

## BÖLÜM 3

### AKIŞKAN HAREKETİNİ YÖNETEN GENEL DENKLEMLER

ve

### AKIM TİPLERİ

#### 3.1. Bazı önemli kavramlar

3.1.1 Uzayda sabit konumlu sonlu kontrol hacmi

3.1.2 Debi

3.1.3 Hareketi takiben alınmış türev

#### 3.2. Genel denklemlerin integral formları

3.2.1 Süreklilik denkleminin integral formu

3.2.2 Momentum denkleminin integral formu

3.3.3 Enerji denkleminin integral formu

3.3.4 Denklemlerin bilançosu

#### 3.3. Genel denklemlerin diferansiyel formları

3.3.1 Diverjans teoremi

3.3.2 Süreklilik denkleminin diferansiyel formu

3.3.3 Momentum denkleminin diferansiyel formu

3.3.4 Enerji denkleminin diferansiyel formu

#### 3.4. Akımların sınıflandırılması

3.4.1 Akımın göreceliği

3.4.2 Daimi ve daimi olmayan akımlar, sanki-daimi akım

3.4.3 Yörünge, akım filamentleri ve akım çizgisi kavramları

3.4.4 Sürtünmeli akımlar, sürtünmesiz akımlar

3.4.4.1 Sınır tabaka:

3.4.4.2. Laminer ve türbülanslı sınır tabaka, geçiş bölgesi

3.4.4.3. Sınır tabakada hız değişimi, yüzey sürtünmesi

3.4.4.4. Sınır tabaka ayrılması

3.4.4.5. Sınır tabaka gelişimini etkileyen faktörler, Reynolds sayısı

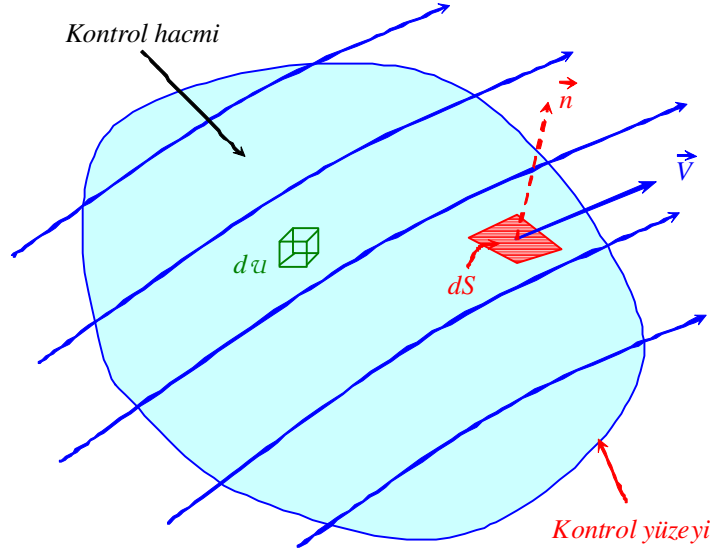
3.4.4.6. İz bölgesi

3.4.4.7. Sınır tabaka ve izin akım alanı üzerindeki etkisi ve havacılıktaki önemi

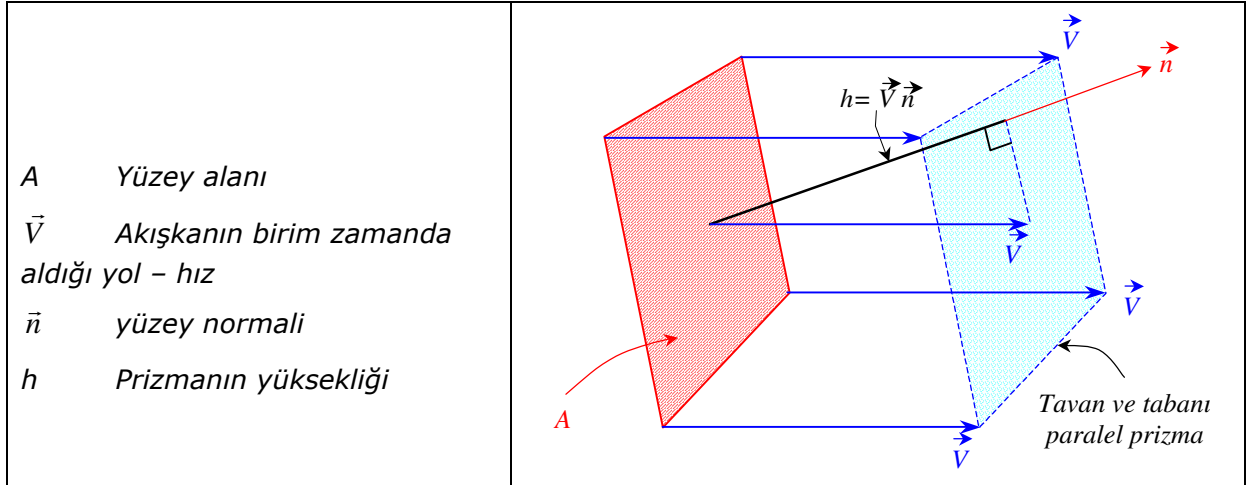
3.4.4.8. Sürtünmesiz akım yaklaşımı

### 3.1-Bazı Önemli Kavramlar

#### 3.1.1-Uzayda Sabit Konumlu, Sonlu Kontrol Hacmi



#### 3.1.2- Debi



**hacımsal debi** = Birim zamanda  $A$  yüzeyinden geçen akışkan hacmi

= prizmanın hacmi = Taban alanı  $\times$  Yükseklik

$$Q = A \cdot (\vec{V} \cdot \vec{n})$$

**Kütlesel debi** = Hacımsal debi  $\times$  yoğunluk

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{Q} = \rho \cdot A \cdot (\vec{V} \cdot \vec{n})$$

### 3.1.3- Hareketi Takiben Alınmış Türev

( $x, y, z$ ) kartezyen koordinat sisteminde bir  $A(x, y, z, t)$  fonksiyonunu göz önüne alalım.

Fonksiyonun tam diferansiyeli

$$dA = \frac{\partial A}{\partial x} dx + \frac{\partial A}{\partial y} dy + \frac{\partial A}{\partial z} dz + \frac{\partial A}{\partial t} dt$$

Düzenlenerek

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\partial A}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial A}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial A}{\partial z} \frac{dz}{dt} + \frac{\partial A}{\partial t}$$

Hız tanımı

$$\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}, \quad \rightarrow \quad \frac{dx}{dt} = u, \quad \frac{dy}{dt} = v, \quad \frac{dz}{dt} = w$$

Böylece

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\partial A}{\partial t} + u \frac{\partial A}{\partial x} + v \frac{\partial A}{\partial y} + w \frac{\partial A}{\partial z}$$

Ayrıca gradyan tanımı gereği

$$\nabla A = \frac{\partial A}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial A}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial A}{\partial z} \vec{k}$$

Böylece *hareketi takiben alınmış türev*

$$\boxed{\frac{DA}{Dt} = \frac{\partial A}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla A}$$

Bu ifadede ilk terim zamana göre değişimleri, ikinci terim ise konuma göre değişimleri ifade etmektedir. Sadece konuma göre alınmış türevlerden farklı olduğunun anlaşılması için de türev sembolü olarak küçük  $d$  harfi yerine büyük  $D$  harfi kullanılmaktadır.

## 3.2- Genel Denklemlerin İntegral Formları

### 3.2.1- Süreklilik Denkleminin İntegral Formu

Kütlenin korunumu prensibi : Kütle yok edilemez / yoktan var edilemez

$\mathcal{V}$  kontrol hacminin  $S$  yüzeyinden birim zamanda çıkan net kütle miktarı



=

$\mathcal{V}$  kontrol hacmindeki kütle miktarının birim zamandaki değişimi



$$= \iint_S \rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} \, dS$$



$$= -\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\mathcal{V}} \rho \cdot d\mathcal{V}$$

$$\iint_S \rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} \, dS = -\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\mathcal{V}} \rho \cdot d\mathcal{V}$$

Sonuç olarak süreklilik denkleminin integral formu

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\mathcal{V}} \rho \cdot d\mathcal{V} + \iint_S \rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} \, dS = 0$$

### 3.2.2- Momentum Denkleminin İntegral Formu

Hareketin korunumu prensibi : Dış kuvvetler toplamı atalet kuvvetine eşittir



$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} = m \cdot \frac{d\vec{V}}{dt}$$

