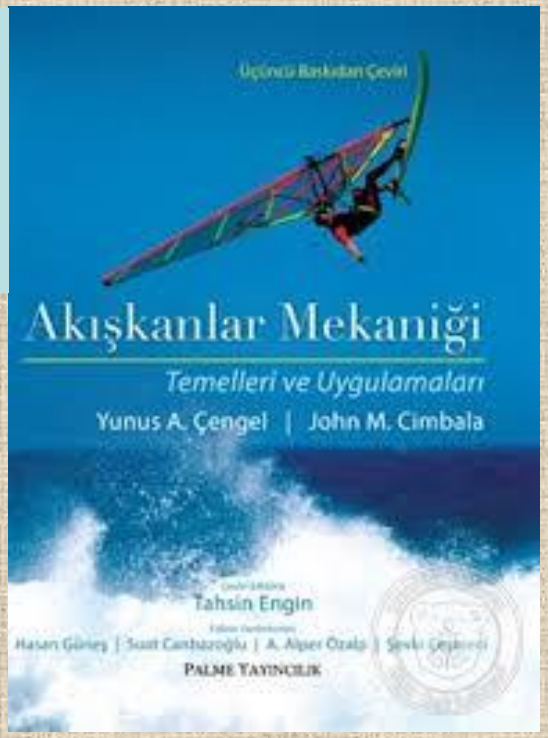
Akışkanlar Mekaniği: Temelleri ve Uygulamaları
3'üncü Baskıdan Çeviri
Yunus A. Cengel, John M. Cimbala
McGraw-Hill, 2014



Bölüm 11

VİSKOZ DIŞ AKIŞLAR
Direnç ve Kaldırma Kuvveti

İngilizce orijinal sunum esas alınarak
Tahsin Engin, Hasan Güneş, A. Alper Özalp ve Suat Canbazoğlu
tarafından hazırlanmıştır.

Boeing 767 uçağının art izi, bulut kümesinin üst kısmının şeklini bozarak karşılıklı dönen uç vorteksleri meydana getirir.

Öğrenim Amaçları

- Direnç, sürtünme ve basınç direnci, direnç azalması ve kaldırma gibi dış akışla ilgili çeşitli fiziksel olgular hakkında sezgisel bir anlayış kazanabilmelidir
- Yakından bilinen geometriler üzerinden akış ile ilgili direnç kuvvetini hesaplayabilmelidir
- Akış rejiminin silindir ve küre üzerindeki akışla ilgili direnç katsayılarına etkisini kavrayabilmelidir
- Kanatlar üzerindeki akışın esaslarını kavrayabilmeli ve kanatlara etkiyen direnç ve kaldırma kuvvetlerini hesaplayabilmelidir

11–1 ■ GİRİŞ

Katı cisimler üzerindeki akışlarla pratikte sıklıkla karşılaşılır ve bu durum sayısız fiziksel olayın gerçekleşmesine yol açar. Bunlara örnek olarak;

- otomobiller, elektrik enerjisi iletim hatları, ağaçlar ve su altı boru hatları üzerine etki eden *direnç kuvveti*
- kuş veya uçak kanatlarının oluşturduğu *Kaldırma*
- yağmur, kar ve dolu taneciklerinin, toz parçacıklarının şiddetli rüzgârlarda *yukarı doğru sürüklenmesi*
- kan akışı ile alyuvarların taşınması
- sıvı damlacıklarının spreylerle sürüklenmesi ve yayılması
- akışkan içinde hareket eden cisimlerin oluşturduğu titreşim ve gürültü
- rüzgâr türbinleri tarafından üretilen güç verilebilir.

Bazen akışkan durgun bir cisim üzerinden hareket eder (bina üzerinden esen rüzgâr gibi) ve bazen de cisim, durgun akışkan içerisinde hareket eder (hava içinde hareket eden otomobil gibi). Görünüşte farklı gibi görünen bu iki olay aslında birbirine özdeştir, çünkü önemli olan akışkan ile cisim arasındaki bağıl harekettir. Bu tür hareketler, koordinat sistemini cisim üzerinde sabitleyerek kolayca analiz edilebilir ve **cisimler üzerinden akış** veya **dış akış** olarak nitelendirilir.

Katı cisimler üzerindeki akış örnekleriyle uygulamada sıklıkla karşılaşılır.

Çoğu dış akışlar için akış alanları ve geometriler analitik olarak çözülemeyecek kadar karmaşıktır ve bu yüzden deneysel verilere dayanan korelasyonlara güvenmek durumunda kalırız.

Serbest Akım Hızı: Bir cisme yaklaşan akışkanın hızıdır (V or u_∞ or U_∞)

İki-Boyutlu Akış: Cisim çok uzun, en-kesit alanı sabit ve akış cisme dik yönde ise, bu durumda cisim üzerindeki akışa iki-boyutludur denir.

Eksenel Simetrik Akış: Akış yönünde cismin bir eksene göre dönel simetrisi varsa akış bu durumda da iki-boyutludur ve **eksenel simetrik akış** olarak nitelendirilir.

Üç-Boyutlu Akış : Bir otomobil üzerinden akışta olduğu gibi, iki-boyutlu veya eksenel simetrik olarak modellenemeyen akış **üç-boyutludur.**

Sıkıştırılamaz Akışlar: Örneğin otomobiller, denizaltılar ve binalar üzerindeki akışlar.

Sıkıştırılabilir Akışlar : Örneğin yüksek hızlı uçaklar, roketler ve füzeler üzerindeki akışlar. Düşük hızlarda sıkıştırılabilirlik etkileri ihmal edilebilir ($Ma < 0.3$) ve böyle akışlar çok az hatayla sıkıştırılamaz olarak ele alınabilir.

Akım Çizgili (aerodinamik/hidrodinamik yapılı) Tasarımlı Cisim: Cismin şeklini, beklenen akım çizgileri ile uyumlu hale getirmek için kasıtlı bir çaba gösterilmiştir. Yarış otomobilleri ve uçaklar gibi akım çizgili tasarımlı cisimler zarif ve düzgün olarak görünür.

Küt veya **Körlenmiş Cisim:** Cisim (bina gibi) akışı engellemeye meyleder. Akım çizgili tasarımlı bir cismi akışkan içerisinde hareket ettirmek çok daha kolaydır ve bu yüzden taşıtlara ve uçaklara akım çizgili tasarımla şekil verilmesi büyük önem taşır.

Uzun silindir (2-B)

Mermi (eksenel simetrik)

İki-boyutlu, eksenel simetrik ve üç-boyutlu akışlar.

Otomobil (3-B)

Akım çizgili tasarımlı cismi akışkan içerisinde hareket ettirmek küt bir cisme göre daha kolaydır.

11–2 ■ KALDIRMA VE DİRENÇ

- Bir katı cismin özellikle bir sıvı akışkan içerisinde hareket etmeye zorlanması halinde bir miktar dirençle karşılaşılması bilinen bir deneyimdir.

Direnç: Akan akışkanın cisme akış yönünde uyguladığı kuvvete **direnç** denir. Direnç kuvveti, akışa maruz kalan cisme doğrudan doğruya kalibre edilmiş bir yay bağlayarak ve akış yönündeki yer değiştirmeyi ölçerek (yaylı terazi ile ağırlık ölçülmesi gibi) belirlenebilir.

Direnç, tıpkı sürtünme gibi çoğunlukla arzu edilmeyen bir etkidir ve bunu en aza indirebilmek için gayret edilir. Ancak bazı durumlarda direnç çok faydalı etki de sağlar ve onu en büyük değerine çıkarmaya çalışırız. Örneğin sürtünme, otomobil frenlerinde “hayat kurtarıcı”dır.

Şiddetli rüzgarlar direnç kuvveti sayesinde ağaçları, elektrik direklerini ve hatta insanları yere yıkabilir.

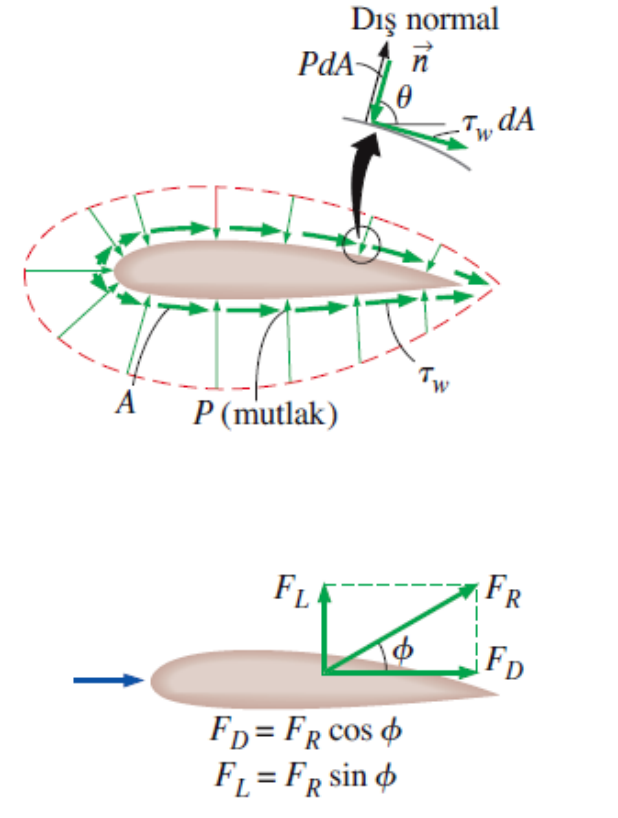
Kaldırma: Basınç ve çeper kayma kuvvetlerinin akışa *dik* yöndeki bileşenleri, cismi bu yönde hareket etmeye zorlar ve bunların toplamına **kaldırma** denir.

Akışkan kuvvetleri ayrıca momentler meydana getirebilir ve cismin dönmesine yol açabilir.

Yuvarlanma momenti: Akış ekseni etrafındaki momenttir.

Sapma momenti: Kaldırma ekseni etrafındaki momenttir.

Yunuslama momenti: Yanal kuvvet ekseni etrafındaki momenttir



$$dF_D = -P\, dA \cos\theta + \tau_w\, dA \sin\theta$$

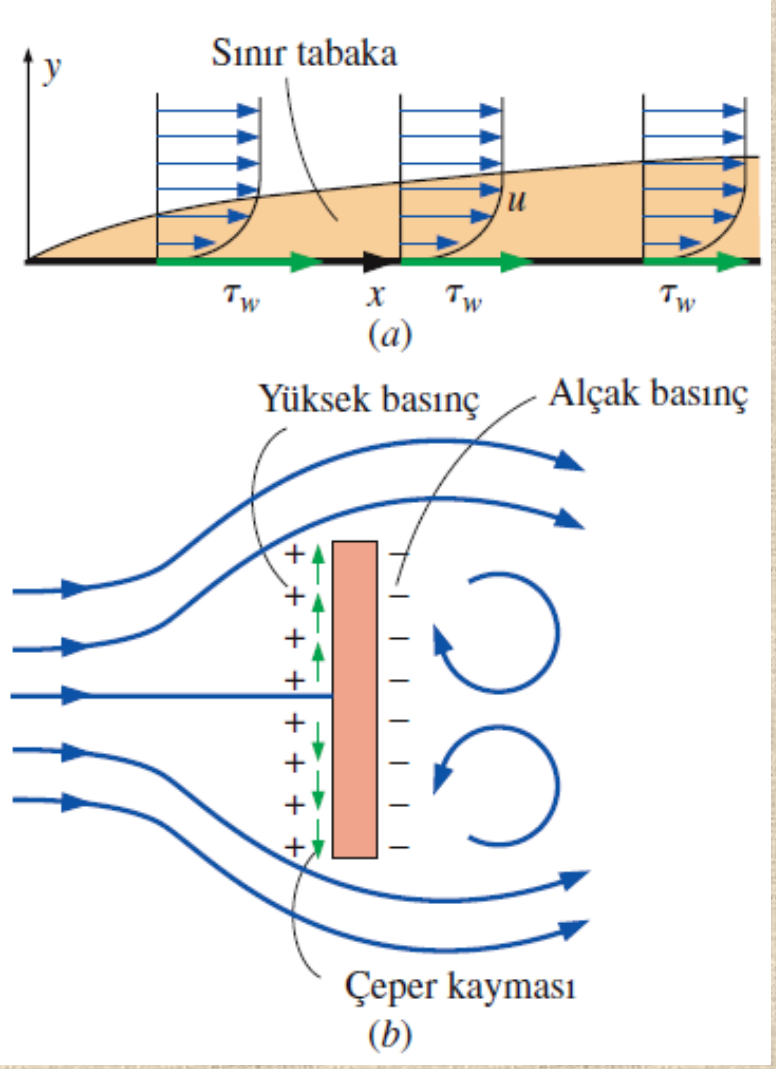
$$dF_L = -P\, dA \sin\theta - \tau_w\, dA \cos\theta$$

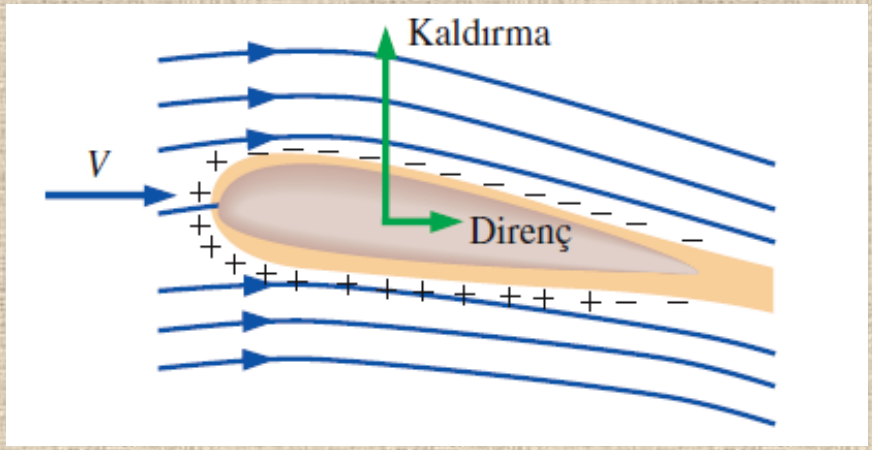
Direnç kuvveti: $F_D = \int_A dF_D = \int_A (-P\cos\theta + \tau_w \sin\theta)\, dA$

ve

Kaldırma kuvveti: $F_L = \int_A dF_L = -\int_A (P\sin\theta + \tau_w \cos\theta)\, dA$

İki-boyutlu bir cisme etkiyen basınç kuvveti ve viskoz kuvvet ile bileşke kaldırma ve direnç kuvvetleri.





Uçak kanatları, uçuş sırasında yeteri kadar kaldırma oluşturacak ve direnci minimumda tutacak biçimde şekillendirilir ve konumlandırılır. Atmosfer basıncının üstündeki ve altındaki basınçlar, sırasıyla artı ve eksi işaretlerle gösterilmiştir.

(a) Düz levha üzerine etki eden direnç kuvveti sadece çeper kayma gerilmesine bağlıdır. (b) Akışa dik yerleştirilen düz levhaya etki eden direnç kuvveti ise sadece basınca bağlıdır ve serbest akıma dik yönde etki eden çeper kayma gerilmesinden bağımsızdır.

Direnç ve kaldırma kuvvetleri; akışkan yoğunluğu, yukarıakım hızı ile aralarında cismin büyüklüğünün, şeklinin ve duruş biçiminin de bulunduğu bir dizi parametreye bağlıdır.

Cismin direnç ve kaldırma karakteristiklerini temsil eden uygun boyutsuz sayılarla çalışmak yararlıdır. Bu sayılar **direnç katsayısı C_D**, ve **kaldırma katsayısı C_L** olup aşağıdaki gibi tanımlanır:

Direnç katsayısı:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

Kaldırma katsayısı:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

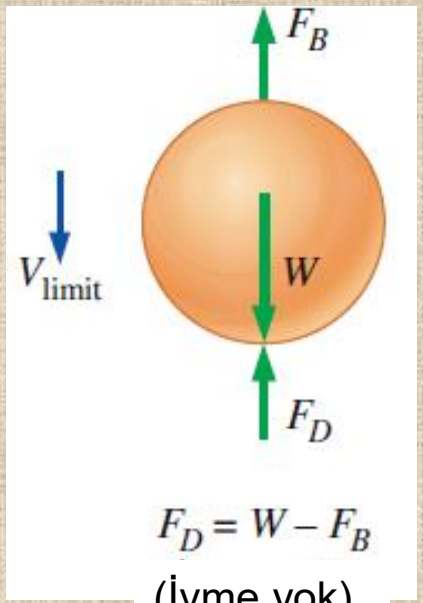
A: *Ön bakış alanı* (akış yönüne dik bir düzlem üzerine iz düşürülmüş alan)

$\frac{1}{2}\rho V^2$ Dinamik basınç

$$C_D = \frac{1}{L}\int_0^L C_{D,x}\,dx \qquad C_L = \frac{1}{L}\int_0^L C_{L,x}\,dx$$

Kanatlar gibi bazı ince cisimlerin kaldırma ve direnç kuvveti hesaplamalarında *A* cisme dik yönde yukarıdan bakan bir kimsenin gördüğü **üst bakış alanı**, olarak alınır.

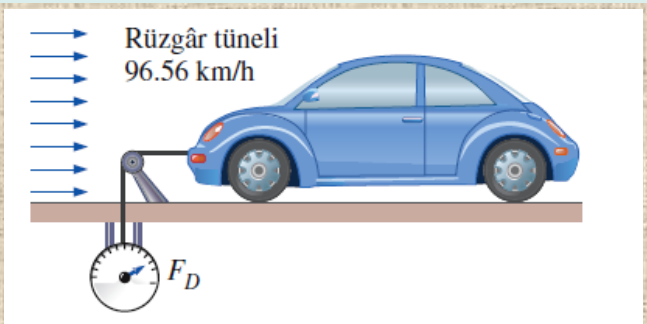
Serbest düşme hareketi sırasında direnç kuvveti, cismin ağırlığı ile kaldırma kuvveti arasındaki kuvvet farkına eşit olduğunda cisim ***limit hız***a ulaşır.



(İvme yok)

ÖRNEK 11–1 Bir Otomobilin Direnç Katsayısının Ölçülmesi

Bir otomobilin direnç katsayısı 1 atm, 21 °C ve 96.56 km/h'lik tasarım şartlarında büyük bir rüzgâr tünelinde tam ölçekli bir testte deneysel olarak belirlenecektir (Şekil 11–9). Otomobilin ön bakış alanı 2.068 m^2'dir. Akış yönünde otomobil üzerine etki eden kuvvet 302.48 N olarak ölçüldüğüne göre, bu otomobilin direnç katsayısını bulunuz.



Analiz Bir cisim üzerine etki eden direnç kuvveti F_D ve direnç katsayısı C_D,

$$F_D = C_D A \frac{\rho V^2}{2} \quad \text{ve} \quad C_D = \frac{2F_D}{\rho A V^2}$$

ifadeleri ile verilir. Bu denklemlerde A ön bakış alanıdır. Buna göre otomobilin direnç katsayısı aşağıdaki gibi elde edilir:

$$C_D = \frac{2 \times (302.4\ \text{N})}{(1.2\ \text{kg/m}^3)(2.07\ \text{m}^2)(96.56 \times 1000/3600\ \text{m/s})^2} = \mathbf{0.34}$$

İrdeleme Direnç katsayısı tasarım şartlarına bağlıdır ve Reynolds sayısı gibi farklı şartlarda değeri farklı olabilir. Bu nedenle farklı taşıtlar için bildirilen direnç katsayıları, ancak dinamik benzerliğin sağlandığı şartlar altında belirlenmişse veya Bölüm 7'de ifade edildiği gibi Reynolds sayısından bağımsız olduğu gösterilmişse anlamlı bir şekilde karşılaştırılabilir. Bu durum, endüst-

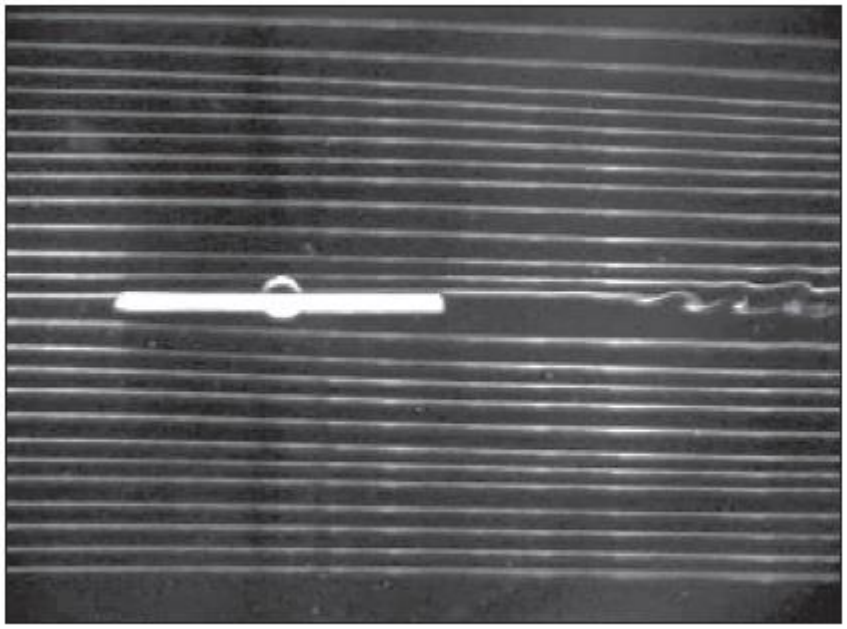
11–3 ■ SÜRTÜNME VE BASINÇ DİRENCİ

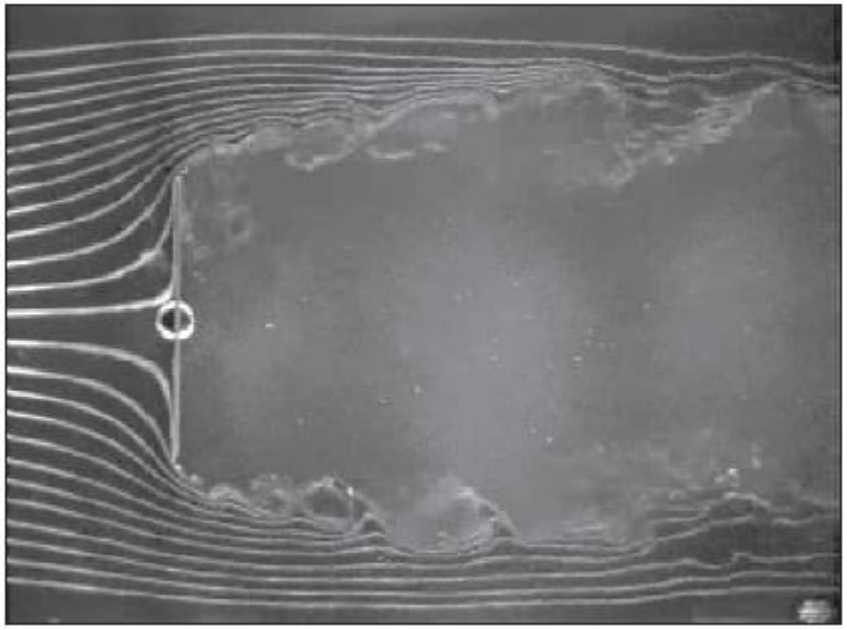
- Direnç kuvveti, çeper üzerindeki kayma kuvveti ile basınç kuvvetinin birleşik etkisi ile akışkanın akış yönünde cisim üzerine uyguladığı net kuvvettir.
- Doğrudan τ_w çeper kayma gerilmesinden kaynaklanan direnç kısmına, sürtünme etkileri yüzünden meydana geldiği için **yüzey sürtünme direnci** (veya sadece *sürtünme direnci* $F_{D,\text{sürtünme}}$), doğrudan *P* basıncından kaynaklanan kısma ise **basınç direnci** denir. (Cismin şekliyle yakından ilgili olduğundan buna *şekil (form) direnci* adı da verilir.

$$C_{D,\,\text{sürtünme}} = \frac{F_{D,\,\text{sürtünme}}}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \qquad C_{D,\,\text{basınç}} = \frac{F_{D,\,\text{basınç}}}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

$$C_D = C_{D,\,\text{sürtünme}} + C_{D,\,\text{basınç}} \qquad F_D = F_{D,\,\text{sürtünme}} + F_{D,\,\text{basınç}}$$

- *Sürtünme* direnci çeper kayma kuvvetinin akış yönündeki bileşenidir. Bu yüzden cismin yerleştirilme biçimine ve aynı zamanda τ_w çeper kayma gerilmesinin büyüklüğüne bağlıdır.
- Düz bir yüzey üzerindeki paralel akışta, direnç katsayısı sürtünme direnç katsayısına (veya basit olarak sürtünme katsayısına) eşittir.
- Sürtünme direnci viskoziteye çok bağlıdır ve viskozitenin artması ile artar.

