نیروهای سیال

آیا تا به حال از خود پرسیده‌اید که یک هواپیما با چه نیرویی بر جاذبهٔ خود غلبه کرده و از روی زمین بلند می‌شود؟ و فیزیک حاکم بر این وسیلهٔ مدرن چیست؟ مسلما هوا باعث می‌شود که این نیروی بلند کننده به بال‌های یک هواپیما وارد شود. به طور کلی به جسمی که در سیالی حرکت می‌کند نیروهایی وارد می‌شود. به این نیروها، نیروی مقاومت [۱] و نیروی برا [۲] گفته می‌شود. نیروی مقاومت نیرویی است که در راستای حرکت جسم بوده و همیشه جهت آن در خلاف جهت حرکت جسم است. در واقع این نیرو می‌خواهد سرعت جسم را کاهش دهد. اما نیروی برا، نیرویی عمود بر سرعت حرکت جسم است که به آن وارد می‌گردد. در بال هواپیما نیروی برا است که وزن هواپیما را خنثی می‌کند.

مدل ونظریه

در این مجموعه آزمایشات ما قرار است تا در مورد این نیروها (برا و مقاومت) مشاهدات و اندازه‌گیری‌هایی انجام دهیم.

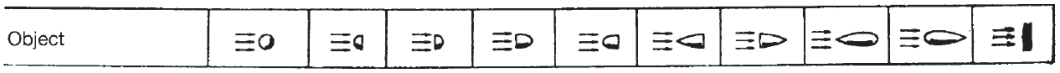
واضح است، هر چه سرعت جسمی داخل یک سیال بیش‌تر باشد، نیروی مقاومت بیش‌تری به آن وارد خواهد شد. در این بخش می‌خواهیم نیروی مقاومت وارد بر یک جسم را بر اساس سرعت بادی که به آن برخورد می‌کند اندازه‌گیری کنیم.

اگر جسمی در مقابل جریان هوایی با سرعت v قرار گیرد، نیروی مقاومت F_R که به آن وارد می‌شود بر اساس رابطهٔ زیر به دست می‌آید

$$F_R = c_w f_p q = \frac{۱}{۲} c_w f_p \rho v^۲ \qquad (۱)$$

[۱] Drag Force

[۲] Lift

Object										
c_w	0.45	0.37	1.17	0.92	0.24	0.21	0.71	0.14	0.07	1.12

شکل ۱: ضریب‌های مقاومت برای هندسه‌های گوناگون

در این معادله c_w ضریب مقاومت جسم است که به هندسهٔ آن مربوط است. ضریب مقاومت اشکال مختلف را در شکل ۶ مشاهده می‌کنید. f_p سطح مقطع جسم است که به صورت عمود به جریان هوا برخورد می‌کند. q همان فشار دینامیکی یعنی اختلاف فشار سیال ساکن و سیالی است که با سرعت v حرکت می‌کند. ρ نیز چگالی هوا است. اگر دقت کنید متوجه می‌شوید که این نیرو با مجذور سرعت رابطه دارد.

می‌توان پیش‌بینی کرد که بر اساس رابطهٔ ۴ نمودار نیروی مقاومت بر حسب فشار دینامیکی یک خط می‌شود.

نیروی برا (F_A) هم مانند نیروی مقاومت با فشار دینامیکی متناسب است. یعنی

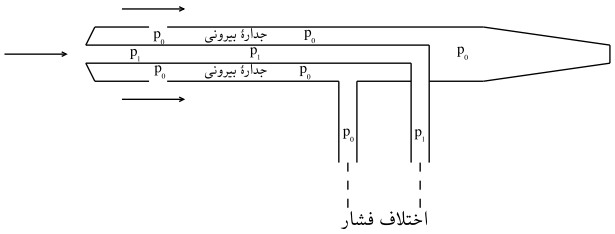
$$F_A = c_A f_p q = \frac{۱}{۲} c_A f_p \rho v^۲ \qquad (۲)$$

در این رابطه، q همان فشار دینامیکی، c_A ضریب برا، f_p سطح عمود به جریان، ρ چگالی سیال و v سرعت آن است.