Sabit kütle için

$$\sum \vec{F} = \frac{d}{dt}(m\vec{V})$$



Dış kuvvetler toplamı = Momentumun birim zamandaki değişimi

#### Dış kuvvetler

##### *Bünyesel kuvvetler*

Gravitasyonel kuvvetler

$$= \iiint_v \vec{f} \cdot \rho \cdot dV$$

Elektromanyetik kuvvetler

Not :  $\vec{f}$  birim kütleye etkiyen bünyesel kuvvettir

##### *Yüzeysel kuvvetler*

Basınç kuvvetleri

$$= -\iint_S p \cdot \vec{n} \cdot dS$$

Teğetsel kuvvetler

$$= \vec{F}_{visc}$$

#### Momentumun birim zamandaki değişimi

Kontrol yüzeyinden çıkan ve giren kütlelerin taşıdıkları momentumlar arasındaki fark	$= \iint_S (\rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} \cdot dS) \cdot \vec{V}$
Kontrol yüzeyindeki kütle miktarının değişiminden kaynaklanan momentum değişimi	$= \frac{\partial}{\partial t} \iiint_v (\rho \cdot dV) \cdot \vec{V}$

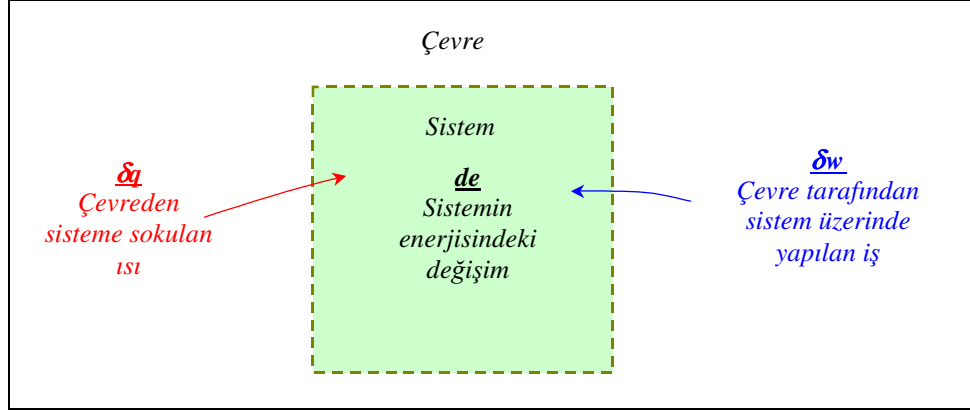
Sonuç olarak Momentum denkleminin integral formu

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_v (\rho \cdot dV) \cdot \vec{V} + \iint_S (\rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} \cdot dS) \cdot \vec{V} = -\iint_S p \cdot \vec{n} \cdot dS + \vec{F}_{visc} + \iiint_v \rho \cdot \vec{f} \cdot dV$$

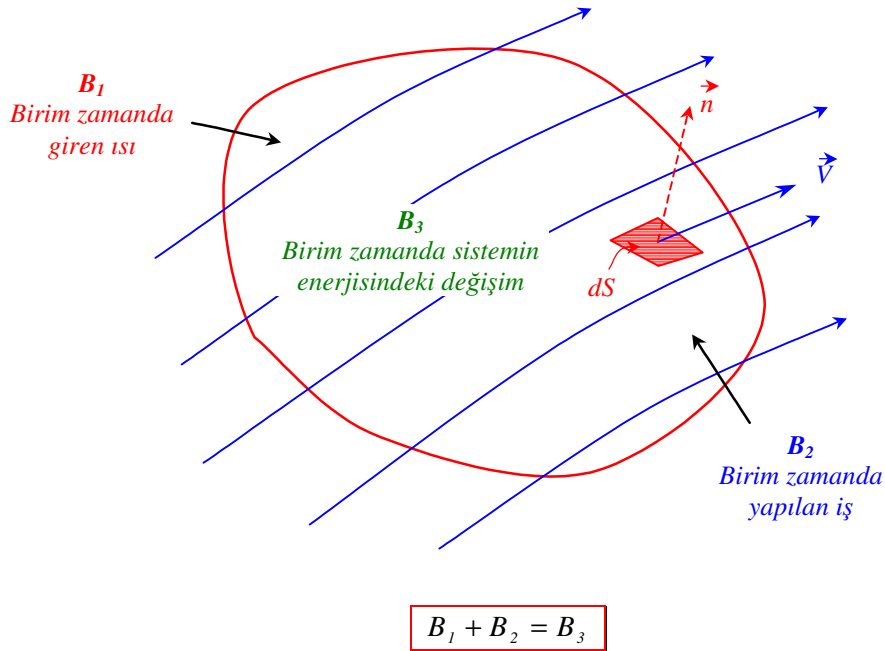
### 3.2.3- Enerji Denkleminin İntegral Formu

Enerjinin korunumu prensibi Enerji yok edilemez, yoktan var edilemez, form değiştirir

#### Termodinamiğin 1. Kanunu



$$\delta q + \delta w = de \quad (\text{birim kütle başına})$$



$$B_1 + B_2 = B_3$$

#### NOT:

Enerji denklemi aslında güç boyutunda olmakla birlikte, bir alışkanlık eseri olarak "enerji denklemi" tabiri kullanılmaktadır.

B<sub>1</sub> – Sisteme birim zamanda sokulan ısı miktarı:

$$1- \text{Radyasyon veya yanma yoluyla birim zamanda sokulan ısı} = \iiint_v \dot{q} \cdot \rho \cdot dv$$

Not :  $\dot{q}$  birim kütle başına sokulan ısı

$$2- \text{Viskoz kaynaklı (ısı iletimi, kütle difüzyonu) olarak sokulan ısı} = \dot{Q}_{visc}$$

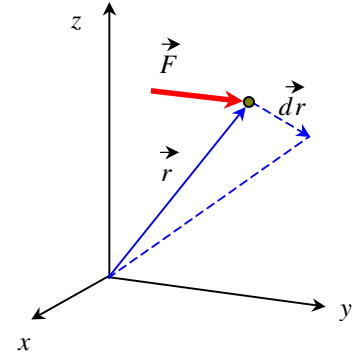
Böylece

$$B_1 = \iiint_v \dot{q} \cdot \rho \cdot dv + \dot{Q}_{visc}$$

B<sub>2</sub> – Çevrenin sistem üzerinde birim zamanda yaptığı iş:İş tanımı

$$\vec{F} \text{ kuvvetinin yaptığı iş} \quad \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

$$\vec{F} \text{ kuvvetinin birim zamanda yaptığı iş} \quad \vec{F} \cdot \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{V}$$

0 halde, çevrenin sisteme etkittiği kuvvetlerin yaptığı iş

$$1- \text{Basınç kuvvetlerinin yaptığı iş} = -\iint_S (p \cdot \vec{n} \cdot dS) \cdot \vec{V}$$

$$2- \text{Bünyesel kuvvetlerin yaptığı iş} = \iiint_v (\vec{f} \cdot \rho \cdot dv) \cdot \vec{V}$$

$$3- \text{Viskoz kuvvetlerin yaptığı iş} = \dot{W}_{visc}$$

Böylece

$$B_2 = -\iint_S (p \cdot \vec{n} \cdot dS) \cdot \vec{V} + \iiint_v (\vec{f} \cdot \rho \cdot dv) \cdot \vec{V} + \dot{W}_{visc}$$

B<sub>3</sub> – Sistemin enerjisinin birim zamanda değişimi:

$$\text{Birim kütle başına enerji} = e + \frac{1}{2} V^2$$

$e$  İç enerji (Durağan sistem için sadece iç enerji vardır)

$\frac{1}{2} V^2$  Kinetik enerji (Hareketli sistem için ilaveten kinetik enerji vardır.)

Kontrol yüzeyinden çıkan ve giren kütlelerin taşıdıkları enerjiler arasındaki fark	$= \iint_S (\rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} dS) \cdot \left( e + \frac{1}{2} V^2 \right)$
Kontrol hacmindeki kütle miktarının değişiminden kaynaklanan enerji değişimi	$= \frac{\partial}{\partial t} \iiint_v (\rho \cdot dv) \cdot \left( e + \frac{1}{2} V^2 \right)$

Sonuç olarak [Enerji denkleminin integral formu](#)

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_v \rho \cdot \left( e + \frac{1}{2} V^2 \right) \cdot dv + \iint_S (\rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} dS) \cdot \left( e + \frac{1}{2} V^2 \right) = - \iint_S (p \cdot \vec{n} dS) \cdot \vec{V} + \iiint_v (\vec{f} \cdot \rho \cdot dv) \cdot \vec{V} + \dot{W}_{visc} + \iiint_v \dot{q} \cdot \rho \cdot dv + \dot{Q}_{visc}$$

NOT:

- Dışardan bir shaft ile güç sokuluyorsa  $\dot{W}_{shaft}$  terimi eklenmeli
- Yükseklik farkı önemliyse  $e + \frac{1}{2} V^2 + gz$  şeklinde potansiyel enerji terimi eklenmelidir.

