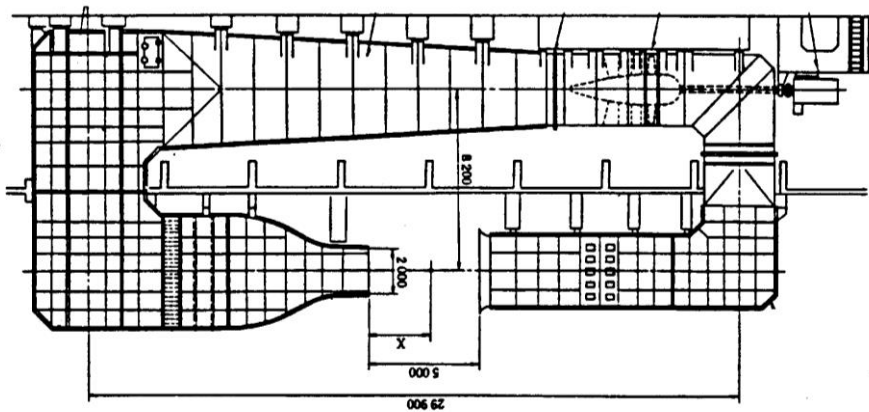


شکل (۵-۵) تونل باد مدار بسته با اتاق آزمون بسته [2]



شکل (۵-۶) تونل باد مدار بسته با اتاق آزمون باز [2]

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



شکل (۵-۷) نمای شماتیک از تونل باد مدار بسته با اتاق آزمون باز [2]

در تونل باد مدار بسته دو نوع اتاق آزمون دیگر نیز وجود دارد که اتاق آزمون نیمه باز و اتاق آزمون باز است. اتاق ۳، 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

۳

جریان هوا می‌شوند. اتاق آزمون باز نیز مشابه اتاق آزمون باز است، با این تفاوت که اتاق آزمون دارای کف می‌باشد. از اتاق آزمون 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 آن که 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 آن را در داخل ساختمان و یا سوله قرار داد.

این گونه تونل بادها را می توان 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 [2]

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 می باشد، بنابراین برای تونل بادهای با سطح اتاق آزمایش بزرگتر از $6/5m^2$ مناسب نبوده و سبب ایجاد آلودگی صوتی می شود.

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- ویژگی های 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 پره های راهنما هزینه اولیه بیشتری مورد نیاز است.

۴- اگر از روش های مرئی سازی 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 می نماید.

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 می شوند و در آزمایشگاه های کوچک از تونل باد مدار باز استفاده می شود. در آزمایشگاه هایی که مرئی سازی در جریان هوا نیز انجام می گیرد، تونل باد را معمولاً به صورتی می سازند 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. علی رغم ابعاد مختلف تونل بادها با سرعت کم ($M=0-0.3$)، 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 (۵-۳)، 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 به‌صورت دلخواه بوده و می‌توان مدلهای 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^{۷۹} مکانی است که در آن مدل قرار گرفته و آزمایشهای مورد نظر در آن انجام می شود. 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، به منظور کاهش توان مورد نیاز فن، بهتر است از اتاق آزمون بسته استفاده شود. تونل باد ایده آل، 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 به صورت باز یا بسته است. با توجه به اینکه نصب و دسترسی به مدل در اتاق آزمون بسته آسان تر بوده و از آنجائیکه توان مورد نیاز فن با افزایش سرعت درون اتاق آزمون، افزایش می یابد. بنابراین برای بهینه کردن انرژی مصرفی فن، بهتر است از اتاق آزمون بسته استفاده شود. از اینرو، اکثر تونل بادهای بزرگ، دارای اتاق آزمون بسته می باشند. برای کاهش اثرات دیواره اتاق آزمون بر روی داده های حاصل از اندازه گیری، سطح اتاق اتاق آزمون را به شکل مستطیل طراحی می کنند. 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.

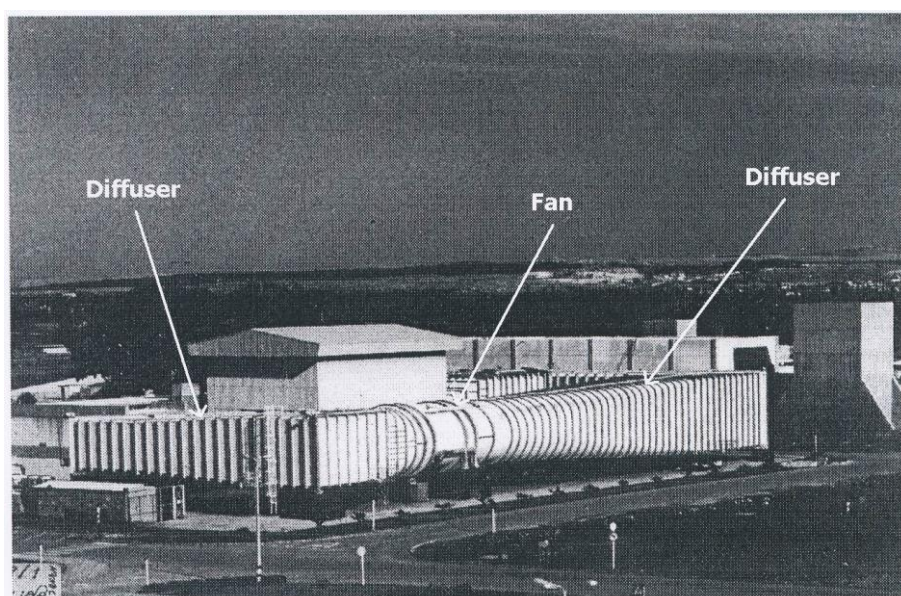
۵-۴-۲- دیفیوزر

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 می کند. 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 می گیرد. عملکرد دیفیوزر یعنی تبدیل انرژی جنبشی به انرژی پتانسیل (فشار)، به

⁷⁹ Test Section

اندازه و نحوه توزیع سرعت در سطح مقطع ورودی، زاویه دیفیوزر و همچنین نسبت سطح ورودی به خروجی وابسته است.

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.



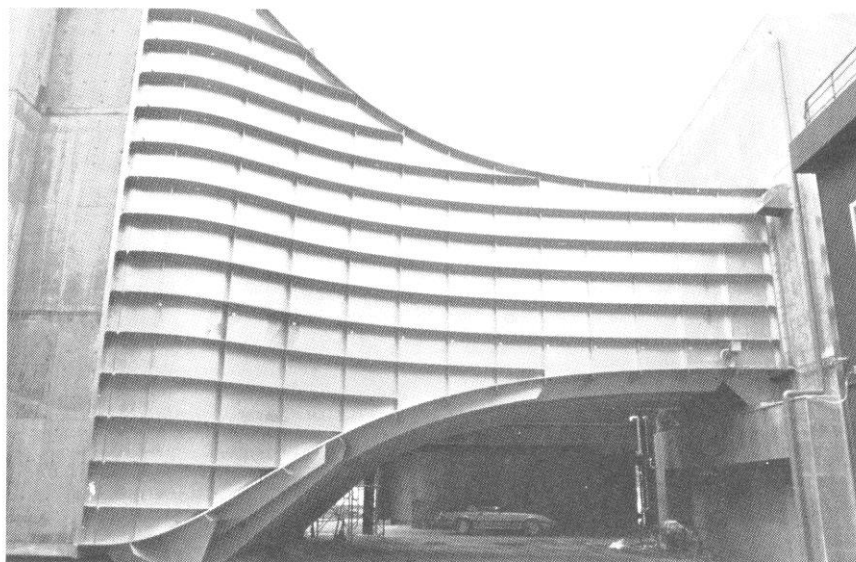
شکل (۵-۹) دیفیوزر تونل باد مدار بسته که در پایین دست فن قرار دارد [2]

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 می کند 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.

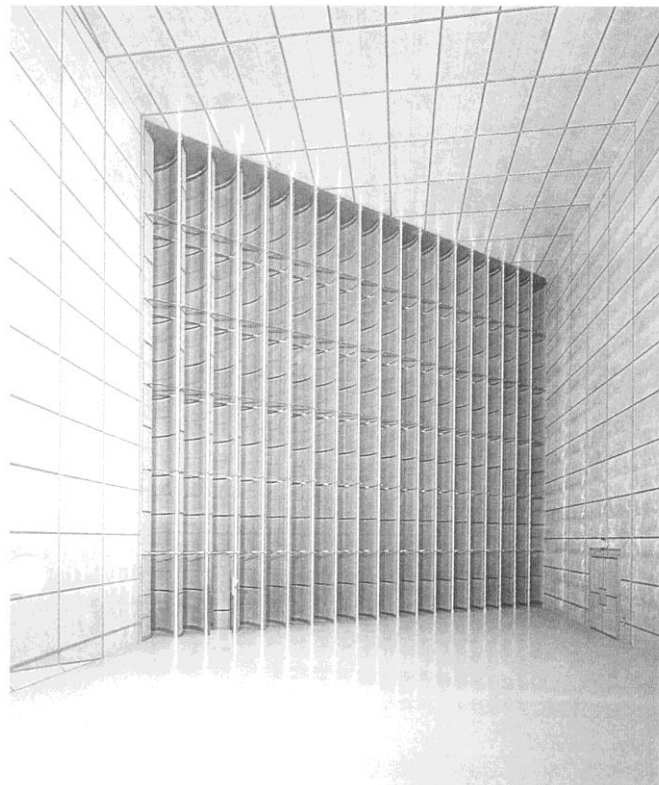
شکل و ابعاد نازل همچنین بر روی افت انرژی در داخل نازل که بیشتر به علت اصطکاک دیواره ها است نیز تاثیر می گذارد. برای جلوگیری از افت فشار زیاد در نازل، سرعت ورودی به نازل در تونل بادهای سرعت پائین (حداکثر سرعت ۱۰۰ تا 150 m/s)، حدود ۱۰ تا 25 m/s است. پروفیل نازل نیز براساس ایجاد توزیع یکنواخت سرعت در خروجی 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 [2]

۵-۴-۴- گوشه ۸۰

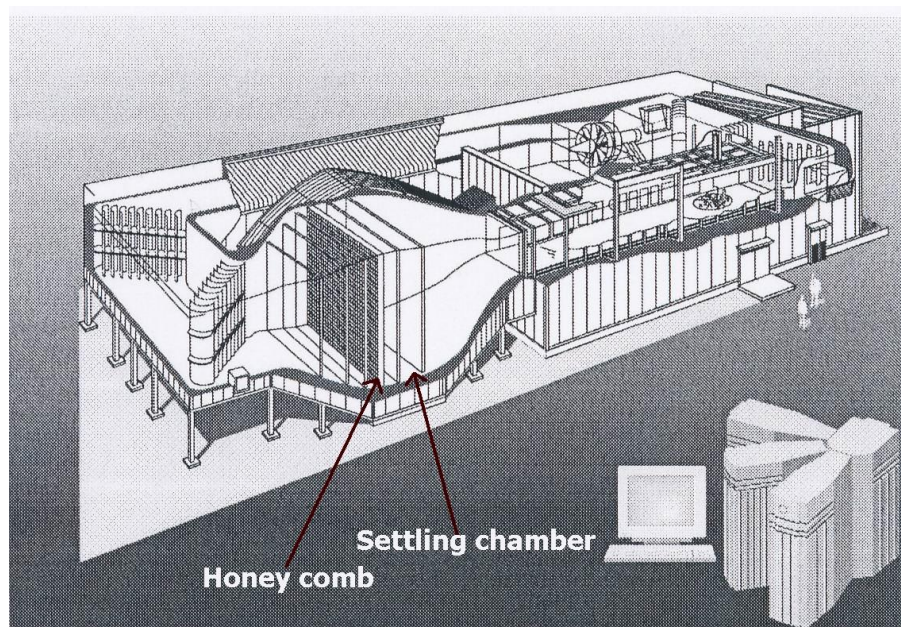
در تونلهای مدار بسته، جریان خروجی از اتاق آزمون، دوباره به اتاق آزمون هدایت می‌شود، به عبارت دیگر جریان هوا 360° می‌چرخد که این عمل به کمک چهار گوشه انجام می‌شود. طراحی گوشه از لحاظ افت انرژی و یکنواختی جریان مهم است. با توجه به بالا بودن سرعت جریان هوا در گوشه‌های اول و دوم، بنابراین افت انرژی در این گوشه‌ها مهم می‌باشند. از طرفی گوشه چهارم اثر قابل توجهی بر روی یکنواختی جریان هوا دارد. به همین جهت در گوشه‌ها تعدادی پره قرار می‌دهند تا بتوان با راندمان و کیفیت بهتری جریان هوا را در مسیر بسته به گردش درآورد. شکل (۵-۱۱)، بخش گوشه (به همراه پره‌های درون آن) تونل باد شرکت نپسان را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که ارتفاع این گوشه 12 m می‌باشد.



شکل (۵-۱۱) گوشه به ارتفاع ۱۲ متر و پره‌های راهنما (تونل باد شرکت مزدا) [2]

۵-۴-۵- اتاق آرامش^{۸۱}

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 $1/5$ تا 2 برابر پهنای آن می‌باشد. شکل (۵-۱۲) اتاق آرامش را نشان می‌دهد.



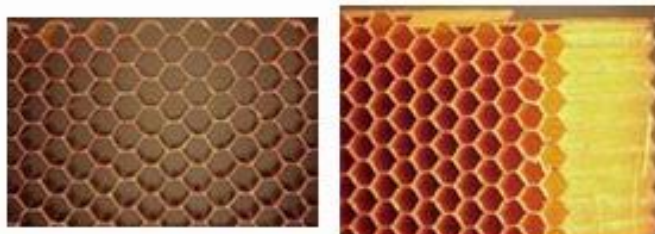
شکل (۵-۱۲) اتاق آرامش تونل باد [2]

شبكة لانه زنبوری که معمولاً در محفظه آرامش قرار می‌گیرد و در شکل (۵-۱۳) نشان داده شده است، دارای خانه‌هایی 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^{۸۲} 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 آرامش، باید طوری باشد که این اغتشاش‌ها

⁸¹ Settling chamber

⁸² Lateral turbulence

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 $0/25$ اینچ است.



شکل (۵-۱۳) لانه زنبوری [2]

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 توریهها 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 توریهها، از بین می روند. توریهها اغتشاشات محوری^{۸۳} را بهتر از اغتشاشات عرضی کم می کنند. توری سبب تغییر انرژی بین اغتشاشات در محورهای گوناگون شده و در نتیجه جریان خروجی را تقریباً

همگن می سازد. در اتاق آرامش ممکن است از یک یا چند توری استفاده کنند. فاصله بین توریها سبب می شوند که گردابه های ایجاد شده توسط توری بالادست، قبل از رسیدن به توری پائین دستی از بین برود. توری های 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 مش⁸⁴ و قطر سیمی که از آن بافته شده است، مشخص می کنند. مش به تعداد سوراخهای توری در یک اینچ از طول اطلاق می شود.

توریها افت نسبتاً زیادی در مسیر جریان هوا ایجاد می کنند 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 می دهد. مشکل دیگری که توریها در تونل باد ایجاد می کنند، کثیف شدن آنهاست که منجر به افزایش افت فشار می شود. در ضمن، با توجه به اینکه گردوغبار روی تور یکنواخت نبوده، کیفیت جریان کاهش می یابد و با زمان تغییر می کند. در صورت استفاده از روشهای مرئی سازی⁸⁵ و استفاده از روغن، خاک چینی و غیره، مشکل فوق افزایش می یابد، لذا اتاق آرامش باید طوری طراحی گردد که بتوان توریها را به راحتی تمیز نمود.

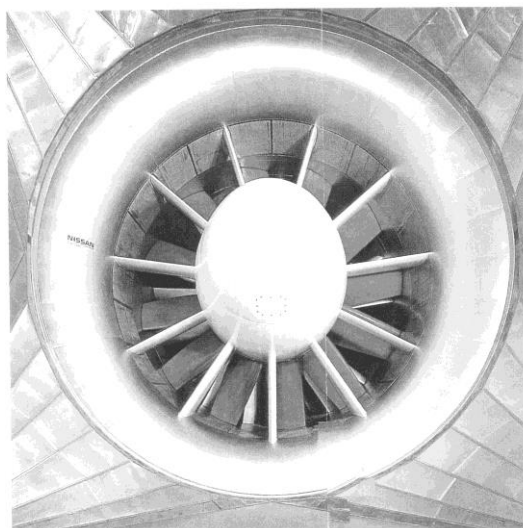
۵-۴-۶- فن

برای ایجاد جریان هوا در تونل باد، باید به هوا انرژی داده شود که این کار توسط فن انجام می شود. به عبارت دیگر، فن انرژی لازم برای جریان هوا و رساندن آن به سرعت مورد نظر در اتاق آزمون را تامین می کند. از اینرو وظیفه فن، جبران تلفاتی است که برای جریان هوا ایجاد می شود که این تلفات متناسب با توان سوم سرعت جریان هوا می باشد. فنهای مورد استفاده در تونل بادهای مدار بسته دارای پره های ثابت می باشند. وجود این پره های ثابت به این علت است که جریان هوای خروجی از فن دارای زاویه و انحراف نسبت به محور فن می باشد، بنابراین برای هدایت مجدد جریان هوا در جهت محور افقی فن و جلوگیری از برخورد جریان هوا با دیواره های تونل باد و اتلاف انرژی جنبشی آن از این پره های ثابت استفاده می کنند. در تونل باد مدار باز مکنده، از فن های بدون پره ثابت هم می توان استفاده کرد، ولی در تونل باد مدار بسته باید حتماً از این پره های ثابت که در بالا دست فن نصب می شوند، استفاده کرد. موتور فن ممکن است که در نازل فن قرار داشته

⁸⁴ Mesh

⁸⁵ Visualization

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 آن جا 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 نیسان را نشان می‌دهد. قطر این فن ۸ m می‌باشد.



شکل (۵-۱۴) فن به قطر ۸ متر (تونل باد شرکت مزدا) [2]

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

الف- فن محوری^{۸۶}

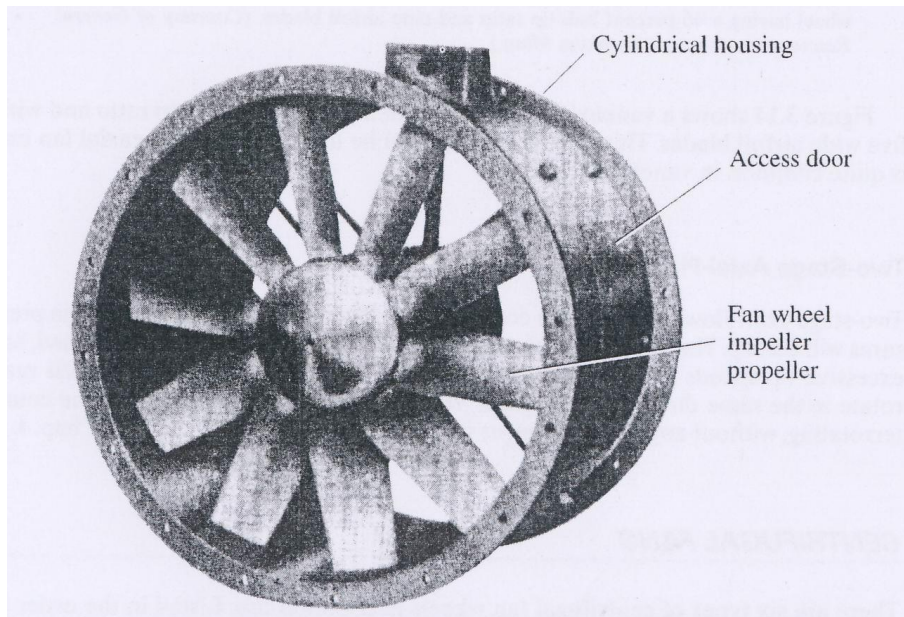
ب- فن سانتریفوژ

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 87 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.



شکل (۱۵-۵) نمونه‌ای از یک فن جریان محوری [2]

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:

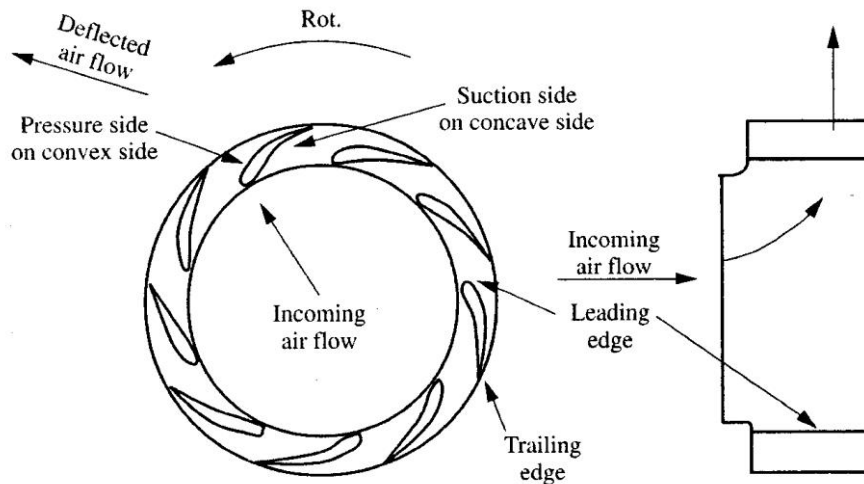
۱- نیروی گریز از مرکز

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.