در سیالاتی که اصطکاک نقش زیادی ندارد، رابطه‌ای با نام رابطهٔ برنولی وجود دارد. این رابطه، فشار یک سیال و سرعت آن را به یکدیگر مرتبط می‌کند. یعنی اگر ما سرعت سیال را در یک نقطه بدانیم، فشار آن را خواهیم دانست و به صورت عکس اگر فشار سیال در نقطه‌ای مشخص باشد سرعت آن قابل تعیین است. با استفاده از این موضوع ما می‌توانیم سرعت سیال (در این آزمایش هوا) را با یک فشار سنج اندازه‌گیری کنیم. برای این کار از وسیله‌ای به نام لولهٔ پیتو [۳] استفاده می‌شود.

لولهٔ پیتو یک لولهٔ دو جداره است که مطابق شکل ۲ نوک آن و دیوارهٔ پهلوی آن سوراخ شده است (شکل ۲). فشار سوراخ مقابل از یک مجرا و فشار سوراخ کناری از مجرای دیگر به یک فشارسنج منتقل می‌شود. اگر جریان هوایی به این لوله برسد، از آن‌جایی که هوای مقابل لوله ایستاده است فشار بیش‌تری دارد، اما هوا با سرعت از سوراخ پهلوی لوله مجاری آن عبور می‌کند و بر اساس رابطهٔ برنولی بین نوک لوله و پهلوی آن باید اختلاف فشاری وجود داشته باشد. این اختلاف فشار توسط یک فشارسنج که به مجاری این دو سوراخ متصل است اندازه‌گیری شده و بر اساس آن سرعت سیال محاسبه می‌گردد.

[۳] Pitot Tube



شکل ۲: شکل شماتیک یک لولهٔ پیتو

طبق رابطهٔ برنولی اگر اختلاف فشار هوای ساکن مقابل لولهٔ پیتو با هوای جریان‌دار کنارهٔ آن برابر q باشد، سرعت سیال بر اساس معادلهٔ زیر با q رابطه خواهد داشت

$$q = \frac{۱}{۲}\rho v^{۲} \qquad (۳)$$

ρ در این رابطه چگالی هوا است. باید توجه کنید که چگالی هوا به ارتفاع و دمایی که در آن آزمایش انجام می‌دهید مرتبط است. اما خوشبختانه ما به جای کار با سرعت سیال، با همان اختلاف فشار آن یعنی q کار می‌کنیم. در واقع داده‌های خود را بر حسب q رسم و بررسی می‌کنیم. به کمیت q فشار دینامیکی می‌گویند.

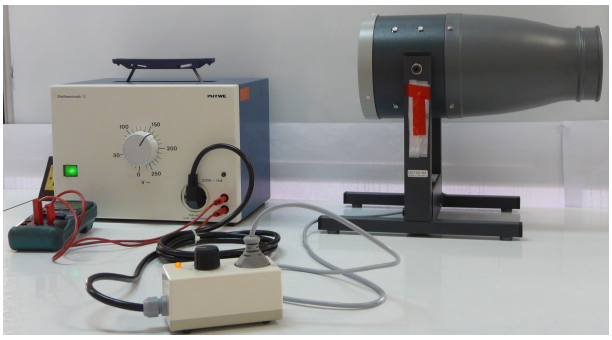
روش آزمایش

ولتاژ برق ورودی مولد باد را هیچگاه بالاتر از $۲۲۰V$ قرار ندهید.

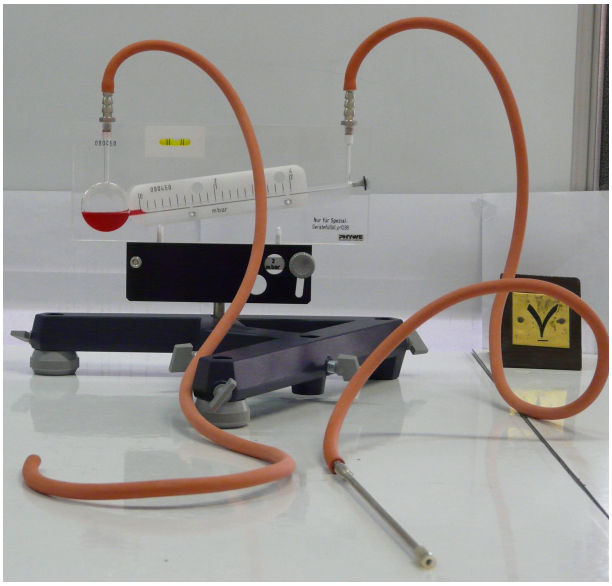
مطابق شکل ۳ سیم برق مولد باد را به محافظ جریان متصل کرده و پیچ محافظ جریان را روی عدد ۱۰ قرار دهید. سیم محافظ جریان را نیز به منبع ولتاژ متغیر (جعبهٔ بزرگ در شکل) وصل کنید. مولتی‌متری را نیز در حالت ولت‌متر متناوب قرار داده و آن را به دو سوراخ اندازه‌گیری ولتاژ منبع ولتاژ متغیر متصل کنید. هنگام تغییر ولتاژ منبع ولتاژ مراقب باشید تا عدد ولت‌متر بالاتر از $۲۲۰V$ نرود.