### 3.2.4- Denklemlerin Bilançosu

[Genel denklemler](#)

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_v \rho \cdot dv + \iint_S \rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} dS = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_v (\rho \cdot dv) \cdot \vec{V} + \iint_S (\rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} dS) \cdot \vec{V} = - \iint_S p \cdot \vec{n} dS + \vec{F}_{visc} + \iiint_v \rho \cdot \vec{f} \cdot dv$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_v \rho \cdot \left( e + \frac{1}{2} V^2 \right) \cdot dv + \iint_S (\rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} dS) \cdot \left( e + \frac{1}{2} V^2 \right) = - \iint_S (p \cdot \vec{n} dS) \cdot \vec{V} + \iiint_v (\vec{f} \cdot \rho \cdot dv) \cdot \vec{V} + \dot{W}_{visc} + \iiint_v \dot{q} \cdot \rho \cdot dv + \dot{Q}_{visc}$$

1 süreklilik + 3 momentum + 1 enerji denklemi = Toplam 5 adet denklem

[Bilinmeyenler](#)

$$\rho, \vec{V}(u, v, w), p, e$$

**Toplam 6 adet bilinmeyen**

O halde, denklem sayısı çözüm için yeterli değildir.

[İlave denklemler \(Termodinamik bağıntılar\)](#)

[İlave bilinmeyen](#)

Hal denklemi

$$p = \rho RT$$

$$T$$

Kalorik mükemmel gazlar için

$$e = c_v T$$

**SONUÇ OLARAK**

7 adet denklem (ve bağıntı) ile 7 bilinmeyen çözülebilir.



### 3.3- Genel Denklemlerin Diferansiyel Formları

#### 3.3.1- Diverjans Teoremi

A bir vektörel veya skaler büyüklük olmak üzere bir yüzey integrali diverjans teoremi yardımıyla bir hacim integraline dönüştürülebilir

$$\boxed{\iint_S A \cdot \vec{n} \, dS = \iiint_v \nabla A \cdot dv}$$

#### 3.3.2- Süreklilik Denkleminin Diferansiyel Formu

Süreklilik denkleminin integral formu

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_v \rho \cdot dv + \iint_S \rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} \, dS = 0$$

Yüzey integrali hacim integraline dönüştürülerek

$$\iint_S (\rho \cdot \vec{V}) \cdot \vec{n} \, dS = \iiint_v \nabla(\rho \cdot \vec{V}) \cdot dv$$

İntegraller birleştirilerek

$$\iiint_v \left[ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \vec{V}) \right] \cdot dv = 0$$

Kontrol hacmi sonsuz küçük yapıldığında integrand sıfıra eşitlenerek [süreklilik denkleminin diferansiyel formu](#)

$$\boxed{\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \vec{V}) = 0} \quad \text{Daimi akım için} \quad \boxed{\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0} \quad \rightarrow \quad \boxed{\nabla(\rho \cdot \vec{V}) = 0}$$

↓

$$\boxed{\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{V} \nabla \rho + \rho \nabla \vec{V}(\cdot) = 0}$$

↓

Materyal türev tanımı kullanılarak

$$\boxed{\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \vec{V} = 0} \quad \text{Daimi, sıkıştırılmaz akım} \quad \boxed{\frac{D\rho}{Dt} = 0} \quad \rightarrow \quad \boxed{\nabla \vec{V} = 0}$$

### 3.3.3- Momentum Denkleminin Diferansiyel Formu

Momentum denkleminin integral formu

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_v (\rho \cdot dv) \cdot \vec{V} + \iint_S (\rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} dS) \cdot \vec{V} = - \iint_S p \cdot \vec{n} dS + \vec{F}_{visc} + \iiint_v \rho \cdot \vec{f} \cdot dv$$

Basıncıla ilgili yüzey integrali hacim integraline dönüştürülerek

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_v (\rho \cdot dv) \cdot \vec{V} + \iint_S (\rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} dS) \cdot \vec{V} = - \iiint_v \nabla p dv + \vec{F}_{visc} + \iiint_v \rho \cdot \vec{f} \cdot dv$$

Bu vektörel eşitlik örneğin bir (x,y,z) kartezyen koordinat sisteminde

$$\text{Hız vektörü} \quad \vec{V} = u \vec{i} + v \vec{j} + w \vec{k}$$

$$\text{Teğetsel kuvvet vektörü} \quad \vec{F}_{visc} = F_{x-visc} \vec{i} + F_{y-visc} \vec{j} + F_{z-visc} \vec{k}$$

$$\text{Bünyesel kuvvet vektörü} \quad \vec{f} = f_x \vec{i} + f_y \vec{j} + f_z \vec{k}$$

olmak üzere üç bileşene ayrılarak örneğin x bileşeni

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_v (\rho \cdot dv) \cdot u + \iint_S (\rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} dS) \cdot u = - \iiint_v \frac{\partial p}{\partial x} dv + F_{x-visc} + \iiint_v \rho \cdot f_x \cdot dv$$

Akı terimi hacim integraline dönüştürülerek ve integraller birleştirilerek

$$\iiint_v \left[ \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} u) \right] \cdot dv = \iiint_v \left[ - \frac{\partial p}{\partial x} + f_{x-visc} + \rho \cdot f_x \right] dv$$

Kontrol hacmi sonsuz küçük yapılarak [Momentum denkleminin diferansiyel formu](#)

Veya

[Navier-Stokes denklemleri](#)

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} u) = - \frac{\partial p}{\partial x} + f_{x-visc} + \rho \cdot f_x$$

Benzer işlemlerle y bileşeni

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} v) = - \frac{\partial p}{\partial y} + f_{y-visc} + \rho \cdot f_y$$

Benzer işlemlerle z bileşeni

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} w) = - \frac{\partial p}{\partial z} + f_{z-visc} + \rho \cdot f_z$$

Daimi akım

$$\frac{\partial}{\partial t} \equiv 0$$

↓

Bünyesel kuvvet ihmal edilirse

$$\vec{f} \equiv 0$$

↓

Viskoz etkiler ihmal edilirse

$$\vec{f}_{visc} \equiv 0$$

↓

Euler denklemleri

$$\begin{aligned}\nabla(\rho \vec{v} u) &= -\frac{\partial p}{\partial x} \\ \nabla(\rho \vec{v} v) &= -\frac{\partial p}{\partial y} \\ \nabla(\rho \vec{v} w) &= -\frac{\partial p}{\partial z}\end{aligned}$$

Veya Navier-Stokes denklemlerinde

örneğin x bileşeninde

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v} u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + f_{x-\text{visc}} + \rho \cdot f_x$$

Soldaki terimler açılarak

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \vec{v} \nabla u + u \nabla(\rho \vec{v}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + f_{x-\text{visc}} + \rho \cdot f_x$$

Düzenlenerek

$$u \left[ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) \right] + \rho \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + \vec{v} \nabla u \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + f_{x-\text{visc}} + \rho \cdot f_x$$

İlk terim süreklilik denklemini gereği sıfır olup

$$\rho \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + \vec{v} \nabla u \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + f_{x-\text{visc}} + \rho \cdot f_x$$

materyal türev kavramı kullanılarak

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + f_{x-\text{visc}} + \rho \cdot f_x$$

Benzer işlemlerle y bileşeni

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + f_{y-\text{visc}} + \rho \cdot f_y$$

Benzer işlemlerle z bileşeni

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + f_{z-\text{visc}} + \rho \cdot f_z$$

### 3.3.4- Enerji Denkleminin Diferansiyel Formu

Enerji denkleminin integral formu

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_v \rho \cdot \left( e + \frac{1}{2} V^2 \right) \cdot dv + \iint_s (\rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} dS) \cdot \left( e + \frac{1}{2} V^2 \right) = - \iint_s (p \cdot \vec{n} dS) \cdot \vec{V} + \iiint_v (\vec{f} \cdot \rho \cdot dv) \cdot \vec{V} + \dot{W}_{visc} + \iiint_v \dot{q} \cdot \rho \cdot dv + \dot{Q}_{visc}$$

Benzeri şekilde yüzey integralleri hacim integrallerine dönüştürülerek, integraller birleştirilerek ve kontrol hacmi sonsuz küçültülerek [enerji denkleminin diferansiyel formu](#)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \cdot \left( e + \frac{1}{2} V^2 \right) \right] + \nabla \left[ \rho \left( e + \frac{1}{2} V^2 \right) \vec{V} \right] = -\nabla(p\vec{V}) + \rho \vec{f} \vec{V} + \dot{w}_{visc} + \rho \dot{q} + \dot{q}_{visc}$$

Daimi akım

$$\frac{\partial}{\partial t} \equiv 0$$

↓

Bünyesel kuvvet ihmal edilirse

$$\vec{f} \equiv 0$$

↓

Viskoz etkiler ihmal edilirse

$$\dot{w}_{visc} \equiv 0, \quad \dot{q}_{visc} \equiv 0$$

↓

Adyabatik olay halinde (ısı ilavesi yok)

$$\dot{q} \equiv 0$$

↓

$$\nabla \left[ \rho \left( e + \frac{1}{2} V^2 \right) \vec{V} \right] = -\nabla(p\vec{V})$$

