

**11. HAFTA**  
**ZORLANMIŞ DIŐ TAŞINIM**

# DIŐ AKIŞTA DİRENÇ VE ISI TRANSFERİ

- Katı cisimler üzerindeki akışkan akış; otomobiller, enerji nakil hatları, ağaçlar ve sualtı boruları üzerine etkiyen direnç kuvveti; uçak kanatlarının oluşturduğu kaldırma; kuvvetli rüzgarlarda yağmur, kar, dolu ve toz parçacıklarının yukarı sürüklenmesi; metal veya plastik tabakaların, buhar veya sıcak su borularının ve çekilmiş tellerin soğutulması gibi çok sayıda fiziksel olaya sebep olur.
- Daldırılmış katı bir cisme göre, cisimden yeteri kadar uzakta (sınır tabaka dışında) akışkan hızı serbest akım hızı olarak adlandırılır. Bu hız genellikle –cismin çok öncesinden yaklaşan akışkanın hızı olan- üst takım hızı  $V$  'ye eşit alınır ve yaklaşma hızı olarak da bilinir.
- Akışkan hızı yüzeyde sıfırdan (kaynama şartı), yüzeyden uzakta serbest akım değerine kadar değişir.

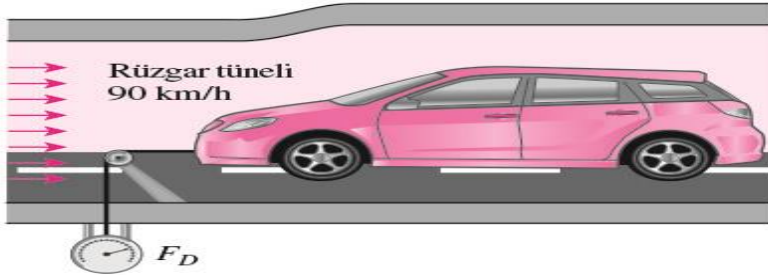


ŞEKİL 7-1

Uygulamada cisimler üzerindeki akışa yaygın olarak rastlanmaktadır.

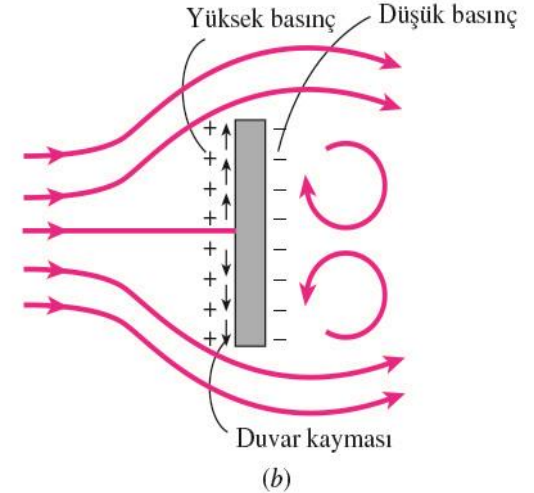
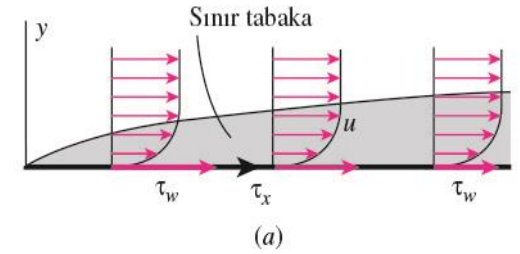
# Sürtünme ve Basınç Direnci

- Akan bir akışkanın bir cisme akış yönünde uyguladığı **kuvvete direnç** denir.
- **Basınç ve çeper kayma kuvvetlerinin** akışa dik doğrultudaki bileşenleri, cismi o doğrultuda hareket ettirmeye çalışır ve bunların toplamı kaldırma olarak adlandırılır.
- Direnç ve kaldırma üzerinde genellikle, **hem yüzey sürtünmesinin (çeper kayması) hem de basıncın payı vardır.**



**ŞEKİL 7-2**

Bir rüzgar tüneline bir araba üzerine etki eden direnç kuvvetinin ölçümü için şematik gösterim.