با استفاده از کلید روی مولد باد، می‌توانید موتور آن را روشن و خاموش کنید. با استفاده از پیچ تنظیم منبع ولتاژ متغیر می‌توانید ولتاژ ورودی موتور مولد باد را تغییر داده و در نتیجه جریان مولد باد را ضعیف یا قوی کنید.

برای این که مطمئن باشید جریان هوای تولید شده توسط مولد باد یکنواخت است، هیچ گاه بیش‌تر از ۲۰ سانتی‌متر از دهانهٔ آن دورتر نروید. یعنی جسمتان همیشه در این فاصله قرار داشته باشد.



شکل ۳: چیدمان و اتصالات مولد باد



شکل ۴: فشارسنج و لولهٔ کاوشگر

فشار قسمت‌های مختلف یک بال

در این آزمایش می‌خواهیم فشار بالا و پایین یک نمونه بال هواپیما را اندازه‌گیری و مقایسه کنیم. بر اساس حدس اولیه، انتظار داریم که متوسط فشار بالای بال کم‌تر از پایین آن باشد.

ابتدا فشار سنج را روی پایه قرار دهید (شکل ۴). دقت کنید که فشار سنج تراز باشد. مایع داخل فشارسنج باید در حالت عادی فشار صفر را نشان دهد. در صورتی که سطح مایع پایین‌تر است مقداری مایع داخل مخزن بریزید (از محل اتصال شلنگ).

مطابق شکل ۴ ، دو شلنگ را به مانومتر (فشار سنج) متصل کنید. شلنگی که به مخزن مایع فشارسنج متصل نیست را به انتهای لولهٔ کاوشگر [۴] را به فشار سنج متصل نمایید. اگر کمی دقت کنید روی خطکش فشار سنج دو عدد بالا و پایین

[۴] Probe Tube

شکل ۵: بال و مولد باد

نوشته شده است. از این دو عدد، عدد پایین‌تر که مقدار آن هم کم‌تر است باید خوانده شود. یعنی در وسط خط‌کش که یک ۲ و ۱ نوشته شده است، عدد پایین که برابر با ۱ است خوانده می‌شود. به علاوه می‌توانید هر یک میلی‌بار $(mbar)$ را برابر با یک هکتو پاسکال (hPa) بگیرید.

در مرحلهٔ بعد، بر اساس شکل ۵ مولد باد و بال را نسبت به یک‌دیگر قرار دهید. اگر کمی دقت کنید روی بال سوراخ‌هایی می‌بینید. این سوراخ‌ها برای اندازه‌گیری فشار تعبیه شده‌اند. از آن‌جایی که نباید لولهٔ کاوشگر اختلالی در جریان ایجاد کند، با چسباندن لولهٔ کاوشگر به این سوراخ‌ها می‌توان فشار طرف دیگر (سمتی که لولهٔ کاوشگر قرار ندارد) را به صورت دقیق اندازه‌گیری کرد. بنا بر این شما باید سر لولهٔ کاوشگر را به سوراخ‌ها بچسبانید و فشار را بخوانید. اما دقت کنید که فشاری که می‌خوانید مربوط به طرف باز سوراخ است، نه طرفی که لولهٔ کاوشگر روی آن قرار گرفته است.

زاویهٔ قسمت تخت بال با جریان هوا را زاویهٔ حمله می‌نامند. دقت کنید که زاویهٔ حملهٔ بال صفر باشد.