### 3.4. Akımların sınıflandırılması

Aerodinamik incelemelerinde karşılaşılan akımları çeşitli bakımlardan sınıflamak mümkündür. Yapılan sınıflamalar

- akımı yöneten denklemlerde bazı terimleri ihmal ederek teorik çalışmalarda çözümü kolaylaştırdığı gibi
- deneysel çalışmalarda da uygun deney sisteminin seçilmesini

sağlamaktadır. Söz konusu sınıflamalardan en önemli bazıları şunlardır:

- Daimi akımlar, daimi olmayan akımlar,
- Sürtünmesiz akımlar, sürtünmeli akımlar,
- Bir-boyutlu, iki-boyutlu, üç-boyutlu akımlar,
- Sıkıştırılmaz akımlar, sıkıştırılabilir akımlar,
- Subsonik (sesaltı), transonik, süpersonik (sesüstü) ve hipersonik akımlar

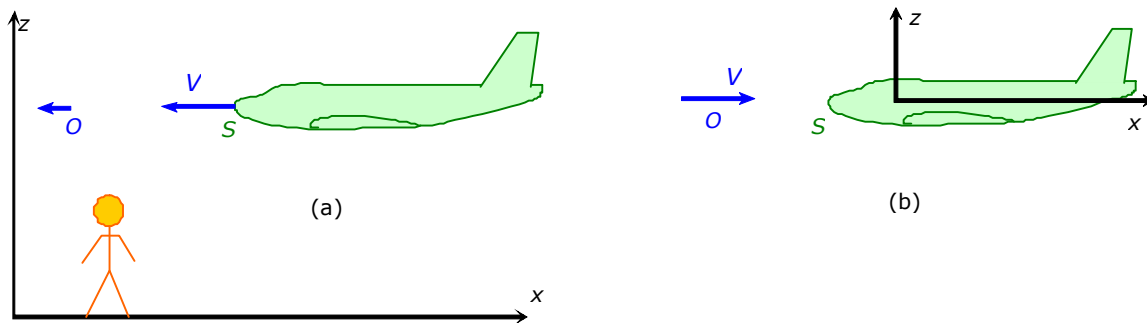
Bu sınıflamaların bazıları bütün bir akım alanı için söz konusu olabildiği gibi bazıları bir akım alanının belli bir bölgesini karakterize edebilir.

Bu bölümde sadece ilk iki sınıflama üzerinde durulacak, diğer sınıflamalar ise izleyen bölümde incelenecektir.

#### 3.4.1. Akımın göreceliği:

Aerodinamik bilimi, daha önce de belirtildiği gibi, hava içerisinde hareket eden cisimler etrafındaki olayları veya duran bir cisim etrafındaki hava hareketi nedeniyle meydana gelen olayları ya da bu ikisinin birleşimi şeklinde, hareket eden bir cisim etrafında yine hava hareketi nedeniyle meydana gelen olayları inceler. Bu incelemeler Newton mekaniğinin üç temel kanununa dayanır. Aerodinamik incelemelerde gözleyicinin konumu ne olursa olsun veya diğer bir deyişle seçilen eksen takımı ne olursa olsun aynı temel fiziksel prensipler ve matematiksel denklemler kullanılır.

Örneğin, sabit hızla yatay uçuş yapmakta olan bir uçağı göz önüne alalım. Yerde bulunan bir gözleyiciye göre uçak hareketsiz hava içerisinde (rüzgar yok kabul ediliyor) uçmakta ve hava içerisindeki herhangi bir hareket uçağın bu hareketi nedeniyle oluşmaktadır. Buna karşılık uçağın pilotu bir diğer gözlemci olarak düşünülürse, pilot uçak içerisinde sabit bir konumdadır. Hava uçağa doğru gelmektedir ve uçak havanın hareketini bozmaktadır. Her iki gözlemci de uçak ve havanın karşılıklı etkileşimlerini aynı denklemlerle inceleyecekler ve aynı çözüme (örneğin uçağa etkiyen kuvvetler için) ulaşacaklardır. Sadece, pilot konumundaki gözlemci için denklemlerdeki bazı terimler sıfır olacaktır. Bu da çözümlemede bazı kolaylıklar sağlayacaktır.



Şekil: Akımın göreceliği

Olayların bu şekilde değişik referanslara göre incelenebilmesine "izafilik prensibi" adı verilir. Aerodinamikte olayların incelenmesinde çoğu zaman, elde edilen denklemlerin daha basit olması nedeniyle, incelenmekte olan cisme bağlı eksen takımında çalışılması tercih edilir. Yani cisim sabit, hava hareketli kabul edilir.

Akımın izafiliğini daha iyi anlayabilmek için durgun hava içerisinde sabit hızla uçan uçağın burun kısmındaki durma noktası civarındaki olayları göz önüne alalım:

Yerdeki gözlemciye göre uçağın burnundaki S noktası ileri doğru V hızı ile hareket etmektedir ve bu noktadaki hava molekülleri de aynı hızla hareket etmektedir. Uçağın ilerisindeki bir O noktasında yer alan hava molekülleri uçak yaklaşınca yavaşça ileriye doğru hızlanmaya başlar. Uçak bu moleküle yetişince de uçakla aynı hızla harekete devam eder.

Uçaktaki gözlemciye göre ise uçağın ilerisindeki O noktasında yer alan bir akışkan molekülü uçağa doğru V hızı ile yaklaşmaktadır. Molekül, uçağa yaklaştıkça yavaşlar ve tam S noktasına gelince durur. İki gözlemcinin bakış açısına göre olaylar farklı gibi görünmekteyse de, sonuçlar her iki halde de aynıdır. Yani her iki halde de S noktası civarında oluşan basınç alanı, ve bunun uçak üzerinde yarattığı kuvvet aynıdır.

Gerçekte, genellikle atmosfer içerisinde ve büyük boyutlarda meydana gelen aerodinamik olayları, akımın izafiliği prensibinden yararlanarak "rüzgar tüneli" adı verilen özel deney ortamlarında modellemek ve deneysel olarak incelemek mümkün olmaktadır. Rüzgar tünelinin "deney odası" adı verilen bölümüne, incelenecek cismin bir modeli sabit olarak oturtulmakta ve model üzerine istenilen hızda hava gönderilerek arzu edilen gözlemler gerçekleştirilebilmektedir.

### 3.4.2 Daimi Akım, Daimi Olmayan Akım

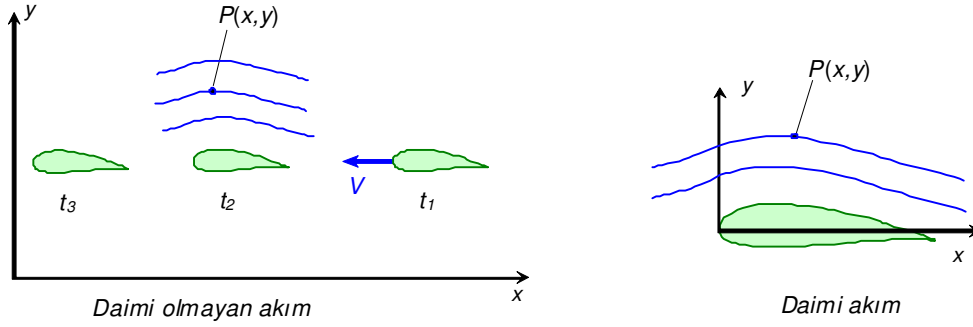
Bir hava akımının daimi olup olmayışı akım içerisinde gözlenen olayların zamana bağlı olup olmayışını ifade eder.

Daimi akımda akım alanının her hangi bir noktasında akım hız ve doğrultusu, basıncı, yoğunluğu, sıcaklığı vb. gibi birtakım karakteristikleri hep aynıdır. Yani zamanla değişmez.

Daimi olmayan akımda ise akım alanının seçilen noktasındaki akım karakteristikleri zamanla değişir.

Bazı hallerde bir gözlemciye göre daimi olmayan bir akım, diğer bir gözlemciye göre daimi olabilir. Diğer bir deyişle seçilen eksen takımına göre daimi veya daimi olmayan bu tip akımlara *sanki daimi akım* denilmektedir. Bu tip akımları gerçek daimi olmayan akımlardan ayırmak gerekir.