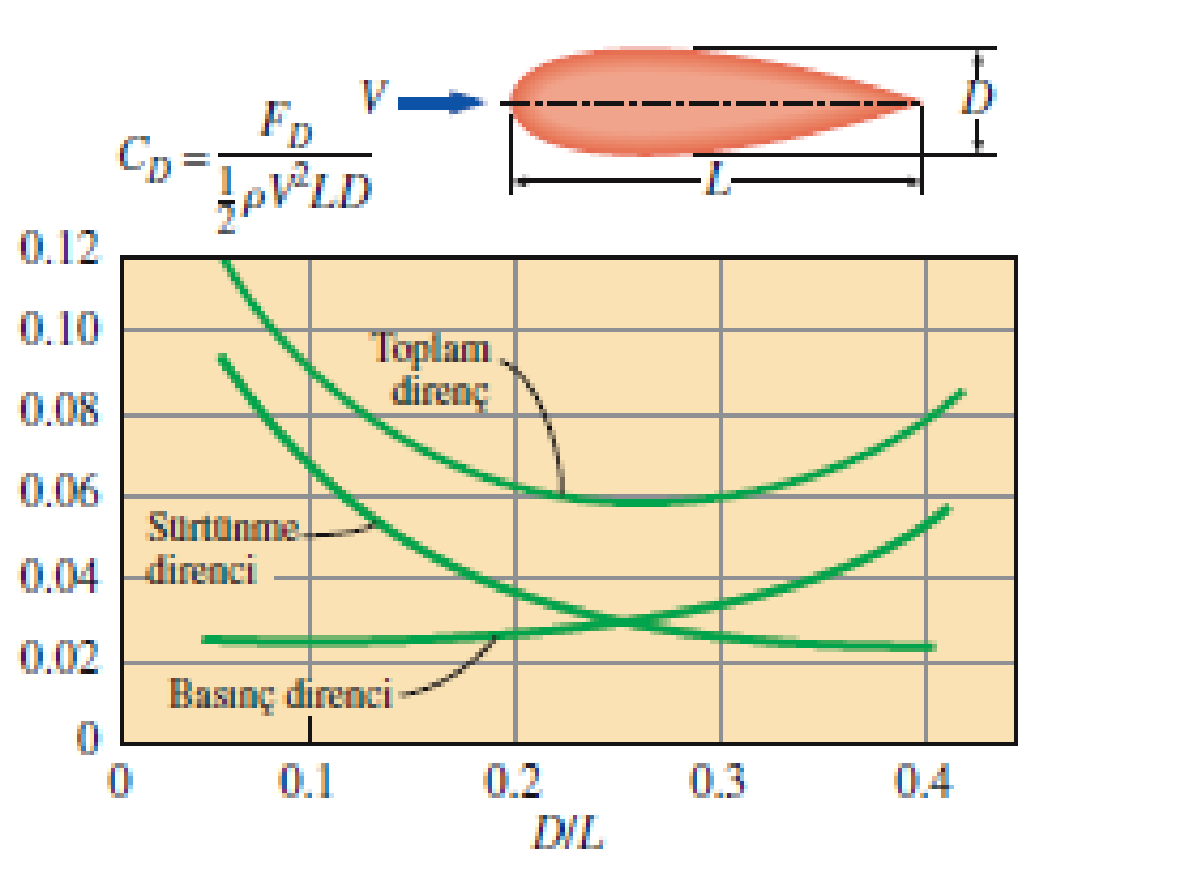




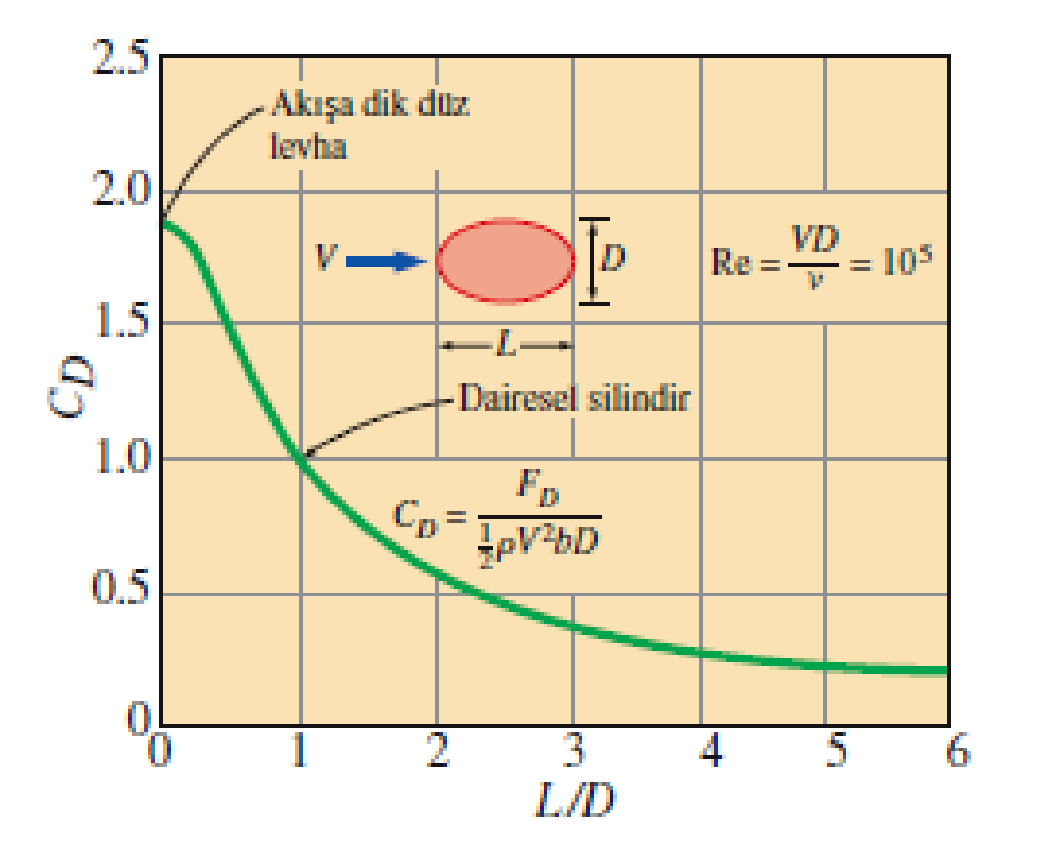
Akışa paralel düz levhada direnç bütünüyle sürtünme direncinden, akışa dik düz levhada ise tamamen basınç direncinden kaynaklanır. Öte yandan akışa dik silindirde direnç her ikisinden (ancak çoğunlukla basınç direncinden) ileri gelir. Paralel düz levha için toplam direnç katsayısı C_D en küçük, düşey düz levha için en yüksek ve silindir için bu ikisinin arasında bir değerdedir (ancak düşey düz levhaya ait değere daha yakındır).

Cisimleri Akım Çizgili Hale Getirerek Direncin Azaltılması

Bu tasarım, sınır tabakanın ayrılmasını geciktirerek basınç direncini azaltırken, cismin önü ile arkası arasındaki basınç farkını düşürüp sürtünme yüzey alanını arttırarak sürtünme direncini ise arttırır. Nihai sonuç hangi etkinin daha baskın olduğuna bağlıdır.



Akım çizgili tasarıma sahip bir kanattaki sürtünme, basınç ve toplam direnç katsayılarının Re = 4×10^4 için *D/L* (kalınlık/kiriş uzunluğu) oranı ile değişimi. Kanatlar ve diğer ince yapılarda C_D'nin ön bakış alanından çok üst bakış alanına göre verildiğine dikkat ediniz.



Uzun eliptik silindirin C_D direnç katsayısının *L/D* görünüş (boy/en) oranı ile değişimi. Burada C_D ön bakış alanına göre tanımlı olup b cismin sayfaya dik genişliğidir.

Elips inceldikçe direnç katsayısı hızla azalır.

Yüksek boy/en oranlarında direnç katsayısındaki azalma büyük oranda sınır tabakanın uzun bir süre yüzeye tutunmuş olarak kalması ve bu nedenle basınç direncinin azalmasındandır.

Akım çizgili hale getirme *titreşim* ve *gürültünün azaltılması* bakımından da faydalıdır.

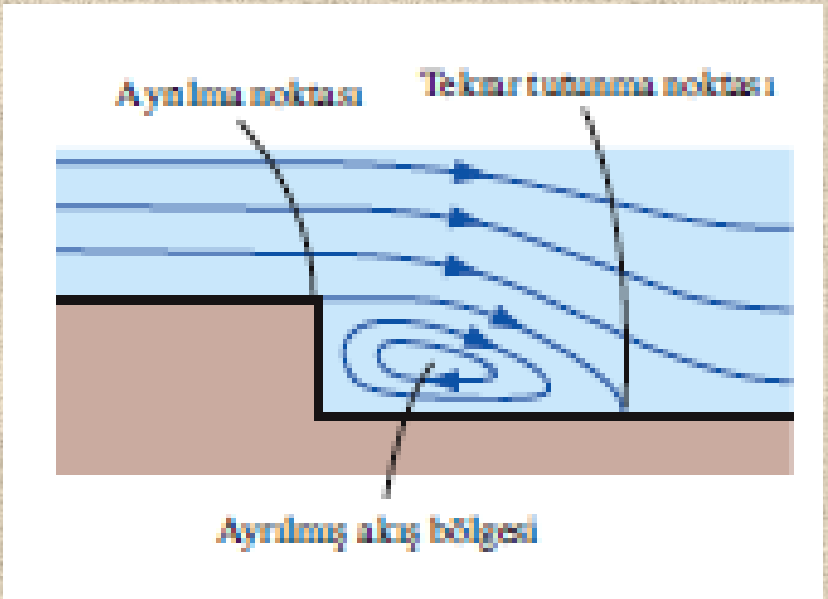
Akım çizgili hale getirme sadece küt cisimler için düşünülmelidir. Çünkü bu tür cisimler, akış ayrılmasının gerçekten muhtemel olduğu yüksek hızlı akışkan akışına (ve dolayısı ile yüksek Reynolds sayılarına) maruz kalır.

Düşük Reynolds sayılı akışların söz konusu olduğu (Re = 1 olduğu sürünme akışlarındaki gibi) cisimler için akım çizgili tasarım bir gereklilik değildir.

Akış Ayrılması

Akış Ayrılması: Yeteri kadar yüksek hızlarda akış cismin yüzeyinden kendisini ayırır. Ayrılma noktasının konumu; Reynolds sayısı, yüzey pürüzlülüğü ve serbest akımdaki çalkantıların düzeyi gibi birçok etkene bağlıdır ve katı yüzeyin geometrisinde keskin köşeler veya ani değişimler yoksa, ayrılmanın tam olarak nerede olacağını kestirmek çoğunlukla zordur.

Bir şelaledeki akış ayrılması.



Bir basamak üzerindeki akış ayrılması.

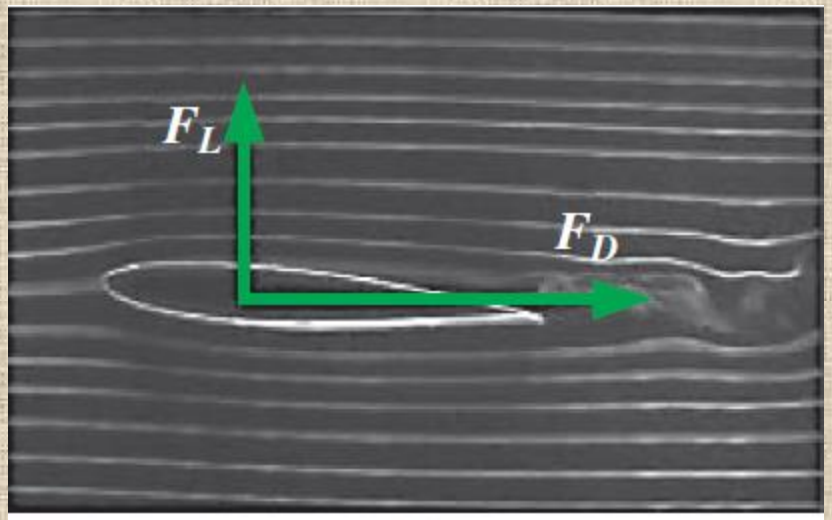
Akış Ayrılma Bölgesi: Bir akışkan cismin yüzeyinden ayrıldığında, cisim ile akışkan akımı arasında bir ayrılmış bölge oluşturur.

- Bu bölge cismin arkasında sürekli donanımlı ve geriye doğru akışların olduğu düşük basınçlı bir bölgedir.
- Ayrılmış bölge ne kadar büyükse basınç direnci de o denli büyük olur.
- Akış ayrılmasının etkileri, aşağıakımın uzağında, yukarıakım hızına göre azalmış hız biçiminde hissedilir.

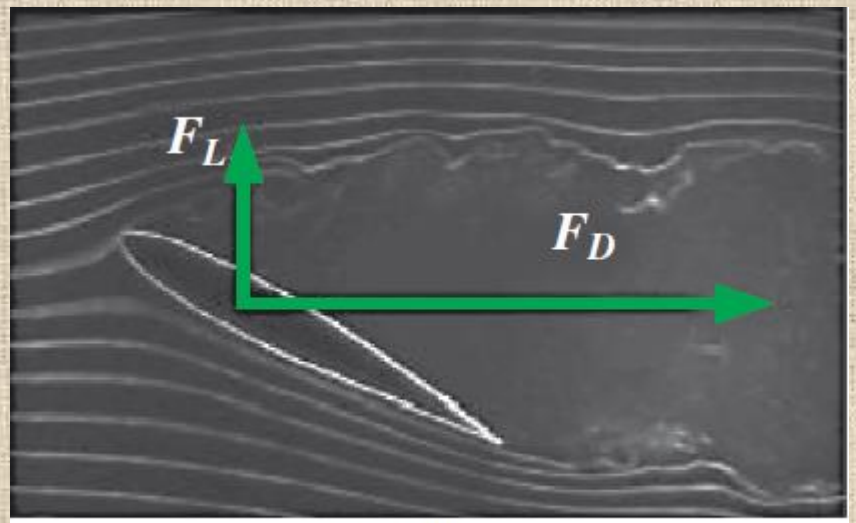
İz Bölgesi: Cismin hız üzerindeki etkilerinin hissedildiği, cisim ardında uzayan akış bölgesidir.

- Viskoz ve dönel etkiler; sınır tabakada, ayrılmış bölgede ve art izinde büyük önem taşır.

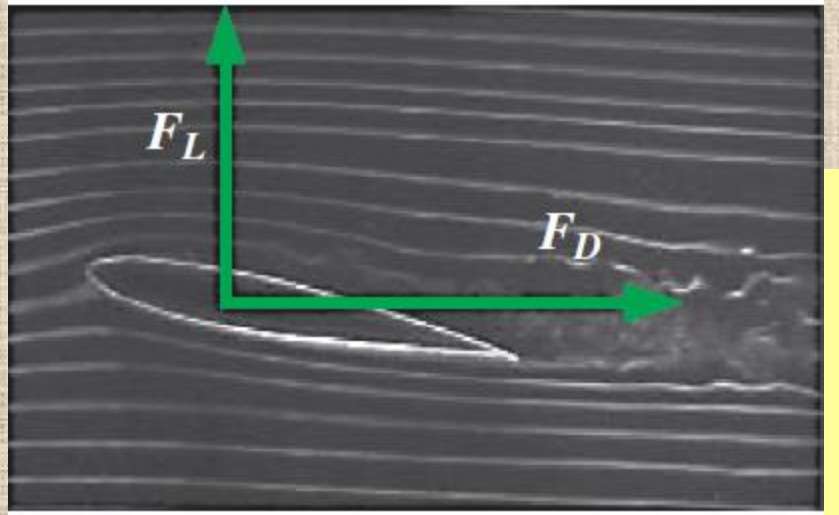
Bir tenis topu üzerindeki akıştaki ayrılma ve art izi bölgesi.



(*a*) 5°



(*c*) 30°



(*b*) 15°

Hücum açısının büyük değerlerinde (çoğunlukla 15°'den fazla) akış kanadın üst yüzeyinden tamamen ayrılarak kaldırmanın hızla azalmasına ve kanadın stola girmesine yol açabilir.

Akış ayrılmasının önemli bir sonucu, art iz bölgesinde **vorteks** adı verilen dönen akışkan yapılarının oluşumu ve kopmasıdır.

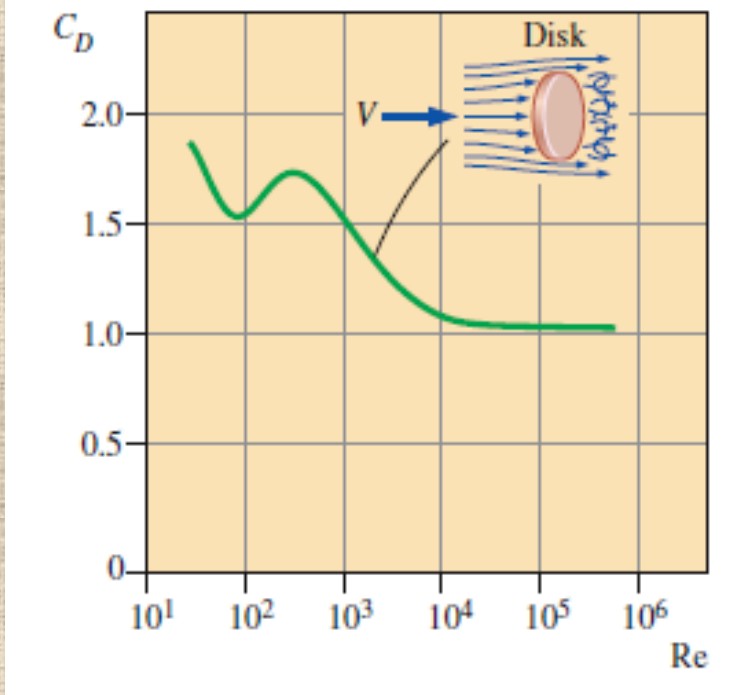
Bu aşağıakım vortekslerinin periyodik üretimine **vorteks kopması** denir.

Cisme yakın vortekslerin meydana getirdiği titreşimler, eğer vorteks kopma frekansı cismin doğal frekansına yakın ise cismin tehlikeli seviyede rezonansa gelmesine yol açabilir.

11–4 ■ YAKINDAN BİLİNEN GEOMETRİLERİN DİRENÇ KATSAYILARI

Çeşitli doğal ve insan yapımı cisimlerin direnç davranışları, genel çalışma şartları altında ölçülmüş direnç katsayıları ile karakterize edilir.

Genellikle ayrı ayrı direnç bileşenlerinden ziyade toplam direnç ile ilgileniriz ve bu yüzden toplam direnç katsayısı verilir.



Direnç katsayısı, Reynolds sayısının düşük (sürünme akışı), orta (laminer akış) ve yüksek (türbülanslı akış) olduğu bölgelerde farklı davranışlar sergiler.

Düşük Re sayılı (Re < 1) akışta, atalet etkileri ihmal edilebilir. Bu akışlara sürünme akışları denir ve akışkan cismin yüzeyine düzgünce sarılır. called

$$C_D = \frac{24}{\mathrm{Re}} \qquad (\mathrm{Re} \lesssim 1)$$

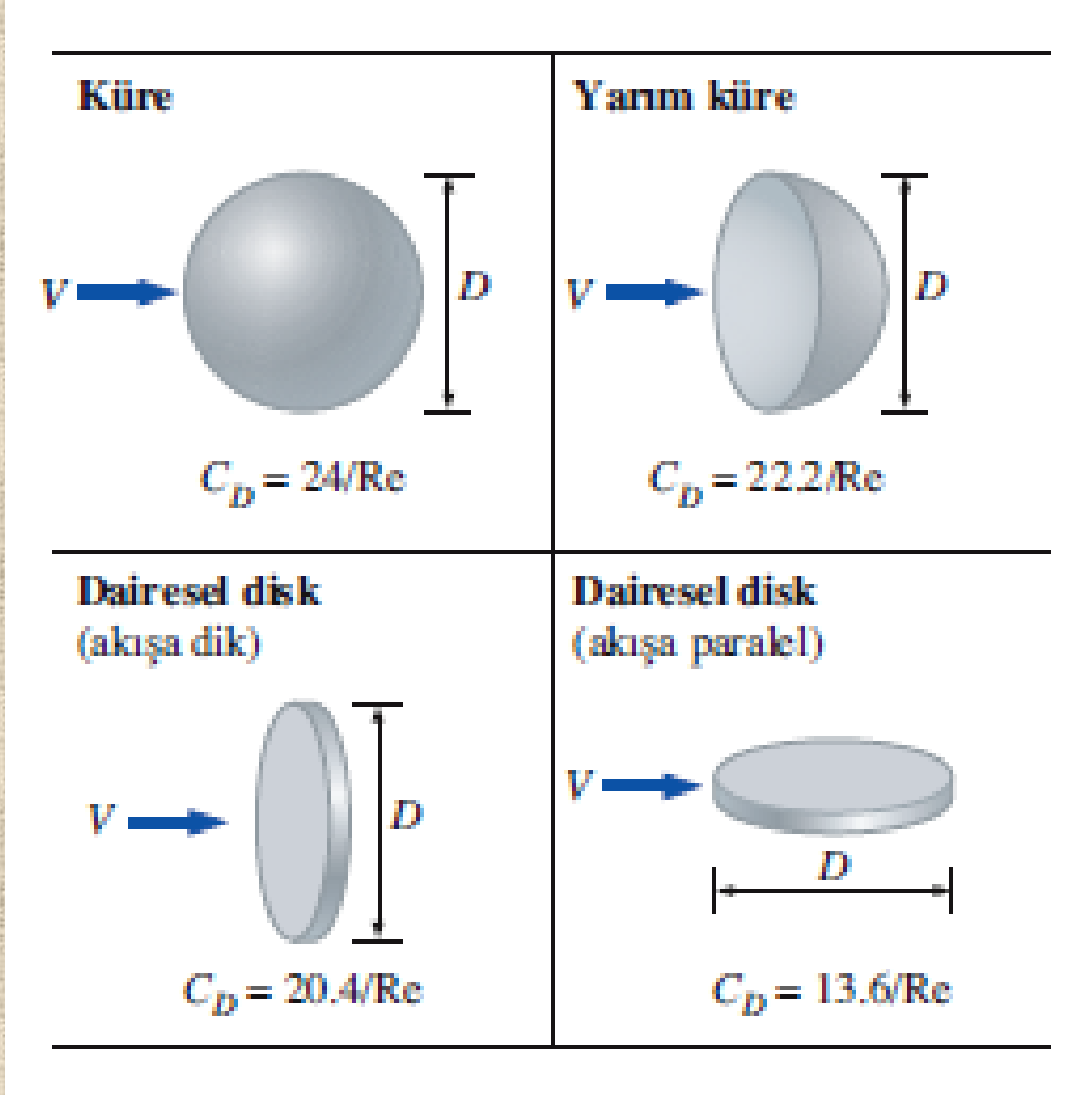
Sürünme akışı, küre

$$F_D = C_D A \frac{\rho V^2}{2} = \frac{24}{\mathrm{Re}} A \frac{\rho V^2}{2} = \frac{24}{\rho V D/\mu} \frac{\pi D^2}{4} \frac{\rho V^2}{2} = 3\pi\mu V D$$

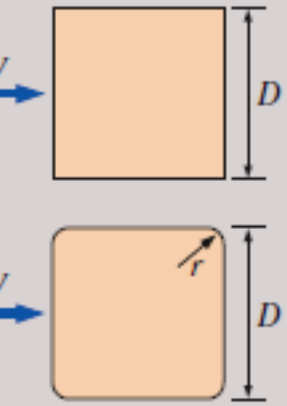
Stokes kanunu

Bu kanun çoğu zaman havadaki toz parçacıkları ve suda asılı katı parçacıklar için kullanılmakta-dır.