نمونه ای از این فن ها در شکل (۵-۱۶) نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۶) نمونه ای از فن سانتریفوژ [2]

۵-۵- تونل باد ویژه با سرعت کم

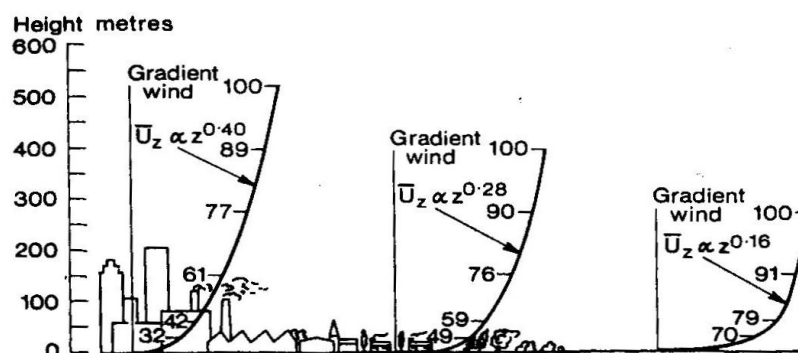
برای حل برخی از مشکلات آیرودینامیکی و یا مهندسی باد نیاز به برخی آزمایشهای ویژه است که این آزمایشهای ویژه نیاز به تونل بادهای ویژه ای از قبیل تونل باد با جریان چرخشی، پرواز آزاد، تونل باد با جریان هوای اغتشاش کم، تونل باد با جریان عمودی، تونل باد برای اتومبیل، تونل باد بدون صدا، تونل باد لایه مرزی و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

۵-۵-۱- تونل باد لایه مرزی

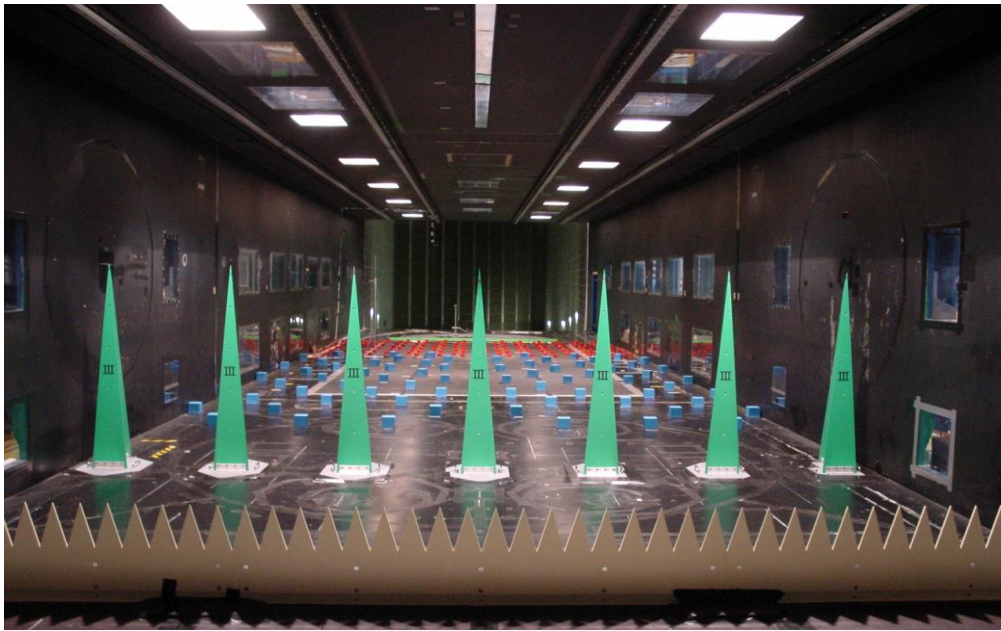
برای بررسی و مطالعه اثر جریان هوای باد بر روی سازه های ساختمانی نظیر پل ها و برجها، پخش آلودگی محیطی و ... از تونل باد لایه مرزی استفاده می شود. مطابق شکل (۵-۱۷) جریان باد در سطح زمین تا ارتفاع مشخصی به صورت لایه مرزی آشفته است و از این رو پروفیل سرعت در اتاق آزمون این گونه تونل بادها باید

به صورت لایه مرزی آشفته باشد. از این رو برای ایجاد لایه مرزی آشفته در اتاق آزمون و ضخیم کردن لایه مرزی و شبیه سازی جریان لایه مرزی هوا، در اتاق آزمون تونل باد لایه مرزی از زبری های مختلفی استفاده می شود که شکل (۵-۱۸) نمونه ای از این زبری ها را نشان می دهد.

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 می یابد، 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 مانع های بزرگ هرمی شکل استفاده می شود و روی کف اتاق آزمون، قبل از مدل، بلوک های کوچکی نصب می شود 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 می آید. با توجه به نوع جریان هوا در اتاق آزمون که به صورت لایه مرزی است، دیگر نیازی نیست که شدت اغتشاش های جریان هوا را همانند تونل باد استاندارد، کاهش داد. بنابراین نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی نازل بالا نبوده و ابعاد تونل باد کوچک تر و هزینه ساخت آن کمتر می شود. 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 زبری ها، نیاز به اتاق آزمون به طول ۱۰ الی ۱۵ متر است.



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



شکل (۵-۱۸) استفاده از انواع زبری در ابتدای اتاق آزمون تونل باد لایه مرزی [2]

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 به منظور 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، به دست 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 بی بعد بدست می‌آیند که با استفاده از آنها می‌توان جریان سیالات

را شبیه سازی نموده و نتایج مطلوب را بدست آورد. به عنوان مثال، نیروی پسای وارد بر یک کره به قطر d_c که در یک سیال تراکم ناپذیر در حال حرکت μ قرار دارد، به لزجت سیال μ ، چگالی سیال ρ ، سرعت سیال U ، قطر کره d_c ، بستگی دارد و آنرا می توان به صورت زیر نوشت:

$$F_{drag} = D = f(\mu', \nu, \rho, \mu) \quad (1-5)$$

با انجام آزمایش بر روی کره ای به قطر d_c و با سرعت سیال U و خواص ρ_1, \dots, μ_1 ، نیرو μ پسای DI به دست می آید. اما اگر هر کدام از این پارامترها تغییر کنند، نیروی پسا دیگر DI نیست. از این رو برای شرایط مختلف، تعداد بی شماری نمودار و جدول به دست می آید که بسیار پیچیده خواهند بود. فرض کنید که می خواهیم با انجام آزمایش، منحنی های نیروی پسا را بر حسب U, ρ, μ, d_c به دست آوریم. در مرحله اول ρ, μ, d_c را ثابت گرفته و منحنی D بر حسب U را می خواهیم بدست آوریم. برای μ است 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 می شود. 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 این که هر آزمایش μ یک ساعت طول بکشد و ما در هر روز ۸ ساعت کاری، آزمایش ها را انجام دهیم، در حدود ۵ سال طول می کشد تا منحنی های مربوط به اثر U, ρ, μ, d_c بر روی نیروی پسای کره را به دست آوریم. نکته جالب این است که در پایان این مدت، با ۱۰۰۰۰ منحنی سر و کار داریم که استفاده از نتایج μ با بسیار دشوار است. اما با استفاده از آنالیز ابعادی، رابطه (۱-۵) به رابطه زیر تغییر می کند:

$$\frac{D}{\rho U^2 d_c^2 \mu} = f_1\left(\frac{\rho U d_c}{\mu}\right) \quad (2-5)$$

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 جریان های مافوق صوت و جریان های سطحی آزاد به ترتیب نیروهای الاستیسیته و گرانشی اهمیت دارند، از این رو رابطه (۲-۵) دیگر معتبر نمی باشد. در این موارد نیروی پسا تابعی از عدد ماخ M (جریان مافوق صوت) و عدد فرود Fr (جریان های سطحی آزاد) نیز باشد.

در مواردی، برای انجام آزمایش تجربی بر روی یک نمونه واقعی، ممکن است نتوان از نمونه واقعی برای انجام آزمایش ها 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:

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

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

و نیروی اینرسی به صورت رابطه زیر در می آید:

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

سایر نیروها عبارتند از:

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

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

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 آن را با علامت E نشان می دهند. 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 شلختینگ⁸⁸ (1979). بنابراین داریم:

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

در مکانیک سیالات و آیرودینامیک، نیروهای اینرسی مهم ترین نیروها می باشند و از این رو نسبت نیروی اینرسی به سایر نیروهایی که در بالا ذکر شده اند، گروهی از اعداد بی بعد را تشکیل می دهند که نقش مهمی را در مطالعه و بررسی جریان سیالات دارند. این اعداد بی بعد عبارتند از:

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

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

⁸⁸ Schlichting

$$Fr = \sqrt{\frac{U^2}{Lg}} \quad (۱۱-۵)$$

نیروی اینرسی
وزن

عدد فرود در تونل باد کاربردی ندارد. عدد ماخ نیز برای جریان‌های با سرعت بالا (بیش از m/s ۱۰۰) 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:

$$\text{مدل } (Re) = \text{نمونه واقعی } (Re) \quad (5-12)$$

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، برونمایی 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:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (13-5)$$

$$\rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} \right) = \mu \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) \quad (14-5)$$

$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} \right) = \mu \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) \quad (15-5)$$

$$\rho \left(\frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} \right) = \mu \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) \quad (16-5)$$

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:

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

که:

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

از طرف دیگر، می‌توان این معادله‌ها را بی‌بعد ساخت. به‌عنوان 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:

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

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

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

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

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

اجزای جانبی بکار رفته در آزمایش و

کالیبراسیون دستگاه جریان سنج سیم

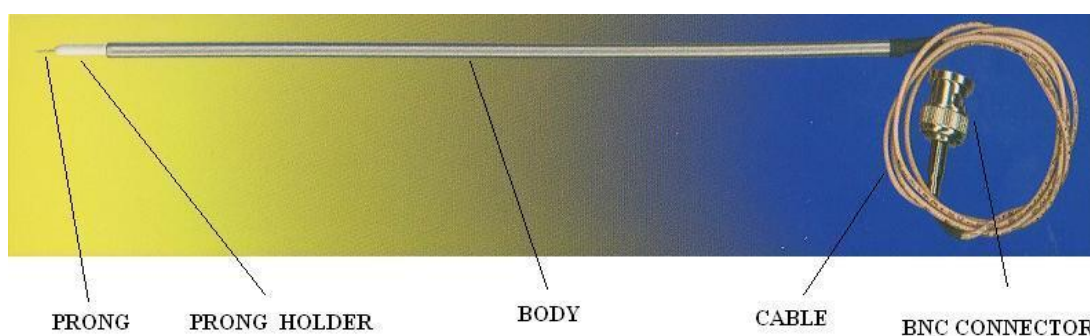
داغ

اجزای جانبی بکار رفته در آزمایش و کالیبراسیون دستگاه جریان سنج سیم داغ

به منظور انجام آزمایشات و تحقیقات نیاز به جریان سنج سیم داغ، تونل باد، پراب سنسور سیم داغ، مکانیزم انتقال دهنده پراب، دستگاه کالیبراسیون، سیستم اخذ داده ها و نرم افزار می باشد. در مورد جریان سنج سیم داغ و تونل باد به تفصیل در فصول قبل توضیحاتی داده شد. در این فصل دیگر وسایل بررسی می گردد.

۶-۱- پراب سیم داغ

یکی از اجزای دستگاه جریان سنج سیم داغ، پراب است که شامل سنسور^{۸۹}، پایه‌ها^{۹۰}، نگهدارنده^{۹۱}، بدنه^{۹۲}، کابل^{۹۳} و اتصالات^{۹۴} است. نمایی از پراب در شکل (۶-۱) آمده است.



شکل (۶-۱) نمایی از پراب [1]

پراب جریان سنج سیم داغ بر مبنای نوع سنسور به کار رفته و یا تعداد سنسور آن (یک، دو و سه بعدی) تقسیم بندی می شود. سنسور پراب دستگاه جریان سنج، از نوع سیم داغ و یا فیلم داغ است. قطر سنسور سیم داغ بسیار کم و دارای پاسخ فرکانسی بالا بوده، ولی شکننده است. فیلم داغ معمولاً لایه‌ای از نیکل و یا پلاتین

⁸⁹ Sensor

⁹⁰ Prongs

⁹¹ Prong Holder

⁹² Body

⁹³ Cable

⁹⁴ BNC Connector

است که بر روی یک زیر لایه از جنس کوارتز قرار می‌گیرد. استحکام سنسور فیلم داغ بالا است، ولی پاسخ فرکانسی آن نسبت به پاسخ فرکانسی سنسور سیم داغ کمتر می‌باشد.

سنسور با جوش القایی و یا لحیم کاری به دو پایه که معمولاً از جنس فولاد ضد زنگ و یا نیکل است، متصل می‌شود. برای آن که آثار تداخلی پایه در جریان به حداقل برسد، معمولاً پایه پراب به شکل سوزن ساخته می‌شود که قطر نوک آن 0.1 mm و قطر پایه آن حدود 0.6 mm است. همچنین به منظور هدایت الکتریکی بهتر، پایه‌های پراب با طلا پوشش داده می‌شوند. بدنه پایه‌های پراب از جنس سرامیک بوده که سوزنها در آن قرار می‌گیرند. سرامیک، عایق بسیار مناسبی است که اثر خازنی آن ناچیز می‌باشد. این سرامیک به بدنه پراب که از لوله فولادی است متصل می‌شود و سنسور از طریق پایه، کابل و اتصالات BNC به مدارهای الکترونیکی دستگاه جریان سنج سیم داغ متصل می‌شود.

پرابها را می‌توان به صورت یک، دو و سه بعدی تقسیم‌بندی نمود. با استفاده از پراب یک بعدی می‌توان سرعت متوسط و شدت اغتشاشهای جریان سیال را در یک بعد اندازه‌گیری نمود. در صورتی که به پراب زاویه یاو^{۹۵} داده شود، با استفاده از مکانیزم انتقال دهنده، مؤلفه‌های بردار سرعت جریان سیال در صفحه مشخص می‌شوند و اگر علاوه بر زاویه یاو، زاویه پیچ^{۹۶} نیز داده شود، بردار سرعت جریان سیال را می‌توان مشخص کرد. پراب دو بعدی، مؤلفه‌های بردار سرعت جریان سیال را در صفحه سنسورهای پراب، به‌طور همزمان اندازه‌گیری می‌کند و با استفاده از پراب سه بعدی هر سه مؤلفه بردار سرعت جریان سیال به‌طور همزمان اندازه‌گیری می‌شوند.

برای انتخاب نوع پراب باید به نکاتی مانند قابلیت‌ها، قیمت، مدت استفاده و زمان کالیبراسیون پراب توجه داشت. قیمت پرابه‌های چند بعدی بسیار بالاتر از پرابه‌های تک بعدی است به همین نسبت نیز هزینه تعمیر سنسور معیوب در آنها بیشتر می‌باشد. همچنین زمان کالیبراسیون پرابه‌هایی که دارای چند سنسور می‌باشند بیشتر از پرابه‌های تک سنسوری است. برای هر سنسور در پراب چند بعدی نیاز به یک دستگاه جریان سنج سیم داغ است.

⁹⁵ Yaw

^{۹۶} Pitch

۶-۲- سنسور سیم داغ

همان‌گونه که بیان شد، اساس کار جریان‌سنج سیم داغ، انتقال حرارت از یک سیم گرم به جریان سیال می‌باشد. سنسور سیم داغ بر روی پایه‌های پراب نصب شده و از طریق کابل‌های الکتریکی به مدار الکترونیکی دما ثابت CT (یکی از شاخه‌های پل وتسون) متصل می‌شود. سنسور سیم داغ یک سیم بسیار نازک است و برای اندازه‌گیری سرعت جریان هوا و سایر گازها در بازه سرعت از چند دهم متر بر ثانیه تا سرعت‌های مافوق صوت و در مایعات نارسانا با سرعت کم قابل استفاده است. سنسور سیم داغ پاسخ فرکانس بالایی نسبت به تغییرات جریان سیال دارد، ولی استحکام مکانیکی آن محدود است. همچنین با توجه به قطر کم آن نسبت به ذرات موجود در جریان سیال، بسیار حساس است و نمی‌توان از آن در تونل بادی که به‌طور هم‌زمان در آن آزمایش مرئی‌سازی^{۹۷} انجام می‌شود، استفاده نمود.

جنس سنسور باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که مقاومت ویژه χ_a و ضریب دمایی مقاومت α_a آن بالا و چگالی ρ_w و ظرفیت حرارتی c_w آن کم باشد تا ثابت زمانی آن نسبت به تغییرات جریان سیال کوچک و در نتیجه پاسخ فرکانسی آن سریع شود. همچنین برای کاهش میزان انتقال حرارت به پایه‌ها، هدایت حرارتی k_w سنسور نیز باید کم باشد. با در نظر گرفتن مشخصه‌های ذکر شده، کمیت $\sigma.\alpha/\rho.c$ تعریف می‌شود که مشخص کننده ثابت زمانی سنسور است. هر چه کمیت فوق بزرگتر باشد، ثابت زمانی آن کوچکتر بوده و عملکرد دستگاه جریان‌سنج سیم داغ بهتر خواهد بود. با توجه به مشخصه‌های عنوان شده، سنسور سیم داغ می‌تواند از جنس تنگستن^{۹۸}، پلاتین^{۹۹}، آلیاژ پلاتین - رودیم^{۱۰۰} با نسبت ۹۰-۱۰ و یا آلیاژ پلاتین - ایردیم^{۱۰۱} با نسبت ۸۰-۲۰ ساخته شود.

کمیت $\sigma.\alpha/\rho.c$ برای سیم تنگستن و پلاتین به ترتیب برابر $۷/۳۲ * ۱۰^{-۸}$ و $۱/۳۳ * ۱۰^{-۶}$ است که این مقدار برای پلاتین بزرگتر می‌باشد، از این رو بهتر است از سنسور با جنس پلاتین استفاده شود. با توجه به این که تنش تسلیم پلاتین نسبت به تنگستن پایین‌تر بوده و به آسانی پاره می‌شود، بنابراین از آلیاژهای پلاتین - رودیم و پلاتین - ایردیم استفاده می‌شود.

⁹⁷ Visualization

⁹⁸ Tungsten

⁹⁹ Platinum

¹⁰⁰ Platinum-Rhodium

¹⁰¹ Platinum-Iridium

اندازه کمیت فوق برای آلیاژهای پلاتین- رودیم و پلاتین- ایردیم به ترتیب برابر $10^{-6} * 1/0.2$ و $10^{-6} * 0.9$ است. مقاومت نهایی تنگستن در برابر کشش، 250000 N/cm^2 می باشد که بسیار بیشتر از تنش تسلیم پلاتین 35000 N/cm^2 و آلیاژهای آن است، اما دمای اکسیدشدن آن از پلاتین بسیار کمتر می باشد. به همین دلیل نمی توان از تنگستن با وجود داشتن نقطه ذوب بسیار بالا در دماهای بالا استفاده نمود و معمولاً از آن برای اندازه گیری سرعت در جریان گاز و هوا با دمای کمتر از 150°C استفاده می شود. ضریب هدایت گرما k_{st} تنگستن نیز بالاتر از پلاتین و آلیاژهای آن است که به دلیل افزایش انتقال حرارت به طریق هدایت، خصوصیت مطلوبی نیست.

سنسور تنگستن را می توان به دو دسته بدون روکش^{۱۰۲} و روکش دار^{۱۰۳} تقسیم بندی نمود. سنسور بدون روکش که در شکل (۶-۲) الف نشان داده شده است، سیم تنگستن با قطر حدود $5 \mu\text{m}$ و طول $1/25 \text{ mm}$ است که مستقیماً به دو سر پایه ها جوش داده می شود. اثر تداخلی پایه ها سبب کاهش دقت اندازه گیریهای جریان سیال در شدت اغتشاشهای بالا برای این پرابها می شود. بنابراین کاربرد این سنسورها در اندازه گیری جریانهای یک یا دو بعدی با شدت اغتشاشهای سرعت جریان سیال حدود $15\% \sim 10\%$ مناسب است. سنسور روکش دار (شکل ۶-۲) ب، سیم تنگستنی با قطر $5 \mu\text{m}$ و طول 3 mm است که دو انتهای سنسور دارای روکش مس به ضخامت 15 تا 20 میکرومتر μm باشد.

قسمت فعال سیم که همان سنسور است دارای طولی حدود $1/25 \text{ mm}$ است. این سنسورها برای اندازه گیری جریان سیالی که شدت اغتشاشهای آن بالا است، طراحی شده اند. آثار تداخلی پایه ها در این سنسورها کمتر بوده و در نتیجه دقت اندازه گیری در سرعت جریان سیالی که اغتشاشهای آن بالا است، افزایش خواهد یافت. با استفاده از این پرابها می توان جریانهای سیالی که شدت اغتشاشهای آنها حدود $30\% \sim 20\%$ است را اندازه گیری نمود.