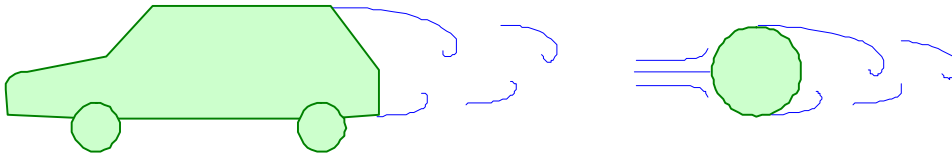
Örneğin şekildeki gibi durgun hava içerisinde düzgün doğrusal hareket yapan bir kanat göz önüne alırsa, herhangi bir  $P(x,y)$  noktasında kanadın etkisiyle meydana gelen akım hızı ve doğrultusu ile basıncın değeri zamanla kanadın konumu değiştikçe değişir. Oysa kanat düzgün doğrusal hareket yaptığından, değişik zamanlarda kanat etrafındaki akım alanının fotoğrafı çekilirse olayların birbirinin benzeri olduğu görülür. Aynı kanat sabit, üniform, paralel hızlı bir akım alanı içerisine konup yakındaki bir  $P(x,y)$  noktası incelenirse, bu noktadaki hız ve basıncın zamanla değişmediği görülür.



Şekil: Sanki-daimi akım

Görüldüğü gibi ilk bakış açısıyla "daimi olmayan tipten" bir olay olarak nitelendirilen akım alanı, ikinci bakış açısıyla "daimi" bir olay olmaktadır.

Gerçek daimi olmayan akıma iyi bir örnek olarak küt cisimlerin arkasındaki akım alanlarını göstermek mümkündür. Örneğin, şekildeki gibi bir otomobilin arkasında çok karışık ve zamanla çok çabuk değişim gösteren bir akım bulunduğunu özellikle tozlu bir yolda veya yağmurlu bir havada fark etmek mümkündür. Silindir etrafındaki akım da bu tip cisimler için iyi bir örnek teşkil eder. Silindirin gerisinde girdaplı bir bölge oluşur ki bu bölgeye iz adını veririz. Bu bölgedeki herhangi bir  $P(x,y)$  noktasındaki akım karakteristikleri zamana önemli bir şekilde bağlıdır ve akım daimi değildir. Buna karşılık silindirin ön tarafında göz önüne alınan diğer bir  $Q(x,y)$  noktasında ise akımın zamanla değişimi ihmal edilebilir mertebelere sahiptir. Bu nedenle bu kısımdaki akım "daimi" kabul edilebilir.



Şekil: Gerçek daimi olmayan akım

### 3.4.3. Yörünge, akım filamentleri ve akım çizgisi kavramları:

Akım alanlarının incelenmesinde akışkan zerrelerinin hareket doğrultuları ve yollarıyla ilgili önemli bazı kavramlar akışkan yörüngesi, akım filamentleri ve akım çizgisi kavramlarıdır.

**Yörünge:** Herhangi bir akışkan akımı çok sayıda akışkan zerrelerinin hareketi olarak göz önüne alınırsa, herhangi bir akışkan zerrisinin hareketi sırasında izlediği yola bu akışkan zerrisinin yörüngesi denir. Herhangi bir akım alanındaki akışkan zerrelerinin her birinin genel olarak ayrı bir yörüngesi bulunmakla birlikte bazı akışkan zerrelerinin yörüngeleri üst üste çakışabilir.

**Akım filamentleri:** Bir akım alanının herhangi bir noktasından ardarda çıkmış bulunan akışkan zerrelerinin herhangi bir anda buldukları noktaları birleştiren çizgiye akım filamentleri adı verilir. Örnek olarak bir sigaradan çıkan duman filelerini gösterebiliriz.

Daimi akımlarda akım filamentleri şekillerini korurken, daimi olmayan akımlardaki akım filamentleri zamanla yer ve şekil değiştirirler.

**Akım çizgisi:** Daimi akımlarda bir akışkanın yörüngesiyle bu akışkanın üzerinde yer aldığı akım filamentleri birbiriyle çakışır. Ve her ikisine birden yeni bir isim, "akım çizgisi" adı verilir. Anlaşılacağı üzere akım çizgisi kavramı sadece daimi akımlar için geçerli olan bir kavramdır. Akım çizgilerinin şu özellikleri vardır:

- Akım çizgisi üzerinde her bir noktadaki hız vektörü akım çizgisine teğettir.
- Akım alanı içerisindeki her bir noktadan bir tek akım çizgisi geçer. Sadece akım hızının sıfır olduğu ve dolayısıyla hız vektörünün bulunmadığı durma noktasında akım çizgileri kesişebilir.
- Akım çizgisi üzerinde hız vektörü akım çizgisine teğet olduğundan, akışkan zerreleri bir akım çizgisinin bir yanından diğer yanına akım çizgisini kesecek tarzda geçemezler. Bu özellik nedeniyle her bir akım çizgisi bir katı cidar gibi göz önüne alınabilir. Aynı şekilde bir katı cidar da bir akım çizgisi gibi düşünülebilir.

### 3.4.4 Sürtümlü akımlar, sürtünmesiz akımlar:

İçerisinde teğetsel gerilmeler oluşan akımlara **sürtümlü akım** adı verilmektedir. Teğetsel gerilmenin kaynağı viskozite ve akışkan hızında genel harekete dik doğrultudaki gradyanlardır.

Örneğin  $x$  ekseninde soldan sağa doğru  $u$  hızıyla akmakta olan bir akımda buna dik  $y$  doğrultusunda bir hız değişimi varsa  $x$  doğrultusunda

$$\tau = \mu (\partial u / \partial y)$$

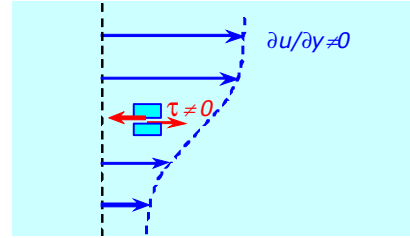
şeklinde bir teğetsel gerilme oluşacaktır.

Bütün akışkanlar büyük veya küçük olsun bir viskoziteye sahiptir. Ancak teğetsel gerilme oluşması için viskozite yalnız başına yeterli değildir. Mutlaka hız farklılıkları (gradyanları) olması gerekir. Örneğin, üniform paralel bir akımda hız farklılıkları olmadığından teğetsel gerilme oluşmaz.

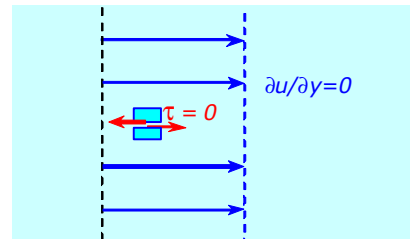
Akım içerisinde hız gradyanı yaratacak etken çoğu zaman akım içerisinde yer alan bir **katı cidar** veya oluşturulan bir **jet akımı**dır.

Katı cidar viskozite yardımıyla akımın ilerlemesini engelleyerek yarattığı bir sınır tabaka ile hız gradyanı oluşturur. Sınır tabaka cismin gerisinde bir iz bölgesi içerisinde hız gradyanını devam ettirir.

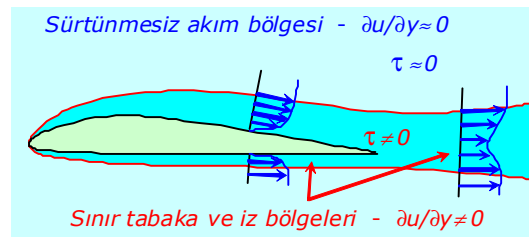
Çevre ortam hızlarından farklı hızlardaki jet akımları ise yine viskozite yardımıyla hız gradyanları oluşturur.



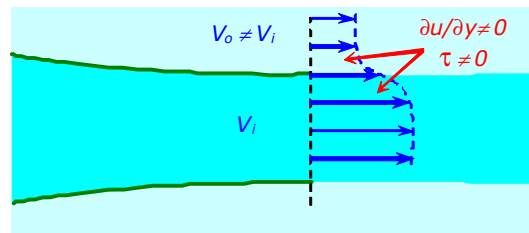
Şekil: Sürtümlü akım



Şekil: Üniform-paralel akım



Şekil: Sınır tabaka ve iz.



Şekil: Jet akımı



Bu oluşumlar içerisinde cisimlerin aerodinamik incelemeleri bakımından en önemli birisi sınır tabaka akımlarıdır.

### 3.4.4.1 Sınır tabaka:

*Viskozitenin*, akışkan tabakalarının birbiri üzerinde *kaymaya karşı* gösterdikleri *direncin* bir tür ölçüsü olduğunu söylemek mümkündür.

Aynı direnç etkisi *akışkanla* - *katı cidar* arasında da söz konusudur. Yani bir akışkan bir katı cisim etrafından geçerken veya bir cisim bir akışkan içerisinde hareket ederken cisim akışkana akışkan da cisme temas yüzeyleri boyunca teğetsel kuvvetler etkiler.