حالا مولد باد را روشن کرده (مراقب ولتاژ باشید تا بیش‌تر از ۲۲۰V نباشد) و با استفاده از لولهٔ کاوشگر فشار نقاط مختلف بال را اندازه‌گیری نموده و نتایج آن را در جدول ۱ یادداشت نمایید. ترجیحا فشار را بر حسب هکتو پاسکال hPa (۱۰۰ پاسکال) بنویسید. هر میلی‌بار $mbar$ ۱ هکتو پاسکال است.

در قسمت بعد زاویهٔ حملهٔ بال را تغییر دهید (حدود ۲۰ درجه). منظور از زاویهٔ حمله، زاویهٔ بال با بردار سرعت جریان هوا است. با زاویهٔ حملهٔ غیر صفر اندازه‌گیری خود را تکرار کرده و نتایج را در جدول ۲ یادداشت کنید.

آیا تفاوتی در اختلاف فشار میانگین بال با زاویهٔ حملهٔ صفر و غیر صفر می‌بینید؟

شمارهٔ سوراخ از قسمت پهن	فشار بالای بال	فشار پایین بال	اختلاف فشار (پایین منهای بالا)
۱			
۲			
۳			
۴			
۵			
۶			
۷			
۸			
میانگین فشار:			

جدول ۱: فشار قسمت‌های مختلف بال با زاویهٔ حملهٔ صفر درجه

شمارهٔ سوراخ از قسمت پهن	فشار بالای بال	فشار پایین بال	اختلاف فشار (پایین منهای بالا)
۱			
۲			
۳			
۴			
۵			
۶			
۷			
۸			
میانگین فشار:			

جدول ۲: فشار قسمت‌های مختلف بال با زاویهٔ حملهٔ غیر صفر

Object										
c_w	0.45	0.37	1.17	0.92	0.24	0.21	0.71	0.14	0.07	1.12

شکل ۶: ضریب‌های مقاومت برای هندسه‌های گوناگون

رابطهٔ مقاومت هوا و سرعت باد

واضح است، هر چه سرعت جسمی داخل یک سیال بیش‌تر باشد، نیروی مقاومت بیش‌تری به آن وارد خواهد شد. در این بخش می‌خواهیم نیروی مقاومت وارد بر یک جسم را بر اساس سرعت بادی که به آن برخورد می‌کند اندازه‌گیری کنیم.

اگر جسمی در مقابل جریان هوایی با سرعت v قرار گیرد، نیروی مقاومت F_R که به آن وارد می‌شود بر اساس رابطهٔ زیر به دست می‌آید

$$F_R = c_w f_p q = \frac{۱}{۲} c_w f_p \rho v^۲ \qquad (۴)$$

در این معادله c_w ضریب مقاومت جسم است که به هندسهٔ آن مربوط است. ضریب مقاومت اشکال مختلف را در شکل ۶ مشاهده می‌کنید. f_p سطح مقطع جسم است که به صورت عمود به جریان هوا برخورد می‌کند. q همان فشار دینامیکی یعنی اختلاف فشار سیال ساکن و سیالی است که با سرعت v حرکت می‌کند. ρ نیز چگالی هوا است. اگر دقت کنید متوجه می‌شوید که این نیرو با مجذور سرعت رابطه دارد.

می‌توان پیش‌بینی کرد که بر اساس رابطهٔ ۴ نمودار نیروی مقاومت بر حسب فشار دینامیکی یک خط می‌شود.

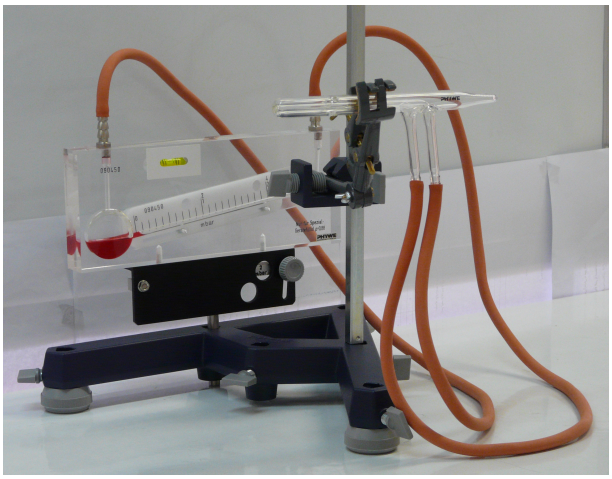
برای انجام آزمایش باید مانومتر را طبق شکل ۷ به لولهٔ پیتو متصل نمایید. دقت کنید فشارسنج تراز بوده و سطح مایع آن روی صفر باشد.