¹⁰² Unplated
¹⁰³ Plated



شکل (۲-۶) پراب با سنسور روکش دار و بدون روکش

الف- (راست) پراب با سنسور بدون روکش (DANTEC 55P11)

ب- (چپ) پراب با سنسور روکش دار (DANTEC 55P01) [1]

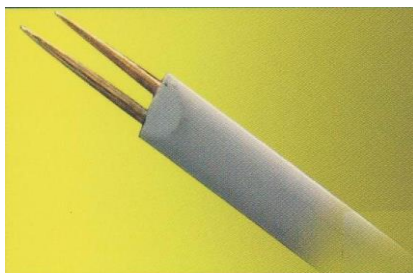
برای ساختن سنسوری از جنس تنگستن، سیم تنگستن را ابتدا تا حداقل قطر ممکن (حدود $10-12 \mu m$) کشیده، سپس با لایه $1 \mu m$ داری الکتریکی دریک حمام اسید، قطر سیم تنگستن را تا حدود $2 \mu m$ کاهش می دهند. روش نصب سنسور تنگستن به ساقه های پراب به دو صورت لحیم کاری و جوشکاری است. با توجه به این که سیم تنگستن در درجه حرارت $350^\circ C$ اکسید می شود، به منظور جلوگیری از اکسید شدن سریع، فیلم نازکی از پلاتین به ضخامت $0.1 \mu m$ بر روی سیم تنگستن لایه گذاری می شود.

سنسورهای از جنس تنگستن معمولاً برای اندازه گیری سرعت جریان سیال به کار برده می شوند. برای اندازه گیری تغییرات دما از سنسوری با جنس پلاتین با قطر $1 \mu m$ و طول $0.1 mm$ استفاده می شود. سیم به پایه هایی از جنس فولاد ضدزنگ نصب شده و مجموعه با یک مدار الکترونیکی جریان الکتریکی ثابت 10^{-4} کار می کند.

۳-۶- پراب یک بعدی

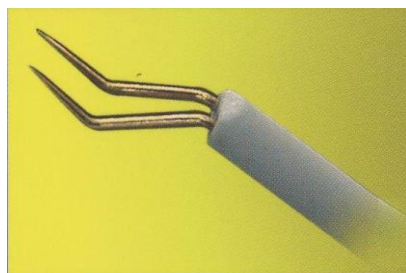
پراب یک بعدی دارای یک سنسور بوده و قادر به اندازه گیری سرعت در جهت جریان سیال است.

پراب یک بعدی را می توان مطابق شکل (۲-۶) به پراب مستقیم SN^{105} و مطابق شکل (۳-۶) به پراب مایل 106 SY تقسیم بندی نمود. در پراب مستقیم SN، پایه ها موازی و هم اندازه اند به طوری که سنسور، عمود بر جریان سیالی که موازی ساقه است، قرار می گیرد. در پراب مایل SY پایه ها موازی بوده ولی اندازه آنها با یکدیگر متفاوت است و سنسور با جریان سیالی که موازی ساقه است، زاویه 45° می سازد.



شکل (۳-۶) پراب مایل SY (فراسنجش صبا WU11) [1]

پرابهای مستقیم SN و مایل SY را می توان با استفاده از سنسورهای روکش دار و بدون روکش ساخت. معمولاً برای کاهش آثار پراب بر روی اندازه گیری سرعت جریان سیال، پراب را موازی جریان سیال قرار می دهند، اما برای اندازه گیری لایه مرزی، موازی قرار دادن پراب با جهت جریان سیال، موجب انسداد جریان در پایین دست سنسور و ایجاد خطا و اغتشاش در جریان سیال می شود. به همین منظور باید به پراب زاویه پیچ β داده و آن را نسبت به جریان سیال مایل نمود. در چنین حالتی باید پراب و دستگاه جریان سنج سیم داغ را در همان زاویه ای که قرار گرفته، کالیبره نمود.



شکل (۴-۶) پراب لایه مرزی (فراسنجش صبا WP13) [1]

¹⁰⁵ Single Normal

¹⁰⁶ Single Yaw

با استفاده از پراب لایه مرزی (شکل ۶-۴) می‌توان لایه مرزی را اندازه‌گیری نمود، به‌صورتی‌که سنسور کاملاً نزدیک به دیواره قرار گرفته و ساقه پراب در جهت جریان سیال باشد. در این حالت بدنه پراب نسبت به سطح دیواره بالاتر خواهد بود، در نتیجه اثر راکد ماندن جریان سیال و اغتشاش ایجادشده در جریان سیال کمتر می‌شود.

۶-۴- مکانیزم انتقال دهنده پراب

دستگاه جریان‌سنج سیم داغ، سرعت لحظه‌ای جریان سیال را در مکانی که پراب در آن قرار دارد، اندازه‌گیری می‌کند. برای آن که بتوان توزیع سرعت و یا تغییرات سرعت جریان سیال را نسبت به مکان اندازه‌گیری نمود، نیاز به مکانیزم انتقال دهنده پراب است. برای کالیبره نمودن دستگاه جریان‌سنج سیم داغ برای پرابهای دو و سه مؤلفه‌ای، نیاز به مکانیزم چرخش است تا بتوان پراب را حول محورهایش چرخاند. همچنین برای اندازه‌گیری گردابه‌های پایین‌دست یک مفتول که یکی از روشهای کالیبراسیون است، نیاز به مکانیزم انتقال دهنده پراب است تا با استفاده از آن پراب را در مکان مناسب قرار داده و گردابه‌های پایین‌دست مفتول را به وضوح اندازه‌گیری نمود. بنابراین مکانیزم انتقال دهنده پراب از تجهیزات اصلی تونل باد است.

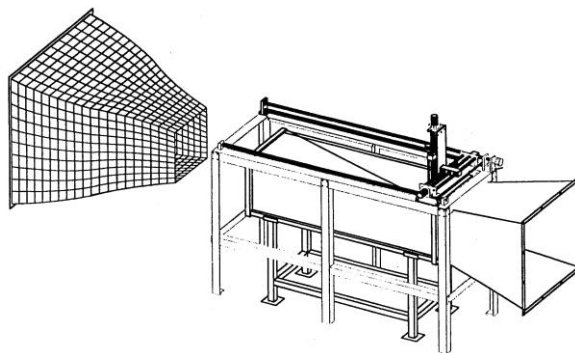
شکل (۶-۵) مکانیزم انتقال دهنده پراب را نشان می‌دهد که از سه محور و با سه درجه آزادی تشکیل شده است. مکانیزم انتقال دهنده با استفاده از موتورهای پله‌ای حرکت می‌کند. با توجه به این که موتورهای پله‌ای قادر به حرکت دورانی با دقت حدود 1° می‌باشند، در صورتی‌که قسمتهای مکانیکی مکانیزم انتقال دهنده به‌طور دقیق ساخته شده باشند، مکانیزم انتقال دهنده پراب می‌تواند پراب را در فضای موردنظر با دقت بسیار بالا جابه‌جا کند. بنابراین باید پیچها و محورهای راهنما مکانیزم انتقال دهنده بدون لقی باشند. هر چه گام پیچ محورهای انتقال دهنده کمتر باشد، حرکت پراب با دقت بالاتری انجام خواهد گرفت. موتورهای پله‌ای با استفاده از راه‌اندازهای الکترونیکی^{۱۰۷} می‌چرخند که این راه‌اندازها، فرمان خود را از طریق نرم‌افزار مربوطه و میکروکنترلر دریافت می‌کنند. طراحی و ساخت مکانیزم انتقال دهنده پراب، برای تونل بادهایی که سطح مقطع اتاق آزمون آنها بزرگتر از $1/5 m^2$ است مشکل نبوده و می‌توان آن را در داخل اتاق آزمون قرار داد.



شکل (۵-۶) مکانیزم انتقال دهنده پراب [1]

اما برای تونل بادهایی که سطح مقطع اتاق آزمون آنها کوچک است، به علت بالا رفتن نسبت انسداد (نسبت سطح مقطع بسته به سطح مقطع باز)، نمی توان مکانیزم انتقال دهنده پراب را در اتاق آزمون نصب نمود و باید آن را خارج از تونل باد در بالای سقف اتاق آزمون و یا در کنار آن قرار داد که برای این کار نیاز به سقف و یا دیوار متحرک است. در صورتی که تونل باد از نوع مدار بسته و یا باز دمنده باشد، مشکل نصب مکانیزم انتقال دهنده وجود ندارد، اما در حالتی که تونل باد از نوع مدار باز مکنده باشد با توجه به فشار منفی در اتاق آزمون، نصب مکانیزم انتقال دهنده مشکل است. شکل (۶-۶) مکانیزم انتقال دهنده پراب را که با استفاده از آن می توان پراب را در اتاق آزمون به حرکت درآورد، نشان می دهد.

این مکانیزم طوری نصب شده است که پراب از طریق سقف وارد اتاق آزمون می شود و اتاق آزمون دارای سقف متحرک است. با توجه به اهمیت اندازه گیری محلی در پژوهشهای آیرودینامیکی و سیالاتی، نیاز است که به همراه دستگاه جریان سنج سیم داغ از مکانیزم انتقال دهنده پراب نیز استفاده شود. معمولاً نرم افزارهای دستگاه جریان سنج سیم داغ دارای گزینه هایی برای کنترل و به حرکت درآوردن موتورهای پله ای و در نتیجه کنترل موقعیت پراب می باشند.



[1] شکل (۶-۶) مکانیزم انتقال دهنده پرآب که بر روی سقف اتاق آزمون نصب شده است

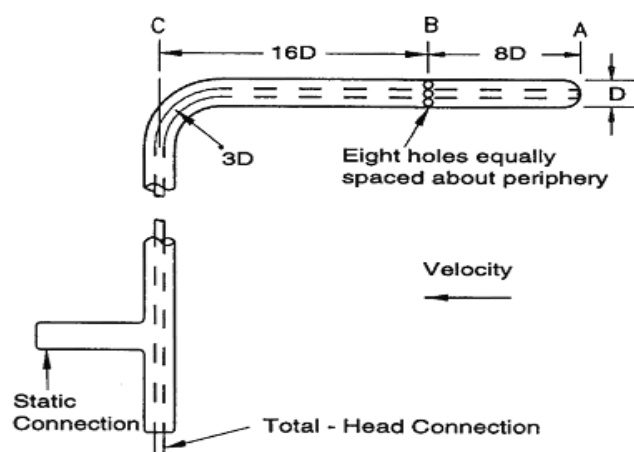
۶-۵- لوله استاتیکی پیتوت و مبدل الکتریکی فشار

یکی از وسایل رایج برای اندازه‌گیری سرعت متوسط جریان سیال، لوله استاتیکی پیتوت است. لوله فوق وسیله‌ای است که با استفاده از آن، فشار استاتیکی p و فشار سکون $(p + \frac{1}{2}\rho U^2)$ جریان سیال اندازه‌گیری می‌شود. اگر فشارهای استاتیکی و سکون اندازه‌گیری شده به دو طرف مانومتر و یا مبدل الکترونیکی فشار متصل شوند، اختلاف این دو فشار، که فشار دینامیکی $(\frac{1}{2}\rho V^2)$ است نشان داده می‌شود که با دانستن ρ چگالی سیال، سرعت جریان به دست می‌آید.

فشار هوا به دو بخش، فشار استاتیکی و فشار دینامیکی تقسیم می‌شود که مجموع این دو را فشار کل هوا می‌نامند. فشار استاتیک را می‌توان به انرژی پتانسیل تشبیه کرد. فشار استاتیکی هوا، در واقع نمایانگر میزان جنبش مولکولها و تعداد ضربات آنها در واحد سطح می‌باشد. فشار دینامیکی که میزانی از اندازه حرکت خطی هوا در واحد حجم می‌باشد و به سرعت هوا و چگالی آن بستگی دارد. فشار کل نیز نمایانگر انرژی کل است که در آن فشار استاتیکی به دینامیکی و بالعکس تبدیل می‌شود. تلفات سبب می‌شود که فشار کلی یا انرژی کلی کاهش یابد.

شکل (۶-۶) لوله استاتیکی پیتوت را نشان می‌دهد که شامل سوراخهای حس‌کننده فشارهای سکون و استاتیکی است. سوراخ حس‌کننده فشار سکون (A) در قسمت جلویی لوله استاتیکی پیتوت قرار گرفته و سطح

مقطع آن عمود بر جهت جریان سیال است. اندازه‌گیری فشار سکون ساده و خطای اندازه‌گیری آن ناچیز است (حساسیت اندازه‌گیری فشار سکون نسبت به انحراف جریان تا زاویه 4° نیز ناچیز است) (Miller1996). مطابق شکل (۶-۷)، اندازه‌گیری فشار استاتیکی توسط سوراخهای جانبی (B) انجام می‌شود.



شکل (۶-۷) لوله استاتیکی پیتوت [1]

برای اندازه‌گیری فشار استاتیکی نیاز است سوراخهای حس‌کننده فشار موازی با جهت جریان سیال باشند. با توجه به آثار نوک و ساقه لوله استاتیکی پیتوت، خطوط جریان موازی سوراخهای جانبی نبوده و این امر سبب خطای ذاتی لوله استاتیکی پیتوت می‌شود که فاصله سوراخهای حس‌کننده فشار استاتیکی از نوک و ساقه، مقدار این خطا را مشخص می‌کند.

استفاده از لوله استاتیکی پیتوت، برای اندازه‌گیری سرعت جریانهای آزاد بوده و در نزدیکی مدل و یا در جریانهایی که زاویه آن مشخص نیست، قابل استفاده نمی‌باشد. مبدل الکتریکی فشار، یک وسیله اندازه‌گیری الکترومکانیکی است که فشارها را تبدیل به سیگنالهای الکترونیکی نموده و از طریق کارت DAQ به رایانه ارسال می‌نماید.

۶-۶- اندازه‌گیری ناحیه ویک با استفاده از رک فشار^{۱۰۸}

یکی از پدیده‌های مهم آیرودینامیکی، پدیده ویک^{۱۰۹} می‌باشد که پشت اجسام و در جریان هوا تشکیل می‌شود. ویک سبب افزایش نیروی درگ وارد بر جسم شده و از اینرو اندازه‌گیری آن مهم می‌باشد. در تونل باد، پدیده ویک را به دو روش اندازه‌گیری می‌کنند:

الف- اندازه‌گیری سرعت ناحیه ویک با استفاده از دستگاه‌های سرعت سنج نظیر دستگاه جریان سنج سیم داغ (HWA)

ب- با استفاده از سیستم رک فشار

رک فشار شامل یک سری لوله‌های اندازه‌گیری فشار استاتیکی و کلی است که می‌تواند به‌طور همزمان در چند نقطه فشار را اندازه‌گیری کند. اصول اندازه‌گیری درگ در سیستم رک فشار برپایه اختلاف ممنتوم می‌باشد. اگر بخواهیم درگ یک مدل را اندازه‌گیری کنیم، می‌توانیم ممنتوم جریان هوا در بالادست و پائین دست جریان را به‌دست آورده و سپس با محاسبه اختلاف آنها، نیروی درگ به‌دست می‌آید. یک رک فشار نیز، تلفات ممنتوم را با اندازه‌گیری فشار، تعیین می‌کند و از اینرو نیاز به یک مجموعه لوله برای اندازه‌گیری فشار کل است. نمایی از رک فشار در شکل (۶-۸) آمده است.

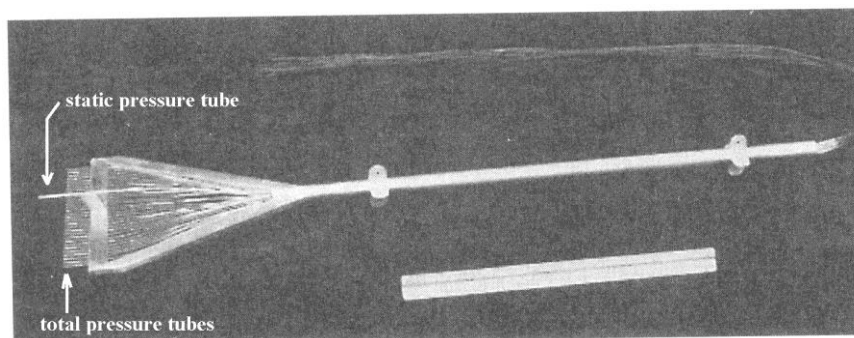
طول رک باید طوری باشد که تمامی ناحیه ویک را تحت پوشش قرار دهد. معمولاً فاصله بین دو لوله در مرکز فشرده تر و در انتها این فاصله به دو برابر مرکز می‌رسد فاصله لوله‌ها باید طوری باشد که بتوان پروفیل ممنتوم را به‌طور دقیق تعیین نمود.

لوله‌های استاتیکی در رک باید از لوله‌های فشار کل فاصله داشته باشند، به‌طوری‌که اثر مقابل بر روی هم نداشته باشند. هدف از استفاده لوله استاتیکی، تعیین فشار استاتیکی در ناحیه ویک است. با توجه به اینکه فشار استاتیکی، تحت تاثیر لوله‌های کلی و پایه رک قرار می‌گیرد، آنها را باید به دقت کالیبره کرد تا خطاهای آنها مشخص شوند. همچنین نوک لوله‌های استاتیکی باید دارای شکل نیم کره باشند. به این ترتیب می‌توان

¹⁰⁸ Pressure Rake

¹⁰⁹ Wake

این خطاها را تا حدود صفر کاهش داد. با استفاده از یک مکانیزم انتقال دهنده، می‌توان رک را جابه‌جا کرد و منطقه ویک را پوشش داد.



شکل (۶-۸) رک فشار [2]

۶-۷- تطبیق دهنده سیگنال^{۱۱۰}

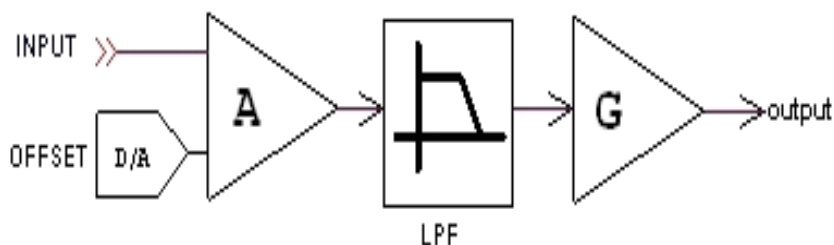
همان‌گونه که بیان شد، سیگنال خروجی مدار الکترونیکی دما ثابت CT به صورت ولتاژ است و می‌توان آن را از طریق کارت DAQ به رایانه ارسال نمود. تغییرات ولتاژ نسبت به سرعت جریان سیال بویژه در سرعت‌های بالا کم است، به طوری که ارسال داده‌ها به صورت مستقیم به رایانه میسر نبوده و نمی‌توان در سرعت 20 m/s ، شدت اغتشاش‌های کمتر از 0.2% را اندازه‌گیری نمود. برای آن که سیگنال خروجی مدار الکترونیکی دما ثابت CT ، بدون مشکل از طریق کارت DAQ به رایانه ارسال شود و همچنین نویزهای الکترونیکی سیگنال خروجی حذف و تا حد ممکن کاهش یابد، نیاز به واحد تطبیق دهنده سیگنال است.

مطابق شکل (۶-۹) واحد تطبیق دهنده سیگنال از مدارهای آفست، فیلتر پایین‌گذر^{۱۱۱} و تقویت‌کننده تشکیل شده است. مدار آفست، ولتاژ منفی ایجاد نموده که با ولتاژ خروجی از مدار الکترونیکی دما ثابت CT جمع می‌شود. سپس ولتاژ آفست داده شده از فیلتر پایین‌گذر عبور کرده و با توجه به اندازه فرکانس قطع، فیلتر پایین‌گذر انتخاب می‌شود. با استفاده از فیلتر پایین‌گذر، نویزها و سیگنال‌های بالاتر از فرکانس قطع حذف یا خیلی کوچک می‌شوند. بنابراین در هنگام کار باید دقت داشت که اندازه فرکانس قطع طوری انتخاب شود

¹¹⁰ Signal Conditioner

¹¹¹ LPF

که سیگنالهای مربوط به سرعت لحظه‌ای از آن حذف نشود. پس از فیلتر نمودن سیگنال آفست داده شده، باید آن را به طور مناسبی تقویت کرده تا در بازه ولتاژ ورودی DAQ قرار گیرد.



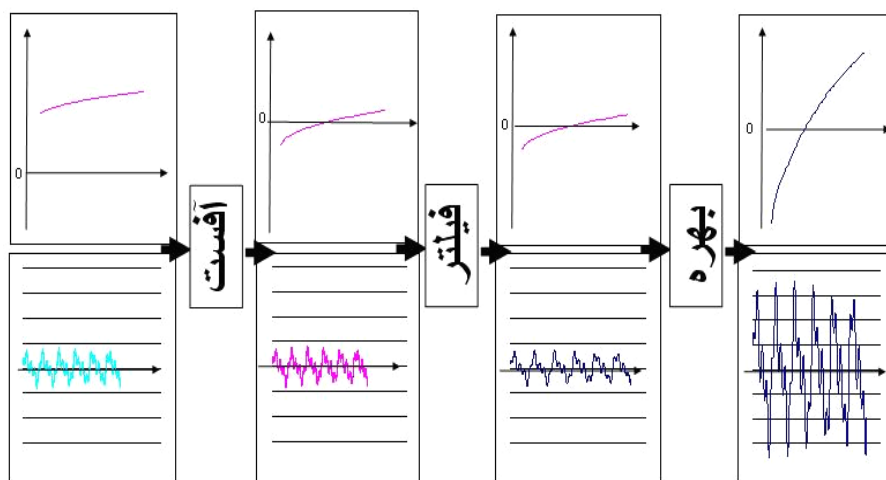
شکل (۶-۹) مدار شماتیک تطبیق دهنده سیگنال [1]

بنابراین ابتدا باید بازه تغییرات سرعت جریان سیال و یا ولتاژ خروجی از مدار الکترونیکی دما ثابت CT را مشخص کرده، سپس اندازه مناسب آفست و بهره را تعیین نمود.

