آزمایش تونل باد[1]

تهیه و تنظیم : پارسا امینی

هدف آزمایش

هدف از این آزمایش آشنایی با تونل باد، عملکرد آن، اندازه گیری و محاسبه ضریب درگ[2] (C_D) برای اجسام مختلف، مقایسه آنها و رسم منحنی تغییرات C_D بر حسب رینولدز می باشد.

مقدمه

تونل های بادی در صنعت و تحقیقات به طور گسترده ای مورد استفاده قرار می گیرند تا جریان اطراف یک شی (مانند اتومبیل ، هواپیما و غیره) را که از طریق هوا عبور می کند ، شبیه سازی کنند. در بسیاری از موارد ، نمونه که در تونل باد مورد آزمایش قرار می گیرد به اندازه نمونه اولیه نیست. در آزمایش ها سرعت های آزاد ممکن است متفاوت باشد. بنابراین مطلوب است که مقدار عدد رینولدز مدل با نمونه اولیه مطابقت داشته باشد. این موضوع همیشه در یک تونل بادی کوچک، مانند تونل باد موجود در آزمایشگاه، ما امکان پذیر نیست ، اما خوشبختانه بسیاری از پارامترها تقریباً در طیف گسترده ای از مقدار رینولدز ثابت هستند.[1]

آزمایش تونل باد بر روی اجزای مدل اصلی و یا مدل آزمایشی یکی از تکنیک هایی است که به طور گسترده برای بدست آوردن جزئیات سیستم سیالاتی-حرارتی استفاده می شود. بسیاری از موارد وجود دارند که تکنیک های محاسباتی و/یا تئوری، چه به دلیل پیچیدگی مسئله و یا کمبود منابع محاسباتی، ناکافی هستند. تست تونل باد به عنوان مقرون به صرفه ترین روش برای این موارد به کار می رود.[1]

تونل های باد به طور گسترده در موسسات تحقیقاتی، دانشگاه ها، صنعت و سازمان های دولتی برای طیف گسترده ای از کاربردها مورد استفاده قرار می گیرند و از بسیاری جهات قابل طبقه بندی هستند.

از دیدگاه اساسی می توان به شکل بدون بعد معادلات حاکم بر حرکت سیال نگاه کرد که شامل پارامترهای مختلف بدون بعدی منجمله عدد استروهال[3] (St) ، عدد رینولدز[4] (Re) ، عدد اویلر[5] (Eu) و عدد فرود[6] (Fr) هستند. وقتی معادله انرژی در نظر

---

[1] Wind Tunnel

[2] Drag Coefficient

[3] Strouhal Number

[4] Reynolds Number

[5] Euler Number

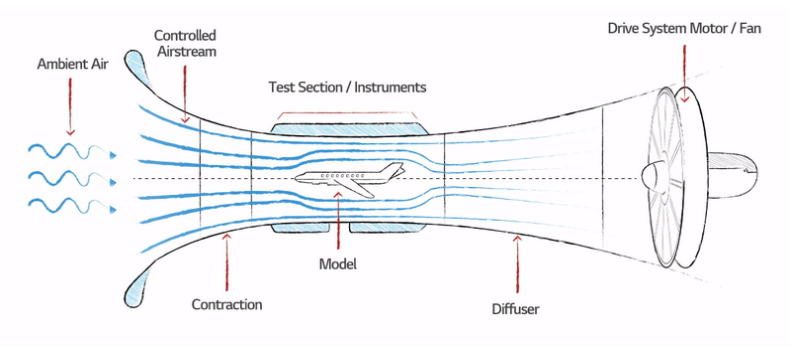
[6] Froude Number

گرفته شود ، پارامترهای بعدی بدون بعدی مانند عدد ماخ[۷] (M)، عدد پرنتل[۸] ($\Pr$) و اکرت[۹] (Ec) ظاهر می شود. پارامترهای بعدی بدون بعد نیز به دلیل شرایط مرزی و غیره ظاهر می شوند.[1]