**ŞEKİL 7-3**

(a) Düz bir plaka üzerinde, akışa paralel olarak etki eden direnç kuvveti, yalnız duvar kaymasına bağlıdır. (b) Düz bir plaka üzerinde, akışa dik olarak etki eden direnç kuvveti yalnız basınca bağlıdır ve serbest akım akışına dik etki eden duvar kaymasından bağımsızdır.

**Direnç kuvveti**  $F_D$  diğer bazı etkenlerin yanı sıra, akışkan özgül kütlesi  $\rho$ , üstakım hızı  $V$  ile cismin boyutu, şekli ve konumuna bağlıdır. Bir cismin **direnç özellikleri** boyutsuz direnç katsayısı  $C_D$  ile gösterilir.

*Drag coefficient:*

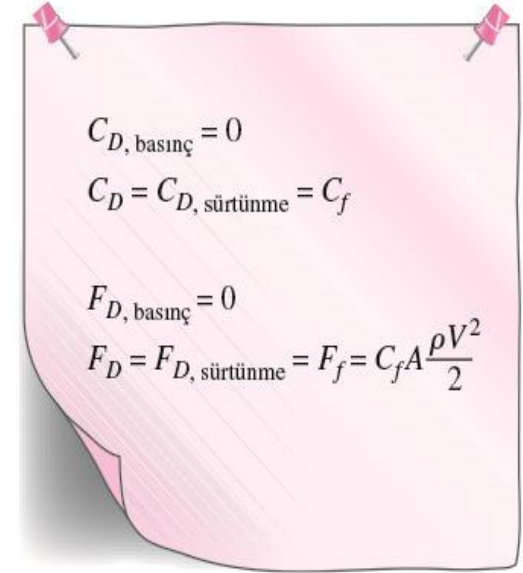
$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

Doğrudan  $\tau_w$  çeper kayma sebep olduğu **direnç bileşeni** –sürtünme etkilerinden kaynaklandığı için- yüzey sürtünme direnci (veya kısaca sürtünme direnci) olarak adlandırılır. Doğrudan  $P$  basıncının sebep olduğu **direnç bileşeni** ise basınç direnci olarak adlandırılır.

$$C_D = C_{D, \text{friction}} + C_{D, \text{pressure}}$$

*Flat plate:*

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



#### ŞEKİL 7-4

Bir düzlem plaka üzerindeki paralel akış için basınç direnci sıfırdır ve dolayısıyla direnç katsayısı sürtünme katsayısına ve direnç kuvveti sürtünme kuvvetine eşittir.

- **Düşük Reynolds** sayılarında, direncin çoğu sürtünme direnci sebebiyle olur.
- Sürtünme direnci yüzey alanıyla da orantılıdır.
- **Basınç direnci**, dalmış bir cismin cephe alanıyla ve önüyle arkasına etki eden basınçların farkıyla doğru orantılıdır.
- Basınç direnci genellikle küt cisimler için baskın, kanatlar gibi akım çizgili cisimler için ihmal edilebilir düzeydedir.
- Bir akışkan cisimden ayrıldığı zaman, cisim ile akışkan akımı arasında bir ayrılma bölgesi oluşturur.
- Dönmelerin ve ters akışların meydana geldiği, cismin arkasındaki bu düşük basınç bölgesi, ayrılma bölgesi olarak adlandırılır.
- Ayrılma bölgesi ne kadar büyükse, basınç direnci de o kadar büyük olur.



### ŞEKİL 7-5

Bir tenis topu üzerindeki akış boyunca ayrılma ve ard iz bölgesi.

*NASA ve Cislunar Aerospace, Inc. izniyle.*

- Hız üzerinde cismin etkilerinin hissedildiği, cismin ardındaki akış bölgesi ard izi olarak adlandırılır.
- **Viskoz** ve dönel etkiler, sınır tabakada, ayrılma bölgesinde ve ard izindeki en önemli etkilerdir.