Reynolds sayısının 10^4'ün üstünde olduğu durumlarda direnç katsayıları çoğu şekiller için (ancak hepsi için değil) esas itibariyle sabit kalır.

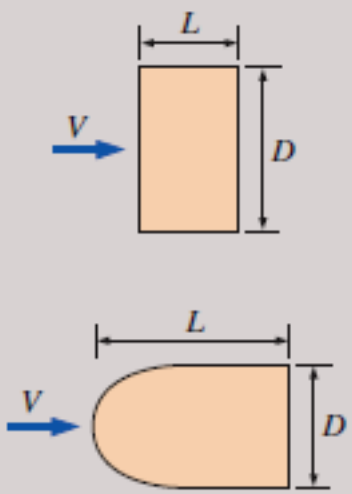


Düşük *Re* sayılarında C_D direnç katsayıları ($Re \leq 1$, $Re = VD/\nu$ ve $A = \pi D^2/4$).



Keskin köşeler: $C_D = 2.2$

Yuvarlak köşeler ($r/D = 0.2$): $C_D = 1.2$



Keskin köşeler:

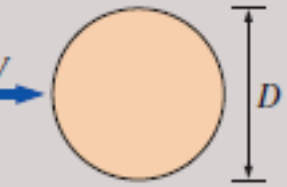
Yuvarlak ön kenar:

L/D	C_D
0.0*	1.9
0.1	1.9
0.5	2.5
1.0	2.2
2.0	1.7
3.0	1.3

* İnce levhaya karşılık gelir

L/D	C_D
0.5	1.2
1.0	0.9
2.0	0.7
4.0	0.7

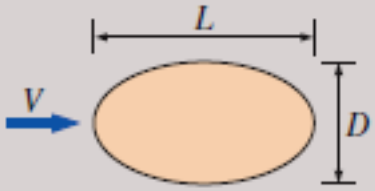
airesel çubuk (silindir)



Laminer: $C_D = 1.2$

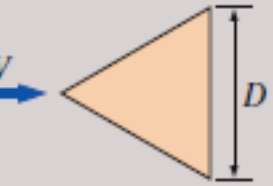
Türbülanslı: $C_D = 0.3$

Eliptik çubuk



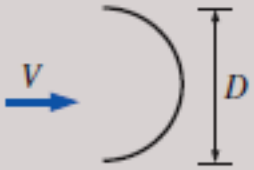
	C_D	
L/D	Laminer	Türbülanslı
2	0.60	0.20
4	0.35	0.15
8	0.25	0.10

şkenar üçgen çubuk



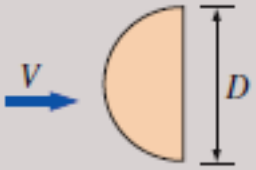
$C_D = 1.5$

Yarım dairesel kabuk



$C_D = 2.3$

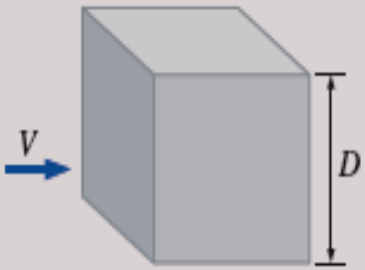
Yarım dairesel çubuk



$C_D = 1.2$

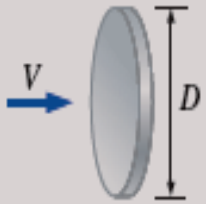
$A = bD$ ön bakış alanına göre Re > 10^4 için çeşitli üç-boyutlu cisimlerin C_D direnç katsayıları ($F_D = C_D A \rho V^2/2$ direnç bağıntısında kullanılan V hızı yukarıakım hızıdır)

Küp, $A = D^2$



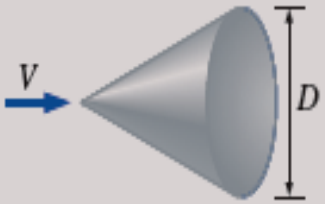
$C_D = 1.05$

İnce dairesel disk, $A = \pi D^2/4$



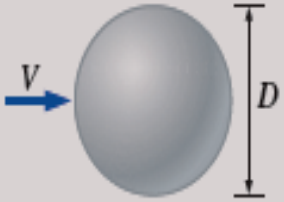
$C_D = 1.1$

Koni ($\theta = 30°$), $A = \pi D^2/4$



$C_D = 0.5$

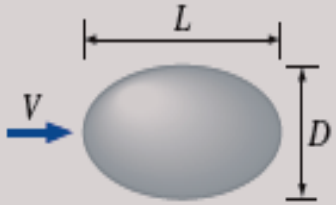
Küre, $A = \pi D^2/4$



Laminer:
$Re \lesssim 2 \times 10^5$
$C_D = 0.5$
Türbülanslı:
$Re \gtrsim 2 \times 10^6$
$C_D = 0.2$

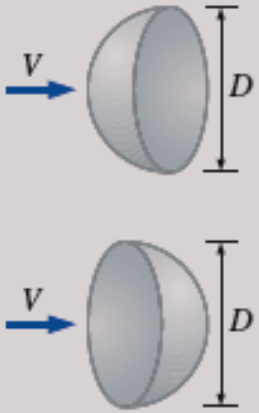
Pürüzlü ve pürüzsüz küreler için C_D'nin Re ile nasıl değiştiğini görmek için Şekil 11–36'ya bakınız

Ellipsoit, $A = \pi D^2/4$



L/D	C_D Laminer $Re \lesssim 2 \times 10^5$	C_D Türbülanslı $Re \gtrsim 2 \times 10^6$
0.75	0.5	0.2
1	0.5	0.2
2	0.3	0.1
4	0.3	0.1
8	0.2	0.1

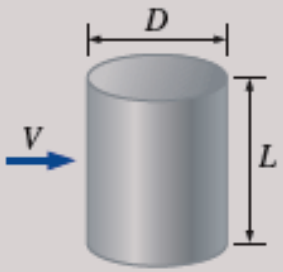
Yarım küre, $A = \pi D^2/4$



$C_D = 0.4$

$C_D = 1.2$

Sonlu silindir, düşey

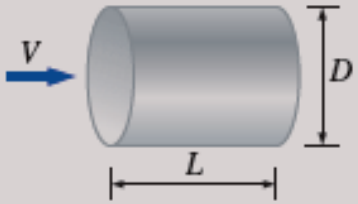


$A = LD$

L/D	C_D
1	0.6
2	0.7
5	0.8
10	0.9
40	1.0
∞	1.2

Değerler laminer akış ($Re \lesssim 2 \times 10^5$) içindir.

Sonlu silindir, yatay,



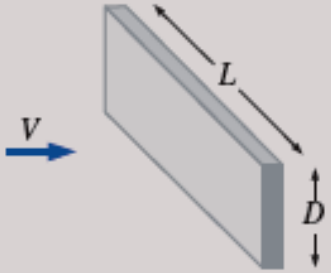
$A = \pi D^2/4$

L/D	C_D
0.5	1.1
1	0.9
2	0.9
4	0.9
8	1.0

Akım çizgili cisim, $A = \pi D^2/4$

$C_D = 0.04$

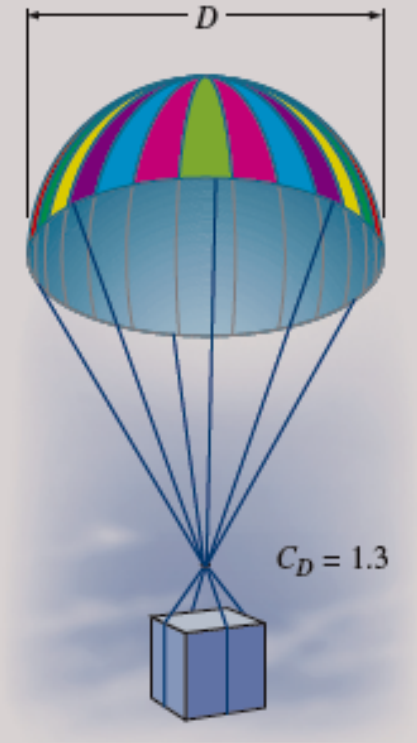
Dikdörtgen levha, $A = LD$



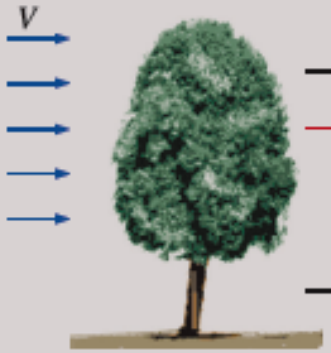
$C_D = 1.10 + 0.02\,(L/D + D/L)$

$1/30 < (L/D) < 30$

Paraşüt, $A = \pi D^2/4$

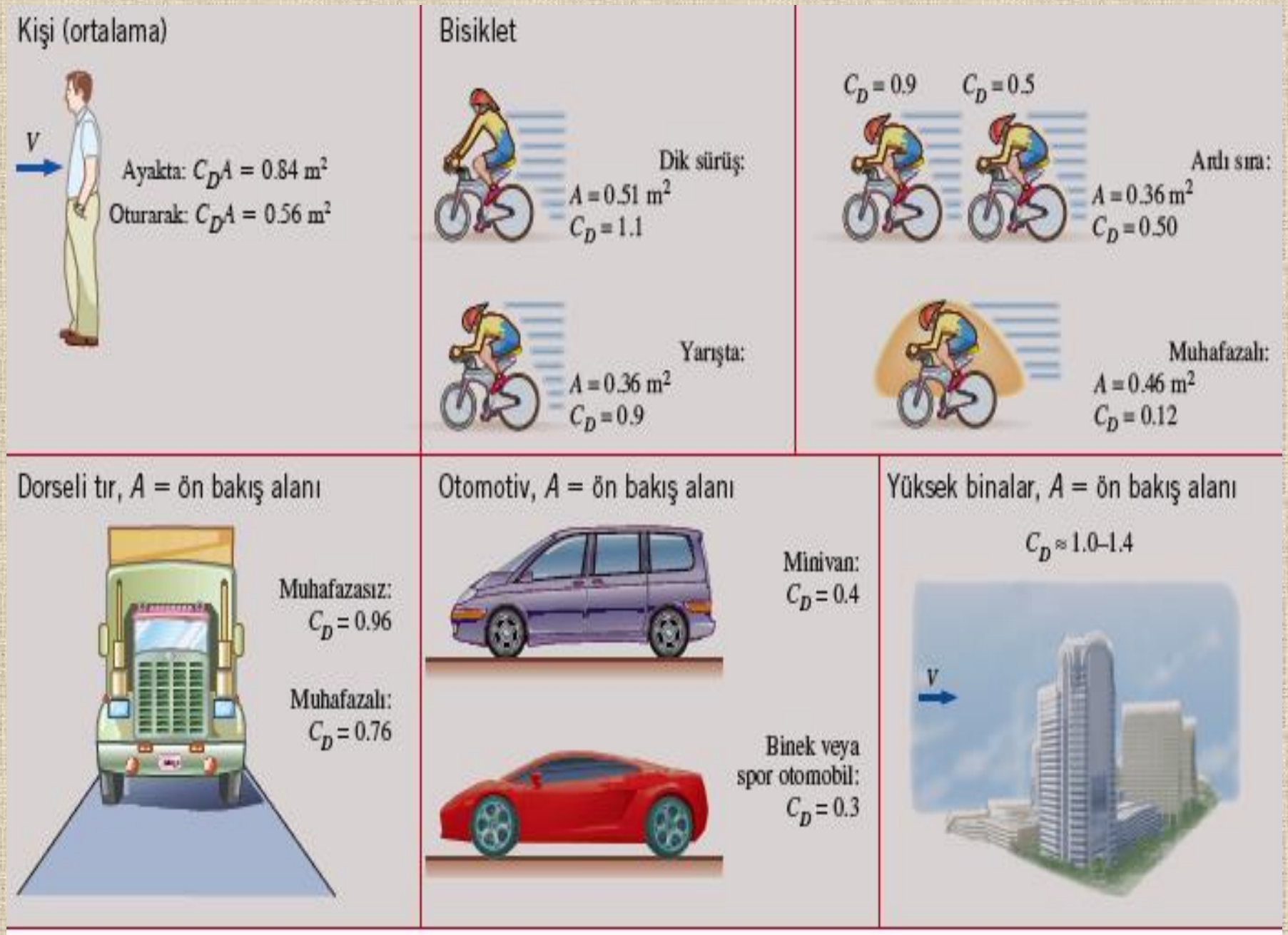


Ağaç, A = ön bakış alanı



V, m/s	C_D
10	0.4–1.2
20	0.3–1.0
30	0.2–0.7

(devam ediyor)


Kişi (ortalama)
V
Ayakta: $C_D A = 0.84\ m^2$
Oturarak: $C_D A = 0.56\ m^2$
Bisiklet
Dik sürüş:
$A = 0.51\ m^2$
$C_D = 1.1$
$C_D = 0.9$
$C_D = 0.5$
Ardı sıra:
$A = 0.36\ m^2$
$C_D = 0.50$
Yarışta:
$A = 0.36\ m^2$
$C_D = 0.9$
Muhafazalı:
$A = 0.46\ m^2$
$C_D = 0.12$
Dorseli tır, A = ön bakış alanı
Muhafazasız:
$C_D = 0.96$
Muhafazalı:
$C_D = 0.76$
Otomotiv, A = ön bakış alanı
Minivan:
$C_D = 0.4$
Binek veya spor otomobil:
$C_D = 0.3$
Yüksek binalar, A = ön bakış alanı
$C_D \approx 1.0–1.4$
V

Direnç Katsayısı Tablolarından Çıkarılan Bazı Sonuçlar

Cismin akış yönüne göre *yerleştirme biçimi*nin (ve dolayısıyla şeklinin) direnç katsayıları üzerinde büyük bir etkisi olduğu görülmektedir.

Dikdörtgen blok üzerindeki akış veya düz levhaya dik akış gibi keskin köşeli küt cisimler için akış ayrılması, akış karakteristiğinde önemli bir değişiklik olmaksızın ön ve arka yüzeylerin kenarlarında oluşur.

Bu yüzden, böyle cisimlerin direnç katsayısı Reynolds sayısından hemen hemen bağımsızdır.

Uzun dikdörtgen çubuğun direnç katsayısı, köşelerinin yuvarlatılması ile hemen hemen yarısına (2.2'den 1.2'ye) indirilebilir.

Akış yönüne göre bir cismin yerleştirme biçimini (ve dolayısıyla şeklini) değiştirerek cismin direnç katsayısı önemli ölçüde değiştirilebilir.

Biyolojik Sistemler ve Direnç

Direnç kavramının biyolojik sistemlerde de önemli sonuçları vardır.

Balıkların, özellikle de yunuslar gibi uzun mesafelere hızlı bir şekilde yüzenlerin gövdeleri, direnci minimuma indirmek için yüksek oranda akım çizgili haldedir (yunusun ıslak deri alanına göre direnç katsayısı 0.0035 civarında olup bu değer türbülanslı akıştaki düz levha değeri ile aynı mertebelerdedir).

Büyük kuşlara kısmen benzeyen uçaklar, direnci ve dolayısıyla yakıt tüketimini azaltmak için kalkıştan sonra tekerleklerini toplar.

Bitkilerin esnek yapıları, sert rüzgârlarda şekillerini değiştirerek direncin düşürülmesini sağlar. Örnek olarak büyük düz yapraklar sert rüzgârlarda kıvrılarak düşük dirençli konik bir şekil alır ve bu arada ağaç dalları direnci azaltmak için kümelenir.

Esnek gövdeler rüzgâr etkisi altında eğilerek direnci azaltır ve ön bakış alanını azaltarak eğilme momentini üşürür.

Jokeyler ve bisiklet sürücüleri direnci olabildiğince azaltmak için öne doğru eğilirler (hem direnç katsayısını hem de ön bakış alanını azaltırlar). Hız kayakçıları da aynı şeyi yaparlar.

Kuşlar uçuş esnasında gagalarını ileri uzatıp ayaklarını geriye doğru katlayarak direncin azaltılması konusunda dersler verir.

Taşıtların Direnç Katsayıları

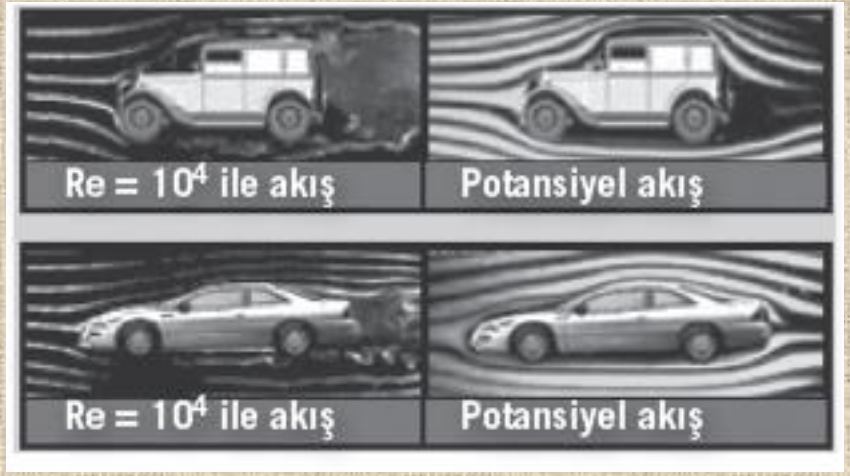
Taşıtların direnç katsayısı aralığı büyük tırlar için 1.0 civarından minibüsler için 0.4'e, binek otomobilleri için ise 0.3 civarına değişir.

Genel olarak taşıt ne kadar çok kütse (körlenmiş yapıda ise) direnç katsayısı da o oranda yükselir.

Dorseli sırlara muhafaza takılması, ön bakış alanını daha çok akım çizgili hale getirerek direnç katsayısını % 20 civarında azaltır.

Kabaca söylemek gerekirse, azaltılmış direncin sağladığı % olarak yakıt tasarrufu, otoyol hızlarındaki % olarak direnç azalmasının yarısıdır.

Zarif görünümlü Toyota Prius'un direnç katsayısı 0.26'dir. Bu değer bir binek otomobili için en düşük değerlerdendir.



Arka uç yakınları hariç, aerodinamik olarak tasarlanmış modern bir otomobil etrafındaki akım çizgileri, ideal potansiyel akışta (sürtünmenin ihmal edilebilir olduğu kabul edilir) otomobilin etrafındaki akım çizgilerine benzerdir ve bu durum direnç katsayısının düşmesini sağlar.

Aerodinamik direnç düşük hızlarda ihmal edilebilir, ancak yaklaşık olarak 50 km/h'in üzerindeki hızlarda ise önemli hale gelir.

Sıcak havalarda, otoyol hızlarında pencereleri açmak yerine klimayı çalıştırarak araba sürmek suretiyle sürücü yakıt tasarrufu sağlayabilir.

Düşük dirençli birçok otomobilde açık pencerelerin yol açtığı türbülans ve ilave direnç, çoğunlukla klimadan daha fazla yakıt tüketimine yol açar.

Başka cisimleri yakından takip eden cisimlerin direnç katsayıları ardı sıra dizilme ile yani öndeki cismin oluşturduğu düşük basınç bölgesine girerek önemli oranda azaltılabilir.

Süperpozisyon

Pratikte karşılaşılan çoğu cismin şekli geometrik açıdan basit değildir.

Ancak böyle cisimler, iki veya daha fazla sayıda basit cismin birleşiminden oluşuyormuş gibi düşünülerek direnç kuvvetinin hesaplanması uygun bir şekilde ele alınabilir.

Bu bağlamda çatıya koyulmuş silindirik çubuklu bir çanak anten, yarım küre ve bir silindirin birleşimi olarak düşünülebilir.

Ardından cismin direnç katsayısı **süperpozisyon** ilkesi kullanarak yaklaşık olarak bulunabilir.

ÖRNEK 11–2 Bir Otomobilin Yakıt Tüketiminde Ön Bakış Alanının Etkisi

Bir taşıtın yakıt tüketimini azaltmanın iyi bilinen iki yolu vardır: Taşıtın ön bakış alanını ve direnç katsayısını azaltmak. Şekil 11–24'te görülen genişliği (*W*) ve yüksekliği (*H*) sırasıyla 1.85 ve 1.70 m olan bir otomobilin direnç katsayısı ise 0.30'dur. Otomobilin genişliği aynı kalmak üzere yüksekliği 1.55 m'ye düşürülürse, yılda tasarruf edilen yakıt ve para miktarını hesaplayınız. Otomobilin 95 km/h'lik ortalama hız ile yılda 18000 km yol kat ettiğini kabul ediniz. Benzinin yoğunluğu ve litre fiyatı sırasıyla 0.74 kg/L ve 4.85 TL/L'dir. Benzinin ısıl değerini (ID) 44000 kJ/kg ve otomobilin verilen ortalama hızdaki toplam (genel) verimini 0.30 alınız.

ÇÖZÜM Bir otomobilin ön bakış alanı, yeni bir tasarımla azaltılacaktır. Bunun sonucunda yılda tasarruf edilen yakıt miktarı ve para hesaplanacaktır.

Kabuller **1** Otomobil bir yılda ortalama 95 km/h hızla 18000 km yol almaktadır. **2** Ön bakış alanının azaltılmasının direnç katsayısı üzerindeki etkisi ihmal edilmektedir.