تونل های بادی همچنین می توانند بر اساس رژیم جریان عملیاتی آنها و پارامترهای بی بعد مربوطه طبقه بندی شوند. معمول است که یک جریان گاز غیر قابل فشرده ، مانند هوا ، در درجه اول با عدد رینولدز آن توصیف شود. جریان گازی متراکم در درجه اول با عدد های ماخ و رینولدز مشخص می شود. جریان مایع در درجه اول با عدد های رینولدز و فرود مشخص می شود. این پارامترها بسیار مهم هستند، زیرا یکی از مهمترینِ اهدافِ آزمایش تونل باد شباهت دینامیکی است، جایی که تمام پارامترهای بدون بعد مرتبط بین مدل و مقیاس کامل است. [1]

از نظر عملی، تونل های بادی اغلب با توجه به اندازه طبقه بندی می شوند. به عنوان مثال ، تونل های با سرعت کم ($M < 0.3$) از تونل های کوچک (به عنوان مثال ، بخش های آزمایشی با ابعاد کمتر از ۱ متر × ۱ متر) تا تونل های بزرگ که قادر به آزمایش اتومبیل های تمام مقیاس و کامیون ها و مدل های بزرگ هواپیما هستند ، متفاوت است. اجزاء. تونل های بادی پر سرعت و ماوراء بنفش نیز نسبتاً متداول هستند ، اما به دلیل نیاز به برق ، این تونل ها در مقایسه با همتایان کم سرعت خود به طور معمول از نظر اندازه نسبتاً کمی هستند.[1]

تونل های باد براساس کاربرد نیز طبقه بندی می شوند. برخی از نمونه ها شامل تونل هایی با سطوح زمینی در حال حرکت برای آزمایش خودرو، تونل های یخ زدایی برای بررسی اثرات تشکیل یخ روی بال هواپیما، تونل های اقلیمی برای شبیه سازی شرایط مختلف محیطی، تونل های دود برای تجسم جریان، تونل های پیشران برای ارزیابی موتورهای هواپیما، تونل های چرخشی برای مطالعه بازیابی چرخش هواپیما و تونل های پایداری برای مطالعه دینامیک پرواز، هستند.[1]



شکل ۱. قسمت های تشکیل دهنده تونل باد[2]

[۷] Mach Number

[۸] Prandtl Number

[۹] Eckert Number

شکل ۲.نمونه ای واقعی از تونل باد[3]

تئوری آزمایش

حل مسائل جریان حقیقی معمولاً شامل ترکیبی از اطلاعات تحلیلی و آزمایشی است. ابتدا حالت جریان فیزیکی حقیقی با مدل ریاضی که حل آن ساده است تخمین زده می شود. سپس برای بررسی نتایج تحلیلی اندازه گیری های آزمایشی انجام می گیرد و از روی آن تحلیل اصلاح می شود. تحلیل ابعادی روش مهمی است که اغلب در دستیابی به این هدف به ما کمک می کند.

با استفاده از پارامترهای بی بعدی که بدست آورده می شود از حجم آزمایش های لازم برای انجام مطالعه تجربی به مقدار زیادی کاسته می شود و نتایج بدست آمده از آزمایش برای تمامی جریان هایی که با جریان مورد آزمایش دارای تشابه دینامیکی هستند معتبر خواهد بود. برخی از وسایلی که می توانند این شرایط را بوجودآورند عبارتنداز کانال آب، تونل باد و ... .

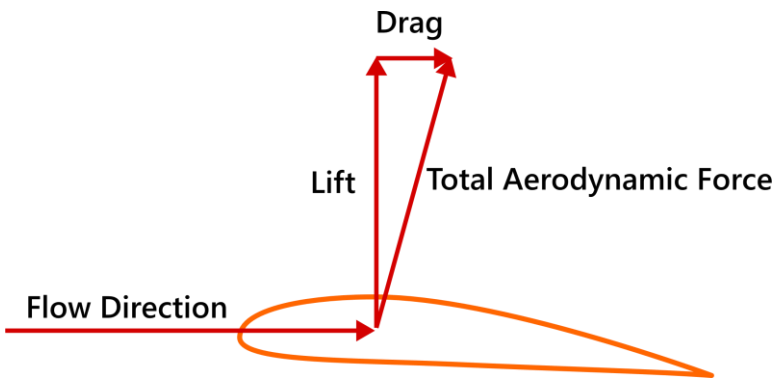
برای توصیف عملکرد تونل باد جسمی را در نظر بگیرید که در معرض جریان سیال قرار دارد.