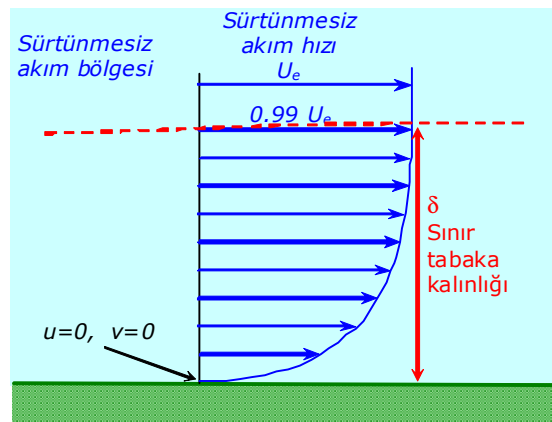
Deneyimler göstermektedir ki böyle bir hareket içerisinde *temas yüzeyinin bütün noktalarında katı cismin hızı ile akışkanın ortalama hızları aynıdır*. Diğer bir deyişle *akışkanın katı cisme göre hızı sıfırdır*.

Cisme en yakın tabakalarda neredeyse durma hızlarında olan akışkan zerreleri daha üst tabakalardaki biraz daha hızlı komşu akışkan kitlelerine teğetsel kuvvetler etkiler onların yavaşlamasına neden olurlar.

Komşu tabakalar arasındaki bu etkileşim cisimden uzaklaştıkça azalacak biçimde sonsuza kadar devam eder.

Bir katı cidar civarında akım hızlarının bu şekilde azalması doğrudan viskozitenin sonucudur. Viskozitenin olmaması halinde, yani sürtünmesiz akımda bu etkinin bulunmayacağını söylemek mümkündür. Aslında bütün akışkanlar viskoz yani sürtünmelidir. Ancak, yüzyılımızın başlarında, modern aerodinamiğin kurucularından olan Prandtl, viskozite etkisinin bir katı cidar yakınında dar bir bölgede çok fazla olduğunu ve bu bölgenin dışına çıkınca etkinin ihmal edilebilir mertebelere indiğini tespit ederek, bir cisim etrafındaki akım alanının farklı karakterde iki bölge halinde incelenmesinin uygun olacağını ortaya koymuştur. Bu bölgelerden, katı cidara yakın olan ve akım hızlarının yukarıda izah edildiği gibi azaldığı bölgeye *sınır tabaka* adını vermiş, viskozite etkilerinin ihmal edilebilir mertebelere indiği dış bölgeye ise *sürtünmesiz akım bölgesi* adını vermiştir.

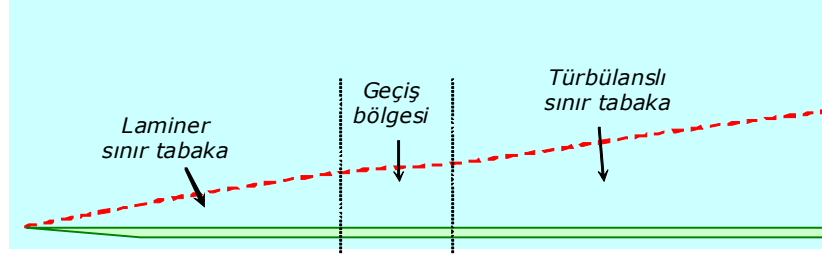
Sınır tabaka genellikle akım hızlarının viskoz olmayan bölgedeki akım hızlarının %99'u ve daha altındaki mertebelerde olduğu bölge olarak tarif edilir. Katı cidardan itibaren, akım hızının sürtünmesiz akım hızının %99'una eşit olduğu tabakaya kadar olan mesafe de sınır tabakanın kalınlığı olarak tanımlanır.



Şekil: Sınır tabaka yapısı

### 3.4.4.2. Laminer ve türbülanslı sınır tabaka, geçiş bölgesi

Sınır tabakalar, laminer ve türbülanslı olarak iki şekilde bulunabilir. Çoğu zaman laminer olarak başlayan sınır tabaka başlangıç noktasından belli bir uzaklıkta türbülanslı hale dönüşür. Laminer sınır tabakanın türbülanslı hale dönüştüğü bölgeye geçiş (transition) bölgesi adı verilir.

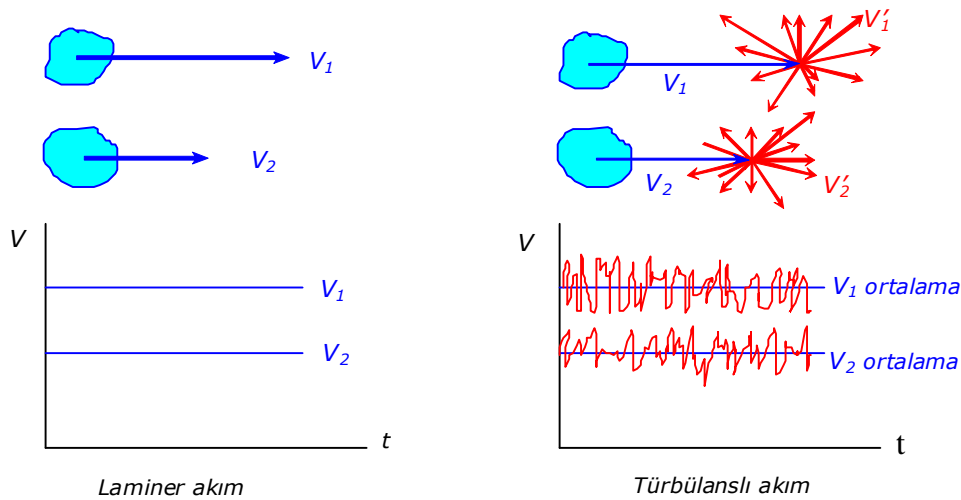


Şekil: Sınır tabaka bölgeleri

Sınır tabakanın laminer veya türbülanslı oluşunu tanımlamak için, önceki paragrafta akışkan zerresi olarak tanımladığımız molekül seviyesindeki mikroskopik akışkan tanelerinden daha büyük, yani makroskopik seviyedeki akışkan kitlelerinin hareketine bakmak gerekir.

Şayet makroskopik büyüklükteki akışkan taneleri yörüngeleri boyunca düzgün görümlü bir akış halinde ise ve yörüngeler arasında makroskopik boyutta bir karışma olmuyorsa bu tip sınır tabakaya laminer sınır tabaka adı verilir.

Buna karşılık türbülanslı sınır tabakada makroskopik büyüklükteki akışkan tanelerinin hareketinde bir düzensizlik (rastgelelik) vardır. Yani, sınır tabaka içerisindeki her bir tabakada ortalama bir hız yanında, şiddetli ve yüksek frekanslı ani hızlar söz konusudur. Diğer bir deyişle, tanecikler genel akım doğrultusunda ortalama bir hareket yaparken rastgele doğrultularda ve rastgele hızlarda ani hareketler de yaparlar. Ani hız doğrultuları rastgele olduğundan türbülanslı sınır tabakanın tabakaları arasında kütle transferi ve oldukça kuvvetli bir karışım da söz konusudur. Geçiş bölgesinde ise Laminer ve türbülanslı sınır tabaka karakteristiklerinin her ikisine birden rastlanır.

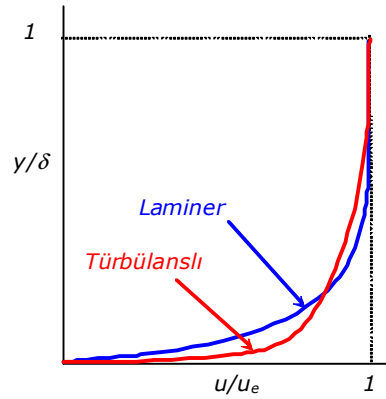


Şekil: Laminer ve türbülanslı tabakalarda partikül hızları

Laminer ve türbülanslı akım özelliklerine sadece sınır tabakalarda rastlamayız. Viskozitenin etkisinin çok kuvvetli olarak görüldüğü herhangi bir akım alanında da rastlamak mümkündür. Bu türden bazı akım tipleri laminer ve türbülanslı akım özelliklerinin anlaşılması bakımından çok güzel örnek teşkil ederler. Örneğin, bir sigaradan yükselen duman, veya bir musluktan akan su. Duman, sigaradan ilk çıktığı an oldukça düzgün bir hareket yapar. Duman zerreciklerinin yörüngelerini açık bir şekilde görmek mümkündür. Ancak sigaradan bir miktar uzakta yörüngeler birbirine karışmaya ve duman da dağılmaya başlar. İşte burada türbülanslı hale geçiş başlamıştır. Benzeri şekilde musluktan yol-yol düzgün bir akışla çıkan su belli bir uzaklıktan sonra daha karışık bir görünüm alır. Yani türbülanslı akım özelliği göstermeye başlar.