یکی از اشیاء حجیم کیت را به میلهٔ نگه‌دارنده متصل نموده، نقاله را وارد میله کرده و میله را در گیره قرار دهید. گیره را نیز داخل نگه‌دارندهٔ سوزنی بگذارید (شکل ۸). وزنهٔ سمت راست شکل برای بر قراری تعادل است. از سوزن نشانگر می‌توانید به عنوان شاخصی برای تراز کردن میله استفاده کنید. دقت کنید که سوزن‌های دو طرف نگه‌دارنده نباید خیلی تنگ و یا خیلی شل باشند.

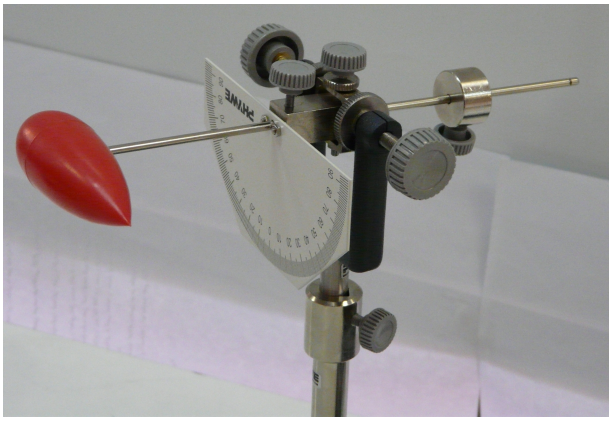
میلهٔ عمودی را روی پایه قرار داده و قرقره، نیروسنج را روی میلهٔ عمودی متصل نمایید

[۵] . کل مجموعه را به صورت شکل ۹ در کنار هم قرار دهید. دقت کنید که فاصلهٔ جسم از مولد باد کم‌تر از ۲۰ سانتی‌متر باشد. لولهٔ پیتو هم نباید پشت جسم باشد، علاوه بر این باید در معرض جریان مستقیم مولد قرار گیرد. حتما

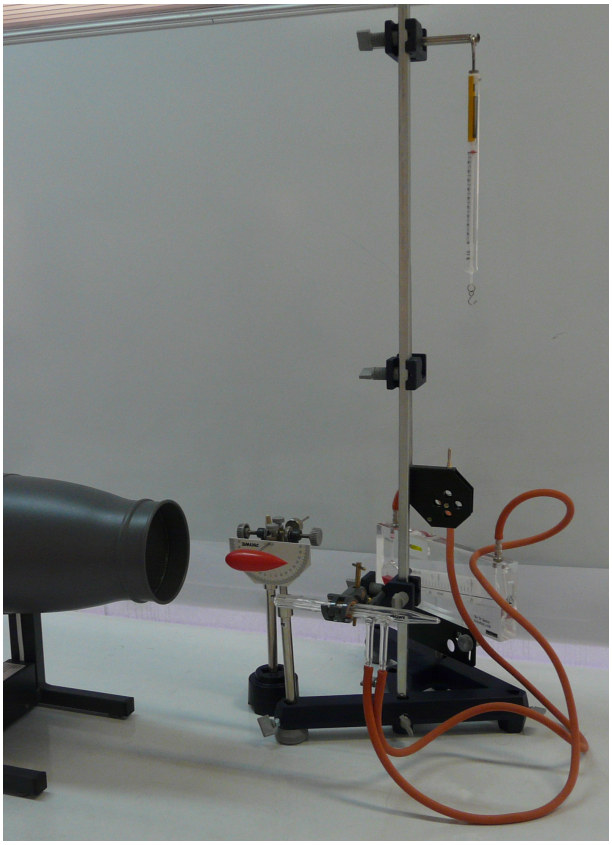
[۵] فاصلهٔ انتهای نیروسنج تا قرقره را بیش‌تر از ۱۰ سانتی‌متر نگیرید، چون در آینده به مقداری فضا بالای گیرهٔ این نیروسنج نیاز است



شکل ۷: روش اتصال لولهٔ پیتو به فشار سنج



شکل ۸: طریقهٔ استفاده از نگه‌دارنده. وزنهٔ سمت راست برای برقراری تعادل است.