سیال نیرویی به جسم وارد می کند طبق تعریف مؤلفه راستای حرکت این نیرو درگ[۱۰] و مؤلفه عمود بر آن لیفت[۱۱] گفته می شود. در اینجا منظور از سرعت سیال، سرعت نسبی آن در هنگام نزدیک شدن به جسم است.

بر روی سطح جسم هم تنش فشاری اثر می کند و هم تنش برشی که هر دو در ایجاد نیروهای لیفت و درگ سهیم اند. شکل ۳ این نیرو ها را نشان می دهد.

[۱۰] Drag Force

[۱۱] Lift Force



شکل ۳. نیرو های فشاری و برشی وارد به ایرفویل[4]

لیفت و و درگ بر اثر کنش دینامیکی سیال متحرک ایجاد می شوند و نیروهایی مانند وزن و شناوری در آنها دخالتی ندارند.

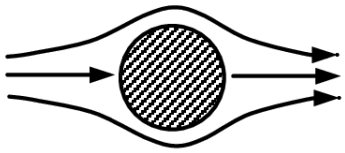
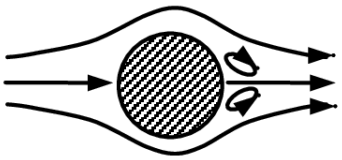
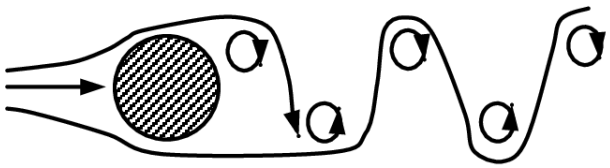
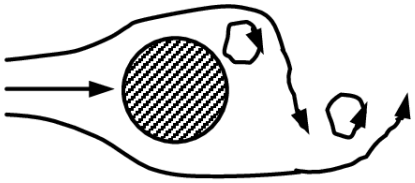
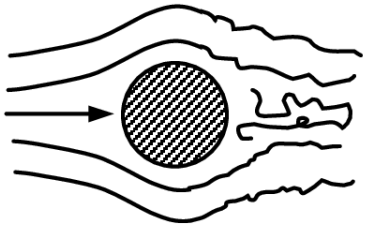
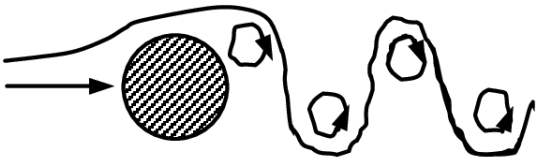
نیروی درگ را می توان به صورت حاصلضرب ضریب دراگ (C_D) و فشار دینامیک، $\frac{\rho u^2}{2}$ بیان کرد:

$$D = C_D \frac{\rho u^2}{2} A \qquad (۱)$$

A تصویر سطح جسم روی صفحه ای عمود بر جریان سیال است.

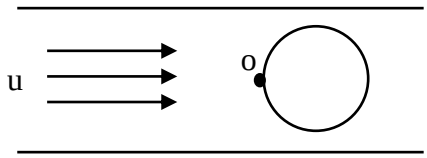
برای روشن شدن موضوع جریان در پیرامون کرده در اعداد رینولدز مختلف، جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. رژیم جریان پیرامون یک کره در اعداد رینولدز مختلف[5]

	Re < 5	Regime of unseparated flow
	5 ≤ Re < 40	A fixed pair of vortices in wake
	40 ≤ Re < 90	Vortex street is laminar
	90 ≤ Re < 150	Vortex street is laminar
	150 ≤Re < 300	Transition range to turbulence in vortex
	300 ≤ Re < $3(10^5)$	Vortex street is fully turbulent
	$3(10^5)$ ≤ Re < $3.5(10^6)$	Laminar boundary layer has undergone turbulent transition and wake is narrower and disorganized
	$3.5(10^6)$ ≤ Re	Reestablishment of turbulent vortex street

همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، نقطه سکون جایی است که سرعت سیال در یک لحظه صفر شده و نقطه جدایی وقتی اتفاق می افتد که خط جریان از مرز جدا می شود.