# Isı Transferi

Local and average  
Nusselt numbers:

$$\text{Nu}_x = f_1(x^*, \text{Re}_x, \text{Pr}) \quad \text{and} \quad \text{Nu} = f_2(\text{Re}_L, \text{Pr})$$

Average Nusselt number:

$$\text{Nu} = C \text{Re}_L^m \text{Pr}^n$$

Film temperature:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}$$

Average friction  
coefficient:

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

Average heat transfer  
coefficient:

$$h = \frac{1}{L} \int_0^L h_x dx$$

The heat transfer rate:

$$\dot{Q} = hA_s(T_s - T_\infty)$$

# DÜZ PLAKALAR ÜZERİNDE PARALEL AKIŞ

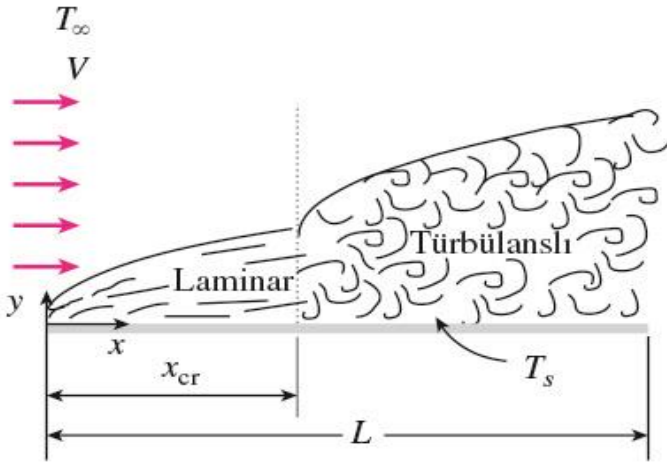
Laminar türbülansa geçiş, diğer bazı etkenlerin yanısıra yüzey geometrisi, yüzey pürüzsüzlüğü, üstakım hızı, yüzey sıcaklığı ve akışkanın tipine bağlıdır ve en iyi şekilde Reynolds sayısı ile tanımlanır. Düz bir plakanın ön kenarından itibaren x uzaklıkta Reynolds sayısı,

$$Re_x = \frac{\rho V x}{\mu} = \frac{V x}{\nu}$$

Kritik Reynolds sayısı için genellikle kabul gören değer;

$$Re_{cr} = \frac{\rho V x_{cr}}{\mu} = 5 \times 10^5$$

Düz bir plaka için mühendislik kritik Reynolds sayısının gerçek değeri yüzey pürüzsüzlüğü, türbülans düzeyi ve yüzey boyunca basınç değişimine bağlı olarak  $10^5$  'ten  $3 \times 10^6$  'ya kadar değişebilir.



**ŞEKİL 7-6**

Düz bir plaka üzerindeki akış boyunca sınır tabakanın laminar ve türbülans bölgeleri.



# Sürtünme Katsayısı

$$Re_x = Vx/\nu$$

$$\text{Laminar:} \quad \delta = \frac{4.91x}{Re_x^{1/2}} \quad \text{and} \quad C_{f,x} = \frac{0.664}{Re_x^{1/2}}, \quad Re_x < 5 \times 10^5$$

$$\text{Turbulent:} \quad \delta = \frac{0.38x}{Re_x^{1/5}} \quad \text{and} \quad C_{f,x} = \frac{0.059}{Re_x^{1/5}}, \quad 5 \times 10^5 \leq Re_x \leq 10^7$$

$$\text{Laminar:} \quad C_f = \frac{1.33}{Re_L^{1/2}} \quad Re_L < 5 \times 10^5$$

$$\text{Turbulent:} \quad C_f = \frac{0.074}{Re_L^{1/5}} \quad 5 \times 10^5 \leq Re_L \leq 10^7$$

## Combined laminar + turbulent flow:

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

$$C_f = \frac{0.074}{Re_L^{1/5}} - \frac{1742}{Re_L} \quad 5 \times 10^5 \leq Re_L \leq 10^7$$

$$\text{Rough surface, turbulent:} \quad C_f = \left( 1.89 - 1.62 \log \frac{\varepsilon}{L} \right)^{-2.5}$$

$$\begin{aligned} C_f &= \frac{1}{L} \int_0^L C_{f,x} dx \\ &= \frac{1}{L} \int_0^L \frac{0.664}{Re_x^{1/2}} dx \\ &= \frac{0.664}{L} \int_0^L \left( \frac{Vx}{\nu} \right)^{-1/2} dx \\ &= \frac{0.664}{L} \left( \frac{V}{\nu} \right)^{-1/2} \frac{x^{1/2}}{\frac{1}{2}} \Big|_0^L \\ &= \frac{2 \times 0.664}{L} \left( \frac{V}{\nu L} \right)^{-1/2} \\ &= \frac{1.328}{Re_L^{1/2}} \end{aligned}$$

## ŞEKİL 7-7

Bir yüzey üzerinde ortalama sürtünme katsayısı, yerel sürtünme katsayısının bütün yüzey üzerinden integre edilmesiyle belirlenir.