شکل ۹: چیدمان اندازه‌گیری نیروی مقاومت

مراقب محل لولهٔ پیتو باشید. در پایان چیدن وسایل برای کنترل لولهٔ پیتو یک بار دستگاه را روشن نمایید. هنگامی که جریان باد وجود دارد، با کمی تکان دادن لولهٔ پیتو نباید فشار خیلی زیاد تغییر کند، علاوه بر این باید هنگامی که دستگاه روی ۲۲۰ ولت قرار دارد، فشار دینامیکی در حدود ۸ هکتو پاسکال بخوانید.

در نهایت نخی را به قلاب نیروسنج گره زده و با عبور دادن نخ از روی قرقره آن را به انتهای میلهٔ متصل به بال (سمتی که وزنهٔ تعادلی قرار دارد)، گره بزنید. توجه کنید، وقتی که شیء مستقیم مقابل مولد قرار دارد نخ باید به این میله عمود باشد. در صورتی که عمود نیست، قرقره و نگه‌دارندهٔ جسم را کمی دوران دهید تا به حالت عمود برسند. مولد باد هم باید مستقیم به سمت جسم باشد (به موازات آن).

در این جا می‌توانید از سوزن نشانگر و پایه به عنوان شاخص استفاده کنید. هنگامی که میلهٔ نگه‌دارندهٔ افقی، تراز بوده و نخ‌های متصل به میله عمود هستند، سوزن نشانگر را زیر میله تنظیم کنید (نوک تیز با میله تماس داشته باشد). محل درست سوزن انتهای میلهٔ نگه‌دارنده (افقی) است. جایی که نخ‌های نیروسنج‌ها متصل شده است. بعد از این اگر انتهای میله جابجا شد (به دلیل تغییر سرعت باد و نیرها این جابجایی حتما رخ می‌دهد)، این شاخص به ما محل درست میله را نشان می‌دهد و با جابجا کردن نیروسنج‌ها می‌توانیم میله را سر جای قبلی (محلی که نوک سوزن قرار دارد) قرار دهیم.

							q/hPa
							F_R/mN

جدول ۳: نیروی مقاومت وارد بر جسم بر حسب فشار دینامیکی

			A/cm^2
			F_R/mN

جدول ۴: نیروی مقاومت وارد بر دایره‌ها بر حسب مساحت آن‌ها برای فشار دینامیکی hPa $q =$

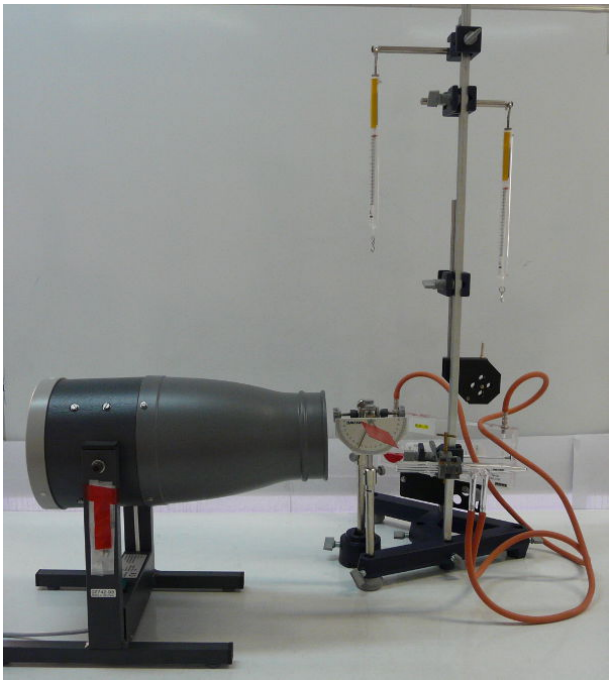
همه چیز برای اندازه‌گیری آماده است. با دقت به ولتاژ منبع تغذیهٔ متغیر (کم‌تر از $220V$)، مولد باد را روشن کنید. مولد باد را در قدرت‌های مختلف قرار داده و فشار دینامیکی را از فشارسنج خوانده و با جابجا کردن نیرو سنج از طریق جابجا کردن گیرهٔ آن روی میلهٔ عمودی، سعی کنید کاری کنید که انتهای میله بر سوزن شاخص منطبق شود (نخ به میلهٔ نگه‌دارندهٔ جسم عمود شود). در این شرایط (حتما کنترل کنید که میلهٔ جسم تراز ایستاده است) نیروی نیروسنج را بخوانید و آن را بر حسب mN وارد جدول ۳ کنید (توجه کنید که حتما باید نیروسنج را در هر مرحله برای عمود کردن میلهٔ افقی جابجا کنید تا نیروی صحیح را بخوانید).