Özellikler Hava ve benzinin yoğunlukları sırasıyla 1.20 kg/m^3 ve 0.74 kg/L'dir. Benzinin ısıl değeri (ID) 44000 kJ/kg olarak veriliyor.

Analiz Cisme etkiyen direnç kuvveti,

$$F_D = C_D A \frac{\rho V^2}{2}$$

ifadesiyle tanımlı olup, burada *A* cismin ön bakış alanıdır. Yeni tasarım öncesi otomobile etkiyen direnç kuvveti aşağıdaki gibi bulunur:

iş, kuvvet ile yolun çarpımıdır. Dolayısıyla bu direnç kuvvetini yenmek için yapılan işin miktarı ve 18000 km'lik mesafe için gerekli olan enerji girişi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$W_{\text{direnç}} = F_D L = (394\ \text{N})(18{,}000\ \text{km/yıl})\left(\frac{1000\ \text{m}}{1\ \text{km}}\right)\left(\frac{1\ \text{kJ}}{1000\ \text{N·m}}\right)$$

$$= 7.092 \times 10^6\ \text{kJ/yıl}$$

$$E_{\text{giriş}} = \frac{W_{\text{direnç}}}{\eta_{\text{araba}}} = \frac{7.092 \times 10^6\ \text{kJ/yıl}}{0.30} = 2.364 \times 10^7\ \text{kJ/yıl}$$

Bu kadar fazla enerjiyi sağlayan yakıtın miktarı ve maliyeti ise,

$$\text{Yakıt miktarı} = \frac{m_{\text{yakıt}}}{\rho_{\text{yakıt}}} = \frac{E_{\text{giriş}}/\text{ID}}{\rho_{\text{yakıt}}} = \frac{(2.364 \times 10^7\ \text{kJ/yıl})/(44000\ \text{kJ/kg})}{0.74\ \text{kg/L}}$$

$$= 726\ \text{L/yıl}$$

$$\text{Maliyet} = (\text{Yakıt miktarı})(\text{Birim fiyat}) = (726\ \text{L/yıl})(4.85\ \text{TL/L}) = 3521\ \text{TL/yıl}$$

Yani otomobil direnci yenmek için bir yılda 726 L benzin yakmakta ve buna bağlı olarak 3521 TL tutarında fazladan masrafa neden olmaktadır

Direnci yenmek için yapılan iş ve direnç kuvveti, doğrudan ön bakış alanıyla ilgilidir. Ön bakış alanını azaltmaktan dolayı yakıt tüketimindeki % azalma, ön bakış alanındaki % azalmaya eşittir.

$$\text{Azalma oranı} = \frac{A - A_{\text{yeni}}}{A} = \frac{H - H_{\text{yeni}}}{H} = \frac{1.70 - 1.55}{1.70} = 0.0882$$

$$\text{Yakıttaki azalma} = (\text{Azalma oranı})(\text{Yakıt miktarı})$$

$$= 0.0882(726\ \text{L/yıl}) = \mathbf{64\ L/yıl}$$

$$\text{Maliyetteki azalma} = (\text{Azalma oranı})(\text{Fiyat}) = 0.0882(3521\ \text{TL/yıl}) = \mathbf{310\ TL/yıl}$$

Böylece otomobilin yüksekliğini azaltmak yaklaşık %9'luk direnç azalmasına neden olduğundan dolayı yakıt tüketimini de azaltmaktadır.

İrdeleme Cevaplar iki anlamlı basamakla verilmiştir. Bu örnek, direnç katsayısına ek olarak bir taşıtın ön bakış alanının azaltılarak, yakıt tüketimi ve dirençte önemli ölçüde düşüş sağlanabileceğini göstermektedir.

11–5 ■ DÜZ LEVHA ÜZERİNDE PARALEL AKIŞ

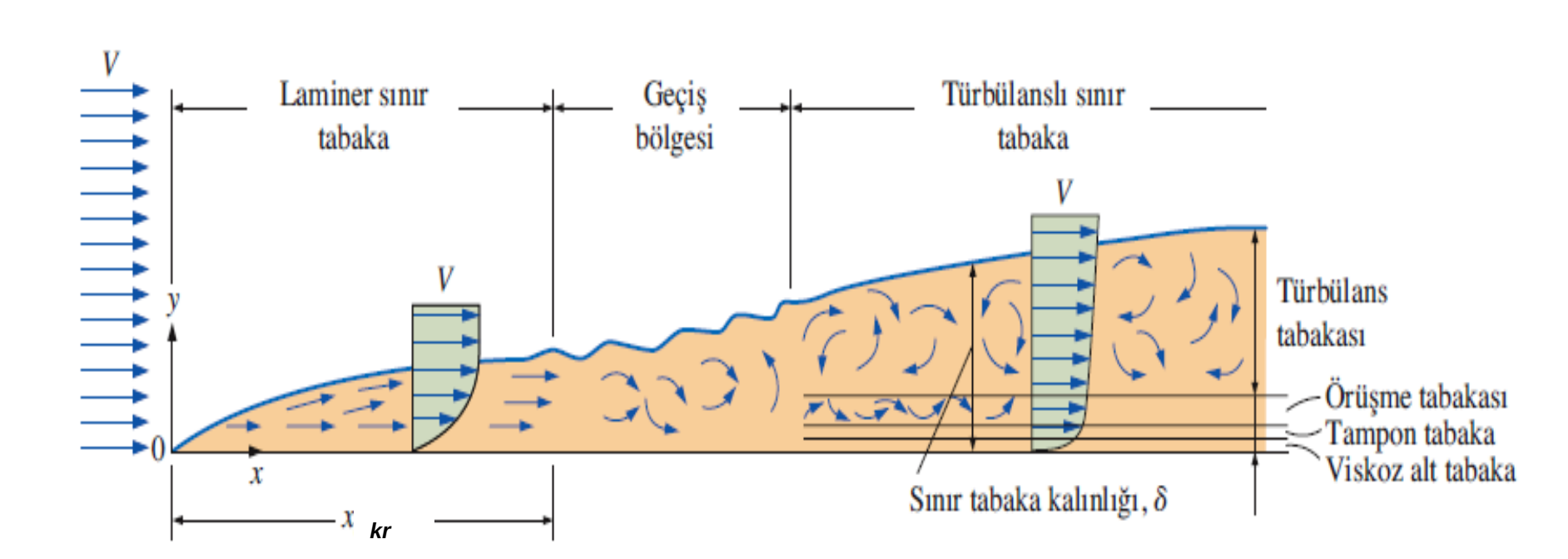
Hız Sınır Tabakası: Akışkan viskozitesinin neden olduğu viskoz kayma kuvvetlerinin hissedildiği, levha üzerinde δ ile sınırlanan akış bölgesidir.

Sınır tabaka kalınlığı δ tipik olarak yüzeyden hızın $u = 0.99V$ olduğu noktaya olan y uzaklığı olarak tanımlanır

u = 0.99V hayali çizgisi levha üzerindeki akışı iki bölgeye ayırır:

Sınır tabaka bölgesi: Viskoz sürtünme etkilerinin ve hız değişimlerinin önemli olduğu bölgedir.

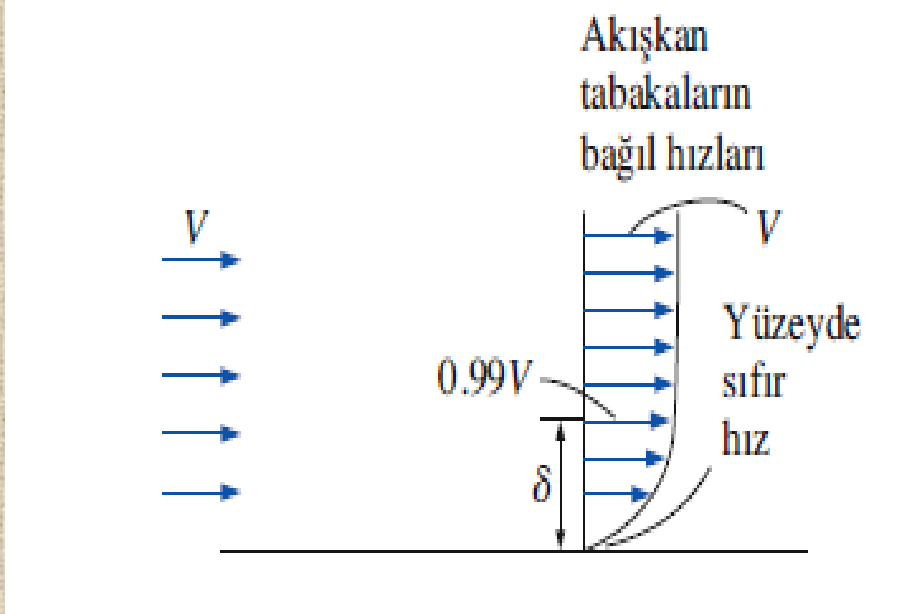
Dönümsüz akış bölgesi: Sürtünme etkilerinin ihmal edilebilir olduğu ve hızın yaklaşık olarak sabit kaldığı bölgedir.



Düz levha üzerindeki akışta sınır tabakanın gelişimi ve farklı akış rejimleri (çizim ölçeksizdir)

Türbülanslı sınır tabakanın, çeperden olan uzaklığa göre karakterize edilen 4 bölgeden oluştuğu düşünülebilir:

- Viskoz alt tabaka
- Tampon tabaka
- Örtüşme tabakası
- Türbülanslı tabaka



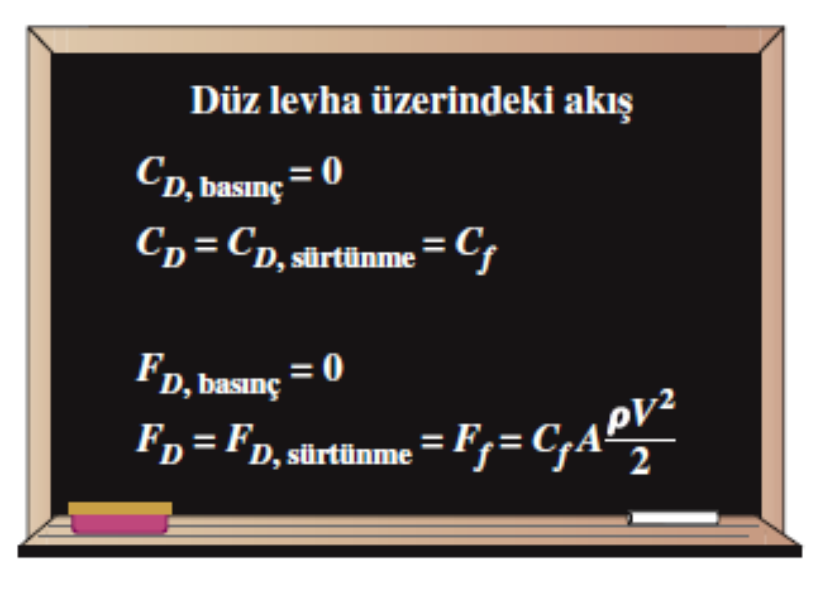
Kaymazlık şartından ve sürtünmeden dolayı bir yüzey üzerinde sınır tabakanın oluşumu.

Düz levha için sürtünme katsayısı:

$$C_D = C_{D,\,\text{sürtünme}} = C_f$$

Düz levha için sürtünme kuvveti:

$$F_D = F_f = \tfrac{1}{2} C_f A \rho V^2$$



Düz levha üzerindeki paralel akış için basınç direnci sıfırdır ve dolayısıyla direnç katsayısı sürtünme katsayısına ve direnç kuvveti de sürtünme kuvvetine eşittir.

Laminerden türbülanslı akışa geçiş; *yüzeyin şekline, yüzey pürüzlülüğüne, yukarıakım hızına, yüzey sıcaklığına ve akışkanın türüne* ve daha birçok parametreye bağlıdır ve en iyi şekilde Reynolds sayısı ile karakterize edilebilir.

Düz levhanın giriş (hücum) kenarından *x* kadar uzaklıktaki Reynolds sayısı aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\mathrm{Re}_x = \frac{\rho V x}{\mu} = \frac{V x}{\nu}$$

V yukarıakım hızı

x geometrinin karakteristik uzunluğu (düz levha için levhanın akım yönündeki uzunluğudur)

Pürüzsüz düz levha üzerindeki akışta laminerden türbülansa geçiş Re ≈ 1 x10^5 civarında başlar, ancak akış Reynolds sayısı çok daha yüksek değerlere ulaşmadan (tipik olarak 3x10^6) tam türbülanslı hale gelmez.

Mühendislik analizlerinde düz levha için genel olarak kabul edilmiş kritik Reynolds sayısı değeri aşağıdaki gibi verilir:

$$\mathrm{Re}_{x,\,\mathrm{kr}} = \frac{\rho V x_{\mathrm{kr}}}{\mu} = 5 \times 10^5$$

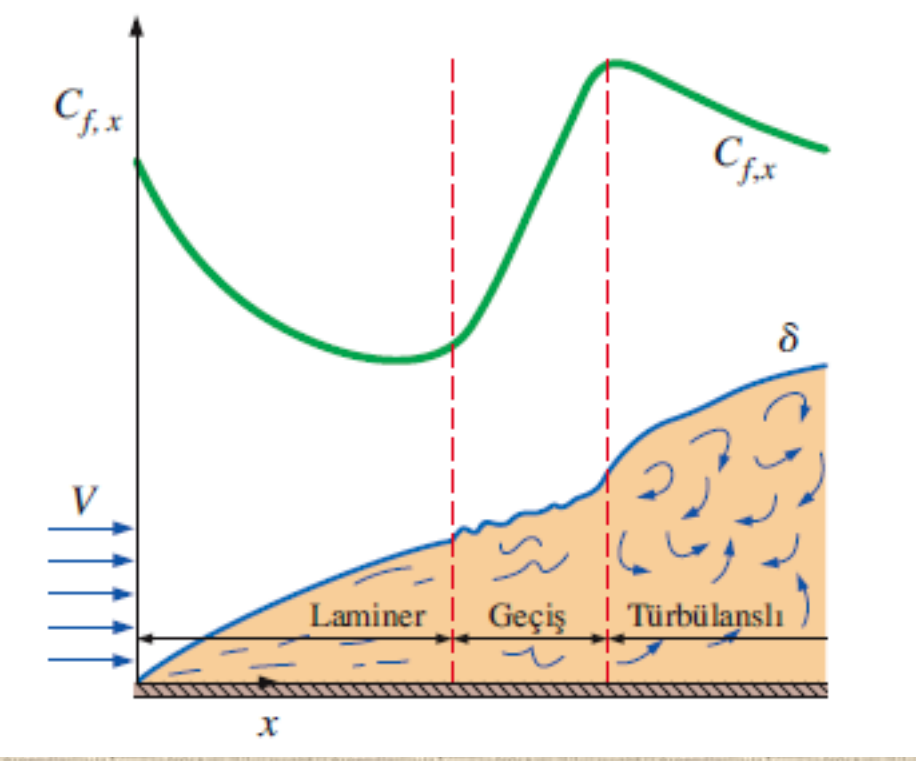
Düz levha için mühendislikteki kritik Reynolds sayısının gerçek değeri, yüzey pürüzlülüğüne, türbülans seviyesine (şiddetine) ve yüzey boyunca basıncın değişimine bağlı olarak 10^5'ten 3×10^6'ya kadar değişebilir.

Sürtünme Katsayısı

Düz bir levha üzerindeki laminer akışta sürtünme katsayısı, kütlenin ve lineer momentumun korunumu denklemlerini sayısal olarak çözmek suretiyle teorik olarak bulunabilir.
Türbülanslı akışta sürtünme katsayısı deneysel olarak belirlenmek ve ampirik Korelasyonlarla ifade edilmek durumundadır.

$$C_f = \frac{1}{L}\int_0^L C_{f,x}\,dx$$

$$\mathrm{Re}_x = Vx/\nu$$



Düz levha üzerinde yerel sürtünme katsayısının değişimi. Bu şematik çizimde sınır tabakanın düşey ölçeğinin çok abartılı olarak çizildiğini unutulmamalıdır.

$$\textit{Laminer:}\quad \delta = \frac{4.91x}{\mathrm{Re}_x^{1/2}} \quad \text{ve} \quad C_{f,x} = \frac{0.664}{\mathrm{Re}_x^{1/2}}, \quad \mathrm{Re}_x \lesssim 5\times 10^5$$

$$\textit{Türbülanslı:}\quad \delta = \frac{0.38x}{\mathrm{Re}_x^{1/5}} \quad \text{ve} \quad C_{f,x} = \frac{0.059}{\mathrm{Re}_x^{1/5}}, \quad 5\times 10^5 \lesssim \mathrm{Re}_x \lesssim 10^7$$

Levhanın tümü üzerinde ortalama sürtünme katsayısı

Laminer: $$C_f = \frac{1.33}{\mathrm{Re}_L^{1/2}} \qquad \mathrm{Re}_L \lesssim 5 \times 10^5$$

Türbülanslı: $$C_f = \frac{0.074}{\mathrm{Re}_L^{1/5}} \qquad 5 \times 10^5 \lesssim \mathrm{Re}_L \lesssim 10^7$$

$$\mathrm{Re}_{cr} = 5 \times 10^5 = Vx_{cr}/\nu$$

$$C_f = \frac{1}{L}\int_0^L C_{f,x}\, dx$$

$$= \frac{1}{L}\int_0^L \frac{0.664}{\mathrm{Re}_x^{1/2}}\, dx$$

$$= \frac{0.664}{L}\int_0^L \left(\frac{Vx}{\nu}\right)^{-1/2} dx$$

$$= \frac{0.664}{L}\left(\frac{V}{\nu}\right)^{-1/2} \left.\frac{x^{1/2}}{\frac{1}{2}}\right|_0^L$$

$$= \frac{2\times 0.664}{L}\left(\frac{V}{\nu L}\right)^{-1/2}$$

$$= \frac{1.328}{\mathrm{Re}_L^{1/2}}$$

Laminer akış bölgesi de dikkate alındığında:

$$C_f = \frac{1}{L}\left(\int_0^{x_{cr}} C_{f,x,\,\text{laminer}}\, dx + \int_{x_{cr}}^L C_{f,x,\,\text{türbülanslı}}\, dx\right)$$

$$C_f = \frac{0.074}{\mathrm{Re}_L^{1/5}} - \frac{1742}{\mathrm{Re}_L} \qquad 5 \times 10^5 \le \mathrm{Re}_L \le 10^7$$

Yüzey üzerindeki ortalama sürtünme katsayısı, yerel sürtünme katsayısının tüm yüzey üzerinden integre edilmesi ile bulunur. Burada gösterilen değerler düz levha üzerindeki laminer sınır tabaka içindir.

Laminer akışta, sürtünme katsayısı sadece Reynolds sayısına bağlıdır yüzey pürüzlülüğünün etkisi yoktur.

Türbülanslı akışta, yüzey pürüzlülüğü, sürtünme katsayısının Reynolds sayısından bağımsız ve sadece yüzey pürüzlülüğünün bir fonksiyonu olduğu tamamen pürüzlü türbülanslı rejimdeki bir noktaya kadar, sürtünme katsayısının birkaç kat aratmasına neden olur.

Tamamen pürüzlü türbülanslı akış:

$$C_f = \left(1.89 - 1.62 \log \frac{\varepsilon}{L}\right)^{-2.5}$$

Bağıl Pürüzlülük, ε/L	Sürtünme Katsayısı, C_f
0.0*	0.0029
1×10^{-5}	0.0032
1×10^{-4}	0.0049
1×10^{-3}	0.0084

* Re = 10^7 olan pürüzsüz yüzey. Diğer değerler tamamen pürüzlü akışlar için Denklem 11-23'ten hesaplanmıştır.

ε yüzey pürüzlülüğü

L levhanın akım yönündeki uzunluğu.

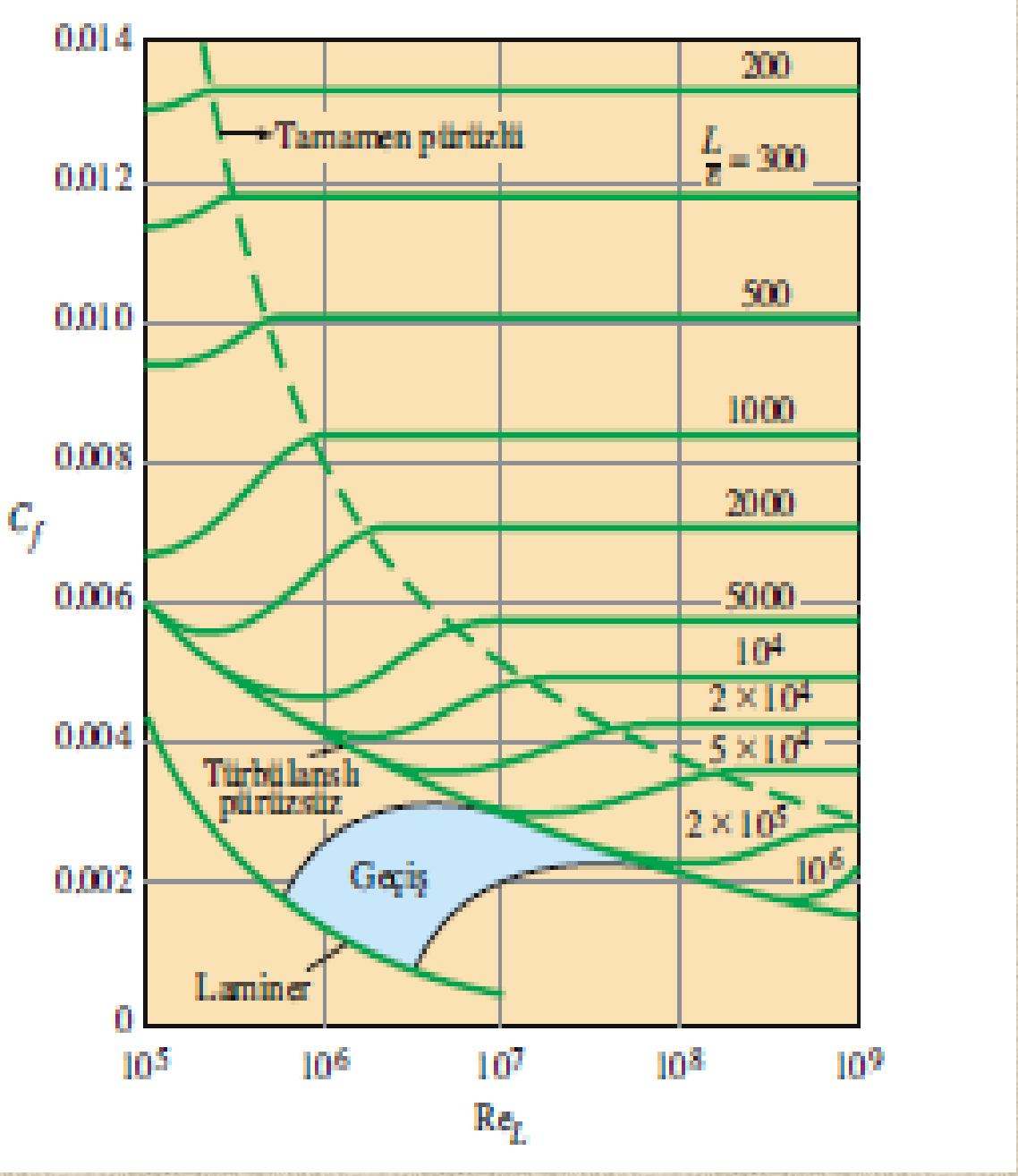
Bu bağıntı pürüzlü (özellikle $\varepsilon/L > 10^4$ ise) yüzeylerdeki Re > 10^6 halindeki türbülanslı akış için kullanılabilir.