شکل (۶-۱۰)، منحنی کالیبراسیون و ولتاژ خروجی قسمتهای مختلف مدار تطبیق دهنده را به صورت نمونه نشان می‌دهد. در صورتی که فرض شود منحنی کالیبراسیون دستگاه جریان سنج سیم داغ در بازه $(5 \sim 25 \text{ m/s})$ دارای ولتاژ متناظر $(1/3 \sim 1/8 \text{ volt})$ باشد، برای به دست آوردن اندازه مناسب آفست، ابتدا میانگین بیشترین و کمترین ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ اندازه‌گیری می‌شود که برابر $1/55$ است. سپس مقدار فوق به عنوان آفست با ولتاژ خروجی از مدار الکترونیکی دما ثابت CT جمع و با توجه به بازه ورودی کارت DAQ که 10 volt تا (-10) است، می‌توان به ولتاژ آفست داده شده تا بهره 40 را اعمال نمود.

شکل (۶-۱۰) به طور شماتیک نحوه عملکرد واحد تطبیق دهنده سیگنال را بر سیگنال خروجی از دستگاه جریان سنج سیم داغ نشان می‌دهد.

ولتاژ خروجی از واحد تطبیق دهنده سیگنال دارای نویز کمتر بوده و به مراتب دارای بازه بزرگتری است. به طوری که با استفاده از ولتاژ خروجی واحد تطبیق دهنده سیگنال به آسانی می‌توان شدت اغتشاشهای کمتر از 0.1% را نیز اندازه‌گیری نمود.



شکل (۱۰-۶) منحنی کالیبراسیون و ولتاژ خروجی قسمتهای مختلف واحد تطبیق دهنده سیگنال [1]

رابطه ولتاژ خروجی واحد تطبیق دهنده سیگنال به صورت زیر بیان می شود:

$$E_{out} = (E - offset) \cdot Gain \quad (1-6)$$

که E_{out} ، ولتاژ خروجی واحد تطبیق دهنده سیگنال، E ، ولتاژ خروجی مدار الکترونیکی دما ثابت CT ، $Offset$ ، ولتاژ آفست و $Gain$ نیز بهره واحد تطبیق دهنده سیگنال است. مدارهای الکترونیکی بهره و آفست باید بسیار دقیق و پایدار باشند.

برد کنترل: برخی از دستگاههای جریان سنج سیم داغ را می توان با استفاده از رایانه تنظیم و کنترل نمود که معمولاً این ارتباط از طریق درگاه سریال رایانه انجام می شود. این ارتباط دو طرفه بوده به طوری که برخی از اندازه گیریها و یا تنظیماتی که توسط نرم افزار انجام گرفته به دستگاه جریان سنج سیم داغ ارسال می شود. تنظیمات فوق شامل نسبت فراگرمایی، بهره و فیلتر مدار الکترونیکی دما ثابت CT برای بهینه نمودن پاسخ فرکانسی دستگاه جریان سنج سیم داغ، آفست، فیلتر پایین گذر و بهره مدار تطبیق دهنده می باشند. معمولاً ارتباط دستگاه جریان سنج سیم داغ با رایانه، از طریق برد کنترل و درگاه سریال است. برد کنترل شامل میکروکنترلر است که از طریق آن اطلاعات به رایانه ارسال و یا از رایانه دریافت می شود. همچنین با استفاده از میکروکنترلر می توان رله ها و میکروسویچهای موجود در مدار الکترونیکی دما ثابت CT و یا مدار تطبیق دهنده سیگنال را کنترل و در نتیجه تنظیمات لازم دستگاه جریان سنج سیم داغ را نیز انجام داد.

۶-۸- جمع آوری و دریافت داده‌ها

ولتاژ خروجی از طریق مدار الکترونیکی دما ثابت CT و یا واحد تطبیق دهنده ولتاژ از طریق کارت DAQ و یا درگاه سریال به رایانه ارسال می‌شود و با استفاده از نرم‌افزار، ولتاژهای مربوطه به صورت کمیت‌های فیزیکی پردازش و تحلیل می‌شوند. نمایی از این کارتها در شکل (۶-۱۰) نشان داده شده است. همان‌گونه که بیان شد، دستگاه جریان‌سنج سیم داغ، قادر به اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان سیال با دقت بالا و پاسخ فرکانسی بالاتر از 30 kHz است، بنابراین باید ولتاژ خروجی مدار الکترونیکی دما ثابت CT و یا واحد تطبیق دهنده ولتاژ که در حوزه زمان می‌باشند را به صورت دیجیتال تبدیل و به رایانه ارسال نمود.

با استفاده از کارت DAQ ، ولتاژ خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم داغ که به صورت آنالوگ می‌باشد به دیجیتال تبدیل و سپس به رایانه ارسال می‌شود. کارت DAQ که توسط شرکت‌های مختلف ساخته می‌شود، به سادگی قابل تهیه است. قیمت کارتهای DAQ مختلف بوده و انتخاب مناسب آن با هزینه کمتر مهم است. به طور کلی تعداد کانالهای ورودی و خروجی، نرخ نمونه‌برداری و دقت اندازه‌گیری در قیمت کارت DAQ تأثیرگذار است. اکثر کارتهای DAQ دارای تعدادی کانال ورودی آنالوگ به دیجیتال، همچنین کانال خروجی دیجیتال به آنالوگ می‌باشند. هنگامی که سیگنالهای ورودی آنالوگ می‌باشند، نیاز به مبدل A/D^{112} است تا داده‌های آنالوگ را به دیجیتال تبدیل نموده و به رایانه ارسال کرد. در حالتی که خروجی آنالوگ مورد نیاز است باید سیگنالهای دیجیتال خروجی رایانه را به آنالوگ تبدیل نمود. دستگاه جریان‌سنج سیم داغ فقط دارای سیگنالهای ورودی آنالوگ بوده و نیاز به کارت DAQ که دارای خروجی آنالوگ باشد، نیست. کارتهای DAQ که دارای خروجی آنالوگ و یا دیجیتال نیستند به مراتب دارای قیمت پایین‌تری می‌باشند.

تعداد کانالهای ورودی کارت DAQ با توجه به تعداد دستگاه جریان‌سنج سیم داغ مورد استفاده در آزمایشها، مشخص می‌شوند. معمولاً هر دستگاه جریان‌سنج سیم داغ، نیاز به دو کانال کارت DAQ دارد که یکی از آنها خروجی مدار الکترونیکی CT و دیگری خروجی واحد تطبیق دهنده سیگنال را به رایانه ارسال می‌نماید.

¹¹² Analog/Digital



شکل (۶-۱۱) نمونه‌هایی از کارت DAQ (Data Acquisition) [1]

همچنین یک کانال ورودی برای اندازه‌گیری دما و یک کانال ورودی دیگر برای خروجی مبدل الکترونیکی فشار برای اندازه‌گیری سرعت متوسط در هنگام کالیبراسیون مورد نیاز است. اکثر کارتهای DAQ دارای حداقل ۱۶ کانال ورودی است که این تعداد برای ۷ دستگاه جریان‌سنج سیم داغ کفایت.

نرخ نمونه‌برداری یکی از پارامترهای مهم در انتخاب کارت DAQ است که با افزایش آن قیمت کارت DAQ نیز افزایش می‌یابد. با توجه به این که دستگاه جریان‌سنج سیم داغ قادر به اندازه‌گیری سرعت جریان لحظه‌ای با فرکانس بالاتر از 30 kHz است. طبق قانون نایکوسیت برای دریافت صحیح داده‌ها، حداقل نرخ نمونه‌برداری باید دو برابر فرکانس دستگاه جریان‌سنج سیم داغ باشد. این فرکانس در مدار تطبیق دهنده سیگنال با فیلتر پایین‌گذر، مشخص و تعیین می‌شود. با توجه به نوع جریان سیال و عدد رینولدز، فرکانس اغتشاشهای سرعت جریان سیال مشخص شده و براساس آن نرخ نمونه‌برداری تعیین می‌شود. در اکثر جریانهای آشفته فرکانس اغتشاشهای جریان سیال کمتر از 30 kHz است. برای اندازه‌گیری اغتشاشهای جریان سیالی که دارای فرکانس 30 kHz می‌باشد، نرخ نمونه‌برداری کارت DAQ نباید کمتر از 60 kHz باشد.

۶-۹- نرم‌افزار

همان‌گونه که بیان شد، خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم داغ که به صورت ولتاژ می‌باشد از طریق کارت DAQ به رایانه ارسال می‌شود. داده‌های ارسال شده به رایانه دارای کمیت ولتاژ بوده و با استفاده از نرم‌افزار، داده‌های فوق به صورت مفاهیم فیزیکی و ریاضی پردازش و تبدیل می‌شوند. یک نرم‌افزار مناسب باید دارای قابلیت‌های زیر بوده و استفاده از آن برای کاربر آسان باشد:

- ✓ مدیریت داده‌ها
- ✓ تنظیم سخت‌افزار جریان‌سنج سیم داغ
- ✓ کالیبراسیون دستگاه جریان‌سنج سیم داغ
- ✓ توانایی حرکت پراب
- ✓ انجام آزمایش اولیه
- ✓ انجام آزمایش دقیق

۶-۹-۱- مدیریت داده‌ها

برای انجام آزمایش با دستگاه جریان‌سنج سیم داغ، ابتدا باید تنظیمات سخت‌افزاری و کالیبراسیون انجام شده، سپس فایل‌های مربوط به روند آزمایش، اخذ داده‌ها و تجزیه و تحلیل را ایجاد نمود. با توجه به این که داده‌های یک آزمایش می‌توانند از نوع آماری و یا لحظه‌ای باشند و تعداد آزمایشها و پارامترهای اندازه‌گیری نیز متنوع می‌باشند، بنابراین نیاز است که نرم‌افزار به‌نحو مطلوبی داده‌ها را دسته‌بندی و مدیریت نماید، به‌طوری که فایل مورد نظر را بتوان به‌آسانی ایجاد، ذخیره و یا استفاده نمود تا کاربر به سهولت به داده‌ها و فایل‌های مورد نظر دسترسی داشته باشد.

۶-۹-۲- تنظیم سخت‌افزار جریان‌سنج سیم داغ

همان‌گونه که بیان شد برای استفاده از جریان‌سنج سیم داغ، نیاز است که سخت‌افزار آن را تنظیم نمود. این تنظیمات می‌تواند به صورت کاملاً خودکار انجام شود، به‌طوری که پس از وارد نمودن اطلاعات مورد نیاز در

نرم افزار، داده‌های لازم از طریق درگاه سریال به قسمت میکروکنترلر دستگاه جریان سنج سیم داغ ارسال شده و از طریق میکروکنترلر با کنترل رله‌های مختلف مدار الکترونیکی دما ثابت CT و تطبیق دهنده سیگنال، تنظیمات لازم انجام شود. این تنظیمات می‌تواند به صورت دستی نیز انجام شود، یعنی نرم افزار اطلاعات لازم را برای تنظیم سخت افزار مشخص نموده و کاربر به طور دستی سخت افزار را تنظیم نماید.

تنظیمات اصلی دستگاه جریان سنج سیم داغ عبارتند از: نسبت فراگرمایی، پاسخ فرکانسی، بهره مدار تطبیق دهنده، آفست مدار تطبیق دهنده و فیلتر پایین گذر و بالا گذر.

با تنظیم نسبت فراگرمایی، مقاومت و در نتیجه درجه حرارت سنسور مشخص می‌شود. با استفاده از تنظیم بهره و فیلتر مدار الکترونیکی دما ثابت CT، می‌توان پاسخ فرکانسی دستگاه جریان سنج سیم داغ را بهینه نمود. برای بهینه نمودن پاسخ فرکانسی باید خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ را به صورت اسیلوگرام در رایانه مشاهده نموده، سپس بهره و فیلتر مدار الکترونیکی CT را طوری تنظیم نمود تا پاسخ فرکانسی جریان سنج سیم داغ بهینه شود. برای تنظیم بهره آفست و فیلتر پایین گذر در مدار تطبیق دهنده، باید بازه سرعت و ولتاژ خروجی از دستگاه جریان سنج سیم داغ را مشخص و سپس تنظیمات لازم را انجام داد.

۶-۹-۳- توانایی حرکت پراب

به منظور انجام آزمایش و بررسی پدیده‌های مختلف سیالاتی نظیر لایه مرزی، جدایش و ... نیاز است تا اندازه‌گیری سرعت جریان سیال در نقاط مختلف با استفاده از مکانیزم انتقال دهنده پراب انجام شود. نرم افزار باید قادر به حرکت مکانیزم انتقال دهنده پراب باشد تا با تغییر مکان پراب بتوان سرعت لحظه‌ای را در نقاط مورد نظر اندازه‌گیری نمود. نرم افزار از طریق درگاه سریال با میکروکنترلر ارتباط برقرار کرده و از طریق میکروکنترلر و درایور، موتورهای پله‌ای را فعال و مکانیزم انتقال دهنده پراب را حرکت می‌دهد.

۶-۹-۴- انجام آزمایش اولیه

برای بررسی پدیده‌های جریان سیال بهتر است، ابتدا پژوهشگر آزمایش را به صورت سریع انجام داده و دید کلی نسبت به آزمایش مورد نظر پیدا کند، سپس نتایج آزمایش را تجزیه و تحلیل اولیه نموده و پس از آن آزمایش را به طور دقیق انجام دهد. در بررسی اولیه می‌توان فرکانس اغتشاش سرعت جریان سیال و نوع آن را تشخیص داده و در نتیجه زمان و نرخ نمونه برداری آزمایش را تعیین نمود. در این حالت نرم‌افزار باید قادر به اخذ داده‌ها، تبدیل آنها به سرعت لحظه‌ای و نمایش آنها به صورت آماری و لحظه‌ای در بعد زمان و فرکانس باشد. سرعت لحظه‌ای در بعد زمان به صورت اسیلوگرام است که با استفاده از تبدیلات فوریه می‌توان سرعت لحظه‌ای را به صورت طیف فرکانسی نمایش داد. با تغییر مکان پراب با استفاده از مکانیزم انتقال دهنده، می‌توان پراب را تغییر مکان داده و داده‌ها را دریافت و بررسی نمود.

۶-۹-۵- انجام آزمایش دقیق

پس از تنظیم نمودن دستگاه جریان سنج سیم داغ و انجام کالیبراسیون و آزمایش اولیه، باید آزمایش دقیق انجام شود. در این حالت، ابتدا باید موقعیت پراب را نسبت به مبدأ مختصات تونل باد و یا مدل مشخص نمود. سپس مکانهای مورد نظر برای اخذ داده و نحوه‌ی حرکت مکانیزم انتقال دهنده پراب را تعیین کرد. همچنین مقادیر آماری و یا لحظه‌ای، زمان اندازه‌گیری سرعت جریان سیال و دیگر پارامترها نظیر تنش برشی را برای ذخیره نمودن و زمان مکث بین حرکت پراب و اخذ داده‌ها را مشخص نمود. در این حالت آزمایش به طور خودکار انجام می‌شود.

نرم‌افزار دستگاه جریان سنج سیم داغ می‌تواند با استفاده از زبانهای برنامه‌نویسی پایه نظیر C++ و Basic توسط کاربر نوشته شود. با توجه به حجم بالای برنامه‌نویسی، این امر مستلزم صرف وقت و تبحر می‌باشد. شرکت‌های سازنده دستگاه جریان سنج سیم داغ چنین نرم‌افزارهایی را با کیفیت مناسب طراحی نموده و نوشته‌اند. این شرکتها بیشتر از زبان برنامه‌نویسی LabView که نرم‌افزاری مناسب برای دستگاههای آزمایشگاهی است، استفاده می‌کنند.

نرم‌افزارهای فوق اگرچه دارای کیفیت بالایی بوده اما در برخی از پژوهشهای تخصصی کارآیی خود را از دست داده و باید از زبانهای برنامه‌نویسی پایه استفاده نمود. در چنین پژوهشهایی بهتر است با استفاده از نرم‌افزار

شرکت سازنده، تنظیمات و کالیبراسیون انجام شده و پس از انجام آزمایش اولیه، برنامه‌ای مناسب توسط کاربر تهیه و استفاده شود.

۶-۱۰- کالیبراسیون دستگاه جریان سنج سیم داغ

با توجه به این که دستگاه جریان سنج سیم داغ دارای دقت بالایی بوده و کوچکترین تغییری در شرایط جریان، نحوه قرارگیری پراب، آلودگی جریان سیال و ... می‌تواند بر روی مقدار ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ تأثیر گذارد، بنابراین قبل از انجام هر آزمایش دقیق، کالیبره نمودن آن ضروری به نظر می‌رسد.

هدف از انجام فرایند کالیبراسیون در دستگاه جریان سنج سیم داغ، تعیین رابطه بین سرعت و ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ به صورت $E = f(U)$ و یا $U = f^{-1}(E)$ می‌باشد. برای کالیبره نمودن دستگاه جریان سنج سیم داغ، نیاز به سرعت‌های معلوم است تا ولتاژهای خروجی متناظر با این سرعت‌ها اندازه‌گیری شوند. این سرعت‌های معلوم و معین را سرعت مرجع (U_R) می‌نامند و باید شدت اغتشاش سرعت‌های مرجع کمتر از ۰/۵٪ باشد.

برای ایجاد سرعت‌های مشخص و کالیبره نمودن دستگاه جریان سنج سیم داغ در جریان هوا، نیاز به دستگاه کالیبراتور است که معمولاً از تونل باد با ابعاد مختلف و یا مخزن هوای فشرده به همراه نازل استفاده می‌شود. از تونل آب نیز برای کالیبره نمودن دستگاه جریان سنج سیم داغ برای جریان آب استفاده می‌شود. علاوه بر دستگاه کالیبراتور، نیاز به وسیله اندازه‌گیر سرعت جریان سیال می‌باشد که معمولاً از لوله استاتیکی پیتوت استفاده می‌شود. پس از مشخص نمودن سرعت‌های مرجع $U_R(n)$ و ولتاژهای خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ $E(n)$ ، لازم است تا رابطه $E = f(U)$ مشخص شود که از روابط مختلف می‌توان استفاده نمود.

برای انجام فرایند کالیبراسیون روش‌های مختلفی وجود دارد که می‌توان آنها را بر اساس بازه سرعت مورد نیاز برای کالیبراسیون طبقه‌بندی نمود. این دسته بندی بدین منظور است که با تغییر مقادیر سرعت، شرایط جریان سیال تغییر کرده و به همراه آن کمیت‌های تأثیرگذار بر ولتاژ خروجی نظیر عدد رینولدز، عدد گرافش، عدد ماخ و ... تغییر می‌کنند.

برای کالیبراسیون جریان سنج سیم داغ، ابتدا بازه تغییرات سرعت یا به عبارت دیگر مقادیر حداقل و حداکثر سرعت مورد نیاز برای اندازه‌گیری (U_{Rmin}, U_{Rmax}) مشخص می‌شود که بهتر است نسبت U_{Rmax} / U_{Rmin} از ۱۰ تجاوز نکند. سپس بین دو مقدار (U_{Rmin}, U_{Rmax})، حدود ۱۰ تا ۳۰ نقطه را مشخص نموده، مقادیر معلوم سرعت جریان سیال، U_R ، در این نقاط و ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ، E ، متناظر با آن اندازه‌گیری می‌شود.

۶-۱۰-۱- معادله کالیبراسیون

پس از به دست آوردن نقاط کالیبراسیون $U_R(n)$ و $E_R(n)$ نیاز است که معادله کالیبراسیون $E=f(U)$ را مشخص نمود. در انتخاب معادله کالیبراسیون دستگاه جریان سنج سیم داغ، باید میزان دقت و همچنین سادگی استفاده از معادله را در نظر گرفت، به طوری که خطای تقریب نمودن منحنی کاهش یافته و در زمان بسیار کوتاهی بتوان سرعت جریان سیال را با استفاده از ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ مشخص نمود. البته با توجه به پیشرفت سریع رایانه‌ها از نظر سرعت و حافظه، زمان محاسبه از اهمیت خاصی برخوردار نبوده و بهتر است از معادله‌هایی استفاده کرد که منحنی (E_R, U_R) را با دقت بهتری تقریب می‌زنند.