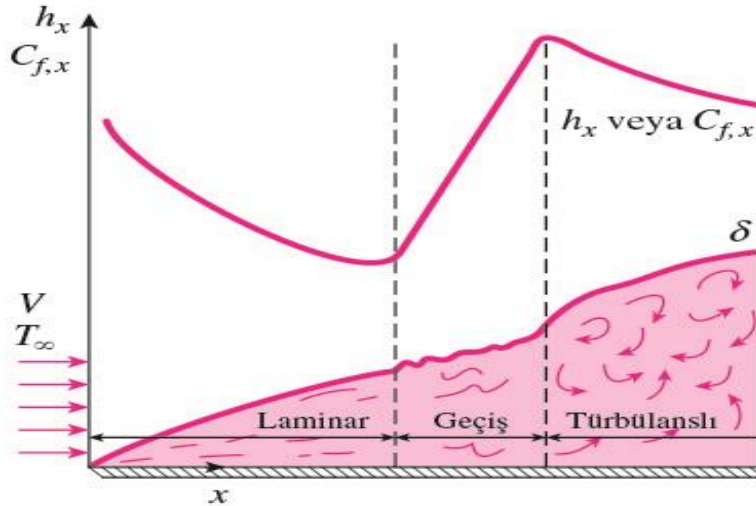


# Isı Transfer Katsayısı

Düz bir plaka üzerindeki laminar akışta, bir x konumunda yerel Nusselt sayısı :

$$\text{Laminar:} \quad Nu_x = \frac{h_x x}{k} = 0.332 Re_x^{0.5} Pr^{1/3} \quad Pr > 0.6$$

$$\text{Turbulent:} \quad Nu_x = \frac{h_x x}{k} = 0.0296 Re_x^{0.8} Pr^{1/3} \quad \begin{array}{l} 0.6 \leq Pr \leq 60 \\ 5 \times 10^5 \leq Re_x \leq 10^7 \end{array}$$



Yerel sürtünme ve ısı transfer katsayıları türbülanslı akışta laminar akıştakinden daha yüksektir.

Ayrıca akış türbülanslı olduğu zaman  $h_x$  en yüksek değerine ulaşır ve daha sonra şekilde görüldüğü gibi akış yönünde  $x^{-0.2}$  oranında azalır.

Bu bağıntılar sabit sıcaklıklı yüzeylerin olduğu durumlar için elde edilmiştir.

## ŞEKİL 7-9

Düzlem bir plaka üzerindeki akış için yerel sürtünme ve ısı transfer katsayılarının değişimi.

# Ortalama Nusselt sayısı

*Laminar:*  $Nu = \frac{hL}{k} = 0.664 Re_L^{0.5} Pr^{1/3}$   $Re_L < 5 \times 10^5$

*Turbulent:*  $Nu = \frac{hL}{k} = 0.037 Re_L^{0.8} Pr^{1/3}$   $0.6 \leq Pr \leq 60$   
 $5 \times 10^5 \leq Re_L \leq 10^7$

**Laminar + turbulent**  $Nu = \frac{hL}{k} = (0.037 Re_L^{0.8} - 871)Pr^{1/3}$   $0.6 \leq Pr \leq 60$   
 $5 \times 10^5 \leq Re_L \leq 10^7$

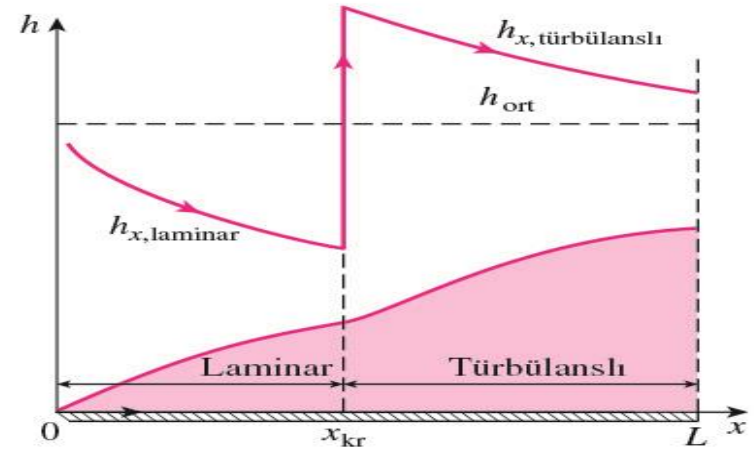
$$h = \frac{1}{L} \left( \int_0^{x_{cr}} h_{x, \text{laminar}} dx + \int_{x_{cr}}^L h_{x, \text{turbulent}} dx \right)$$