Türbülanslı akışta yüzey pürüzlülüğü sürtünme katsayısının birkaç kat artmasına neden olabilir.

Türbülanslı akışta C_f pürüzlülükle birkaç kat artar.

Tamamen pürüzlü bölgede C_f Reynolds sayısından bağımsızdır.

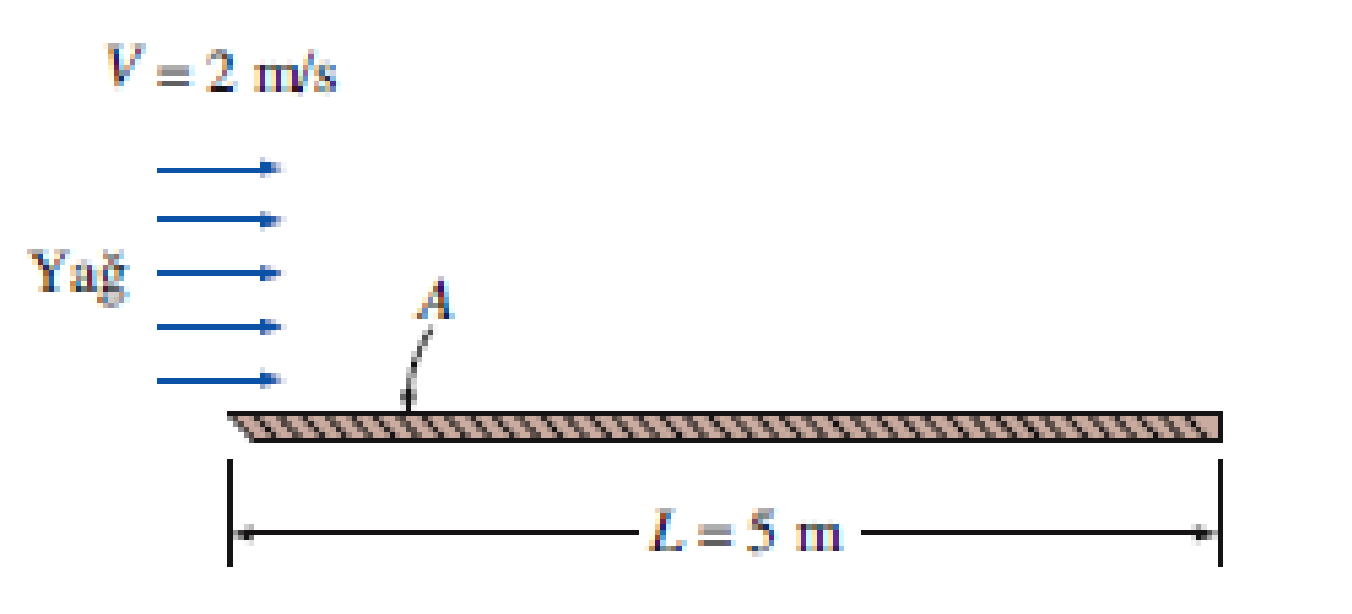
Bu diyagram boru akımları için verilen Moody diyagramının düz levha versiyonudur.



Pürüzlü ve pürüzsüz düz levhalar üzerindeki paralel akış için sürtünme katsayıları.

ÖRNEK 11–3 Düz Levha Üzerindeki Sıcak Yağ Akışı

Sıcaklığı 40 °C olan motor yağı, 5 m uzunluğundaki düz levha üzerinde 2 m/s'lik serbest akım hızı ile akmaktadır (Şekil 11–32). Levhanın birim genişliğine etkiyen direnç kuvvetini bulunuz.



ÇÖZÜM Motor yağı düz levha üzerinde akmaktadır. Birim genişlikteki levha üzerindeki direnç kuvveti bulunacaktır.

Kabuller **1** Akış daimi ve sıkıştırılamazdır. **2** Kritik Reynolds sayısı $Re_{kr} = 5 \times 10^5$.

Özellikler 40 °C'deki motor yağının yoğunluğu ve kinematik viskozitesi sırasıyla $\rho = 876$ kg/m^3 ve $\nu = 2.485 \times 10^{-4}$ m^2/s'dir.

Analiz $L = 5$ m olduğu dikkate alınarak levhanın sonundaki Reynolds sayısı,

$$\mathrm{Re}_L = \frac{VL}{\nu} = \frac{(2\ \mathrm{m/s})(5\ \mathrm{m})}{2.485 \times 10^{-4}\ \mathrm{m^2/s}} = 4.024 \times 10^4$$

olarak bulunur. Bu değer kritik Reynolds sayısından küçüktür. Dolayısıyla levhanın tamamı üzerindeki akış laminerdir ve ortalama sürtünme katsayısı,

$$C_f = 1.328\mathrm{Re}_L^{-0.5} = 1.328 \times (4.024 \times 10^4)^{-0.5} = 0.00662$$

olur. Basınç direncinin sıfır ve dolayısıyla düz levha üzerindeki paralel akışta $C_D = C_f$ olduğu göz önüne alınarak birim genişlik için levha üzerine etkiyen direnç kuvveti,

$$F_D = C_f A\frac{\rho V^2}{2} = 0.00662(5 \times 1\ \mathrm{m^2})\frac{(876\ \mathrm{kg/m^3})(2\ \mathrm{m/s})^2}{2}\left(\frac{1\ \mathrm{N}}{1\ \mathrm{kg\cdot m/s^2}}\right) = \mathbf{58.0\ N}$$

olarak bulunur. Levhanın tüm yüzeyine etki eden toplam direnç kuvveti, yukarıdaki değeri levha genişliği ile çarparak bulunabilir.

İrdeleme Birim genişlik başına bulunan kuvvet, kütlesi yaklaşık 6 kg olan bir cismin ağırlığına karşılık gelmektedir. Dolayısıyla levhanın hareketini engellemek amacıyla levhaya eşit ancak zıt yönlü kuvvet uygulayan bir kimse, 6 kg'lık bir kütleyi düşürmemek için gerekli kuvveti uyguluyor gibi hissedecektir.

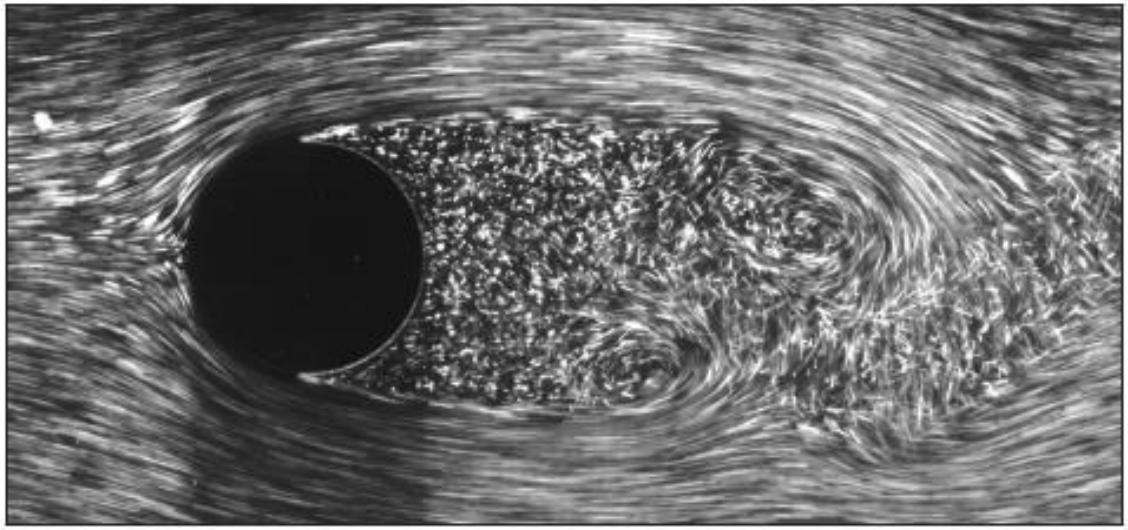
11–6 ■ SİLİNDİR VE KÜRE ÜZERİNDEN AKIŞLAR

Silindir ve küre üzerinden akış ile uygulamada sıklıkla karşılaşılır.

Bir gövde-borulu ısı değiştiricisinde boruların içerisinden *iç akış*, üzerinden ise *dış akış* söz konusudur.

Futbol, tenis ve golf gibi birçok spor dalında küresel toplar üzerinden akış vardır.

Dairesel silindir veya kürenin karakteristik uzunluğu olarak *dış çap D* alınabilir. Dolayısıyla Reynolds sayısı $Re = VD/\nu$ olarak tanımlanır. Bu ifadede V akışkanın silindire veya küreye yaklaşırken sahip olduğu üniform hızdır. Dairesel silindir veya küre karşısındaki akışın kritik Reynolds sayısı $Re_{kr} \cong 2 \times 10^5$ civarındadır. Yani sınır tabaka içerisindeki akış rejimi $Re \lesssim 2 \times 10^5$ civarında laminer, $2 \times 10^5 \lesssim Re \lesssim 2 \times 10^6$ aralığında geçiş bölgesi ve $Re \gtrsim 2 \times 10^6$ için ise tamamen türbülanslı olur.



Yukarıakım hızları çok düşük olduğunda ($Re \lesssim 1$) akışkan silindir etrafına tamamen sarılır.

Art izi bölgesindeki akış, periyodik vorteks oluşumu ve düşük basınçlar ile karakterize edilir.

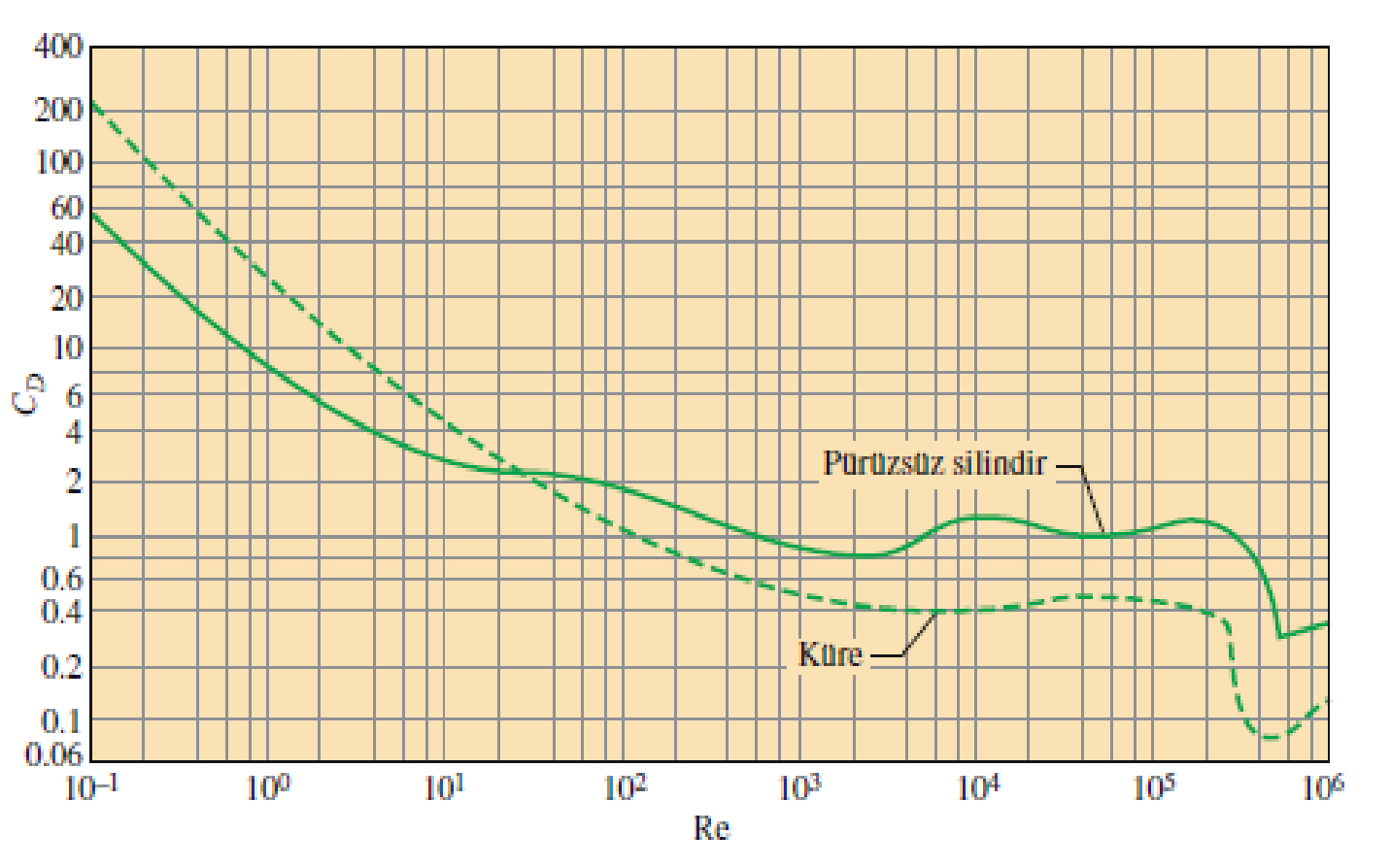
Türbülanslı art izinde laminer sınır tabakanın ayrılması; Re = 2000'de dairesel silindir üzerinden akış.

Silindir veya küre üzerindeki akışta hem *sürtünme direnci* hem de *basınç direnci* önemli olabilir.

Durma noktası yakınındaki yüksek basınç ve diğer tarafta art izindeki düşük basınç, akış yönünde cisim üzerinde net bir kuvvet oluşturur.

Direnç kuvveti; düşük Reynolds sayılarında (Re $\lesssim$ 10) büyük oranda sürtünme direncinden, yüksek Reynolds sayılarında (Re $\gtrsim$ 5000) ise basınç direncinden ileri gelir.

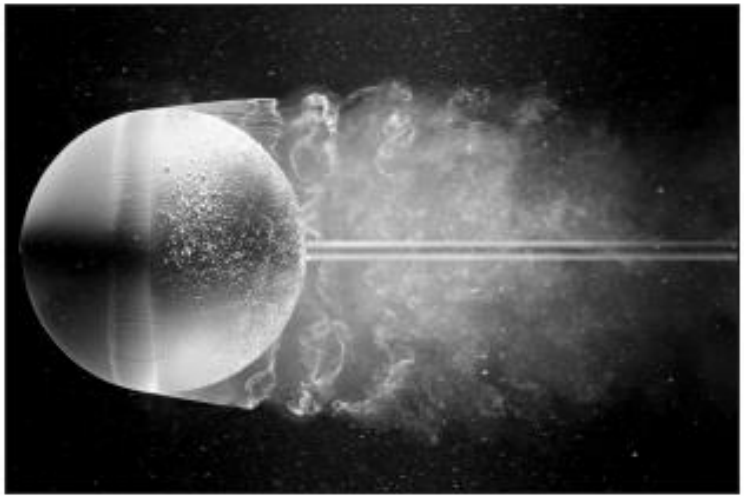
Aradaki Reynolds sayılarında her iki etki de önemlidir.



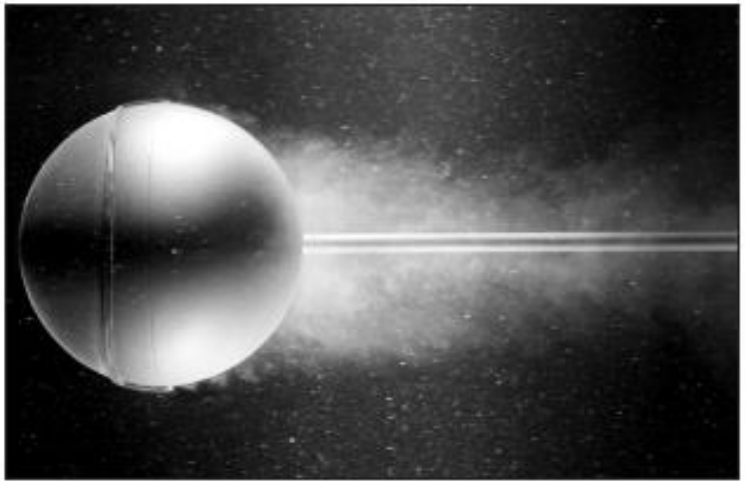
Pürüzsüz dairesel silindir ve pürüzsüz küre üzerindeki çapraz akış için ortalama direnç katsayısı.

C_D Direnç Katsayısı Eğrilerinden Gözlemler

- Re $\lesssim$ 1 için sürünme akışı vardır ve Reynolds sayısı arttıkça direnç katsayısı azalır. Küre için C_D = 24/Re'dir. Bu bölgede akış ayrılması yoktur.
- Re $\cong$ 10 civarında cismin arkasında akış ayrılması ve Re $\cong$ 90 civarında ise vorteks kopması başlar. Re $\cong 10^3$ civarına kadar Reynolds sayısı büyüdükçe ayrılma bölgesi büyür. Bu noktada direnç çoğunlukla (yüzde 95'i civarında) basınç direncinden kaynaklanır. 10 $\lesssim$ Re $\lesssim 10^3$ aralığında ise Reynolds sayısı büyüdükçe direnç katsayısı küçülmeye devam eder. (Direnç katsayısındaki azalma dirençte de mutlaka azalma olacağını göstermez. Direnç kuvveti hızın karesi ile doğru orantılıdır. Bu yüzden yüksek Reynolds sayılarında hızdaki artış, genellikle direnç katsayısındaki düşüş miktarından daha fazladır.)
- $10^3 \lesssim$ Re $\lesssim 10^5$ orta aralığında direnç katsayısı nispeten sabit kalır. Bu davranış küt cisimlerin ortak yönüdür. Bu aralıkta sınır tabakadaki akış laminerdir. Ancak silindiri veya küreyi geçen ayrılmış bölgedeki akış oldukça türbülanslı olup, geniş bir türbülans art izine sahiptir.
- $10^5 \lesssim$ Re $\lesssim 10^6$ aralığında bir yerde (çoğunlukla 2 x 10^5 civarında) direnç katsayısında ani düşüş meydana gelir. C_D'deki bu büyük azalma sınır tabakadaki akışın türbülanslı hale geliyor olmasından kaynaklanır. Bu durumda ayrılma noktası cismin arkasında daha da ileriye hareket eder ve art izinin boyutu ve dolayısıyla basınç direncinin büyüklüğü azalır. Bu ise akım çizgili cisimlerin tersine bir durumdur. Akım çizgili cisimlerde sınır tabaka içerisindeki akış türbülanslı olduğu zaman direnç katsayısında (çoğunlukla sürtünme direncinden dolayı) artış olur.
- 2 x $10^5 \lesssim$ Re $\lesssim$ 2 x 10^6 aralığında bir geçiş rejimi vardır, bu aralıklardaki akışlarda C_D, bir minimum değere düşer ve daha sonra yavaşça türbülanslı akıştaki son değerine yükselir.



(*a*)



(*b*)

Sınır tabaka *laminer*ken akış ayrılması θ = 80° civarında, *türbülanslı* iken ise θ = 140° civarında oluşur (bu açı silindirin ön durma noktasından itibaren ölçülür)

Türbülanslı akışta ayrılmanın gecikmesi, enine yönde akışkandaki şiddetli çalkantılardan kaynaklanır ve bu durum ayrılma olmadan önce türbülanslı sınır tabakanın yüzey boyunca daha uzağa gitmesine imkan sağlar. Dolayısıyla bu ayrılma gecikmesi daha dar art izi ve daha küçük basınç direncine neden olur.

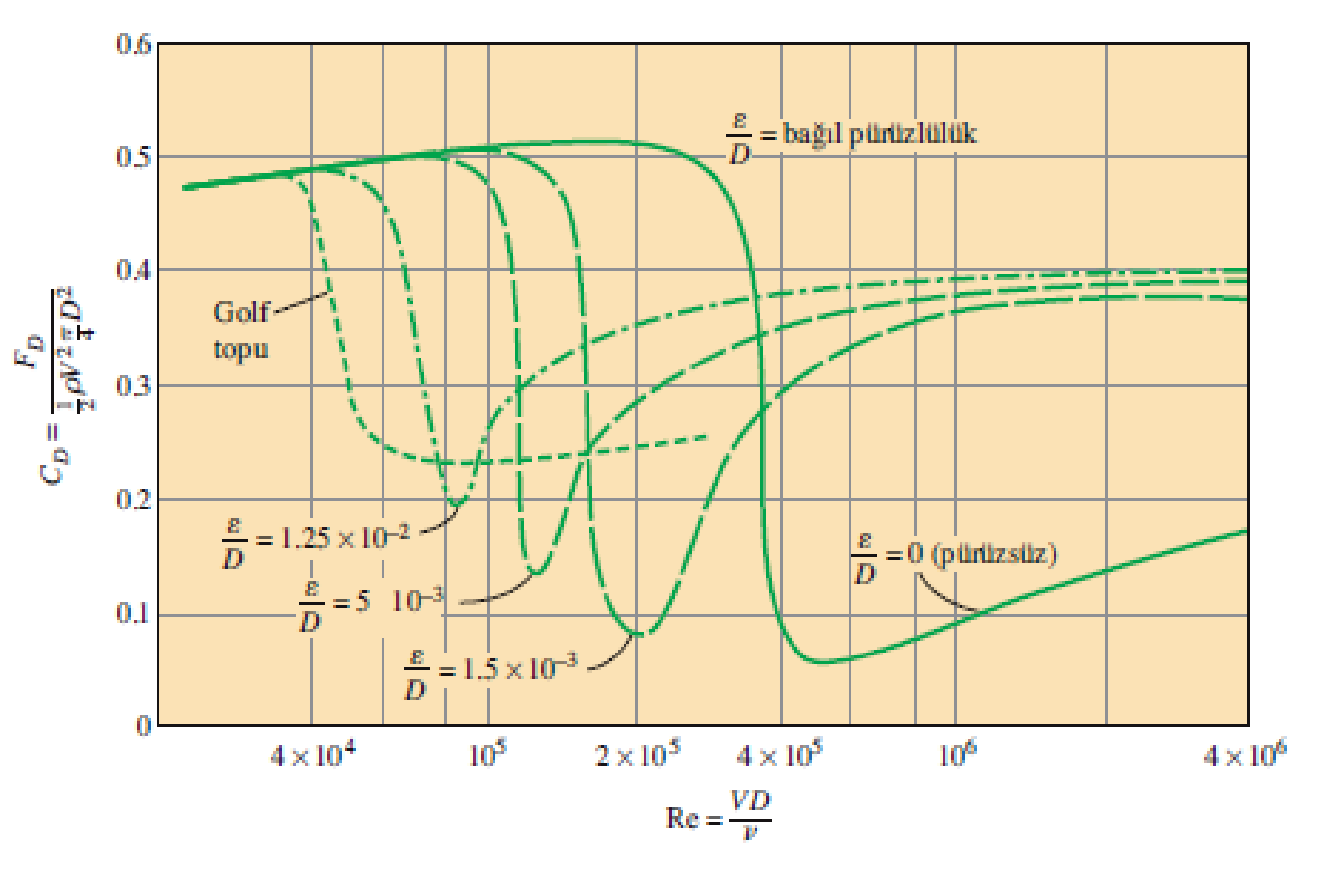
(a) Re = 15 000'de pürüzsüz küre ve (b) Re = 30 000'de engel teli takılı küre üzerindeki akış görüntüleri. İki fotoğraf karşılaştırıldığında sınır tabaka ayrılmasındaki gecikme açıkça görülmektedir.