الف - تقریب نمودن با روش معادله توانی (King)

معادله توانی (King) را می‌توان به عنوان معادله کالیبراسیون استفاده نمود:

$$E^2 = A + BU^n \quad (3-6)$$

مقادیر A ، B و n ضرایب ثابتی می‌باشند که با استفاده از کالیبراسیون سرعت به دست می‌آیند. (Collis & Williams 1959) برای بازه $0.02 < Re < 44$ ، (عدد رینولدز Re بر پایه قطر سنسور است)، مقدار $n = 0.45$ را بهترین نتیجه برای تقریب نمودن معادله کالیبراسیون به صورت توانی بیان نمودند. در سرعت‌های متوسط، بهترین مقدار n برای یک پراب سیم داغ با قطر $5 \mu m$ حدود $0.4-0.45$ است. برای به دست آوردن ضرایب ثابت معادله توانی از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده نمود، یکی از روش‌ها، حل نمودن معادله‌ها به طور همزمان و به دست آوردن مقادیر A ، B و n است.

در روش دیگر، ابتدا مقادیر ولتاژ E اندازه‌گیری شده از دستگاه جریان‌سنج سیم داغ به توان دو رسیده، سپس مقادیر سرعت جریان سیال U به توان $(0.1+0.01(I))$ می‌رسد. هنگامی که $I=0$ است، بهترین خطی را که با رابطه $(E^2, U^{0.1})$ تقریب زده می‌شود، به دست آورده و مقادیر $A(0)$ ، $B(0)$ و $\varepsilon_u(0)$ مشخص می‌شوند، سپس برای $I=1$ بهترین خطی که با رابطه $(E^2, U^{0.11})$ تقریب زده می‌شود، همچنین مقادیر $A(1)$ ، $B(1)$ و $\varepsilon_u(1)$ را تعیین نموده و این عمل تا $I=80$ تکرار می‌شود. سپس با توجه به کمترین مقدار $\varepsilon_u(I)$ ، می‌توان بهترین معادله کالیبراسیون $E^2 = A + BU^n$ را به دست آورد. در این حالت A و B متناظر با کمترین مقدار $\varepsilon(I)$ و $n = 0.1 + 0.01(I)$ است. با استفاده از رایانه‌های امروزی زمان بسیار کمی برای انجام محاسبه‌های فوق صرف می‌شود. طبق رابطه توانی، هنگامی که $U=0$ است، $E^2(U=0) = A$ خواهد بود. اما با روش ارایه شده، مقدار A برابر $E^2(U=0)$ نخواهد بود، بویژه برای حالتی که بازه کالیبراسیون شامل نقطه $U = 0$ نباشد.

ب - تقریب نمودن با روش اسپلاین (Spline)

تقریب نمودن منحنی به روش اسپلاین یکی از روشهای مهم و مناسب است. در این روش از هر چند نقطه یک منحنی سهمی تقریب زده می‌شود. این روش یکی از بهترین روشها برای تقریب نمودن یک منحنی است و دارای خطای کمتری نسبت به روشهای دیگر است. قابل ذکر است در این روش، دو منحنی مجاور هم باید در نقطه مشترک دارای پیوستگی بوده و حد چپ و راست آنها نیز با یکدیگر برابر باشند.

در روش تقریب نمودن منحنیها با اسپلاین، معادله تقریب چند رابطه‌ای است. با توجه به حافظه مناسب رایانه‌ها، لازم نیست منحنی تقریب شده با روش اسپلاین را به صورت معادله چند رابطه‌ای بیان کرد، بلکه مقادیر متناظر E و U_R را می‌توان به صورت آرایه مرتب نمود. تعداد عضوهای این آرایه بستگی به تعداد بیت‌های کارت DAQ دارد. به عنوان مثال تعداد عضوهای آرایه‌ها برای یک کارت ۱۲ بیتی $4096 = 2^{12}$ می‌باشد. برای ایجاد آرایه طبق منحنی تقریب شده با روش اسپلاین، ابتدا بازه ولتاژ ورودی کارت DAQ را مشخص نموده (E_{max}, E_{min}) ، سپس طبق معادله زیر:

$$E(I) = E_{min} + \frac{(E_{max} - E_{min})}{2^n} (I) \quad (4-6)$$

تقسیمات ولتاژ ورودی کارت DAQ مشخص می‌شود. با فرض این که مشخصات کارت ورودی $E_{min} = -10V$ ، $E_{max} = +10V$ و $n = 12$ باشد، معادله (۶-۶) به صورت زیر خواهد بود:

$$E(I) = -10 + \frac{20}{4096}(I) \quad (۵-۶)$$

که مقدار I از ۰ تا ۴۰۹۵ تغییر می‌کند. با توجه به مقدار، آرایه $E(I)$ تعیین می‌شود و با استفاده از منحنی تقریب اسپلاین، به ازای هر $E(I)$ ، سرعت جریان متناظر آن $U(I)$ محاسبه می‌شود. با ایجاد یک آرایه دو بعدی که بعد اول آن $E(I)$ و بعد دوم آن $U(I)$ است، می‌توان آن را در حافظه رایانه ذخیره و با استفاده از آن سرعت جریان سیال را اندازه‌گیری نمود.

ج - تقریب نمودن با روش چند جمله‌ای

ارایه شده است. برای به دست آوردن $E=f(U)$ معادله کالیبراسیون دستگاه جریان سنج سیم داغ به شکل $U = f^{-1}(E)$ ، سرعت جریان سیال، لازم است که معادله کالیبراسیون را معکوس نموده و طبق معادله را تابعی از U سرعت جریان سیال را محاسبه نمود. اما با توجه به منحنی کالیبراسیون، می‌توان از ابتدا آرایه کرد. $U=f(E)$ در نظر گرفته و معادله کالیبراسیون را به صورت E متغیر

را مستقیماً U در نظر گرفتند. از این طریق می‌توان معادله E سرعت را به صورت تابع چند جمله‌ای از ولتاژ به صورت زیر بیان نمود: E بر اساس

$$U = C_0 + C_1E + C_2E^2 + C_3E^3 + C_4E^4 + \dots \quad (۶-۶)$$

چندجمله‌ای با مرتبه ۴، برای تقریب نمودن معادله‌های کالیبراسیون دستگاه جریان سنج سیم داغ مناسب است. لازم به ذکر است هر چه مرتبه چندجمله‌ایها بالاتر باشد، احتمال ناپایداری افزایش می‌یابد.

فصل هفتم

اندازه گیری نیروها

اندازه گیری نیروها

همان‌طور که بیان شد، هدف از کاربرد تونل باد در تحقیقات و پژوهشها، بررسی و مطالعه مشخصه‌های جریان هوا اطراف مدل و در نهایت استفاده از نتایج آن در بهینه سازی طراحی اجسام و عملکرد آنهاست. یکی از مشخصه‌های کمی جریان هوا بر روی اجسام، نیروهای اعمالی از طرف جریان هوا بر روی جسم است که اندازه‌گیری و تعیین آن اهمیت بسیاری دارد. به‌طور کلی، در تونل باد، نیروهای اعمالی از طرف جریان باد به مدل، به سه روش ذیل اندازه‌گیری و بررسی می‌شوند:

۱- اندازه‌گیری نیروها با اندازه‌گیری ممنتوم در ناحیه دنباله جسم^{۱۱۳}

۲- اندازه‌گیری نیروها با اندازه‌گیری توزیع فشار بر روی سطح مدل

۳- اندازه‌گیری مستقیم نیروها با استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری نیرو یا بالانس‌ها

در روش اندازه‌گیری ممنتوم، ممنتوم در بالادست مدل و در ناحیه دنباله جسم در پایین دست آن اندازه‌گیری شده و تعیین اختلاف ممنتوم در بالادست و پایین دست مدل، نیروی پسا اندازه‌گیری می‌شود. در روش دوم، با ایجاد تعداد زیادی اوریفیس بر روی سطح مدل، توزیع فشار استاتیکی بر روی سطح مدل اندازه‌گیری شده و با انتگرالگیری از این توزیع فشار نیروهای برا و پسا اعمال شده به مدل به‌دست می‌آید. در روش سوم، از

¹¹³ Wake-Survey Method

دستگاه‌های اندازه‌گیری نیرو که بالانس نام دارند، مقادیر نیرو و گشتاورهای اعمال شده به مدل از طرف جریان هوا، به صورت مستقیم اندازه‌گیری می‌شود.

هر یک از روش‌های فوق برای اندازه‌گیری نیروها و گشتاورها، دارای ویژگی‌های مختلفی بوده و در موارد مختلفی می‌توانند به کار روند.

به طور کلی مزیت اندازه‌گیری ممنتوم در ناحیه دنباله جسم، این است که به وسیله آن می‌توان اطلاعات مفیدی در مورد مشخصات جریان هوا در اطراف جسم به دست آورد. این اطلاعات می‌تواند شامل وسعت محدوده دنباله جسم، تعیین مؤلفه‌های نیروی پسا نظیر پسا القائی، چگونگی تغییر ناحیه دنباله جسم با تغییر زاویه حمله و نیز توزیع نیروی پسا در امتداد جسم می‌باشد که این اطلاعات می‌تواند در طراحی و نیز معترسازی کدهای CFD مفید باشد. از روش اندازه‌گیری ممنتوم می‌توان برای تعیین نیروی پسا در حالت دو بعدی و سه بعدی استفاده نمود که در حالت سه بعدی، انجام اندازه‌گیری‌ها به علت زیاد بودن نقاط اندازه‌گیری تا حدودی دشوار می‌باشد.

در روش اندازه‌گیری توزیع فشار بر روی سطح مدل نیز می‌توان اطلاعات مفیدی از چگونگی توزیع فشار استاتیکی بر روی سطح مدل، تعیین نقطه فشار حداکثر، تعیین مرکز فشار و... را به دست آورد. این روش نیز به طور معمول برای انجام آزمایش‌های دو بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به زیاد بودن نقاط اندازه‌گیری فشار بر روی سطح و در نتیجه افزایش تعداد اریفیس‌ها و نیز افزایش تعداد شلنگ‌های اتصال به مانومتر، کاربرد این روش در حالت سه بعدی مشکلاتی را به همراه دارد.

بالانس‌ها نیز تجهیزاتی هستند که بسته به نوع آنها در داخل مدل قرار گرفته و یا اینکه خود مدل بر روی آنها نصب شده و مقادیر نیرو و گشتاورهای اعمالی به مدل اندازه‌گیری می‌شود. قابل ذکر است که بالانس‌ها تنها یک عدد را به عنوان مقدار نیرو نشان می‌دهند و اطلاعاتی را در مورد مشخصات جریان هوا در اختیار نمی‌گذارند.

با توجه به اهمیت اندازه‌گیری نیروها و گشتاورهای اعمال شده به مدل، در این فصل هر یک از سه روش فوق بررسی می‌شوند.

$$C_D = 2 \int_0^{\frac{y_{\max}}{d}} \left[\left(\frac{q_2}{q_\infty} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{q_2}{q_\infty} \right] d \left(\frac{y}{d} \right)$$

مقدار C_D شامل نیروی پسا اصطکاکی و فشاری می‌باشد. با توجه به معادله (۷-۱۲) مشخص می‌شود که با

اندازه‌گیری مقادیر $\frac{q_2}{q_\infty}$ در چندین نقطه از سطح کنترل ۲ و محاسبه انتگرال رابطه (۷-۱۲) می‌توان مقدار

C_D را به دست آورد. مقادیر موجود در رابطه (۷-۱۲) که q_2, q_∞ می‌باشند را می‌توان به دو روش اندازه‌گیری نمود.

روش اول، که متداولترین روش است، استفاده از رک فشار می‌باشد. در این روش، لوله‌های اندازه‌گیری فشار کل در یک رک قرار داده می‌شود. این لوله‌ها را می‌توان به مانومتر چند لوله‌ای و یا scan valve متصل نمود. اگر از مانومتر استفاده شود، تنها نسبت $\frac{q_2}{q_\infty}$ مورد نیاز است و مقادیر خوانده شده مستقل از وزن مخصوص سیال درون مانومتر و زاویه آن می‌باشد. روش دیگر استفاده از یک لوله پیتوت به همراه یک مکانیزم انتقال دهنده است. در این روش باید از سیستم جمع‌آوری داده نیز استفاده نمود. این سیستم، مکان لوله پیتوت استاتیکی و نیز فشار آن را در آن محل، به دقت اندازه‌گیری می‌کند. در این روش برای حصول اطمینان از اینکه کل ناحیه دنباله جسم جاروب شده است، بهتر است که مقدار فشار کل و میزان جابه‌جایی پراب پیتوت به صورت همزمان بر روی صفحه نمایش رایانه نمایش داده شوند.

روش دیگر اندازه‌گیری مقادیر انتگرال رابطه (۷-۱۲) استفاده از دستگاه جریان سنج سیم داغ به همراه مکانیزم انتقال دهنده پراب است. در این روش، پراب دستگاه جریان سنج سیم داغ به مکانیزم انتقال دهنده متصل شده و ناحیه پشت مدل را اندازه‌گیری می‌کند. داده‌های حاصل از پراب به صورت مقادیر سرعت هستند که با استفاده از نرم افزار می‌توان آن را به مقادیر فشار دینامیکی در هر نقطه تبدیل نمود.

یکی از نکات بسیار مهم در این روش، اندازه‌گیری صحیح مقادیر q در ناحیه پشت مدل و یا ناحیه دنباله جسم است. در این روش اندازه‌گیری، دو عامل باعث بروز خطا می‌شوند:

۱- یکنواخت نبودن فشار استاتیکی در ناحیه اندازه‌گیری و برابر نبودن آن با فشار استاتیکی جریان آزاد

۲- اغتشاش‌های درون جریان هوا

با توجه به رابطه (۷-۳) مشاهده می‌شود که اگر مقادیر فشار $P_1 = P_2$ نباشد، آنگاه $P_1 A_1 \neq P_2 A_2$ و در نتیجه نیروی ناشی از تفاوت فشار استاتیکی در سطوح ۱ و ۲ را نیز باید در معادله‌ها در نظر گرفت.

شدت اغتشاش‌های درون جریان هوا نیز مهم می‌باشد. شدت اغتشاش‌ها باعث ایجاد مقادیر تنش برشی τ_{xx} می‌شوند که این تنش بر روی سطح کنترل اثر دارد. بنابراین سطح کنترل ۲ باید در جایی باشد که شدت اغتشاش‌ها تقریباً برابر شدت اغتشاش‌های جریان آزاد باشد تا τ_{xx} که به سطوح کنترل ۱ و ۲ عمل می‌کند

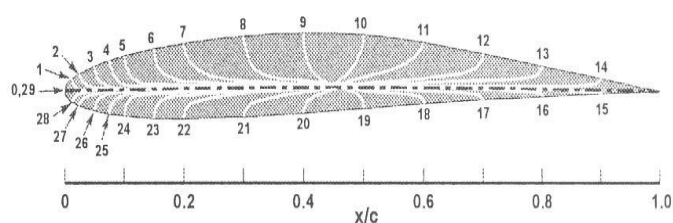
یکسان بوده و در معادله (۳-۷) حذف شوند. نکته دیگر در مورد شدت اغتشاش‌ها این است که اغتشاش‌های جریان سبب بروز خطا در هنگام اندازه‌گیری فشار دینامیکی با لوله استاتیکی پیتوت و یا رک فشار می‌شوند. برای اندازه‌گیری مناسب و صحیح مقدار q در پشت جسم، رک فشار باید با مقداری فاصله نسبت به جسم قرار گیرد به گونه‌ای که در این فاصله، فشار استاتیکی ناحیه دنباله با فشار تونل باد برابر شده و رک نیز تقریباً در فشار استاتیکی تونل باد قرار گیرد.

همان‌طور که بیان شد، مکان قرارگیری پراب لوله پیتوت برای اندازه‌گیری فشار مهم است. مکان قرارگیری پراب باید جایی باشد که شدت اغتشاش‌های جریان هوا کم باشد. زیرا این اغتشاش‌ها بر روی مقادیر خوانده شده از لوله پیتوت خطا ایجاد می‌کنند.

استفاده از این روش برای انجام اندازه‌گیری نیروی پسا اجسام سه بعدی کاربرد چندانی ندارد. علت این امر، افزایش زیاد داده‌ها و مشکلات ناشی از اندازه‌گیری با لوله پیتوت می‌باشد. همچنین ناحیه دنباله جسم اگر به‌صورت سه بعدی باشد، گردابه‌هایی را ایجاد می‌کند که این گردابه‌ها باید به دقت اندازه‌گیری شوند.

۲-۷- اندازه‌گیری نیرو به روش اندازه‌گیری توزیع فشار

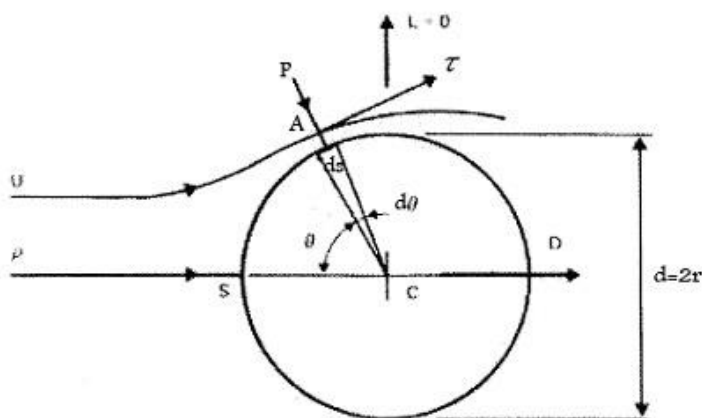
یکی دیگر از روش‌های اندازه‌گیری نیروهای برا و پسا، اندازه‌گیری توزیع فشار استاتیکی بر روی سطح مدل و انتگرال‌گیری از آن است. در این روش مطابق شکل (۲-۷) اوریفیس‌های زیادی بر روی سطح مدل ایجاد می‌شوند و هر کدام از این اوریفیس‌ها توسط لوله‌های نازکی به دستگاه‌های اندازه‌گیری فشار متصل می‌شوند.



شکل (۲-۷) ایجاد اوریفیس بر روی یک ایرفویل برای اندازه‌گیری توزیع فشار استاتیکی روی سطح آن [2]

اگر توزیع فشار در تمامی نقاط در طول سطح یک ایرفویل مشخص باشد، با استفاده از انتگرال گیری می توان نیروی فشاری کل بر روی بدنه ایرفویل را مشخص نمود.

شکل (۳-۷)، استوانه ای را نشان می دهد که عمود بر جریان U قرار دارد. با در نظر گرفتن المان کوچکی از سطح به مساحت ds ، مقدار نیروی پسا وارد شده بر المان مذکور بصورت زیر بیان می شود:



شکل (۳-۷) استوانه عمود بر جریان [2]

$$dD = (P \cos \theta + \tau \sin \theta) ds \quad (۱۳-۷)$$

که τ تنش برشی و P فشار استاتیکی است. با انتگرال گیری از این رابطه بر روی سطح استوانه خواهیم داشت:

$$D = \int_S (P \cos \theta + \tau \sin \theta) ds \quad (۱۳-۷)$$

که S مساحت جانبی استوانه است.

با نوشتن رابطه (۱۳-۷) به صورت بی بعد خواهیم داشت:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 d l} = \frac{1}{l d} \int \left(\frac{P}{\frac{1}{2} \rho U^2} \cos \theta + \frac{\tau}{\frac{1}{2} \rho U^2} \sin \theta \right) ds \quad (۱۴-۷)$$

از آنجا که $C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U^2}$, $C_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho U^2}$ به ترتیب ضرایب اصطکاک پوسته‌ای و ضریب فشار استوانه هستند،

با جایگذاری آنها در معادله بالا خواهیم داشت:

$$C_D = \frac{1}{dL} \int_s (C_p \cos \theta + C_f \sin \theta) ds \quad (15-7)$$

معادله فوق نشان می‌دهد که نیروی پسا استوانه را می‌توان با اندازه‌گیری فشار P و تنش برشی τ بر روی سطح استوانه، بدست آورد.

در استوانه، مقدار پسا ناشی از اصطکاک پوسته‌ای در مقایسه با نیروی پسا ناشی از فشار، بسیار کوچک است و می‌توان آنرا نادیده گرفت. با در نظر گرفتن این فرض و رابطه زیر:

$$ds = r d\theta = (d/2) d\theta \quad (16-7)$$

مقدار C_D را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$C_D = \frac{1}{2} \int_c (C_p \cos \theta) d\theta \quad (17-7)$$

در شکل (۷-۳)، نقطه S، نشان دهنده نقطه سکون است. سرعت جریان هوا هنگامیکه از نقطه S بر روی استوانه شروع به حرکت می‌کند، از مقدار صفر افزایش می‌یابد و طبق معادله برنولی، فشار و در نتیجه ضریب فشار افت می‌کنند.

و نیز عدم نیاز به کالیبراسیون مداوم است. از معایب این نوع بالانس نیز می‌توان به اندازه بزرگ آن، بالا بودن قیمت اولیه و زمان مورد نیاز برای کاهش آثار متقابل ۶ مؤلفه بر روی یکدیگر و نیز تنظیم بالانس نام برد.

مزیت بالانس داخلی، قیمت اولیه پایین آن است و همچنین اینکه یک بالانس داخلی ممکن است در چندین تونل باد به کار رود. یکی از معایب بالانس داخلی نیز این است که بارگذاری روی مدل ممکن است به طور تصادفی از ظرفیت بالانس تجاوز کند که این باعث خرابی بالانس می‌شود.