*For liquid metals*

$$Nu_x = 0.565(Re_x Pr)^{1/2} \quad Pr < 0.05$$

*For all liquids, all Prandtl numbers*

$$Nu_x = \frac{h_x x}{k} = \frac{0.3387 Pr^{1/3} Re_x^{1/2}}{[1 + (0.0468/Pr)^{2/3}]^{1/4}}$$



**ŞEKİL 7-10**

Bir düz plaka üzerinde birleşik laminar ve türbülanslı akış için ortalama ısı transfer katsayısının grafik gösterimi.

# Giriş Uzunluğu Isıtılmayan Düz Plaka

Yerel Nusselt sayıları

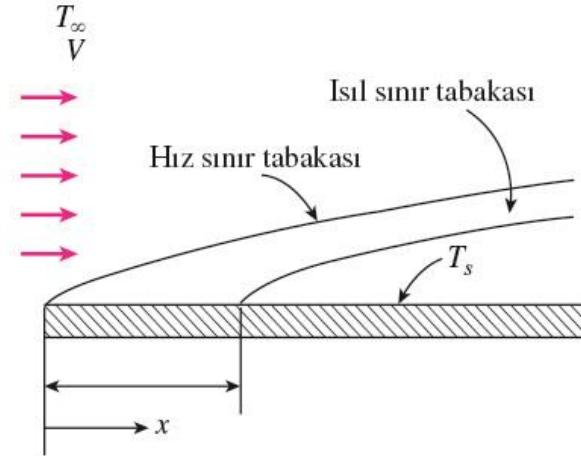
$$\text{Laminar:} \quad Nu_x = \frac{Nu_x(\text{for } \xi=0)}{[1 - (\xi/x)^{3/4}]^{1/3}} = \frac{0.332 Re_x^{0.5} Pr^{1/3}}{[1 - (\xi/x)^{3/4}]^{1/3}}$$

$$\text{Turbulent:} \quad Nu_x = \frac{Nu_x(\text{for } \xi=0)}{[1 - (\xi/x)^{9/10}]^{1/9}} = \frac{0.0296 Re_x^{0.8} Pr^{1/3}}{[1 - (\xi/x)^{9/10}]^{1/9}}$$

Ortalama taşınım katsayıları

$$\text{Laminar:} \quad h = \frac{2[1 - (\xi/x)^{3/4}]}{1 - \xi/L} h_{x=L}$$

$$\text{Turbulent:} \quad h = \frac{5[1 - (\xi/x)^{9/10}]}{4(1 - \xi/L)} h_{x=L}$$



**ŞEKİL 7-12**

Isıtılmamış giriş bölgesi bir düzlem duvar üzerindeki akış.

# Üniform Isı Akısı

Düz bir plaka üzerinde üniform ısı

$$\text{Laminar: } Nu_x = 0.453 Re_x^{0.5} Pr^{1/3} \quad Pr > 0.6, \quad Re_x < 5 \times 10^5$$

$$\text{Turbulent: } Nu_x = 0.0308 Re_x^{0.8} Pr^{1/3} \quad 0.6 \leq Pr \leq 60, \quad 5 \times 10^5 \leq Re_x \leq 10^7$$

Bu bağıntılar sabit sıcaklıklı plaka durumuna kıyasla, laminar akışta yüzde 36 ve türbülanslı akışta yüzde 4 daha yüksek değer verir.

Isı akısı  $q_s$  belliyse, palakadan (veya plakaya) olan ısı transfer hızı ve bir  $x$  uzaklıkta yüzey sıcaklığı,

$$\dot{Q} = \dot{q}_s A_s$$

$$\dot{q}_s = h_x [T_s(x) - T_\infty] \quad \rightarrow \quad T_s(x) = T_\infty + \frac{\dot{q}_s}{h_x}$$