Yüzey Pürüzlülüğünün Etkisi

Yüzey pürüzlülüğü türbülanslı akışta genellikle direnç katsayısını arttırır.

Bu durum bilhassa akım çizgili tasarımlı cisimler için geçerlidir.

Ancak dairesel silindir ve küre gibi küt cisimlerde yüzey pürüzlülüğündeki artış Reynolds sayısına bağlı olarak gerçekte direnç katsayısını *azaltabilir*.



Yüzey pürüzlülüğünün bir kürenin direnç katsayısı üzerindeki etkisi.

	C_D	
Re	Pürüzsüz Yüzey	Pürüzlü Yüzey, $\varepsilon/D = 0.0015$
2×10^5	0.5	0.1
10^6	0.1	0.4

Yüzey pürüzlülüğü, Reynolds sayısının değerine bağlı olarak küresel bir cismin direnç katsayısını arttırabilir veya azaltabilir.

Yüzeyin pürüzlü hale getirilmesi direnci azaltmakta büyük bir üstünlük sağlayacak şekilde kullanılabilir.

Golf topları, düşük Reynolds sayısında türbülanslı akışı başlatmak için bilinçli olarak pürüzlü hale getirilir. Böylece sınır tabakadaki türbülanslı akışın başlangıcında direnç katsayısında görülen keskin bir düşüşün üstünlüğü elde edilir (golf toplarının genelde hız aralığı 15-150 m/s'dir ve Reynolds sayısı 4 x 10^5'ten azdır). Üzeri oyuklarla kaplı golf topunun kritik Reynolds sayısı 4 x 10^4 civarındadır. Bu Reynolds sayısında türbülanslı akışın ortaya çıkması golf topunun direnç katsayısını yarıya indirir. Bu ise, vuruş yapıldığında top daha uzağa gidecek demektir.

Ancak masa tenisi topu için, hızlar çok düşük ve tenis topu çok küçüktür, top hiçbir zaman türbülanslı akış aralığındaki hızlara asla ulaşamaz. Bu nedenle masa tenisi toplarının yüzeyleri pürüzsüz yapılır.

Direnç kuvveti bağıntısı:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

Silindir ve küre için ön bakış alanı:

$$A = LD$$

$$A = \pi D^2/4$$

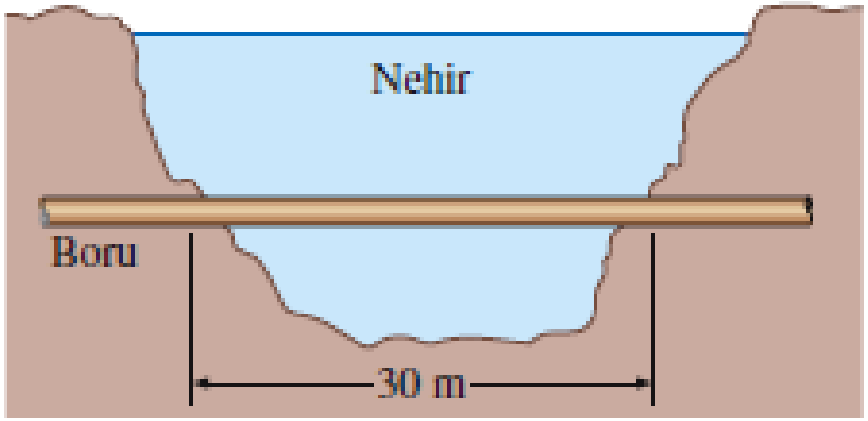
ÖRNEK 11–4 Nehirdeki Boruya Etkiyen Direnç Kuvveti

Dış çapı 2.2 cm olan bir boru 30 m genişlikteki bir nehirden suya tamamen batmış bir şekilde geçmektedir (Şekil 11–38). Suyun ortalama hızı 4 m/s ve su sıcaklığı 15 °C'dir. Nehrin boruya uyguladığı direnç kuvvetini bulunuz.

ÇÖZÜM Bir boru nehir altından döşenmiştir. Boru üzerine etki eden direnç kuvveti bulunacaktır.

Kabuller **1** Borunun dış yüzeyi pürüzsüzdür ve böylece direnç katsayısını bulmak için Şekil 11–34 kullanılabilir. **2** Nehirdeki su akışı daimidir. **3** Su akışının yönü boruya diktir. **4** Nehir akışındaki türbülans dikkate alınmayacaktır.

Özellikler 5 °C'deki suyun yoğunluğu ve dinamik viskozitesi $\rho = 999.1$ kg/m^3 ve $\mu = 1.138 \times 10^{-3}$ kg/m·s.



Analiz $D = 0.022$ m m olduğu dikkate alınırsa Reynolds sayısı,

$$\mathrm{Re} = \frac{VD}{\nu} = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{(999.1\ \mathrm{kg/m^3})(4\ \mathrm{m/s})(0.022\ \mathrm{m})}{1.138 \times 10^{-3}\ \mathrm{kg/m{\cdot}s}} = 7.73 \times 10^4$$

olarak hesaplanır. Bu değere karşılık gelen direnç katsayısı Şekil 11–34'ten $C_D = 1.0$ olarak elde edilir. Ayrıca silindiri geçen akışın ön bakış alanı $A = LD$'dir. Buna göre boruya etki eden direnç kuvveti aşağıdaki gibi elde edilir:

$$F_D = C_D A \frac{\rho V^2}{2} = 1.0(30 \times 0.022\ \mathrm{m}^2)\frac{(999.1\ \mathrm{kg/m^3})(4\ \mathrm{m/s})^2}{2}\left(\frac{1\ \mathrm{N}}{1\ \mathrm{kg{\cdot}m/s^2}}\right)$$

$$= 5275\ \mathrm{N} \cong \mathbf{5300\ N}$$

İrdeleme Bu kuvvet 500 kg'dan daha büyük bir cismin ağırlığına özdeştir. Bu nedenle nehrin boruya uyguladığı direnç kuvveti, aralarında 30 m bulunan iki ucundan destekli boruya asılmış 500 kg'dan daha büyük bir kütlenin ağırlığına eşdeğerdir. Eğer boru bu kuvvete karşı koyamıyorsa gerekli önlemler alınmalıdır. Eğer nehir daha hızlı akarsa veya nehirdeki türbülans çalkantıları daha önemli olursa direnç kuvveti daha da büyük olacaktır. Bu durumda boru üzerindeki daimi olmayan kuvvetler önemli hale gelebilir.

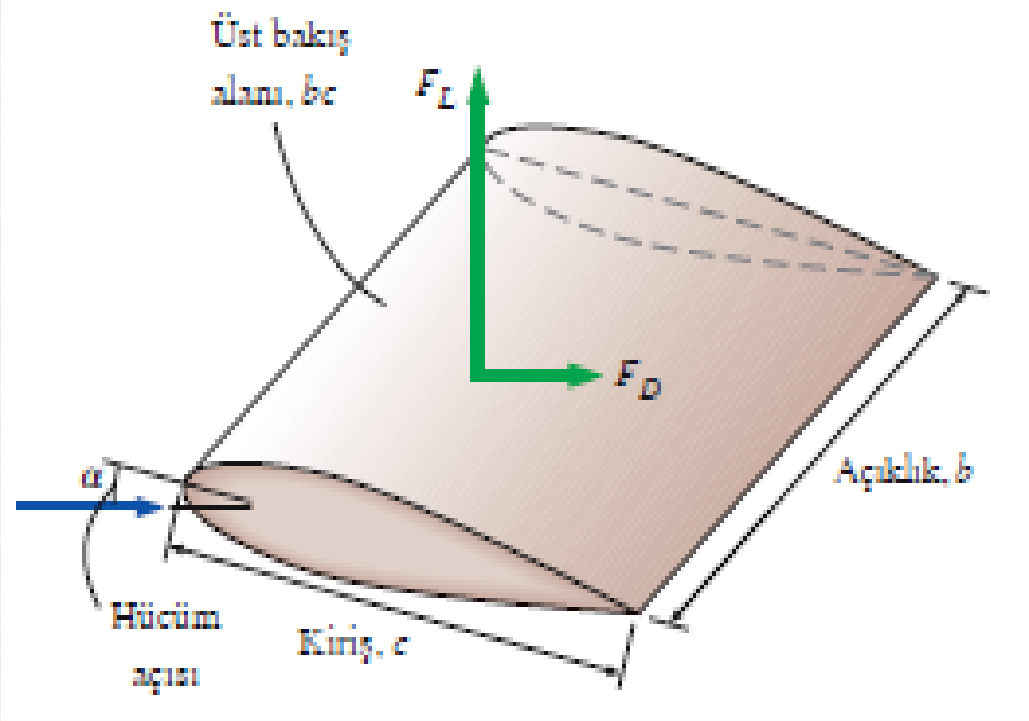
11–7 ■ KALDIRMA

Kaldırma: Kaldırma, viskoz ve basınç kuvvetlerinden dolayı akışa dik yöndeki net kuvvet bileşeni olup, kaldırma katsayısı ise aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

Kaldırma katsayısı

***A** üst bakış alanı:* cisme dik yönde yukarıdan bakan bir kişinin gördüğü alandır



Kanatla ilgili çeşitli terimlerin tanımı.

Bir uçak için kanat açıklığı iki kanadının uçları arasındaki toplam uzaklık olarak alınır. Bu uzunluk, kanatlar arasındaki gövde genişliğini de içerisine alır.

Birim üst bakış alanına düşen ortalama kaldırma kuvveti F_L/A'ya **kanat yükü** denir. Kanat yükü basit olarak uçak ağırlığının kanatların üst bakış alanına oranıdır (çünkü sabit irtifa uçuşundaki kaldırma kuvveti uçağın ağırlığa eşittir).

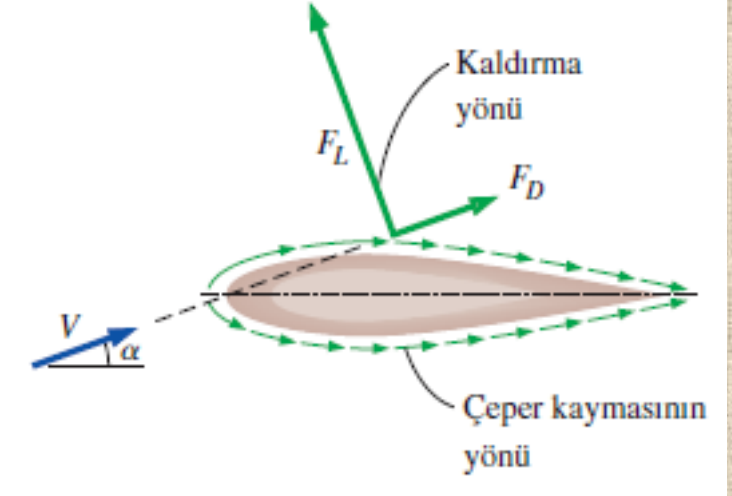
Uçak kanatları direnci minimumda tutarak, kaldırma sağlamak üzere özel olarak tasarlanırlar.

Yarış otomobillerindeki rüzgârlıklar (hava yönlendirici kanatlar) ve ters kanatlar gibi bazı parçalar ise kaldırmayı önlemek, hatta otomobilin çekişini ve kontrolünü iyileştirmek için yere baskı yapmak üzere negatif kaldırma oluşturma amaçlı tasarlanırlar.

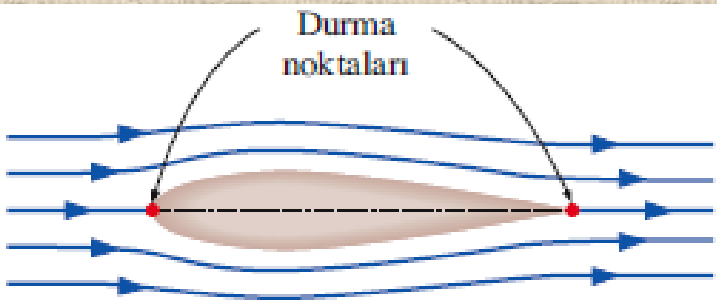
Pratikte kaldırmanın tamamen cismin yüzeyindeki basınç dağılımından kaynaklandığı düşünülebilir, dolayısıyla kaldırma üzerinde başlıca etkisi olan şey cismin şeklidir.

Kanatların tasarımındaki başlıca husus, üst yüzeydeki ortalama basıncı en küçük değerine indirmek, bu arada alt yüzeydekini de en büyük değerine çıkarmaktır. *Hızın yüksek olduğu yerlerde basınç düşük, hızın düşük olduğu yerlerde ise basınç yüksektir (Bernoulli teoremi).*

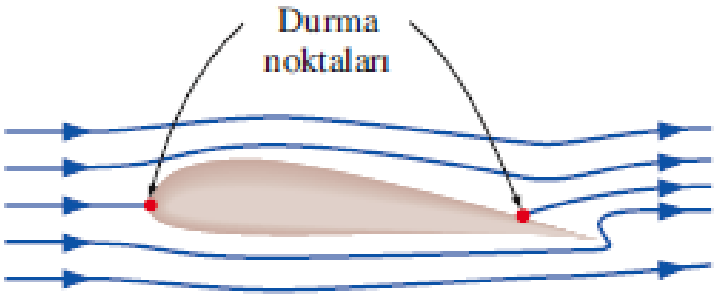
Kaldırma, orta seviyedeki hücum açılarında pratik olarak yüzey pürüzlülüğünden bağımsızdır, çünkü pürüzlülük çeper kayma gerilmesini etkiler basıncı etkilemez.



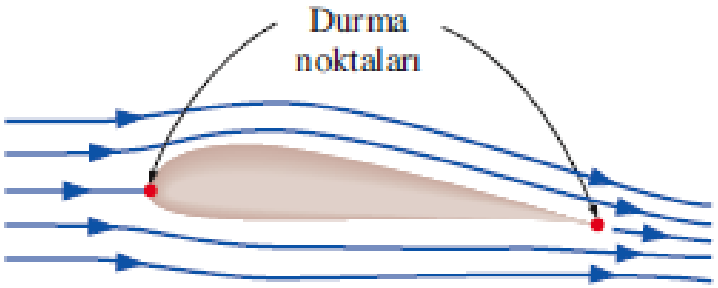
Kanatlarda kaldırmaya viskoz etkilerin katkısı çoğunlukla ihmal edilebilir, çünkü çeper kayma gerilmesi böyle cisimlerin yüzeylerine paraleldir ve dolayısıyla kaldırma yönüne hemen hemen diktir.



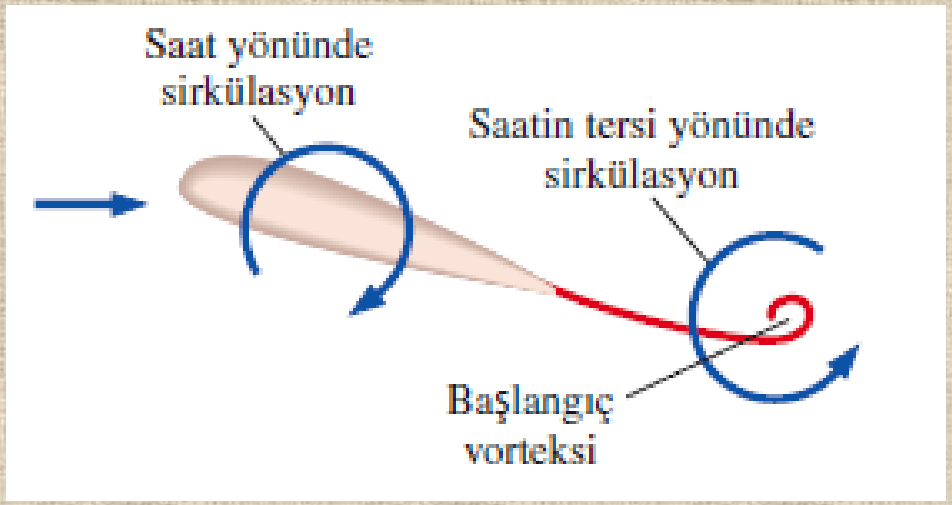
(*a*) Simetrik kanadı geçen dönümsüz akış (sıfır kaldırma)



(*b*) Simetrik olmayan kanadı geçen dönümsüz akış (sıfır kaldırma)

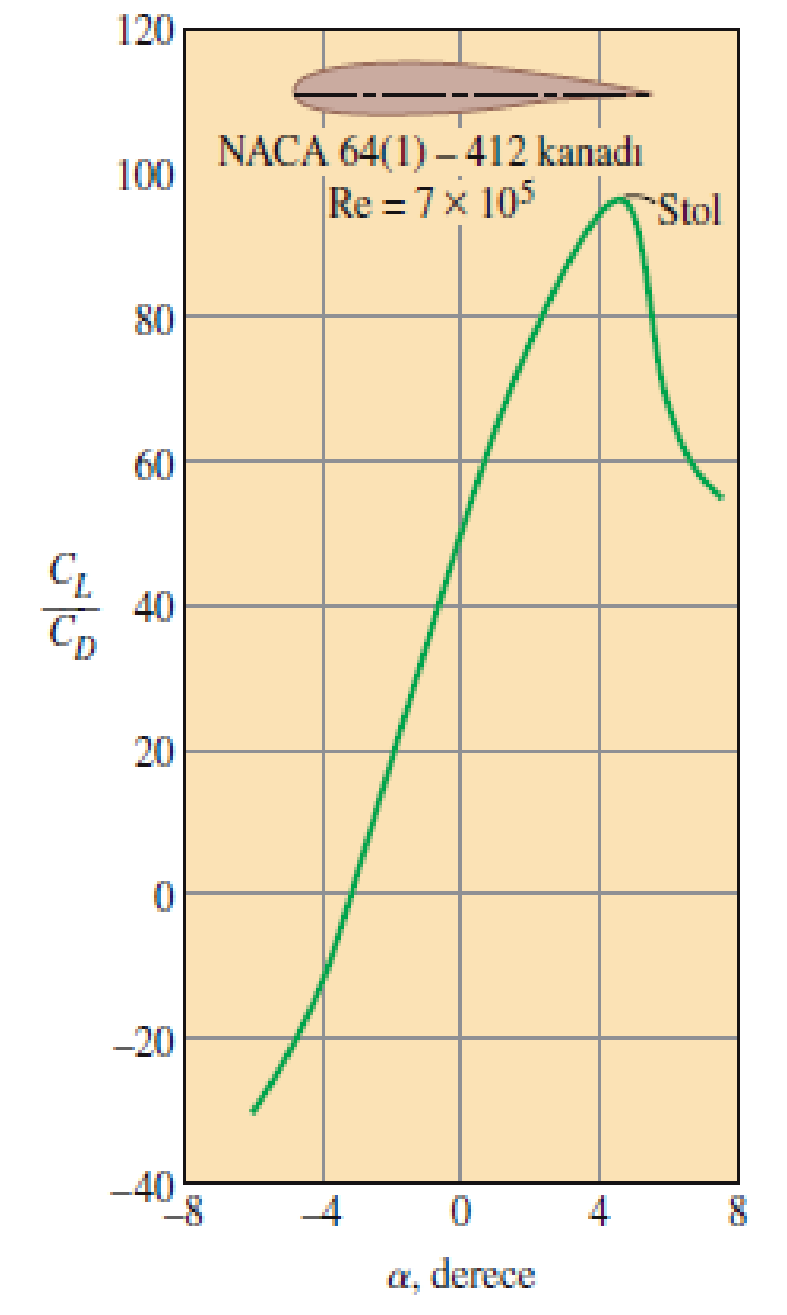


(*c*) Simetrik olmayan kanadı geçen gerçek akış (pozitif kaldırma)



Hücum açısındaki ani bir artıştan kısa bir süre sonra kanattan saatin tersi yönde başlangıç vorteksi kopar, bu esnada kanadın etrafında saat yönünde sirkülasyon ortaya çıkarak kaldırmaya yol açar.

Simetrik ve simetrik olmayan iki-boyutlu kanatları geçen dönümsüz ve gerçek akışlar.



Kanatların en yüksek kaldırmayı oluştururken en düşük dirence neden olması arzu edilir.

Bu nedenle kanatlarda performans ölçüsü **kaldırma/direnç oranı**dır. Bu oran, kaldırma ve direnç katsayılarının oranına, C_L/C_D eşittir.

C_L/C_D oranı kanat Stol durumuna gelinceye kadar hücum açısı ile artar ve kaldırmanın dirence oranının değeri iki-boyutlu bir kanat için 100 mertebesine kadar çıkabilir.

İki-boyutlu bir kanatta, kaldırma/direnç oranının hücum açısı ile değişimi.

Kanadın kaldırma ve direnç karakteristiklerini değiştirmenin aşikâr bir yolu hücum açısını değiştirmektir.

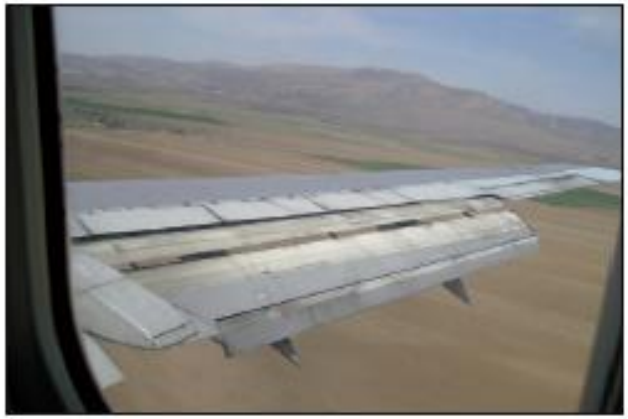
Bir uçak üzerinde kanatlar gövdeye göre sabit olduğundan, kaldırmayı arttırmak için uçağın tamamına eğim verilir.

Bir diğer yaklaşım, modern büyük uçaklarda yapıldığı gibi hareketli *giriş (hücum) ve çıkış (firar) kenarı kanatçıkları (flapları)* kullanarak kanadın şeklini değiştirmektir.

Kanatçıklar (flaplar) kalkış ve iniş sırasında kanadın şeklini değiştirerek kaldırmayı maksimum yapmak, ayrıca düşük hızlarda uçağın kalkış ve inişine imkân vermek için kullanılır.

Seyir yüksekliğine çıkıldığında kanatçıklar (flaplar) toplanır. Sabit yükseklikte seyrederken, kanatlar direnç katsayısının minimum olduğu ve yakıt tüketimini minimum yapan uygun kaldırma katsayılı “normal” şekline döner.