به‌طور کلی باید به این نکته توجه داشت که نیروها و گشتاورهایی را که یک بالانس باید تحمل کند، تابعی از اندازه ابعاد اتاق آزمون تونل باد و سرعت هوا است. همچنین هیچ سیستم بالانس واحدی وجود ندارد که بتواند تمامی تست‌های ممکن را برای تمامی انواع و شرایط آزمایش انجام دهد. ولی بالانس خارجی به‌علت بازه بیشتر تحمل نیروها و گشتاورها، انعطاف پذیری بیشتری دارد. قابل ذکر است که بالانس یک تونل باد وسیله بسیار پیچیده‌ای است و طراحی و ساخت آن معمولاً به مهندسين بالانس سپرده می‌شود تا مهندسين تونل باد.

فصل هشتم

روش انجام آزمایش و بررسی نتایج

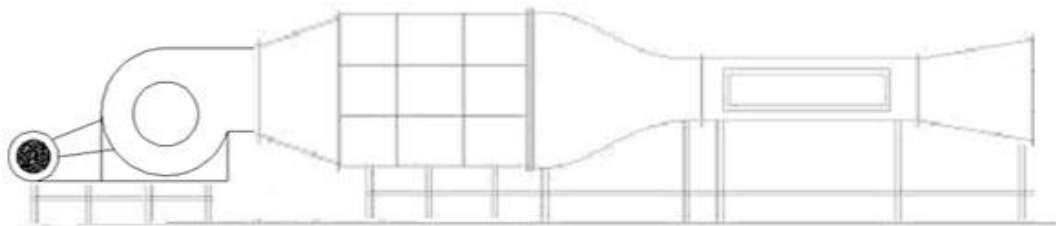
روش انجام آزمایش

در این فصل مشخصات تونل باد مورد استفاده، روش انجام آزمایش، ساخت مدل و بررسی نتایج بدست آمده در تونل باد ارائه می شود.

۸-۱- 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 ۸۰*۸۰*۲۰۰ cm و از جنس پلکسی گلاس^{۱۱۴} است. این تونل مجهز به یک فن سانتریفوژ و موتور سه فاز ۴۵ kw است.

حداکثر سرعت این تونل باد ۳۵ 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 (۸-۱) و (۸-۲) نشان داده شده است.



¹¹⁴ Plexiglass

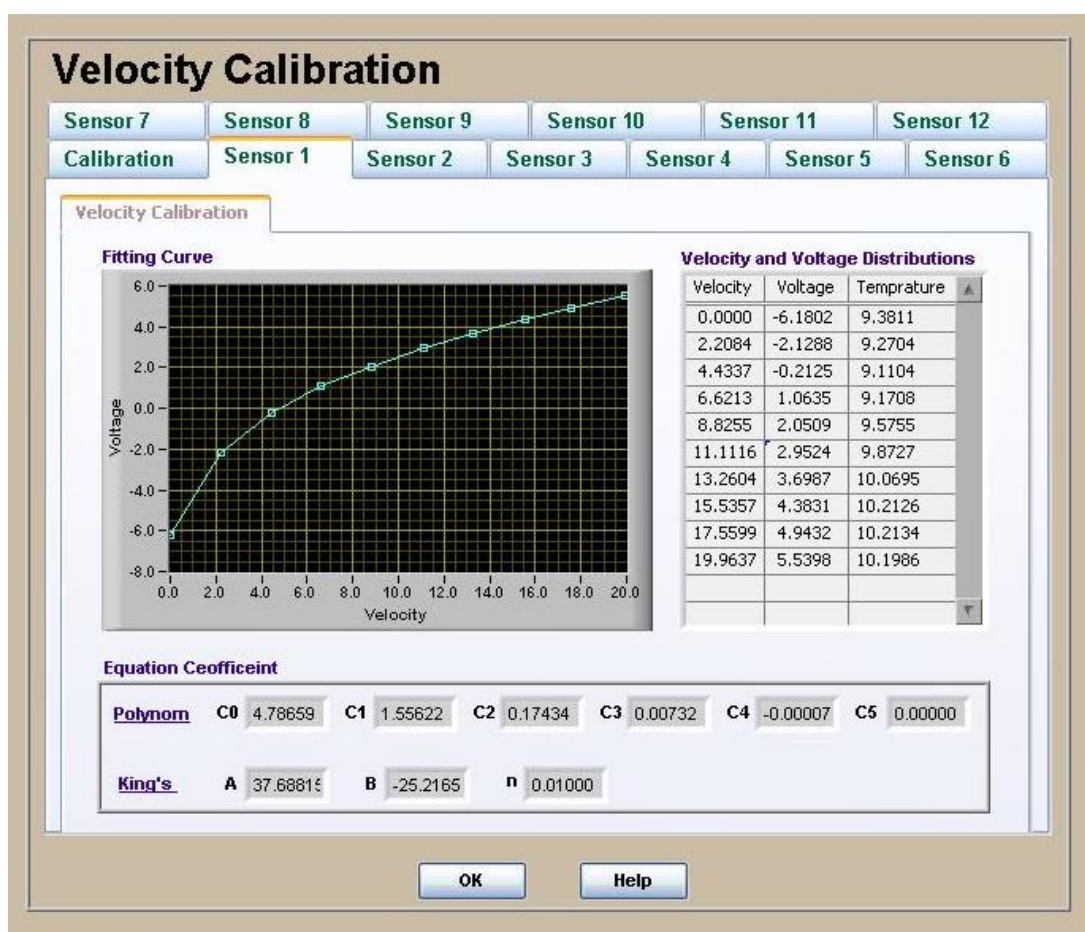
شکل (۸-۱) شماتیک تونل باد دانشگاه صنعتی شاهرود



شکل (۸-۲) نمایی از تونل باد دانشگاه صنعتی شاهرود

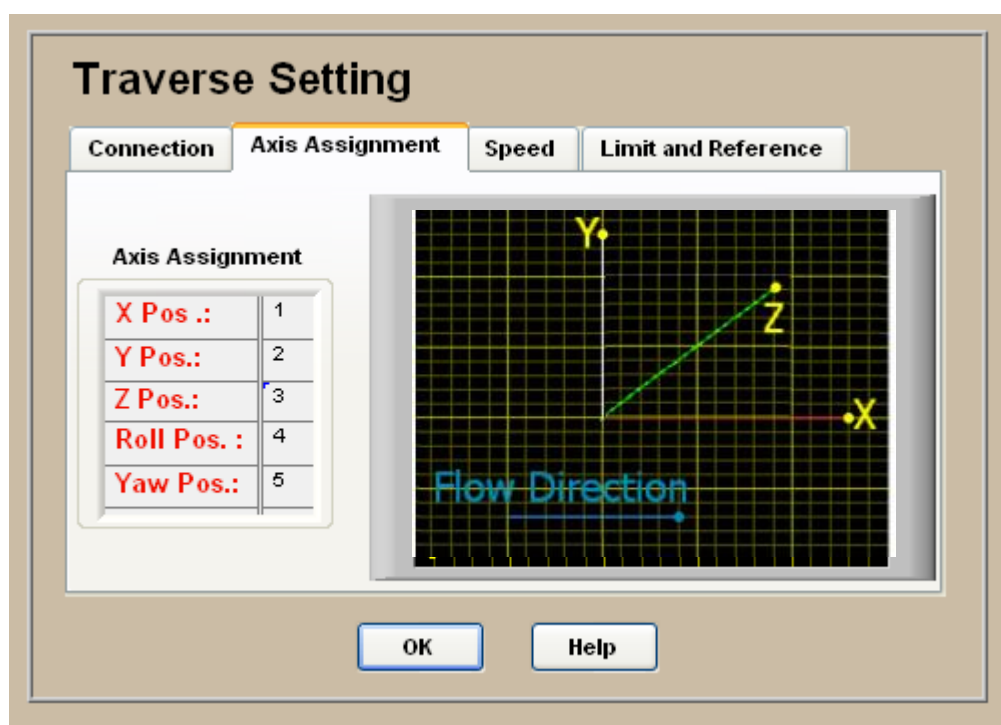
برای اندازه گیری توزیع سرعت در داخل تونل باد از دستگاه و نرم افزار جریان سنج سیم داغ یک بعدی، ساخت شرکت فراسنجش صبا استفاده شد. برای هر نقطه جریان، زمان نمونه برداری ۵ ثانیه انتخاب گردید. کالیبراسیون پراب نیز در داخل تونل باد صورت گرفت که منحنی کالیبراسیون در شکل (۸-۳) آمده است. این کالیبراسیون برای 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.

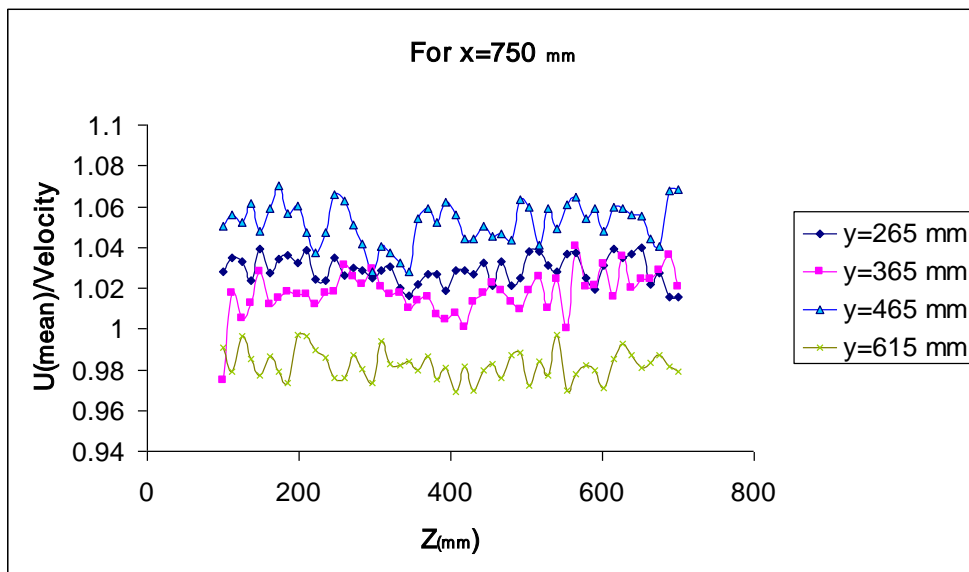


شکل (۸-۳) منحنی کالیبراسیون جریان سنج سیم داغ

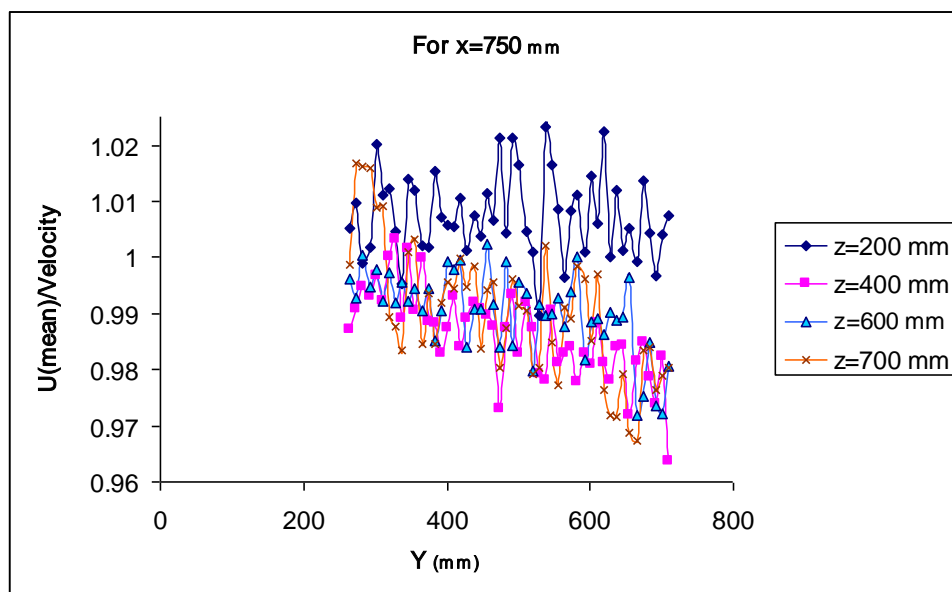
محور مختصات در نظر گرفته شده در این آزمایش، مطابق شکل (۸-۴) در ابتدای اتاق آزمون فرض شد. پروفیل سرعت بدست آمده در طول اتاق آزمون در فواصل مختلف در شکل‌های (۸-۵) تا (۸-۸) آمده است. در این نمودارها نسبت سرعت متوسط (U_{mean}) که با جریان سنج سیم داغ بدست آمده به سرعت اندازه گیری شده توسط لوله پیتوت ($Velocity$) بر حسب فواصل مختلف از محور مختصات نشان داده شده است.



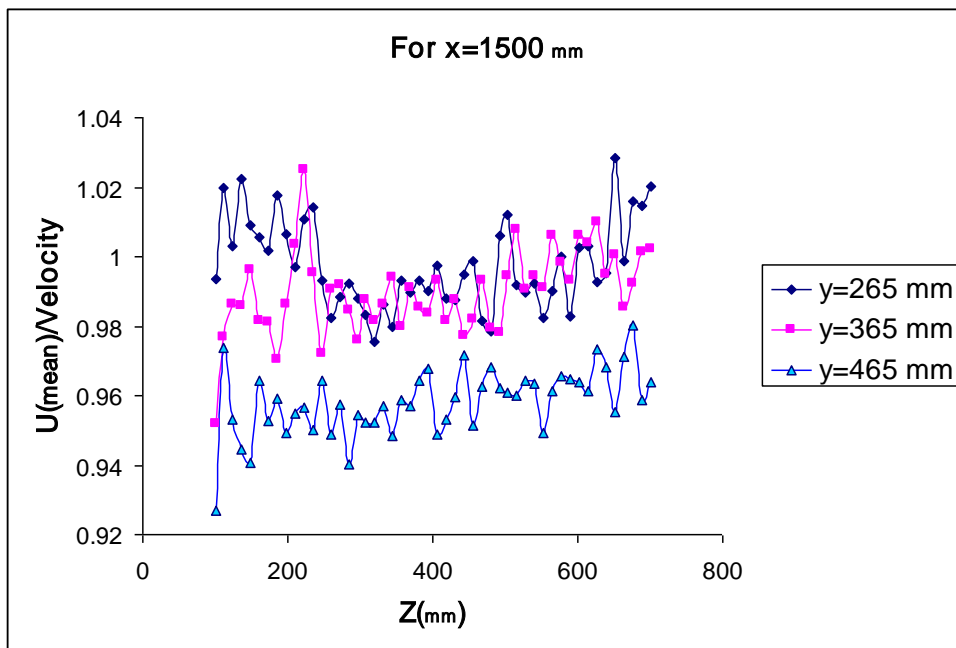
شکل (۸-۴) محور مختصات انتخابی



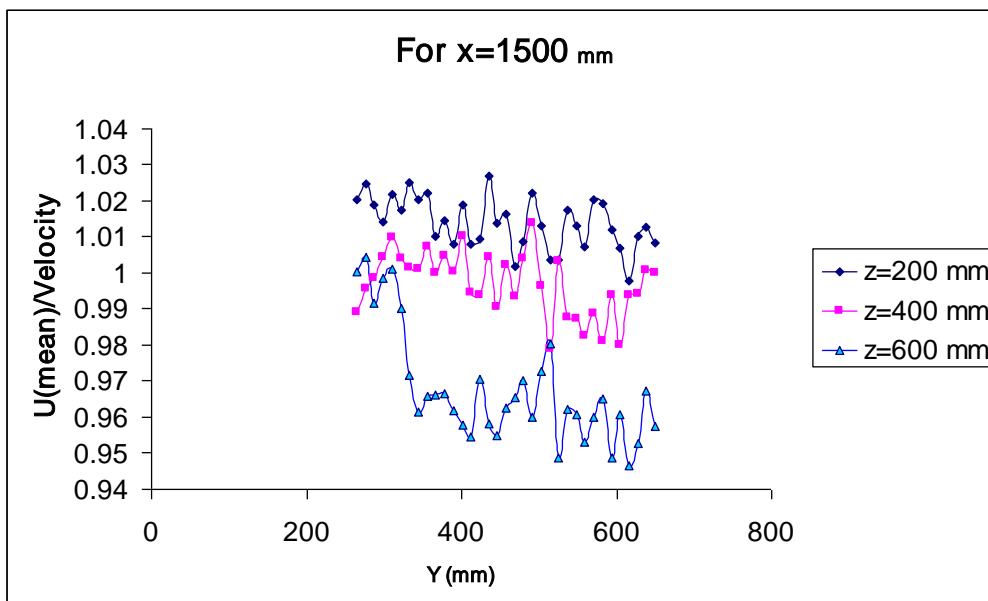
شکل (۵-۸) توزیع سرعت در فاصله ۷۵۰ mm از ابتدای اتاق آزمون بر حسب Z, Y



شکل (۶-۸) توزیع سرعت در فاصله ۷۵۰ mm از ابتدای اتاق آزمون بر حسب Y, Z

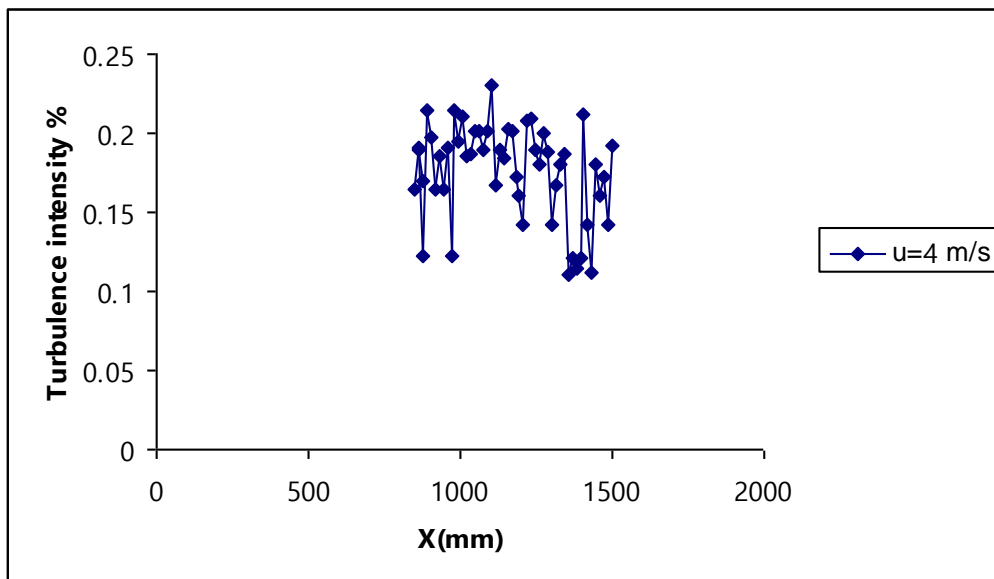


شکل (۷-۸) توزیع سرعت در فاصله ۱۵۰۰ mm از ابتدای اتاق آزمون بر حسب Z, Y



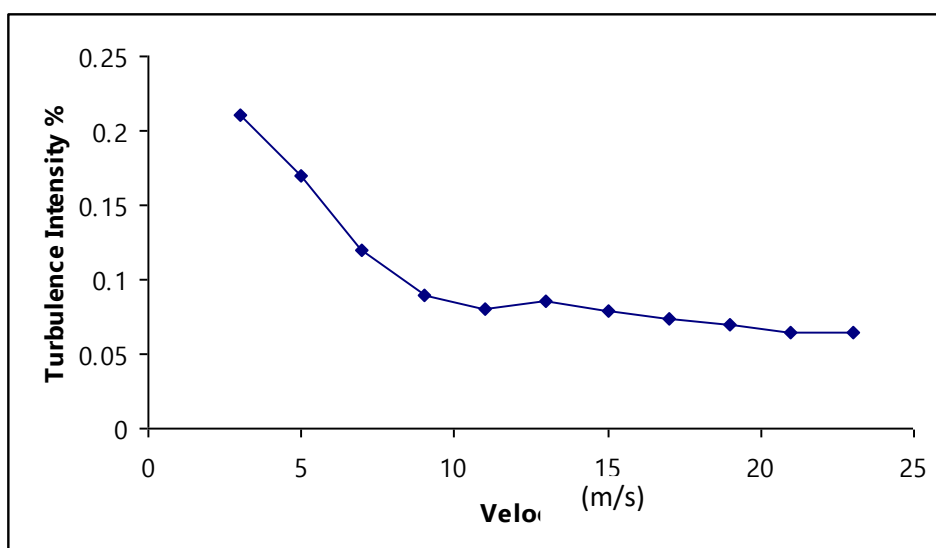
شکل (۸-۸) توزیع سرعت در فاصله ۱۵۰۰ mm از ابتدای اتاق آزمون بر حسب Y, Z

میزان شدت اغتشاشات جریان آزاد در این تونل باد در حدود ۰/۲ درصد است. میزان توزیع شدت اغتشاشات در مرکز تونل باد و در طول اتاق آزمون در شکل (۸-۹) نشان داده شده است.