نمودار نیروی مقاومت بر حسب فشار دینامیکی را رسم کنید و با محاسبهٔ شیب آن مقدار $c_w f_p$ را محاسبه کنید. سپس مساحت عمود بر جریان جسم را به دست آورده و با استفاده از آن c_w را برای جسم محاسبه کنید. مقدار به دست آمدهٔ c_w را با مقدار واقعی آن بر اساس اطلاعات شکل ۶ مقایسه کنید. درصد خطای آزمایش شما چقدر است؟

رابطهٔ مقاومت هوا و سطح مقطع جسم

چیدمان این قسمت دقیقا مانند بخش قبل است، اما با این تفاوت که جای جسم حجیم باید از سطوح دایروی استفاده شود. سطوح دایروی در سه اندازه هستند. در فشار دینامیکی مشخصی نیروی مقاومت به دایره‌های مختلف را اندازه‌گیری کنید. نتایج را در جدول ۴ وارد نمایید.

نیروی مقاومت را بر حسب سطح جسم رسم کنید. شیب این منحنی باید کمیت $c_w q$ را بدهد. از آن‌جایی که شما q را می‌دانید، می‌توانید مقدار c_w را به دست آورید. عدد به دست آمده را با مقدار دقیق آن یعنی ۱٫۱۲ مقایسه کنید. درصد خطای اندازه‌گیری خود را نیز محاسبه نمایید.



شکل ۱۰: چیدمان اندازه‌گیری نیروی مقاومت و نیروی برا

نیروی برا و نیروی مقاومت

نیروی برا (F_A) هم مانند نیروی مقاومت با فشار دینامیکی متناسب است. یعنی

$$F_A = c_A f_p q = \frac{۱}{۲} c_A f_p \rho v^۲ \qquad (۵)$$

در این رابطه، q همان فشار دینامیکی، c_A ضریب برا، f_p سطح عمود به جریان، ρ چگالی سیال و v سرعت آن است.

برای چیدمان این بخش باید وسایلی به چیدمان قسمت قبل اضافه کنید (شکل ۱۰). یک نیروسنج را بالای انتهای میلهٔ نگه‌دارندهٔ افقی (سمتی که وزنهٔ تعادل قرار دارد) به میله متصل کنید. توجه کنید که محل قرار دادن نیروسنج به گونه‌ای باشد که بتوان آن را روی پایه جابجا (بالا و پایین) کرد. در واقع هر دو نیروسنج برای تنظیم شدن باید قابلیت جابجایی روی پایه را داشته باشند. حالا نخی را از این نیروسنج جدید، به صورت مستقیم به محل اتصال نخ روی میلهٔ نگه‌دارندهٔ افقی گره بزنید. دوباره از تراز بودن میلهٔ نگه‌دارنده مطمئن شوید. گیرهٔ متحرک هم نباید خیلی سفت یا شل باشد.

مانعی که در این قسمت استفاده می‌کنید، مستطیل‌های تخت هستند. در کل آزمایش باید میلهٔ نگه‌دارنده افقی باشد. نخ‌های متصل به میله نیز باید عمود باشند. از سوزن نشانگر برای این کار می‌توانید استفاده کنید. کافی است که ارتفاع

							q/hPa
							F_A/mN
							F_R/mN

جدول ۵: نیروی مقاومت و برا، بر حسب فشار دینامیکی برای جسم مستطیلی با زاویهٔ حملهٔ ۲۰ درجه.