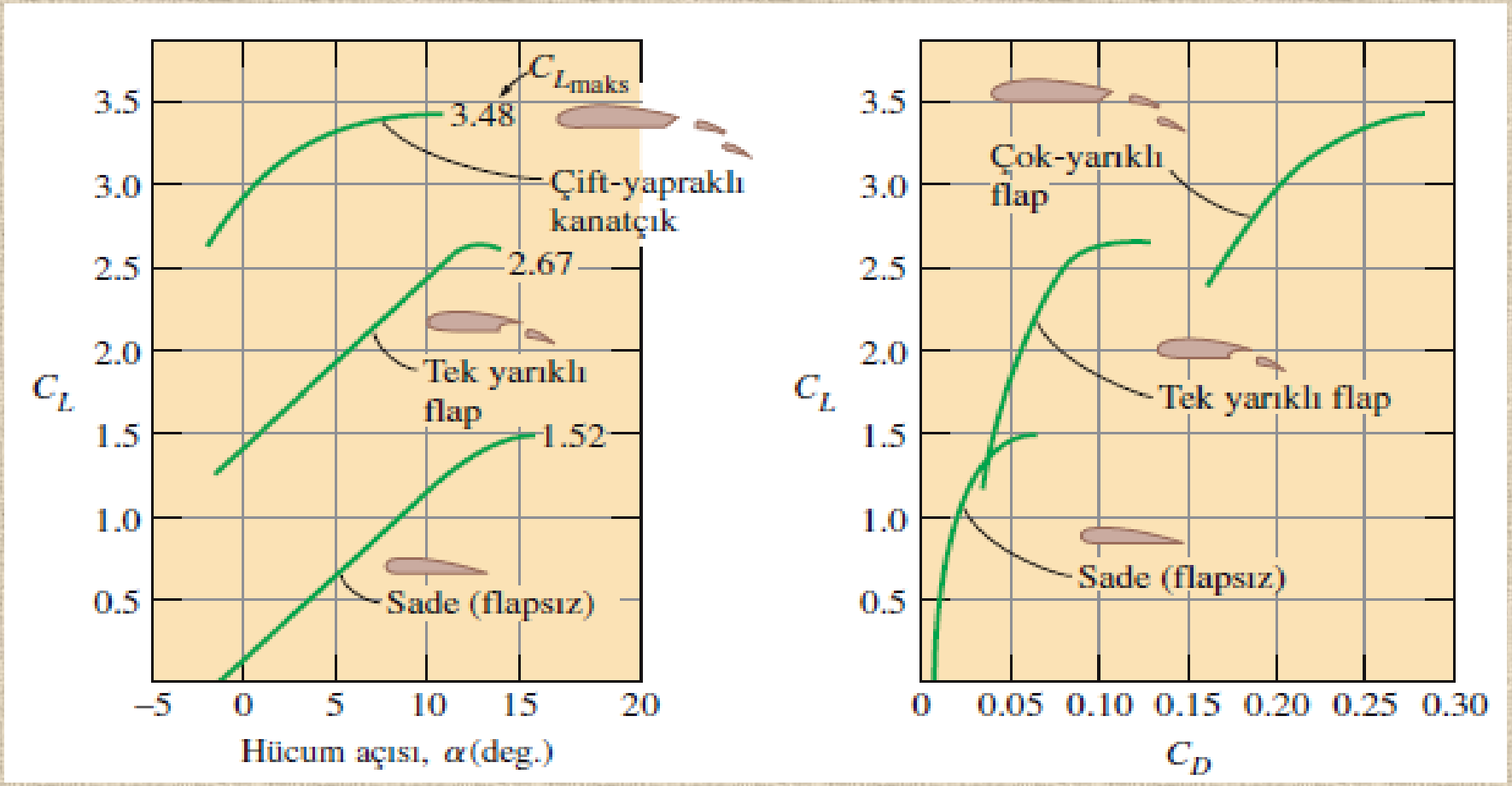
Normal çalışma esnasında küçük bir kaldırma katsayısının bile büyük miktarda kaldırmaya yol açabildiğine dikkat ediniz. Bunun nedeni, uçağın seyir hızının çok yüksek olması ve kaldırmanın da akış hızının karesi ile orantılı artmasıdır.



(*a*) Flaplar uzatılmış (kalkış hali)

(*b*) Flaplar toplanmış (seyir hali)

Kalkış ve iniş sırasında hareketli kanatçıklar (flaplar) kullanılmak suretiyle kanat şekli değiştirilerek kanadın kaldırma ve direnç karakteristikleri değiştirilebilir.



Kanatçıkların (flapların) kanadın kaldırma ve direnç katsayıları üzerinde etkisi.

Maksimum kaldırma katsayısı, kanatçığın olmadığı durumda 1.5 civarından, çift-yarıklı kanatçık durumu için 3.5'e kadar artar.

Maksimum direnç katsayısı, kanatçığın olmadığı bir kanat için 0.06'dan çift-yarıklı kanatçık durumu için 0.3'e kadar artar.

Kaldırma katsayısını maksimum yapmak için kanatçıkların hücum açısı arttırılabilir.

Minimum uçuş hızı, uçağın toplam ağırlığı *W*'nun kaldırmaya eşit ve $C_L = C_{L,maks}$ olması şartından bulunabilir. Buna göre,

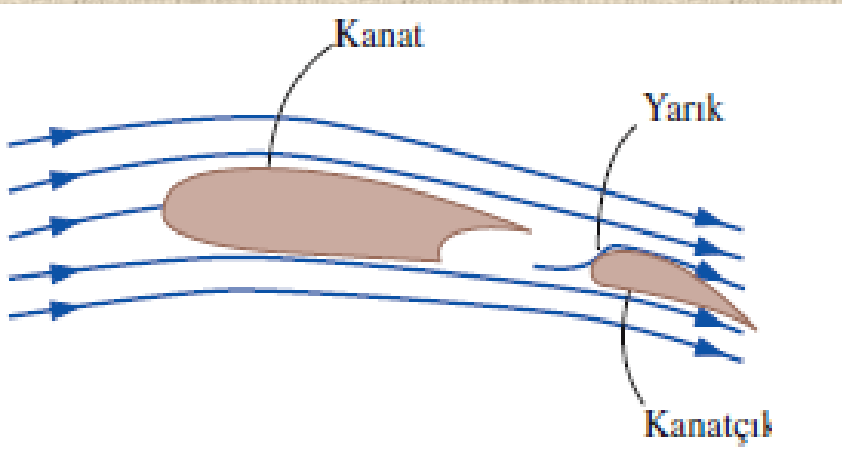
$$W = F_L = \tfrac{1}{2} C_{L,\,\text{maks}}\, \rho V_{\min}^2 A \quad \rightarrow \quad V_{\min} = \sqrt{\frac{2W}{\rho C_{L,\,\text{maks}}\, A}}$$

Verilen bir ağırlık için, kaldırma katsayısı ile kanat alanının çarpımı olan $C_{L,maks}A$'yı maksimum yaparak iniş veya kalkış hızı minimize edilebilir.

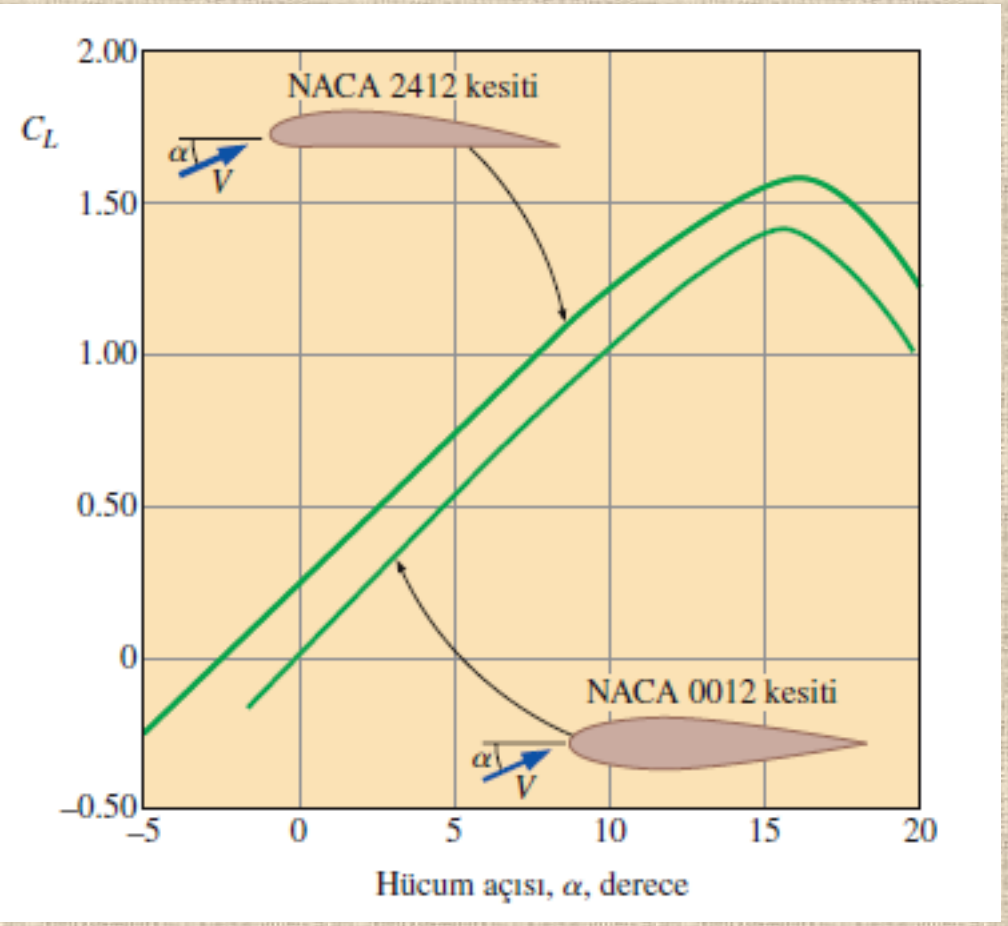
Bunu yapmanın bir yolu daha önce ifade edildiği gibi kanatçıklar (flaplar) kullanmaktır. Diğer bir yolu ise, Şekil 11–46'da gösterildiği gibi kanatçıklar arasında akış bölmeleri (yarıklar) bırakarak yapılabilen sınır tabaka denetimidir.

Sınır tabakanın kanatlar ve kanatçıkların üst yüzeyinden ayrılmasını engellemek için yarıklar (slotlar) kullanılır.

Bu ise havanın kanat altındaki yüksek basınç bölgesinden üst yüzeydeki alçak basınç bölgesine hareket etmesine izin verilerek yapılır.



Üst yüzeyden sınır tabakanın ayrılmasını engellemek ve kaldırma katsayısını yükseltmek için kullanılan tek yarıklı, kanatçıklı (flaplı) kanat.



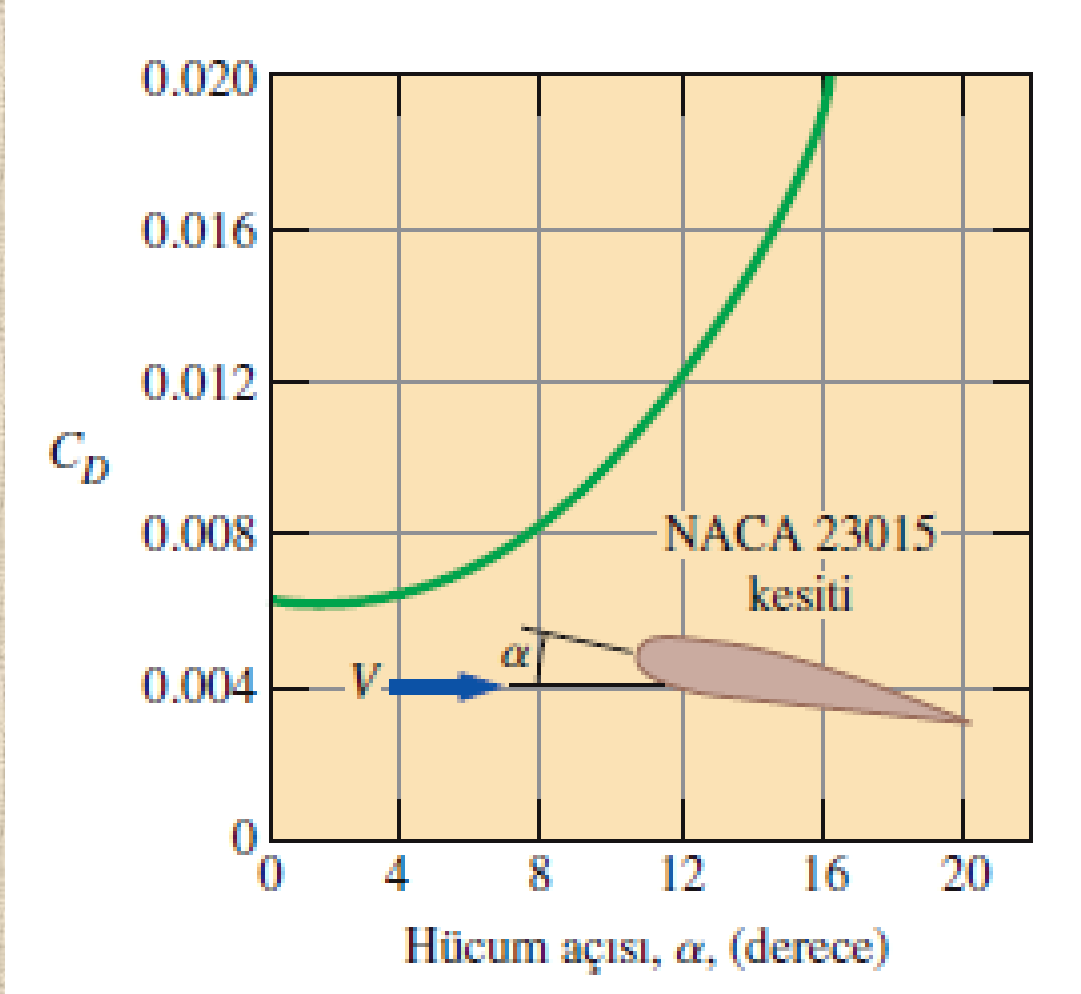
Simetrik ve simetrik olmayan kanatlar için kaldırma katsayısının hücum açısı ile değişimi.

Kaldırma katsayısı, artan α hücum açısı ile önce yaklaşık olarak doğrusal bir biçimde artarak α = 16° civarında en yüksek değerine ulaşır ve daha sonra ise keskin bir şekilde düşmeye başlar. Hücum açısının daha da artması ile kaldırmada oluşan bu azalmaya ***Stol (duracak hale gelme)*** denir ve kanadın üst yüzeyi üzerindeki geniş bir art izi bölgesinin oluşmasından ve akışın ayrılmasından kaynaklanır. Stol, direnci de arttırdığı için arzu edilmeyen bir durumdur.

Sıfır hücum açısında (α = 0°) simetrik kanat için kaldırma katsayısı sıfırdır, ancak üst yüzeyindeki eğriliği daha büyük olan simetrik olmayan kanatlar için direnç katsayısı sıfır olmaz. Bu nedenle kanat kısımları simetrik olan uçaklar aynı kaldırmayı oluşturmak için daha büyük hücum açısı ile uçmalıdır.

Hücum açısının ayarlanması ile kaldırma katsayısı birkaç kat arttırılabilir (simetrik olmayan kanat için α = 0°'de 0.25'den α = 10°'de 1.25'e).

Direnç katsayısı hücum açısı ile çoğunlukla üstel şekilde artar. Bu nedenle yakıt ekonomisi bakımından kısa uçuş sürelerinde büyük hücum açıları mümkün mertebe az kullanılmalıdır.



Bir kanadın direnç katsayısının hücum açısı ile değişimi.

Sonlu Açıklıktaki Kanatlar ve İndüklenmiş Direnç

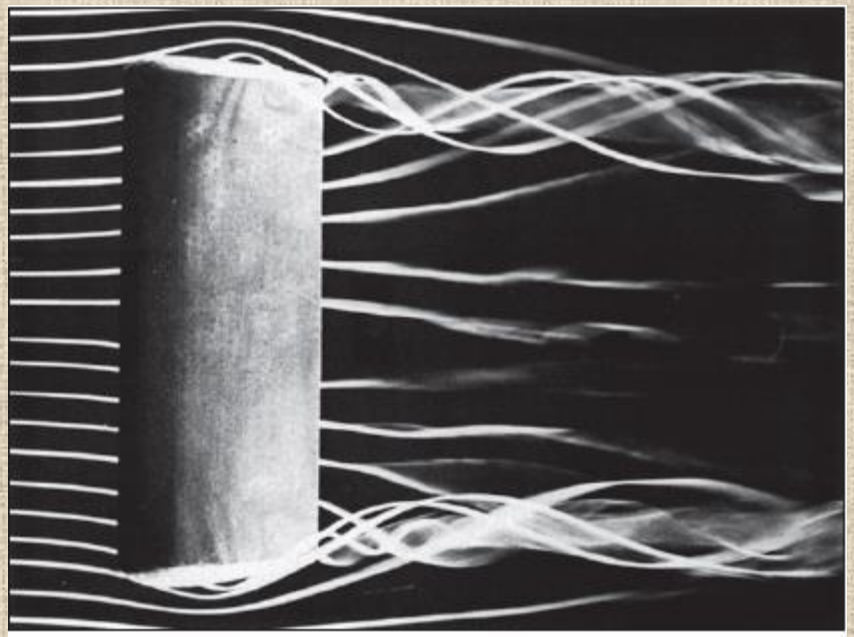
Sonlu açıklıktaki uçak kanatları ve diğer kanatlar için, son kısımlardaki uç etkileri alt ve üst yüzeylerdeki akışkan kaçağından ötürü önem kazanır.

Akışkan ile kanat arasındaki bağıl hareket nedeniyle akışkan arkaya doğru süpürülürken, alt (yüksek basınç bölgesi) ve üst (alçak basınç bölgesi) yüzeyler arasındaki basınç farkı uçlardaki akışkanı yukarıya doğru sürer.

Bu ise, **uç vorteksi** adı verilen ve her iki kanadın ucunda akış boyunca spiral çizen bir dönme hareketine yol açar.

Vorteksler, kanat boyunca kanatların uçları arasında da oluşur.

Bu dağınık vorteksler kanatların çıkış kenarlarından kopmaya başladıktan sonra kenarlara doğru toplanır ve kanatların uçları (Şekil 11–49) boyunca uzanan iki tane şiddetli **çıkış (firar) kenarı vorteksi**ni oluşturmak üzere uç vorteksleri ile birleşir.



(a)

(c)

(b)

Çeşitli yollarla gözlenen firar (çıkış kenarı) vorteksleri: (a) Bir dikdörtgen kanadın firar kenarını terk eden vorteks çekirdeklerini gösteren rüzgâr tünelindeki duman çıkış çizgileri; (b) Jet motorlarının arkasındaki düşük basınçlı bölgede su buharının yoğuşması ile başlangıçta dört beyaz iz çizgisinin oluşması ve daha sonra bu çizgilerin birleşip oldukça uzak aşağıakım bölgesine kadar sürüp giden iki adet zıt yönde dönen firar vorteksine dönüşümü; (c) Kanat uçlarında meydana gelen uç vortekslerini göstermek üzere dumanlı havada uçan bir tohum serpme uçağı.

Kuşlar, öndeki kuşun oluşturduğu yarıcı etkiyi kullanarak V halinde göç ederler. Bu kuşların sürü olarak V halinde gidecekleri yere kadar üçte bir daha az enerji ile uçtukları belirlenmiştir.

Aynı nedene bağlı olarak askeri jetler de bazen V halinde uçar.

(a) Enerji tasarrufu yapmak için karakteristik V şeklinde uçan kazlar.
(b) Aynı şekilde doğayı taklit eden askeri jet uçakları.

Serbest akım ile etkileşen uç vorteksleri, kanat uçlarına akış yönü dahil olmak üzere tüm yönlerde kuvvet uygular.

Akış yönündeki kuvvet bileşeni dirence eklenir ve **indüklenmiş (etkili) direnç** olarak adlandırılır.

Bu durumda kanadın toplam direnci, indüklenmiş direnç (3-boyut etkileri) ile kanat kısmının direncinin (2-boyut etkileri) toplamıdır.

Görünüş (Boy/En Oranı): Kanadın ortalama açıklığının karesinin, üst bakış alanına oranına görünüş veya boy/en oranı (BEO) denir. Üst bakış alanı dikdörtgensel, kiriş boyu *c* ve açıklığı *b* olan bir kanat için görünüş veya boy/en oranı,

$$\mathbf{BEO} = \frac{b^2}{A} = \frac{b^2}{bc} = \frac{b}{c}$$

Boy/en oranı, kanadın akış yönünde ne ölçüde dar olduğunun bir ölçüsüdür.

Genelde boy/en oranı arttıkça kanadın kaldırma katsayısı artar, direnç katsayısı ise azalır.

Boy/en oranı büyük olan gövdeler daha verimli uçar, ancak kütlesel atalet momentlerinin daha büyük olmasından (merkezden daha fazla uzakta olduğu için) dolayı manevra kabiliyetleri daha azdır. Bu nedenle boy/en oranı küçük olan gövdelerin manevra kabiliyeti daha iyidir, zira kanatlar merkezdeki kısma daha yakındır.

(*a*) Uçuş esnasında kanat tüyleri saçılmış halde olan sakallı akbaba.

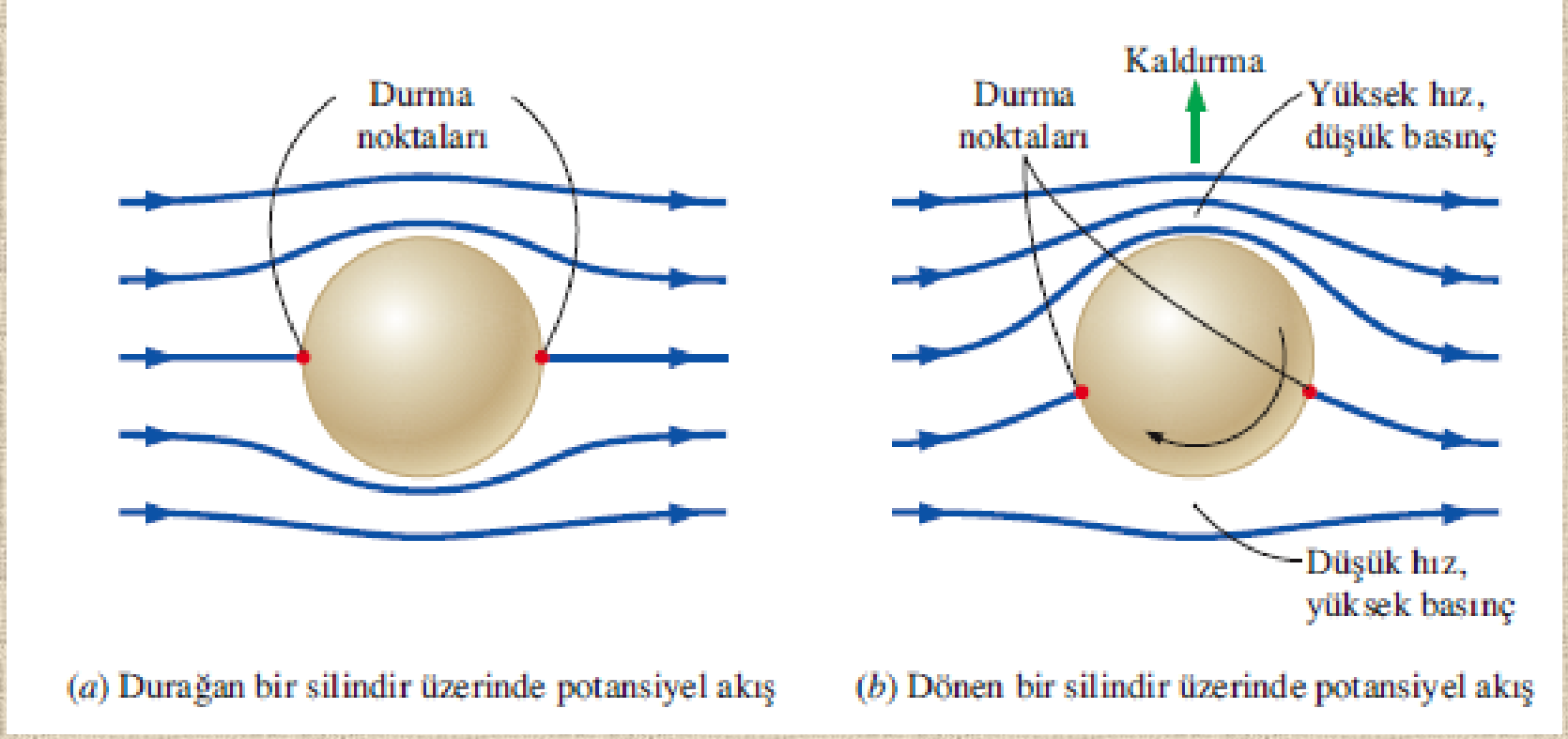
(*b*) Planördeki kanat uzantıları indüklenmiş direnci azaltmak için kullanılır.