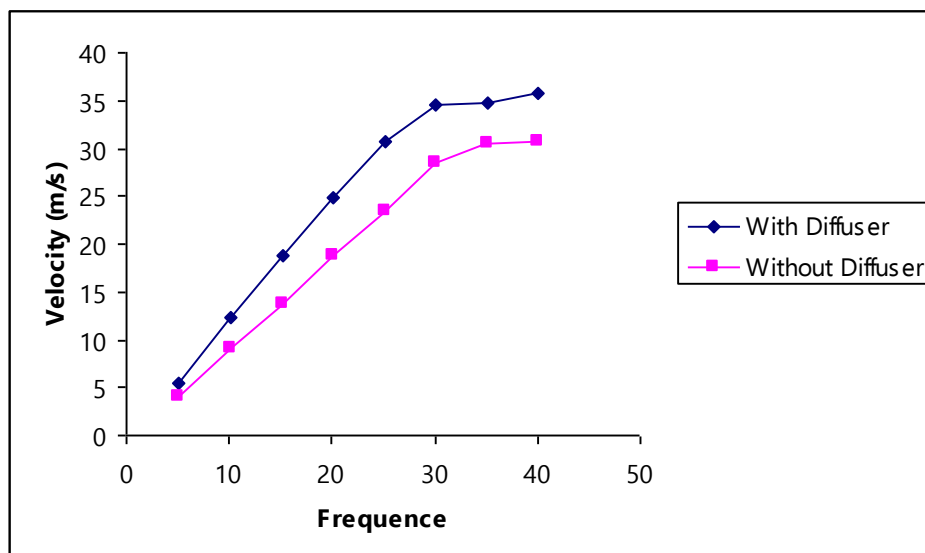
شکل (۸-۹) توزیع شدت اغتشاشات در سرعت ۴ m/s در مرکز تونل باد و در طول اتاق آزمون

شکل (۸-۱۰) تغییر شدت اغتشاشات جریان آزاد را بر حسب تغییر سرعت در مرکز اتاق آزمون نشان می دهد. مطابق شکل، با افزایش سرعت از مقدار شدت اغتشاشات کم شده و سپس در حد مشخصی تقریباً ثابت می ماند.



شکل (۸-۱۰) توزیع شدت اغتشاشات بر حسب سرعت در مرکز اتاق آزمون

میزان توزیع سرعت تونل باد بر حسب فرکانس موتور فن مورد استفاده در شکل (۸-۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۸-۱۱) توزیع سرعت در تونل باد بر حسب فرکانس موتور فن مورد استفاده

مطابق این شکل که برای دو حالت استفاده از دیفیوزر بعد از اتاق آزمایش و عدم استفاده از آن بدست آمده، میزان سرعت قابل حصول در تونل باد را نشان می دهد. میزان ماکزیمم سرعت قابل حصول در این تونل باد با استفاده از دیفیوزر در حدود ۳۵ m/s بوده و در صورت عدم استفاده از دیفیوزر در انتهای اتاق آزمون به ۳۰ m/s می رسد.

همچنین آشکار است که با استفاده از دیفیوزر میزان سرعت قابل حصول در تونل باد تا حدود ۲۰٪ افزایش می یابد.

۸-۲- مدل آزمایش

جهت انجام این آزمایش و اندازه گیری توزیع فشار در اطراف برج خنک کن، از مدل‌های استوانه و برج خنک کن استفاده گردید.

۸-۲-۱- مدل استوانه

از آنجائیکه جریان اطراف برجهای خنک کن مشابه جریان اطراف استوانه است، از مدل استوانه نیز استفاده گردید. استوانه مورد استفاده به قطر $8/6$ cm و طول 40 cm و از جنس آهن ساخته شده بود. جهت اندازه گیری توزیع فشار در پیرامون استوانه، 24 سوراخ 2 mm بر روی رینگ آلومینیومی تعبیه شده و این رینگ مطابق شکل (۸-۱۲) در وسط استوانه قرار گرفت. به هر کدام از این سوراخها نیز شیلنگ هایی به طول 3 m متصل گردید که از طرف دیگر به دستگاه اندازه گیری فشار وصل شدند. مطابق شکل، این استوانه با استفاده از دو میله، به صورت افقی در تونل باد قرار گرفت.

فصل نہم

بحث و نتیجه گیری

۹-۱- ارائه راه حل

در فصل پیشین میزان توزیع فشار در ورودی برجهای خنک کن بررسی گردید. همان گونه که بیان شد، جهت کاهش اثر نامطلوب باد تحقیقات وسیعی انجام گرفته است. به عنوان مثال پرز^{۱۱۵} استفاده از دیواره های بادشکن را برای برجهای خنک کن از نوع هامون^{۱۱۶} معرفی نمود.

در برجهای هامون، مبدلهای حرارتی به صورت افقی در سطح مقطع برج قرار گرفته اند در صورتی که در برجهای از نوع هلر^{۱۱۷} که موضوع مورد بحث در این تحقیق می باشد، مبدلهای حرارتی به صورت عمودی در ورودی برج نصب شده اند.

تحقیقات پرز نشان داد که برای برجهای مذکور، استفاده از دیوار باد شکن به شکل یک دیوار متخلخل که در وسط برج به صورت عمود بر جریان باد قرار می گیرد، نقش مهمی در بهبود عملکرد برج تحت شرایط باد متقاطع دارد. [13]

مسعود بهنیا^{۱۱۸} نیز مقاله ای منتشر کرد که در آن استفاده از دیواره های بادشکن، به شکل دیواره های شعاعی خارجی در برجهای هامون به عنوان راه حل، ارائه شده بود. [29]

فو سانگ^{۱۱۹} نیز با مطالعات عددی و تجربی انجام داده، استفاده از دیواره های باد شکن را پیشنهاد نمود. [30]

مطالعات رفّت الوکد^{۱۲۰} نیز اثر مطلوب دیواره های باد شکن را آشکار نمود. [31]

در ادامه دیواره های بادشکن مورد استفاده قرار گرفته و نتایج حاصله از آنها ارائه می شود.

¹¹⁵ Preez

¹¹⁶ Homon Type

¹¹⁷ Heller Type

¹¹⁸ Masud Behnia

¹¹⁹ Fu Song

¹²⁰ Rafat Al-Waked

۹-۲- دیواره های باد شکن در پایین برج

همان گونه که بیان شد، پیشنهادی که برای کاهش اثرات باد ارائه شده است، استفاده از خود باد به عنوان عاملی جهت کاهش اثرات نامطلوب آن است. بدین ترتیب که توسط وسایلی، باد متقاطع به صورت یکنواخت در ورودی برج تقسیم شود به نحوی که سرعت ورودی شعاعی برابر با سرعت باد گردد که این حالت یک حالت ایده آل می باشد و عملاً رسیدن به چنین شرایطی غیر ممکن به نظر می رسد.

برای نزدیک شدن به این هدف نصب دیواره هایی در مکانهایی که باعث افت عملکرد برج می شوند یعنی نواحی کناری و پشتی برج و هدایت باد به این نواحی که در نهایت باعث افزایش دبی جرمی هوای خشک عبوری از روی مبدل‌های حرارتی می شود، ضروری به نظر می رسد.

چندین حالت در این تحقیق بررسی گردید که در هر کدام موقعیت دیواره ها متفاوت است. این حالات بدین صورت هستند:

۱- دو دیوار شعاعی با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم

۲- دو دیوار شعاعی با زاویه ۱۸۰ درجه نسبت به هم

۳- استفاده از چهار دیوار شعاعی

۴- استفاده از هشت دیوار شعاعی

جهت بررسی تاثیر وزش باد از زوایای مختلف بر عملکرد برج خنک کن نیز مدل با تغییر زاویه β چرخانده شده و در نتیجه این حالت شبیه سازی گردید. همچنین به منظور بررسی تغییر اندازه دیواره ها بر میزان توزیع فشار جانبی برج خنک کن، دو نوع دیواره در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت.

شایان ذکر است که تمام آزمایشات در عدد رینولدز $Re = 1.1 * 10^5$ انجام گرفته و به منظور کاهش خطا، زمان آفست گیری و همچنین دیتا برداری ۳۰s انتخاب گردید.

۳-۹- دیواره های باد شکن ۳ cm

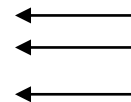
در این سری آزمایشات دیواره هایی به ابعاد 30×49 mm از چوب ساخته شده و در زوایای مختلفی نسبت به هم قرار گرفتند که در ادامه آمده است.

۹-۳-۱- استفاده از دو دیوار باد شکن با زاویه 120° درجه نسبت به هم

برای بررسی تاثیر دو دیواره، دیواره هایی چوبی در زاویه 120° درجه نسبت به هم مطابق شکل (۹-۱) قرار گرفتند. توزیع فشار بدست آمده مطابق با شکل (۹-۲) بدست آمد. در نمودار بدست آمده جهت مقایسه بین نتایج، توزیع فشار در حالت عدم استفاده از دیوار باد شکن نیز آمده است.

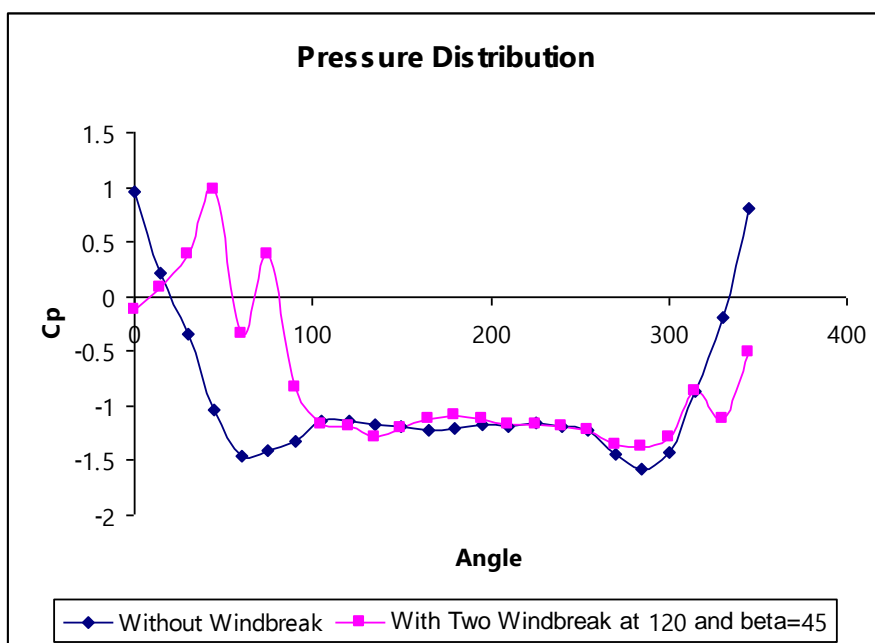
شایان ذکر است که α بیان کننده زاویه بین دو دیواره باد شکن و β زاویه چرخش برج نسبت به محور گذرنده از مرکز آن است.

Wind

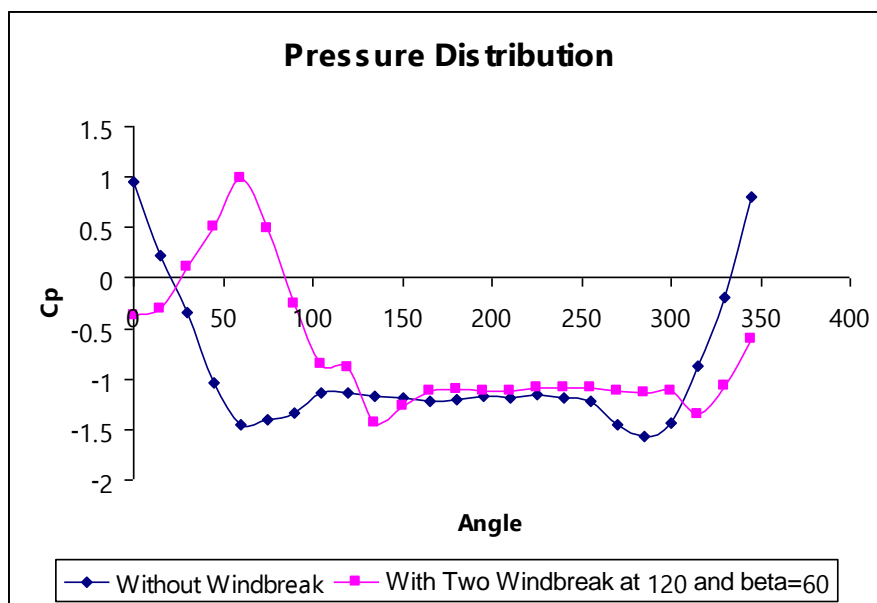


شکل (۹-۱) شماتیک قرار گیری دیواره های بکار رفته در مدل

جهت بررسی میزان تاثیر وزش باد از جهات مختلف، آزمایشات دیگری با تغییر زاویه β انجام گرفت. نتایج بدست آمده مطابق شکل‌های (۹-۴) تا (۹-۷) است.



شکل (۹-۶) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر ($\alpha = 120^0, \beta = 45$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره



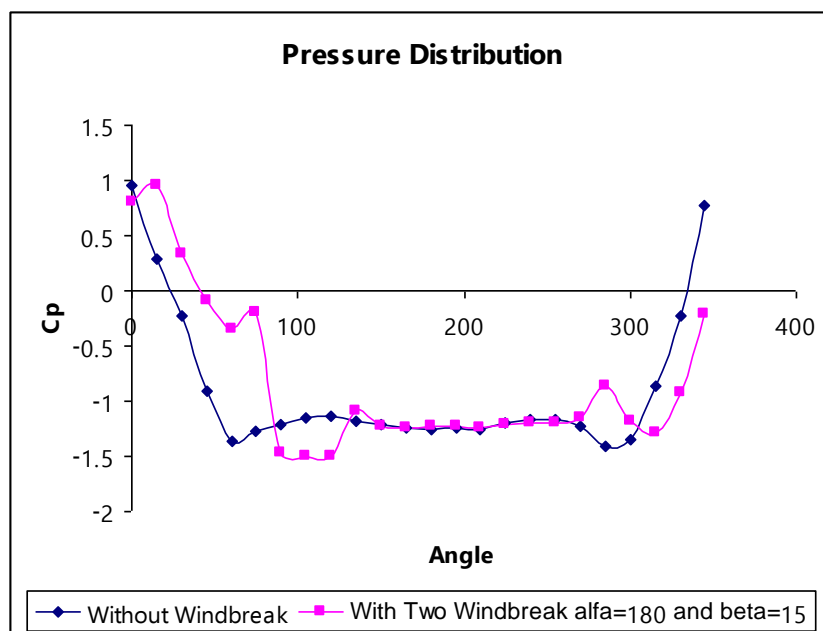
شکل (۷-۹) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر ($\alpha = 120^0, \beta = 60$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره

مطابق شکل بالا و با توجه به اینکه در نیروگاهها ممکن است باد از جهات مختلف بوزد در نتیجه میزان تاثیر دیواره ها نیز در کاهش اثر نامطلوب باد تغییر می کند، نمودار بدست آمده نشان دهنده این تغییرات است. طبق این نمودار در صورت وزش باد از ۴۵ درجه در مقایسه با وزش باد از جهت های دیگر، تاثیر دیواره ها بر عملکرد برج بهتر بوده و در صورت وزش باد از ۶۰ درجه کمترین تاثیر را خواهد داشت.

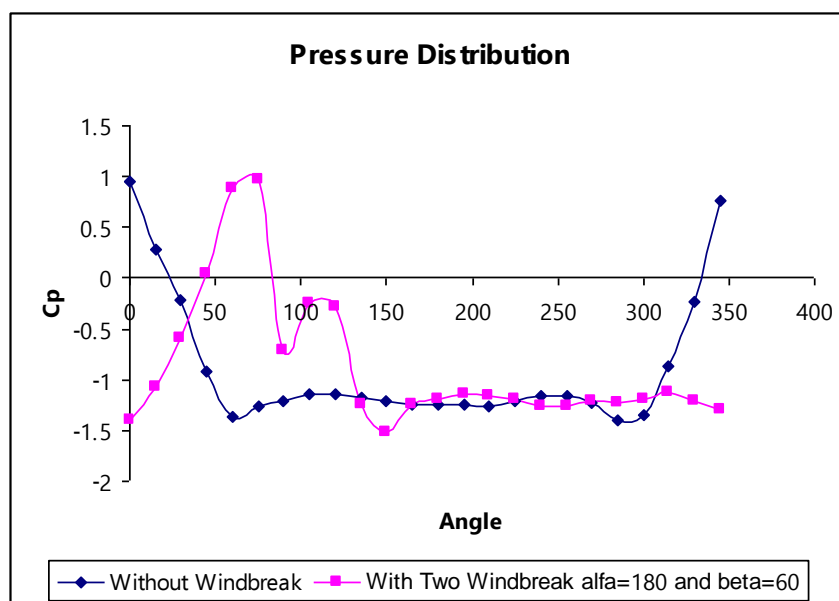
۹-۳-۲- استفاده از دو دیوار باد شکن با زاویه ۱۸۰ درجه نسبت به هم

در آزمایش دیگر دیواره های باد شکن در زاویه ۱۸۰ درجه نسبت به هم قرار گرفتند. شماتیک قرار گیری دیواره های مطابق شکل (۹-۹) است. در این حالت میزان توزیع فشار در ورودی برج تغییر کرده و نمودارهای دیگری بدست آمدند که در ادامه آمده است.

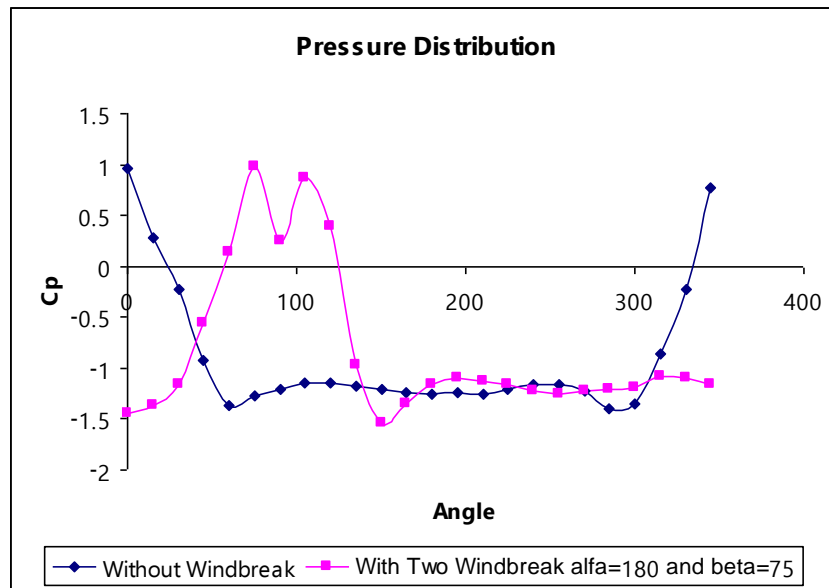
آزمایشات مشابه دیگری نیز با تغییر زاویه β انجام گرفت که نتایج آن مطابق شکل‌های (۹-۱۱) تا (۹-۱۶) است.



شکل (۹-۱۱) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر ($\alpha = 180^0, \beta = 15$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره



شکل (۹-۱۴) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر ($\alpha = 180^0, \beta = 60$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره

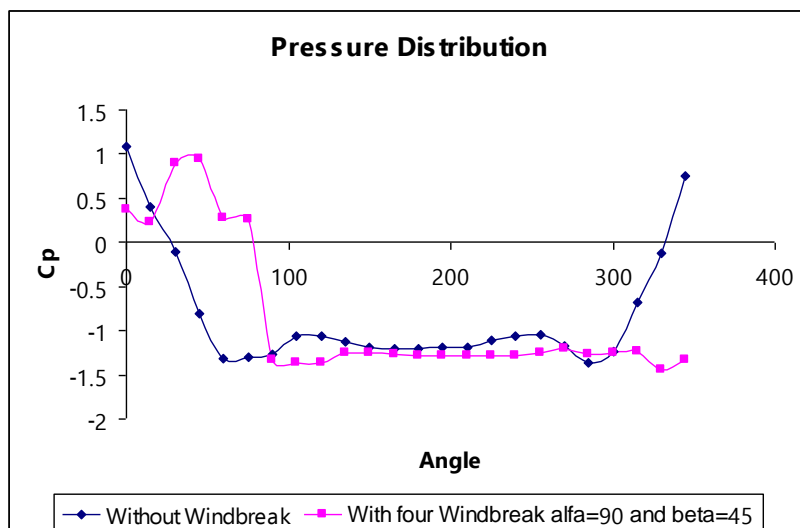


شکل (۹-۱۵) توزیع فشار بدست آمده برای دو دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر ($\alpha = 180^0, \beta = 75$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره

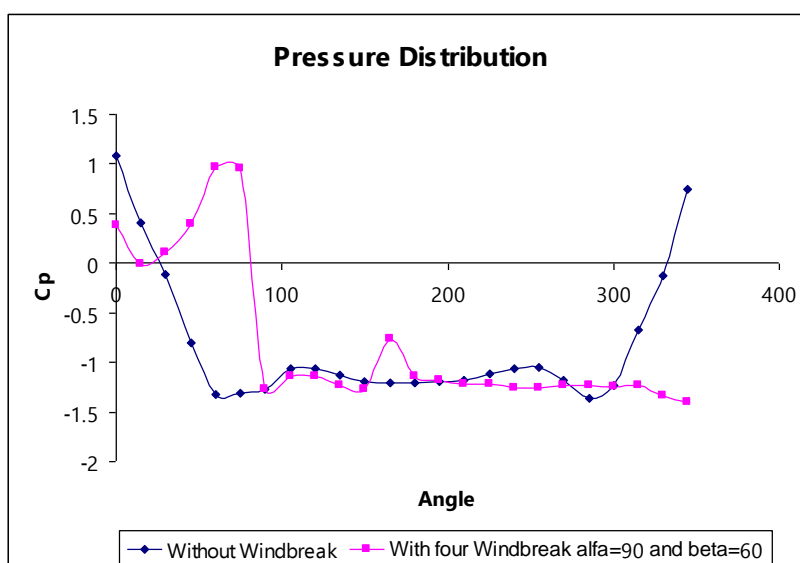
۹-۳-۳- استفاده از چهار دیوار باد شکن با زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم

در این آزمایش دیواره های باد شکن در زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم، مطابق شکل (۹-۱۸) قرار گرفتند. در این حالت نیز توزیع فشار در ورودی برج تغییر کرده و نمودارهای دیگری بدست آمد.