### 3.4.4.3. Sınır tabakada hız değişimi, yüzey sürtünmesi

Laminer ve türbülanslı sınır tabakalardaki tipik hız dağılımları aşağıdaki şekilde görülmektedir. Burada  $u$  ile katı cidara paralel hızlar belirtilmektedir. Fark edildiği gibi, türbülanslı halde katı cidar yakınındaki hız gradyanı (hızın cidara dik doğrultudaki değişimi) laminer haldekinden daha fazladır.



Şekil: Sınır tabakada hız dağılımı

Sınır tabaka içerisinde herhangi bir noktada akışkan tabakaları arasındaki kayma gerilmesi şiddetinin

$$\tau = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

şeklinde hız gradyanına ve mutlak viskozitenin büyüklüğüne bağlı olduğu belirtilmişti. Bu gerilmenin yüzey üzerindeki değeri, yani yüzey sürtünme gerilmesi ise

$$\tau_w = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0}$$

Yüzey üzerindeki hız gradyanının büyüklüğüne bağlıdır.

Buna göre türbülanslı halde yüzey yakınındaki hız gradyanı laminer haldekinden daha büyük olduğundan, türbülanslı haldeki yüzey sürtünme sürüklemesi laminer haldekinden daha fazladır.

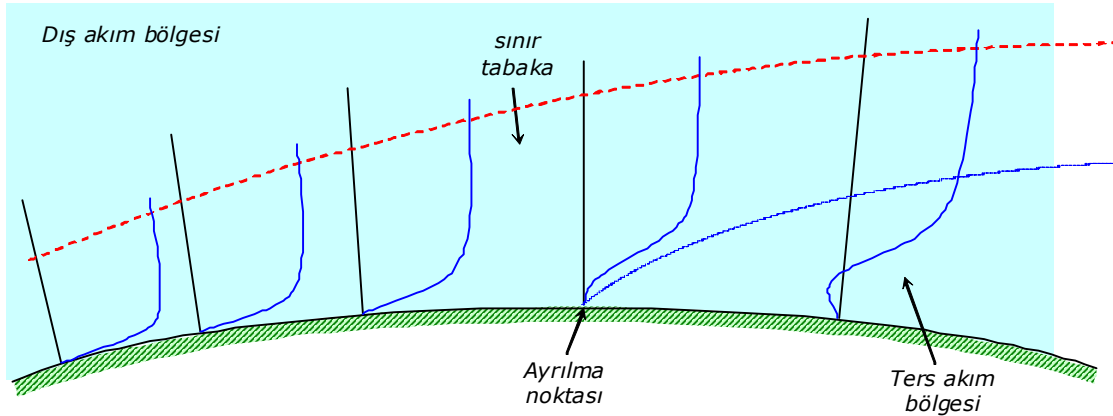
Ayrıca deneyimler göstermektedir ki türbülanslı sınır tabakanın kalınlığı, aynı noktada yer alacak bir laminer sınır tabakaya kıyasla daha fazladır.

Bu iki nedenden ötürü bir uçak üzerinde oluşan sınır tabakanın mümkün olduğu kadar laminer kalması arzu edilir.

Türbülanslı ve laminer sınır tabaka kalınlıklarının oranı hakkında bir fikir belirtmek gerekirse, deniz seviyesinde  $65 \text{ m/sn}$  hızındaki akım içerisinde yer alan bir düz levhanın burnunda sınır tabaka kalınlığı sıfır ve burundan  $1 \text{ m}$  gerideki laminer sınır tabaka kalınlığı  $2 \text{ mm}$  iken, aynı noktada türbülanslı sınır tabaka bulunması halinde bu tabakanın kalınlığı  $20 \text{ mm}$  kadar olmaktadır.

#### 3.4.4.4. Sınır tabaka ayrılması

Sınır tabakada laminer, geçişsel ve türbülanslı bölgeler dışında önemli bir olay da ayrılmadır. Sınır tabaka içerisinde katı cidarı takip etmekte olan akışkan zerreleri bazı hallerde belli bir noktadan sonra aniden cidardan uzaklaşan bir yörünge takip etmeye başlarlar. Bu durumda ayrılmanın olduğu noktanın gerisinde akışkanın genel akım yönüne zıt yönde bir hareket yaptığı da gözlenir.



Şekil: Sınır tabakanın ayrılması

Ayrılmamanın başlıca nedeni sınır tabaka içindeki akışkan zerrelerinin hareketini zorlaştıran yöndeki basınç kuvvetleridir. Sınır tabaka içinde zaten genel akım hızından daha düşük hızla, yani küçük bir momentuma sahip olacak şekilde hareket etmekte olan akışkan partikülleri, zıt yöndeki bir basınç kuvvetinin etkisi halinde, bu kuvveti yenebilecek kadar momentuma sahip olmadıkları takdirde daha da yavaşlayarak bir yerden sonra duvardan uzaklaşacak şekilde harekete başlarlar.

Bu tip olaylar ters basınç gradyanı halinde ortaya çıkar. Yani, sınır tabakanın olduğu katı cidar boyunca basınç giderek artıyorsa sonuçta muhtemelen bir ayrılma ile karşılaşılabilir.

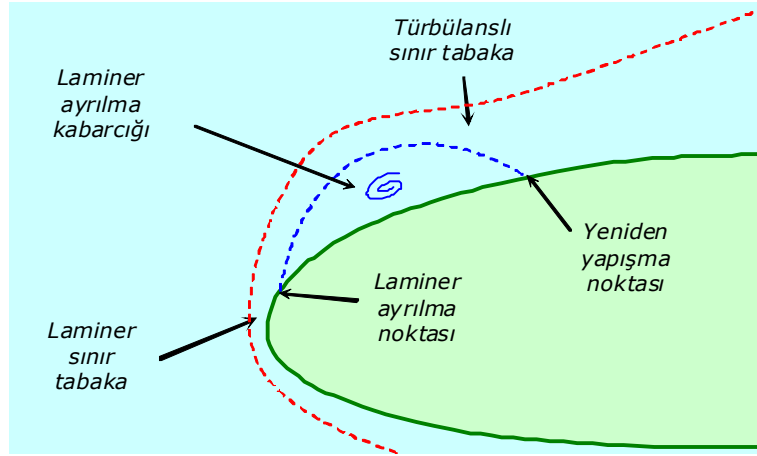
Ayrılmaya kadar gelişen sınır tabakanın laminer olduğu kısmında meydana gelirse *laminer ayrılma*, türbülanslı kısmında meydana gelirse *türbülanslı ayrılma* olarak adlandırılır.

Ayrılmaya kadar gelişen sınır tabaka içerisinde duvar üzerindeki hız gradyanı incelenirse,

- i) Ayrılmadan önce  $(\partial u / \partial y)_w > 0$  olduğu, ancak bu gradyanın değerinin ayrılma noktasına yaklaştıkça azaldığı,
- ii) Ayrılma noktasında  $(\partial u / \partial y)_w = 0$  olduğu,
- iii) Ayrılma noktasından sonra ise  $(\partial u / \partial y)_w < 0$  olduğu gözlenir.

Laminer olarak ayrılan sınır tabaka, bazı hallerde ayrılmanın ardından türbülanslı hale dönüşerek yeniden cidara yönelebilir ve türbülanslı bir sınır tabaka olarak katı cidarı takip

eder. Bu gibi hallerde sınır tabakanın ayrıldığı ve yeniden cidara yapıştığı noktalar arasında kalan bölgede kapalı bir dönel akım oluşur (Şekil 5.9). Bu bölgeye laminer ayrılma kabarcığı adı verilir. Bu tür ayrılmalara özellikle kanat profillerinin hücum kenarları civarında rastlanır.



Şekil: Laminer ayrılma kabarcığı

### 3.4.4.5. Sınır tabaka gelişimini etkileyen faktörler, Reynolds sayısı

Hava akımı içerisinde yer alan uçak gövdesi, kanadı gibi ve benzeri bir cisim üzerinde meydana gelen sınır tabakanın

- kalınlığı,
- laminer veya türbülanslı oluşu,
- laminer halden türbülanslı hale geçtiği noktanın konumu,
- ayrılma oluşumu ve ayrılma noktalarının yerleri

gibi sınır tabaka ile ilgili bir çok olay, akım alanı ve cismin geometrisiyle ilgili birçok faktörden önemli ölçüde etkilenir. Bu etkenler şunlardır:

- Reynolds sayısı
- Basınç gradyanı
- Yüzey pürüzlülüğü
- Serbest akım türbülansı

#### REYNOLDS SAYISI:

Reynolds sayısı bir akışkan akımında atalet kuvvetleri ile viskoz kuvvetler (sürtünme kuvvetleri) arasındaki oranı gösteren çok önemli bir parametredir.

$$Re \propto \frac{\text{Atalet kuvvetleri}}{\text{Viskoz kuvvetler}} \rightarrow Re = \frac{\rho U l}{\mu}$$

Bu tanımlamaya göre, Reynolds sayısının çok küçük olması halinde bir akım alanının hemen tamamında viskoz kuvvetlerin hakim olacağını söyleyebiliriz. Buna karşılık Reynolds sayısı arttıkça atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetler yanında önem kazandığını görürüz. Reynolds sayısının yüksek değerlerinde ise akım alanının genelinde atalet kuvvetleri baskın olup, bu kuvvetler yanında sürtünme kuvvetlerinin etkisi ihmal edilebilir. Ancak bu halde, akışkanın katı cidarlarla temas halinde olduğu bölgelerde viskoz kuvvetlerin önemi yine büyüktür. Nitekim, sınır tabaka dediğimiz oluşumun

meydana geldiği bu bölgelerde akışkan hızları, sürtünme kuvvetleri nedeniyle cidar üzerinde sıfır olacak şekilde azalır.