İndüklenmiş direnç, (a) kuşların kanatlarındaki kanat ucu tüyleri ile ve (b) uçak kanatlarındaki uç plakaları veya başka önlemlerle azaltılabilir.

Dönme İle Oluşan Kaldırma

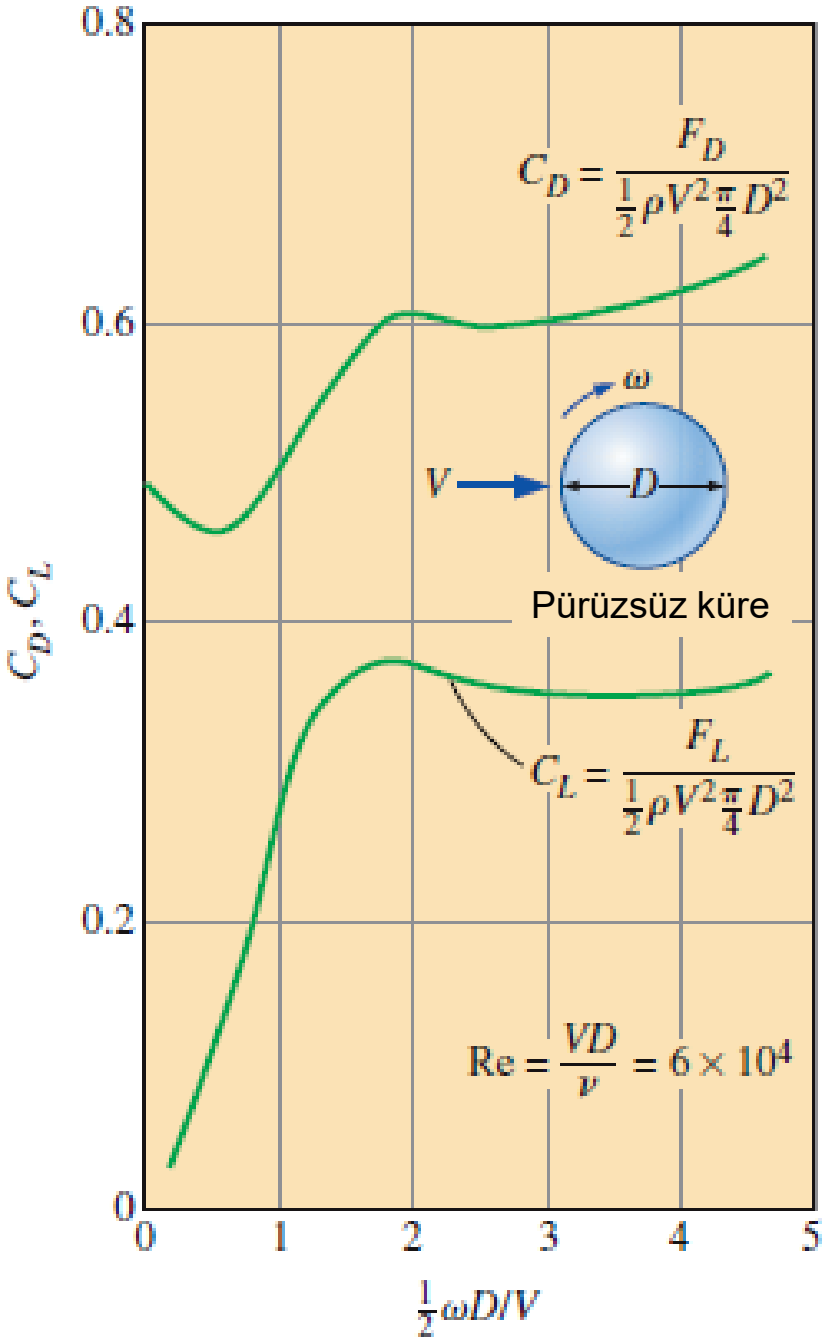
Magnus Etkisi: Katı bir cismi döndürerek kaldırma oluşturma olayıdır. Top dönmezken, üst-alt simetriden dolayı kaldırma sıfırdır.

Silindir kendi ekseni etrafında döndürülürse, kaymazlık şartından dolayı bir miktar akışkanı etrafında sürükler ve akış alanı, dönen ve dönmeyen akışların süperpozisyonunu yansıtır.



(*a*) Durağan bir silindir üzerinde potansiyel akış (*b*) Dönen bir silindir üzerinde potansiyel akış

"İdealleştirilmiş" potansiyel akış durumu için, dönen dairesel silindirde kaldırmanın oluşumu (gerçek akışta art izi bölgesinde akış ayrılması meydana gelir).



Kaldırma katsayısı özellikle düşük açısal hızlarda dönme hızına şiddetli bir şekilde bağlıdır.

Dönme hızının direnç katsayısı üzerinde etkisi ise daha azdır. Ayrıca pürüzlülük, direnç ve kaldırma katsayılarını etkiler.

Belirli bir Reynolds sayısı aralığında pürüzlülük, arzu edildiği gibi, kaldırma katsayısını arttıracak, direnç katsayısını azaltacak şekilde bir etki oluşturur.

Bu nedenle doğru miktarda pürüzlülüğü olan bir golf topu, aynı şekilde vurulduğunda, pürüzsüz golf topundan daha yükseğe ve daha uzağa gider.

$Re = VD/\nu = 6 \times 10^4$ için pürüzsüz bir kürenin kaldırma ve direnç katsayılarının boyutsuz dönme hızına göre değişimi.

ÖRNEK 11–5 Ticari Bir Uçağ Kaldırma ve Direnç

Ticari bir uçağın toplam kütlesi 70000 kg ve kanat üst bakış alanı 150 m²'dir (Şekil 11–54). Uçağın seyir hızı 558 km/h, seyir yüksekliği 12000 m ve hava yoğunluğu 0.312 kg/m³'tür. Uçağın kalkış ve inişte kullandığı çift yarıklı flapları vardır, ancak seyir halinde bütün flaplar toplanmaktadır. Kanadın kaldırma ve direnç karakteristiklerinin yaklaşık olarak NACA 23012 (Şekil 11–45) ile aynı alınabildiği varsayılmaktadır. Buna göre uçağın (*a*) flapları açılmış ve açılmamış olarak yapılan kalkış ve iniş için emniyetli en düşük hızını, (*b*) seyir yüksekliğinde daimi seyri sağlayacak hücum açısını ve (*c*) kanat direncini yenebilecek itkiyi sağlamak için gerekli gücü bulunuz.

ÇÖZÜM Yolcu uçağının seyir şartları ve kanat karakteristikleri verilmiştir. Emniyetli en düşük iniş ve kalkış hızları, seyir esnasındaki hücum açısı ve gerekli güç bulunacaktır.

Kabuller **1** Kanadın haricinde, gövde direnci gibi diğer uçak parçalarının oluşturduğu direnç ve kaldırma dikkate alınmayacaktır. **2** Kanatlar iki-boyutlu kanat olarak kabul edilebilir ve kanatların uç etkileri dikkate alınmayacaktır. **3** Kanatların kaldırma ve direnç karakteristikleri yaklaşık olarak NACA 23012 ile aynı olup, Şekil 11–45 kullanılabilir. **4** Yerde ortalama hava yoğunluğu 1.20 kg/m³'tür.

Özellikler Hava yoğunluğu yerde 1.20 kg/m³, seyir yüksekliğindeki ise 0.312 kg/m³'tür. Kanatların maksimum kaldırma katsayıları $C_{L,\text{maks}}$ flaplı ve flapsız durum için sırası ile 3.48 ve 1.52'dir (Şekil 11–45).

Analiz (*a*) Uçağın ağırlığı ve seyir hızı aşağıdaki gibi bulunur:

$$W = mg = (70{,}000\ \text{kg})(9.81\ \text{m/s}^2)\left(\frac{1\ \text{N}}{1\ \text{kg}\cdot\text{m/s}^2}\right) = 686{,}700\ \text{N}$$

$$V = (558\ \text{km/h})\left(\frac{1\ \text{m/s}}{3.6\ \text{km/h}}\right) = 155\ \text{m/s}$$

Flaplı ve flapsız halde stol şartlarına karşılık gelen en düşük hızlar Denklem 11–24'ten sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilir:

$$V_{\min 1} = \sqrt{\frac{2W}{\rho C_{L,\text{maks}1} A}} = \sqrt{\frac{2(686{,}700\ \text{N})}{(1.2\ \text{kg/m}^3)(1.52)(150\ \text{m}^2)}\left(\frac{1\ \text{kg}\cdot\text{m/s}^2}{1\ \text{N}}\right)} = 70.9\ \text{m/s}$$

$$V_{\min 2} = \sqrt{\frac{2W}{\rho C_{L,\text{maks}2} A}} = \sqrt{\frac{2(686{,}700\ \text{N})}{(1.2\ \text{kg/m}^3)(3.48)(150\ \text{m}^2)}\left(\frac{1\ \text{kg}\cdot\text{m/s}^2}{1\ \text{N}}\right)} = 46.8\ \text{m/s}$$

Stol bölgesinden kaçınmak için gereken "emniyetli" en düşük hızlar yukarıdaki değerleri 1.2 ile çarparak elde edilir (1 m/s = 3.6 km/h):

$$\textit{Flapsız}: V_{\min 1,\ \text{emniyetli}} = 1.2V_{\min 1} = 1.2(70.9\ \text{m/s}) = 85.1\ \text{m/s} = \mathbf{306\ km/h}$$

$$\textit{Flaplı}: V_{\min 2,\ \text{emniyetli}} = 1.2V_{\min 2} = 1.2(46.8\ \text{m/s}) = 56.2\ \text{m/s} = \mathbf{202\ km/h}$$

Flapların kullanılması, uçağın önemli ölçüde daha düşük hızlarda kalkmasına ve inmesine imkân vermekte ve böylece daha kısa bir pist yeterli olmaktadır.

(*b*) Uçak sabit yükseklikte daimi seyir halindeyken, kaldırma kuvveti uçağın ağırlığına eşit olmalıdır, $F_L = W$. Buradan kaldırma katsayısı aşağıdaki gibi bulunur:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} = \frac{686{,}700\ \text{N}}{\frac{1}{2}(0.312\ \text{kg/m}^3)(155\ \text{m/s})^2(150\ \text{m}^2)}\left(\frac{1\ \text{kg·m/s}^2}{1\ \text{N}}\right) = 1.22$$

Flapsız durum için C_L'nin bu değerine karşılık gelen hücum açısı Şekil 11–45'ten $\alpha \cong 10°$ olarak bulunur.

(*c*) Uçak sabit yükseklikte daimi seyir halindeyken, uçak üzerinde etki eden net kuvvet sıfırdır ve dolayısıyla motorların sağladığı itki, direnç kuvvetine eşit olmalıdır. 1.22 olan seyir kaldırma katsayısına karşılık gelen direnç katsayısı, flapsız durum için Şekil 11–45'ten $C_D \cong 0.03$ olarak bulunur. Buna göre kanatlar üzerine etki eden direnç kuvveti aşağıdaki gibi bulunur:

$$F_D = C_D A \frac{\rho V^2}{2} = (0.03)(150\ \text{m}^2)\frac{(0.312\ \text{kg/m}^3)(155\ \text{m/s})^2}{2}\left(\frac{1\ \text{kN}}{1000\ \text{kg·m/s}^2}\right)$$

$$= 16.9\ \text{kN}$$

Güç, kuvvet ile hızın (birim zamanda alınan yol) çarpımıdır. Böylece bu direnci yenmek için gereken güç, itki ile seyir hızının çarpımıdır.

$$\text{Güç} = \text{İtki} \times \text{Hız} = F_D V = (16.9\ \text{kN})(155\ \text{m/s})\left(\frac{1\ \text{kW}}{1\ \text{kN·m/s}}\right)$$

$$= \mathbf{2620\ kW}$$

Dolayısıyla seyir halinde kanatların üzerindeki direnci yenmek için motorların sağlaması gereken güç 2620 kW'tır. %30'luk itki verimi için (yani yakıt enerjisinin %30'u uçağı ileri hareket ettirmek için kullanılması halinde), uçağa 8730 kJ/s kadarlık bir güç girişi gereklidir.

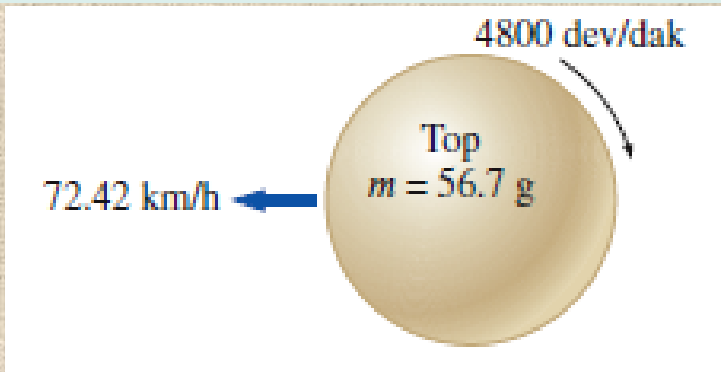
İrdeleme Bulunan güç sadece kanatlar üzerine etki eden direnci yenmek için gereken güçtür ve uçağın diğer parçaları (gövde, kuyruk vs.) üzerine etki eden direnç buna dahil değildir. Bu nedenle seyir esnasında gerekli toplam güç çok daha büyük olacaktır. Ayrıca bu güç değeri, hücum açısı büyük olduğunda kalkış esnasında baskın olabilen indüklenmiş direnci de dikkate almamaktadır (Şekil 11–45, 2-boyutlu kanat içindir ve 3-boyut etkilerini içermemektedir).

ÖRNEK 11–6 Bir Tenis Topu Üzerinde Dönmenin Etkisi

Kütlesi 56.7 g ve çapı 64 mm olan bir tenis topuna vurulduğu anda hızı 72.42 km/h, geriye doğru dönme hızı ise 4800 devir/dakika olmaktadır (Şekil 11–55). 1 atm ve 26.7 °C'deki havada topa vurulduğunda, vuruştan kısa bir süre sonra yerçekiminin ve dönmeden kaynaklanan kaldırmanın birleşik etkisiyle top yükselir mi, alçalır mı?

ÇÖZÜM Tenis topuna geriye doğru dönme verilecek şekilde vurulmuştur. Vuruştan sonra topun yükseleceği veya alçalacağı belirlenecektir.

Kabuller **1** Şekil 1153'ün uygulanabileceği şekilde top yüzeyleri yeteri kadar pürüzsüzdür. **2** Hareketine yatay olarak başlayabilmesi için topa yatay olarak vurulmaktadır.



Özellikler Basıncı 1 atm ve sıcaklığı, 26.7 °C olan havanın yoğunluğu ve kinematik viskozitesi sırasıyla $\rho = 1.177$ kg/m^3 ve $\nu = 1.576 \times 10^{-5}$ m^2/s'dir.

Analiz Topa yatay olarak vurulmaktadır, bu nedenle normalde dönme olmaması halinde yerçekiminin etkisi ile alçalacaktır. Geriye doğru dönüş kaldırma oluşturur ve eğer kaldırma topun ağırlığından daha büyük ise top yükselir. Kaldırma kuvveti

$$F_L = C_L A \frac{\rho V^2}{2}$$

denkleminden bulunabilir. Bu denklemde A topun ön bakış alanıdır ve $A = \pi D^2/4$ ifadesinden bulunabilir. Topun öteleme ve açısal hızları, sırasıyla,

$$V = (72.42 \text{ km/h})\left(\frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}}\right)\left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}\right) = 20.12 \text{ m/s}$$

$$\omega = (4800 \text{ devir/dk})\left(\frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ devir}}\right)\left(\frac{1 \text{ dk}}{60 \text{ s}}\right) = 502 \text{ rad/s}$$

elde edilir. Buna göre, boyutsuz dönme hızı aşağıdaki gibi bulunur:

$$\frac{\omega D}{2V} = \frac{(502 \text{ rad/s})(0.064 \text{ m})}{2(20.12 \text{ m/s})} = 0.80 \text{ rad}$$

Şekil 11–53'ten bu değere karşılık gelen kaldırma katsayısı $C_L = 0.21$ olarak alınır. Bu durumda top üzerine etki eden kaldırma kuvveti,

$$F_L = (0.21)\frac{\pi(0.064 \text{ m})^2}{4}\frac{(1.177 \text{ kg/m}^3)(20.12 \text{ m/s})^2}{2}$$

$$= 0.16 \text{ N}$$

olarak bulunur. Topun ağırlığı ise,

$$W = mg = (0.057 \text{ kg})\,(9.81 \text{ m/s}^2) = 0.556 \text{ N}$$

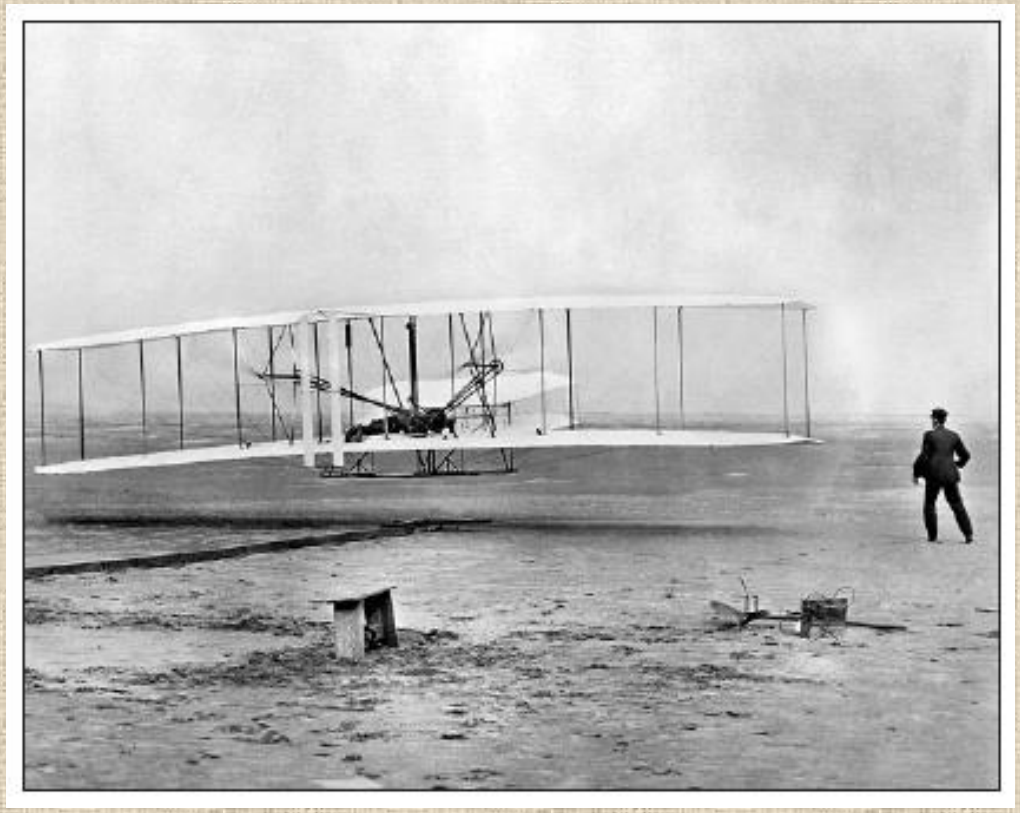
elde edilir. Bu değer kaldırmadan daha büyüktür. Bu nedenle, topa vurulduktan sonra yerçekiminin ve dönmeden kaynaklanan kaldırmanın birleşik etkisiyle topa 0.556 − 0.161 = 0.395 N'luk net bir kuvvet etkir ve top yere **düşer.**

İrdeleme Bu örnek, geriye doğru dönme verilmek suretiyle bir topa çok daha sert vurulabileceğini göstermektedir, ileriye doğru dönme ise ters etki yapar (negatif kaldırma) ve topun yere düşmesini hızlandırır. Ayrıca bu problemde Reynolds sayısı 8×10^4 olup bu değer, Şekil 11–53'ün hazırlanmasında kullanılan değer olan 6×10^4'e yeterince yakındır

Wright Kardeşler gerçekten de bütün zamanların en etkileyici mühendislik takımı idi.

Kendi kendilerini eğitmişlerdi ve havacılığın modern teorisi ve uygulaması konusunda çok bilgiliydiler.

Bu alandaki diğer önder kişilerle yazışmışlar ve teknik dergilerde yayın yapmışlardır.



Wright Kardeşler Kitty Hawk'ta havalanırken.

Kaldırma ve direnç kavramlarının geliştirilmesi onlara atfedilememesine karşın, onlar bu kavramları kullanarak motorlu, insanlı, havadan ağır (havada kendiliğinden duramayan), kontrollü ilk uçuşu başarmışlardır.

Onlardan önceki birçok kişi başaramadığı halde onlar bunda başarılı oldular, çünkü parçaları ayrı ayrı değerlendirip tasarladılar.

Wright Kardeşlerden önce deney yapanlar, uçağı bir bütün olarak inşa ediyor ve deniyorlardı. Wright Kardeşler bütün bunları değiştirdi. Her bir parça üzerinde ölçekli ve tam boyutlu modelleri kullanarak rüzgâr tünelinde ve arazide çalıştılar.

Özet

- Giriş
- Direnç ve Kaldırma
- Sürtünme ve Basınç Direnci
  - ✓ Cisimleri Akım Çizgili Hale Getirerek Direncin Azaltılması
  - ✓ Akış Ayrılması
- Yakından Bilinen Geometrilerin Direnç Katsayıları
  - ✓ Biyolojik Sistemler ve Direnç
  - ✓ Taşıtların Direnç Katsayıları
  - ✓ Süperpozisyon
- Düz Levha Üzerinde Paralel Akış
  - ✓ Sürtünme Katsayısı
- Silindir ve Küre Üzerinden Akışlar
  - ✓ Yüzey Pürüzlülüğünün Etkisi
- Kaldırma
  - ✓ Sonlu Açıklıktaki Kanatlar ve İndüklenmiş Direnç
  - ✓ Dönme İle Oluşan Kaldırma