آن را وقتی میلهٔ نگه‌دارنده تراز بوده و نخ‌های نیروسنج‌ها به آن عمود هستند تنظیم کرده و آن را سمتی که نیروسنج‌ها وصل هستند، زیر انتهای میله قرار دهید. بعد از این اگر انتهای میله جابجا شد، این شاخص به ما محل درست میله را نشان می‌دهد و با جابجا کردن نیروسنج‌ها می‌توانیم میله را سر جای قبلی (محلی که نوک سوزن شاخص قرار دارد) قرار دهیم.

پس هر گاه که تنظیم جسم و نگه‌دارنده به هم خورد باید نیروسنج‌ها را به طریقی جابجا کنیم که انتهای میله بر سوزن شاخص منطبق شود (نخ‌ها به میلهٔ نگه‌دارنده عمود باشند). در این شرایط باید نیروسنج را بخوانید تا نتایج شما صحیح باشند. مراقب باشید که نیروی عمودی وارد بر میله کم نباشد تا میله روی سوزن شاخص تکیه دهد.

اکنون که چیدمان آزمایش به پایان رسید، اندازه‌گیری‌های زیر را انجام دهید.

اندازه‌گیری نیروی مقاومت و برا بر حسب فشار دینامیکی

یکی از اجسام مستطیلی شکل تخت را برداشته و آن را در نگه‌دارندهٔ متحرک بگذارید. زاویهٔ جسم با افق (زاویهٔ حمله) را روی ۲۰ درجه تنظیم کنید. مولد باد را روشن نمایید (به ولتاژ آن دقت کنید. پایین‌تر از $۲۲۰V$). با تغییر قدرت مولد فشار دینامیکی را تغییر داده و با تنظیم نیروسنج‌ها نیرهای برای و مقاومت را بخوانید. نتایج خود را در جدول ۵ یادداشت نمایید.

نیروی مقاومت و برا را در یک نمودار بر حسب فشار دینامیکی رسم کنید. شیب کدام نیرو بیش‌تر است؟ چرا باید از این موضوع خوشحال باشیم؟!

اندازه‌گیری نیروی مقاومت و برا بر حسب سطح مقطع جسم

اجسام مستطیلی شکل تخت با مساحت مختلف را بر داشته و در یک فشار دینامیکی ثابت و مشخص، نیروی برا و مقاومت بر این اجسام را اندازه‌گیری کنید. زاویهٔ حملهٔ این اجسام را روی همان ۲۰ درجه تنظیم کنید. نتایج اندازه‌گیری خود را در جدول ۶ بنویسید.

نیروی برا و نیروی مقاومت را با علامت‌های مختلف (مثلا ضرب‌در و دایره) در یک نمودار بر حسب مساحت جسم رسم نمایید. تفاوت شیب این دو نیرو را تحلیل کنید.

			A/cm^2
			F_A/mN
			F_R/mN

جدول ۶: نیروی برا و مقاومت وارد بر مستطیل‌های تخت بر حسب مساحت آن‌ها با زاویهٔ حملهٔ ۲۰ درجه و فشار دینامیکی $q =$ hPa

θ	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۲۷٫۵	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰
F_A/mN										
F_R/mN										

جدول ۷: نیروی مقاومت و برا، برای جسم مستطیلی شکل برای زوایای حملهٔ متفاوت. مقدار فشار دینامیکل برابر است با $q =$ hPa

اندازه‌گیری نیروی برا و مقاومت بر حسب زاویهٔ حمله

در این زیربخش بزرگ‌ترین مستطیل تخت را بردارید. فشار دینامیکی را ثابت تنظیم کرده و این زاویهٔ حملهٔ این مستطیل را تغییر داده و نیروهای برا و مقاومت را اندازه‌گیری کنید. نتایج خود را وارد جدول ۷ کنید.

نیروهای برا و مقاومت را با علامت‌های مختلف (مثلا ضرب‌در و دایره) بر حسب زاویهٔ حمله در یک نمودار رسم کنید. بر اساس این نمودار حدس می‌زنید چه زاویهٔ حمله‌ای برای یک بال تخت مناسب است؟