برای بدست آوردن ضریب درگ (C_D) بایستی سرعت سیال در هنگام نزدیک شدن به جسم مشخص باشد که می توان از رابطه برنولی برای این منظور استفاده کرد:



$$\frac{u^2}{2g}+\frac{P_s}{\gamma}+y=\frac{V_0^2}{2g}+\frac{P_0}{\gamma}+y_0 \qquad (۲)$$

در نقطه O سیال برای یک لحظه به حالت سکون در می آید. P_s فشار استاتیکی و P_o فشار سکون سیال می باشد.

$$U=\left[2g\left(\frac{P_0-P_s}{\gamma}\right)\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۳)$$

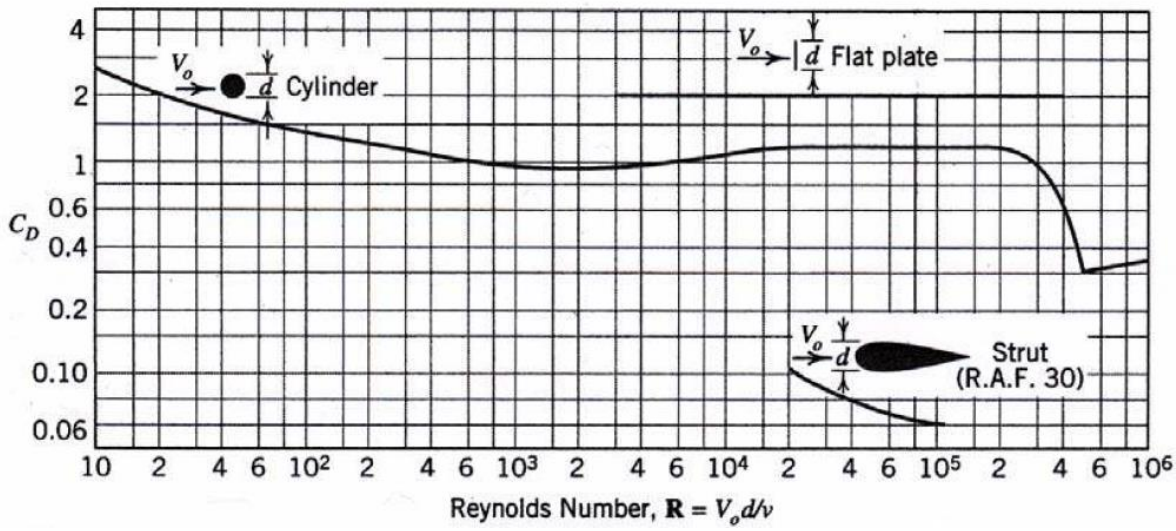
اگر رابطه فوق را برحسب ارتفاع فشار Δh بیان کنیم خواهیم داشت:

$$u=\sqrt{2g\Delta h_{air}} \qquad (۴)$$

Δh اختلاف ارتفاعی که از لوله پیتوت خوانده می شود. این Δh بر حسب میلی متر الکل می باشد و باید به میلی متر هوا تبدیل شود:

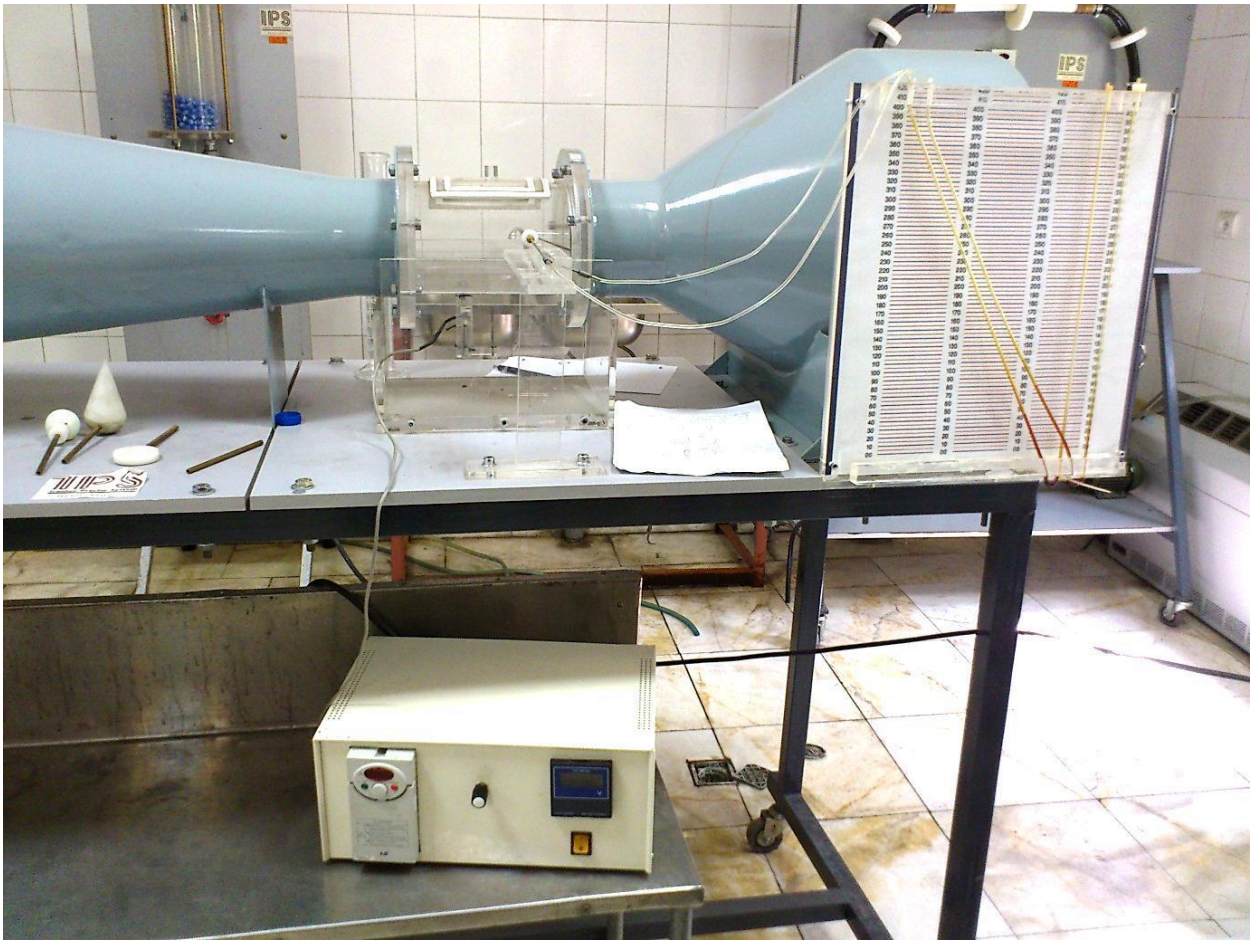
$$\Delta h_{air}=\frac{\Delta h_1\times\gamma_1}{\gamma_{air}} \qquad (۵)$$

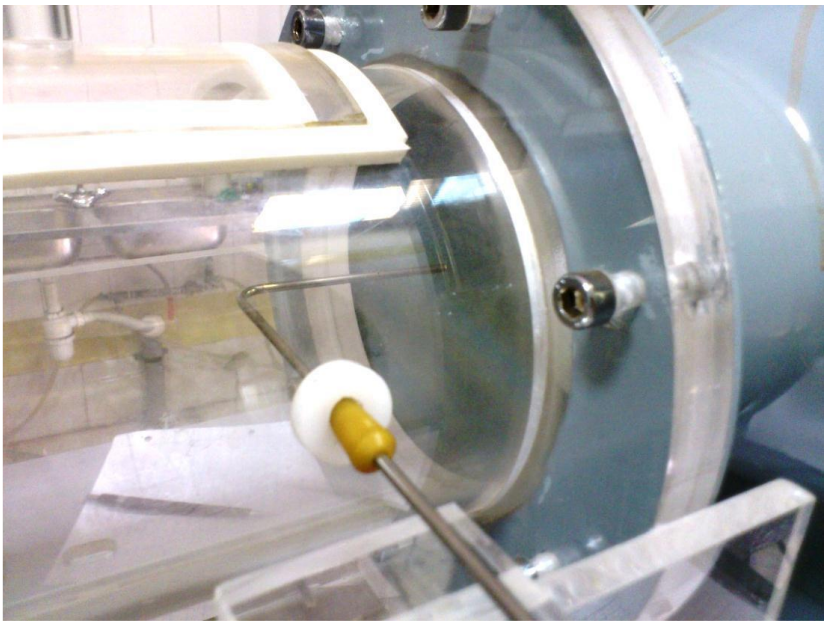
در شکل ۴ نمودار ضریب درگ کره، دیسک و جسم دوکی شکل بر حسب عدد رینولدز نشان داده شده است.