شکل (۹-۲۲) توزیع فشار بدست آمده برای چهار دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر ($\alpha = 90^0, \beta = 45$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره

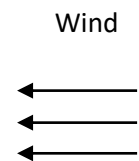


شکل (۹-۲۳) توزیع فشار بدست آمده برای چهار دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر ($\alpha = 90^0, \beta = 60$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره

شکل (۹-۲۶) نرخ افزایش میانگین توزیع فشار در برج برای چهار دیواره ۳ cm ($\alpha = 90$) بر حسب زاویه β

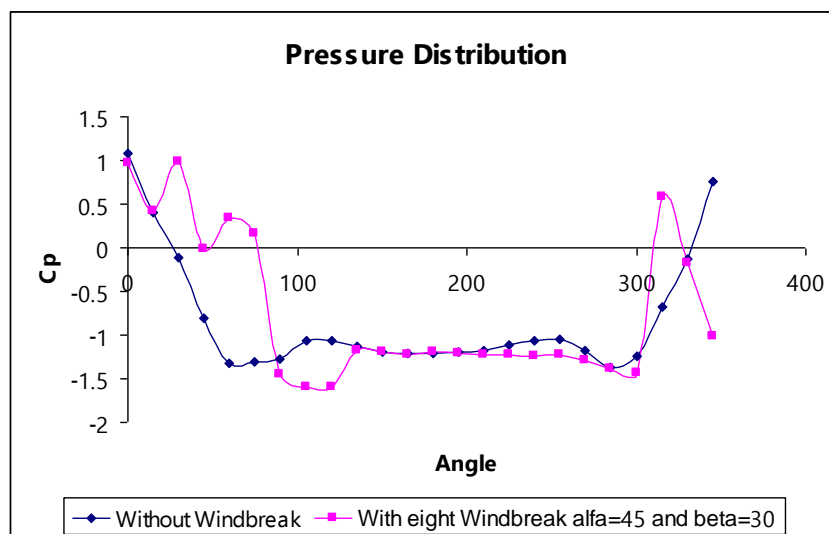
۹-۳-۴- استفاده از هشت دیوار باد شکن با زاویه ۴۵ درجه نسبت به هم

در این آزمایش مطابق شکل (۹-۲۷) دیواره های باد شکن در زاویه ۴۵ درجه نسبت به هم قرار گرفتند.

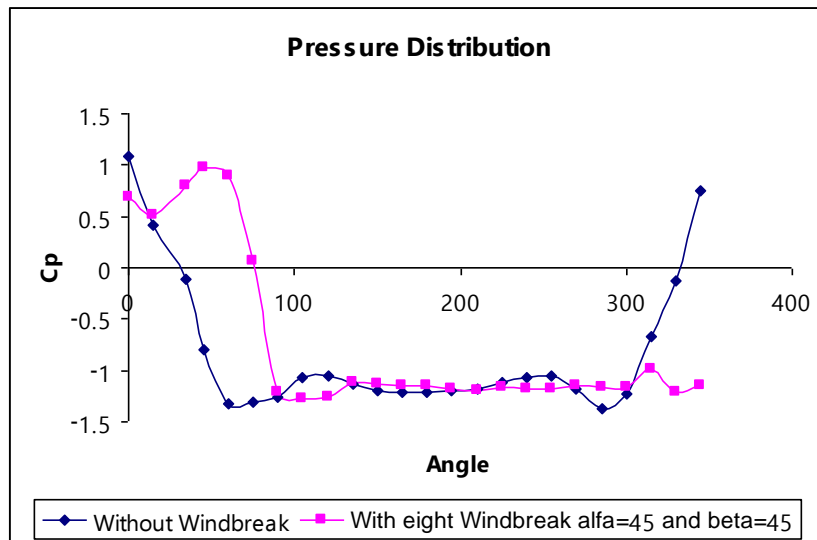


شکل (۹-۲۷) شماتیک قرار گیری دیواره ها

توزیع فشار برای حالت وزش باد از روبرو مطابق شکل (۹-۲۸) است. مطابق با آزمایشات قبلی، بررسی وزش باد از جهات دیگر نیز مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مربوطه در شکل‌های (۹-۲۹) تا (۹-۳۱) آمده است.



شکل (۹-۳۰) توزیع فشار بدست آمده برای هشت دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر ($\alpha = 45^0, \beta = 30$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره



شکل (۹-۳۱) توزیع فشار بدست آمده برای هشت دیواره بادشکن به عرض ۳ سانتی متر ($\alpha = 45^\circ, \beta = 45^\circ$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره

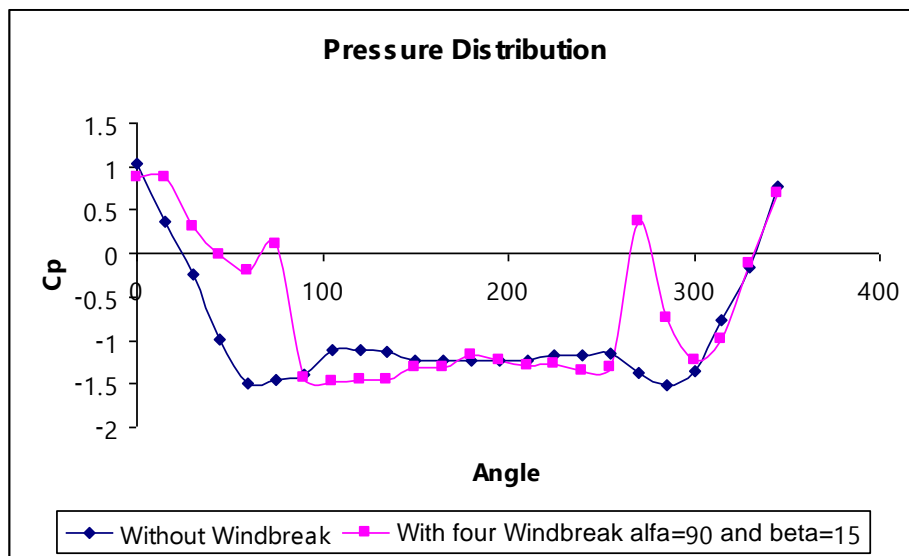
مقایسه بین نتایج در شکل (۹-۳۳) آمده است. مطابق این شکل با استفاده از هشت دیواره در ورودی برج میزان پراکندگی، یکنواخت تر می گردد یا به عبارت دیگر این مدل به جهت باد وابستگی کمتری داشته و در مناطقی که جهت باد در آنها متغیر است بیشتر مفید می باشد.

۹-۴- دیواره های باد شکن ۶ cm

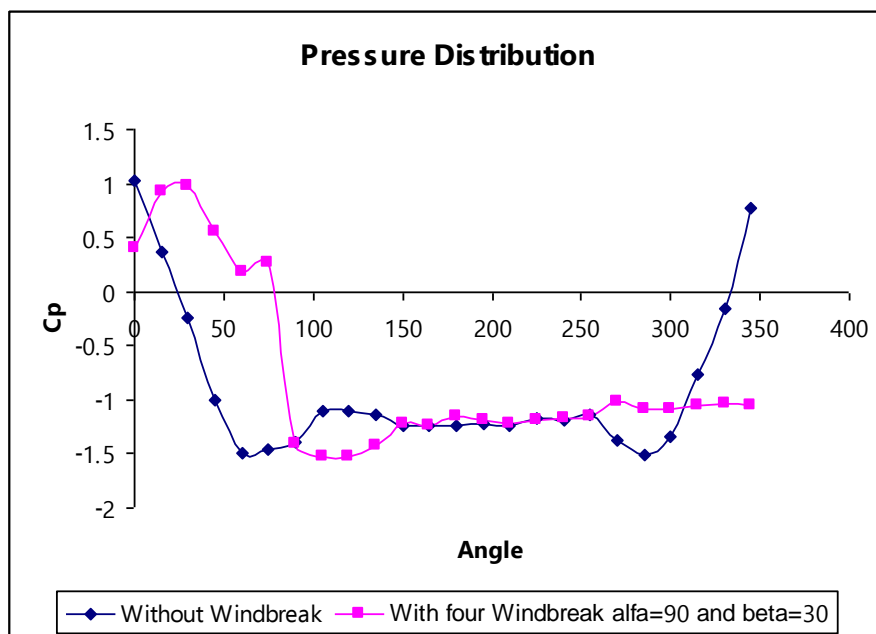
به منظور بررسی تغییر اندازه دیواره های باد شکن بکار رفته در ورودی برج آزمایشات دیگری انجام گرفت. در این سری آزمایشات نیز دیواره های چوبی دیگری با ابعاد ۶۰*۴۹ بکار رفت و در زوایای مختلفی نسبت به هم قرار گرفتند.

۹-۴-۳- استفاده از چهار دیوار باد شکن با زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم

در این حالت نیز با تغییر زاویه قرارگیری دیواره های باد شکن نسبت به هم در موقعیت ۹۰ درجه نسبت به هم، میزان توزیع فشار در ورودی برج مطابق شکل‌های (۹-۴۹) تا (۹-۵۵) بدست آمد.



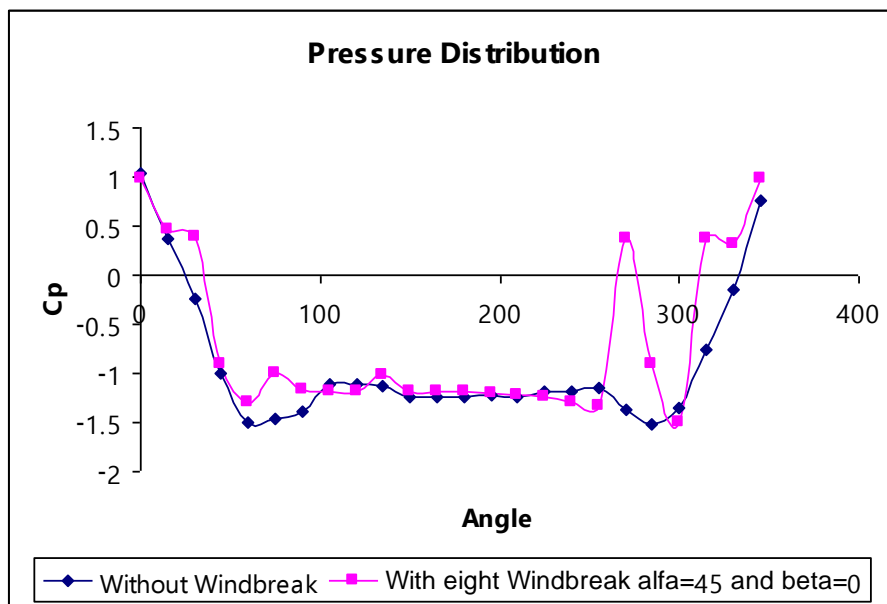
شکل (۹-۵۰) توزیع فشار بدست آمده برای چهار دیواره باد شکن به عرض ۶ سانتی متر ($\alpha = 90^0, \beta = 15$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره



شکل (۹-۵۱) توزیع فشار بدست آمده برای چهار دیواره باد شکن به عرض ۶ سانتی متر ($\alpha = 90^0, \beta = 30$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره

۹-۴-۴- استفاده از هشت دیوار باد شکن با زاویه ۴۵ درجه نسبت به هم

با قرارگیری دیواره ها در موقعیت ۴۵ درجه نتایج مطابق شکل‌های (۵۷-۹) تا (۶۰-۹) بدست آمد.



شکل (۵۷-۹) توزیع فشار بدست آمده برای هشت دیواره بادشکن به عرض ۶ سانتی متر ($\alpha = 45^0, \beta = 0$) و مقایسه آن با حالت نبود دیواره

۹-۵- پیشنهادات

پیشنهاد می شود در ادامه و در راستای کارهای مشابه، تحقیقات تجربی بر روی طرح‌های دیگری که باعث از بین رفتن اثرات نامطلوب باد می گردد انجام شود. به عنوان مثال می توان به استفاده از دیواره های باد شکن در بالای برج جهت کاهش اثر نامطلوب باد بر روی جریان هوای خروجی برج انجام گردد که در این حالت بایستی جریان هوای داخل برج شبیه سازی شود.

همچنین با توجه به اینکه در نیروگاهها معمولا بیشتر از یک برج خنک کن مورد استفاده قرار می گیرد لذا تاثیر عملکرد برجهای خنک کن بر روی همدیگر نیز از جمله تحقیقات قابل انجام است.

منابع

[1]- اردکانی، محمد علی. **جریان سنج سیم داغ**، چاپ اول، تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی،

۱۳۸۵

[2]- اردکانی، محمد علی. **تونل باد سرعت پایین**، چاپ اول، تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی،

۱۳۸۶

[3]- Hermann Schlichting. **BOUNDARY LAYER THEORY**. Seventh Edition, McGRAW HILL, 1979,4-24

[4]-Tuncer Cebeci & Jean Cousteix. **MODELING AND COMPUTATION OF BOUNDARY LAYER FLOW**.

Springer, 1947, 430-440

[5]- S. P. Singh, S. Mittal. **FLOW PAST A CYLINDER: SHEAR LAYER INSTABILITY AND DRAG CRISIS**.

Department of Aerospace Engineering Indian Institute of Technology Kanpur, UP 208 016 India .

[6]- William J. Devenport.(2007). **FLOW PAST A CIRCULAR CYLINDER**

- [7]-John C. Hensley.(2006). **COOLING TOWERS FUNDAMENTALS**. Published by SPX Cooling Technologies, Inc.Overland Park, Kansas USA.,7-16
- [8]-D.G Kroger. **AIR COOLED HEAT EXCHANGER AND COOLING TOWERS, THERMAL FLOW PERFORMANCE EVALUATION AND DESIGN**. Begell House,Inc,New york. 1998, chapter 9.2
- [9]-C.M.B.Russell & H.R.McChesney.(1976). **CROSS WIND & INTERNAL FLOW CHARACTERISTIC OF DRY COOLING TOWERS**.C-E Lummus,Combustion Engineering.Inc.,20-24
- [10]- Kelly Birkinshaw , Marwan Masri , Robert L. Therkelsen.(2002). **COMPARISON OF ALTERNATE COOLING TECHNOLOGIES FOR CALIFORNIA POWER PLANT ECONOMICS** , Environmental and Other Tradeoffs. CALIFORNIA ENERGY COMMISSION.,chapter 2
- [11]- Miscellaneous Sources.**WET COOLING TOWERS.EMISSION FACTORS**.
- [12]- Electrical Energy Equipment: **COOLING TOWERS**.
- [13]- A.F, du Preez 1, D.G. Kroger .(1995). **THE EFFECT OF THE HEAT EXCHANGER ARRANGMENT AND WIND BREAK WALLS ON THE PERFORMANCE OF NATURAL DRAFT DRY COOLING TOWERS SUBJECTED TO CROSS WINDS**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 58 293-303
- [14]-Cesar Farell,Oktaý Guven,Federico Maisch(1976). **MEAN WIND LOADING ON ROUGH WALLED COOLING TOWERS** .Journal of the Engineering Mechanics Division.1059-1079
- [15]- Dr. Yoshihiro KAWARABATA, Shintaro NAKAE, Minoru HARADA.(1983). **SOME ASPECTS OF THE WIND DESIGN OF COOLING TOWERS** . Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 14, 167--180
- [16]- Yan Dachun Li Chenxin.(1987). **WIND TUNNEL SIMULATION OF WIND EFFECT A GROUP OF HIGH COOLING TOWERS**. Acta Mechanica Sinica, Vol. 3.

- [17]- M. Kasperski I and H.-J. Niemann.(1988). **ON THE CORRELATION OF DYNAMIC WIND LOADS AND STRUCTURAL RESPONSE OF NATURAL-DRUGHT COOLING TOWERS.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 30 .67-75.
- [18]- A. F. Du Preez and D. G. Kroger.(1992). **EFFECT OF WIND ON PERFORMANCE OF A DRY-COOLING TOWER .** Heat Recovery Systems & CHP Vol. 13, No. 2, pp. 139-146,
- [19]- T.F. Sun a, Z.F. Gu a, L.M. Zhou b, P.H. Li ~ and G.L. Cai.(1992). **FULL-SCALE MEASUREMENT AND WIND TUNNEL TESTING OF WIND LOADING ON TWO NEIGHBORING COOLING TOWERS .** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44
- [20]-D.J.Bergstrom and D.Derksen.(1993). **NUMERICAL STUDY OF WIND FLOW OVER A COOLING TOWER.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 46-47
- [21]- Qing-ding Wei, Bo-yin Zhang, Ke-qi Liu, Xiang-dong Du, Xian-zhong Meng.(1995). **A STUDY OF THE UNFAVORABLE EFFECTS OF WIND ON COOLING EFFICIENCY OF DRY COOLING TOWERS.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 54/55 . 633-643
- [22]- T.F. Sun, Z.F. Gu.(1995). **INTERFERENCE BETWEEN WIND LOADING ON GROUP OF STRUCTURES.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 54/55 .
- [23]-A.F.DU Preez and D.G Kroger.(1995). **EFFECT OF THE SHAPE OF THE TOWER SUPPORTS AND WALLS ON THE PERFORMANCE OF A DRY COOLING TOWER SUBJECTED TO CROSS WINDS.** heat transfer engineering.vol 16 . no 2
- [24]- T.J. Bender, D.J. Bergstrom*, K.S. Rezkallah.(1996). **A STUDY ON THE EFFECTS OF WIND ON THE AIR INTAKE FLOW RATE OF A COOLING TOWER.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 64 .61-72
- [25]-H.J Niemann and H.D Kopper.(1998). **INFLUENCE OF ADJACENT BUILDINGS ON WIND EFFECTS ON COOLING TOWERS.** Engineering structures. Vol 20. No 10.874-880
- [26]- M.D. Su, G.F. Tang, S. Fu.(1998). **NUMERICAL SIMULATION OF FLUID FLOW AND THERMAL PERFORMANCE OF A DRY COOLING TOWER UNDER CROSS WIND CONDITION.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 79 289 -306.

- [27]- Maurizio Orlando.(2000). **WIND INDUCED INTERFERENCE EFFECTS ON TWO ADJACENT COOLING TOWERS**. Engineering Structures 23 (2001) 979–992
- [28]- Fu Song AND Zhai Zhiqiang.(2000). **NUMERICAL INVESTIGATION OF THE ADVERSE EFFECT OF WIND ON THE HEAT TRANSFER PERFORMANCE OF TWO NATURAL DRAFT COOLING TOWERS IN TANDEM ARRANGEMENT**. Acta Mechanica Sinica Vol.17, No.1
- [29]-Masud Behnia and Rafat Al Waked.(2003). **THE PERFORMANCE OF NATURAL DRAFT DRY COOLING TOWERS UNDER CROSS WIND.CFD STUDY**. International journal of Energy Research.28:147-161
- [30]-S. Fu ,Z. Zhai.(2005). **IMPROVING COOLING EFFICIENCY OF DRY COOLING TOWER UNDER CROSS WIND CONDITIONS BY USING WIND BREAK METHODS**. Applied Thermal Engineering 26 1008–1017
- [31]- Rafat Al Waked and Masud Behnia.(2005). **THE EFFECT OF WINDBREAK WALLS ON THE THERMAL PERFORMANCE OF NATURAL DRAFT DRY COOLING TOWERS**. Heat Transfer Engineering, 26(8):50–62,
- [32]- Ghulam Amur, Brian Milton, John Reizes, Jafar Madadnia, Simon Beecham, Peter Brady, and Homa Koosha . **ROLE OF PLANT BUILDINGS IN A POWER STATION ACTING AS BARRIER TO THE WIND AFFECTING THE NATURAL DRAFT COOLING TOWER PERFORMANCE** . 15th Australasian Fluid Mechanics Conference The University of Sydney, Australia