Aynı mantıkla sınır tabaka üzerinde Reynolds sayısının etkisini incelersek, Reynolds sayısı arttıkça atalet kuvvetlerinin akım alanının geneli üzerindeki etkisinin daha da artacağını ve viskoz kuvvetlerin hakim olduğu sınır tabaka bölgesinin daha inceleyeceğini söylememiz mümkündür.

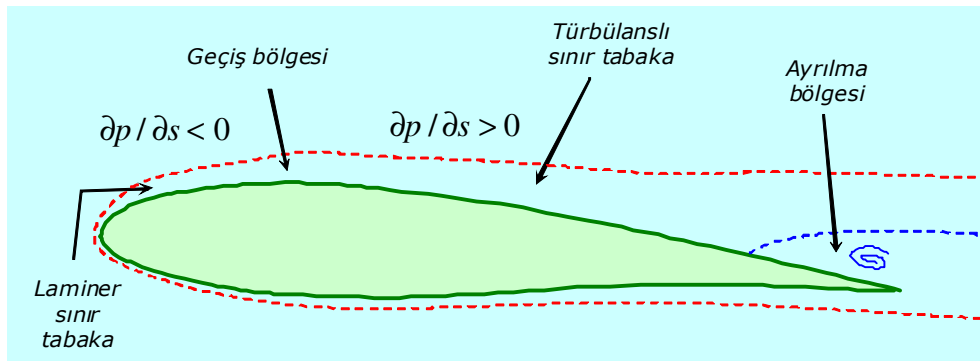
Reynolds sayısının sınır tabaka üzerindeki bu genel etkisi dışında önemli bir diğer etkisi de sınır tabakanın laminer halden türbülanslı hale geçiş bölgesinin yeri üzerindedir. Deneyimler göstermiştir ki Reynolds sayısı arttıkça sınır tabaka daha çabuk (yani, daha öndeki bir noktada) türbülanslı hale geçmektedir.

Gerek laminer ayrılma ve türbülanslı ayrılma oluşumu ve konumları, ve gerekse laminer ayrılma sonucu bir kabarcık oluşumu yine Reynolds sayısının değerine bağlı olarak önemli ölçüde değişebilen diğer sınır tabaka özellikleridir.

### BASINÇ GRADYANTI:

Bir katı cidar boyunca oluşan sınır tabakanın gelişimi, geçiş bölgesinin yeri, laminer veya türbülanslı ayrılma oluşumu ve konumları üzerinde cidar boyunca basınç değişiminin çok önemli etkileri vardır. Bu etkileri kabaca şu şekilde özetlemek mümkündür:

- Negatif basınç gradyanı genellikle sınır tabakanın gelişimini olumlu yönde etkiler.
- Pozitif basınç gradyanı ise sınır tabaka gelişimini olumsuz yönde etkileyerek geçişin ve ayrılma oluşumunun çabuklaşmasına neden olur.



**Şekil: Sınır tabakanın gelişimi üzerinde basınç gradyanının etkisi**

### YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ:

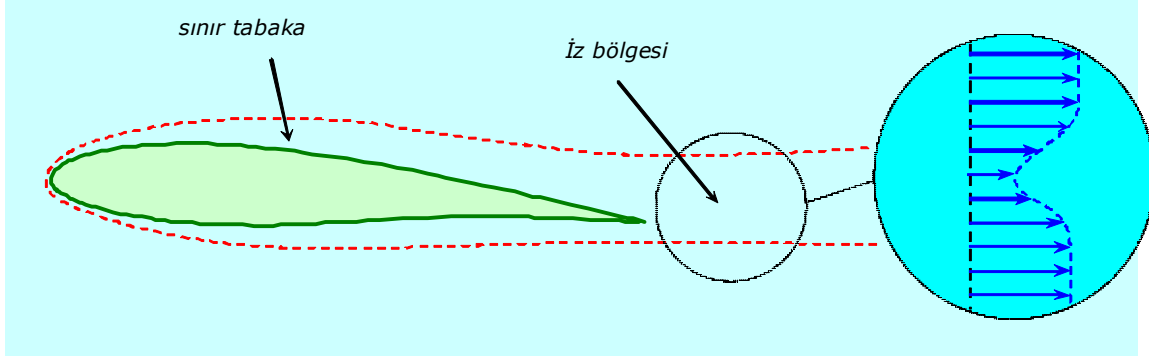
Katı cidar yüzeyindeki pürüzlülük sınır tabakada geçiş bölgesinin daha önde oluşmasına neden olur.

### SERBEST AKIM TÜRBÜLANSI:

Serbest akımın türbülansı ne kadar fazla olursa sınır tabaka da laminer halden türbülanslı hale o kadar önce geçer.

### 3.4.4.6. İz bölgesi

Akışkan akımına maruz bir katı cisim üzerinde oluşan sınır tabaka bu cismin bitiminde, yani firar kenarında aniden ortadan yok olmaz, Sınır tabakanın özellikleri cismin gerisinde bir kaymalı akım bölgesinde kendini göstermeye devam eder. Cismin gerisindeki bu bölgeye *iz bölgesi* adı verilir (Şekil 5.11). İz bölgesi içerisinde viskoz kuvvetler, sınır tabaka içinde olduğu gibi önemini korur ve akışkan hızlarında aynen sınır tabaka içine benzer bir dağılım görülür.



Şekil: İz bölgesi

İz bölgesinin yapısı (hız dağılımı) ve cismin gerisindeki gelişimi sınır tabakanın yapısında ve oluşan ayrılmalardan önemli ölçüde etkilenir.

### 3.4.4.7. Sınır tabaka ve izin akım alanı üzerindeki etkisi ve havacılıktaki önemi

Bir cisim etrafında meydana gelen sınır tabakanın iki önemli etkisinden söz etmek mümkündür. Bunlardan birincisi akışkanın katı cidar üzerinde yarattığı sürtünme kuvvetidir. Katı cismin bütün cidarları üzerinde oluşan sürtünme kuvvetlerinin bileşkesi katı cismin akışkan içerisinde ilerlemesini engelleyici yöndedir ve genellikle *sürtünme sürüklemesi* adı ile bilinir. Daha önce de belirtildiği gibi türbülanslı sınır tabakalarda sürtünme sürüklemesi laminer sınır tabakalara kıyasla daha fazladır. Bu nedenle uçak gövdesi, kanadı ve benzeri aerodinamik yapıları cisimler üzerinde sınır tabakanın mümkün olduğu kadar geniş bir bölgede laminer kalması arzu edilir.

Sınır tabakanın ikinci önemli etkisi de akım alanındaki basınç dağılımı üzerindedir. Gerek sınır tabakanın kalınlığı ve gerekse sınır tabakanın gelişiminin bir sonucu olarak ortaya çıkan ayrılma ve iz bölgeleri akım alanındaki basınç dağılımının değişmesine ve bunun sonucu olarak da katı cisme etkiyen ilave bir *basınç sürüklemesi* nin oluşumuna neden olurlar. Ayrıca taşıma katsayısı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Bu etkiler ilerleyen bölümlerde incelenecektir.

### 3.4.4.8. Sürtünmesiz akım yaklaşımı

Daha önce de belirtildiği gibi gerçekte bütün akışkanların az veya çok bir miktar viskoziteleri vardır. Akışkanın viskoz özelliği akım alanının her tarafında mevcuttur. Ancak, yine belirtildiği gibi akışkanın viskozitesiyle ilgili olarak ortaya çıkan sürtünme kuvvetleri genel olarak akışkanın katı yüzeylerle temasta bulunduğu bölgelerde belirgin, bunun dışındaki bölgelerde ise ihmal edilebilir mertebelerdedir. İşte bu şekilde viskozite etkilerinin ihmal edilebilir mertebelerde olduğu akım alanlarına sürtünmesiz akım gözüyle bakmak mümkündür. Akım alanlarının bu şekilde bir modelle göz önüne alınması aerodinamik incelemelerde büyük kolaylık sağlar.