شکل ۴. نمودار ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز برای سه جسم دوکی، مسطح و کروی شکل[6]

شکل دستگاه





شکل ۵. دستگاه تونل باد

شرح دستگاه

همانطور که در **Error! Reference source not found.** دیده می شود، تونل باد از بخش های همگرا، واگرا(نازل)، مقطع آزمایش و فن مکنده تشکیل شده است.

در انتهای نازل شبکه لانه زنبوری برای آرام کردن و جلوگیری از ایجاد اغتشاش هوای ورودی به کار می رود. در کل ساختار تونل باد به گونه ای است که در حد امکان جریان یکنواختی در مقطع آزمایش ایجاد می شود.

در مقطع آزمایش، لوله پیتوت[۱۲] برای اندازه گیری اختلاف فشار سکون و استاتیکی($P_0 - P_s$) قرار داده شده است که طبق رابطه (۲) می توان سرعت سیال را محاسبه کرد. یک نیرو سنج[۱۳] نیز برای اندازه گیری نیروی درگ قرار داده شده است.

روش انجام آزمایش

قبل از شروع آزمایش می بایست دستگاه را تنظیم نمود. سپس آزمایش را در چهار مرحله انجام داد. در مرحله اول نمونه پایه به تنهایی روی دستگاه قرار می گیرد و نیروی درگ برای آن اندازه گیری می شود. دقت شود با نصب هر وسیله صفرِ نیرو باید تنظیم شود.

در مراحل دوم، سوم و چهارم، نمونه کروی، دوکی و دیسکی شکل بر سر راه هوا قرار داده شده و آزمایش تکرار می شود.

نتایج و محاسبات

۱- برای پایه سیستم ترازو و تمام مدل ها، نمودار نیروی کشش اندازه گیری شده را بر حسب سرعت هوا رسم کنید.

۲- مقدار ضریب درگ هر جسم را برای سرعت های اندازه گیری شده، محاسبه کرده، منحنی آن را بر حسب عدد رینولدز برای هرکدام از مدل ها جداگانه روی کاغذ لگاریتمی رسم کنید.

۳- منحنی های قسمت قبل را با منحنی های ارائه شده مقایسه کرده، در مورد آن بحث کنید و علل خطا را ذکر کنید.

۴- با توجه به نتایج آزمایش انجام شده یک نظر کلی در درباره رابطه بین نیروی کشش و شکل جسم بیان کنید.

۵- برای کم کردن مؤلفه افقی نیروی فشاری[۱۴] چه می توان کرد؟

۶- آیا پایه سیستم ترازو روی نتایج شما اثری دارد یا خیر؟ اگر تاثیر دارد اثرات آن را بیان کنید.

---

[۱۲] Pitot tube

[۱۳] Load cell

[۱۴] Form drag

۷- اگر سرعت هوا در تونل خیلی زیاد باشد، آیا فرض اینکه ضریب درگ فقط تابع عدد رینولدز است صحیح می باشد یا این ضریب به عوامل دیگری می تواند بستگی داشته باشد؟

۸- آیا در مورد کره می توان از این آزمایش صحت قانون استوک را تحقیق کرد؟

منابع

[1] Cattafesta, Louis & Bahr, Christopher & Mathew, Jose. (2010). Fundamentals of Wind-Tunnel Design. 10.1002/9780470686652.eae532.

[2] Lghvacstory. the basic components of a wind tunnel. [image on Internet]. 2018 [updated 2018 Dec 10; cited 2020 Jul 28]. Available from: https://www.lghvacstory.com/wp-content/uploads/2018/12/LG-HVAC_Wind-Tunnel.gif

[3] Baesystems. the basic components of a wind tunnel. [image on Internet]. 2019 [updated 2019 Oct 01; cited 2020 Jul 28]. Available from: https://www.baesystems.com/en/product/wind-tunnel

[4] J Doug McLean. A diagram of the force vectors acting on a lifting airfoil. [image on Internet]. 2019 [updated 2019 Jan 10; cited 2020 Jul 28]. Available from: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Airfoil_lift_and_drag.svg

[5] Irvine, Thomas F.(1999). “KARMAN VORTEX SHEDDING AND THE STROUHAL NUMBER.”

[6] R.L.Street et al. (1996). Elementary Fluid Mechanics.