

BÖLÜM 1

GİRİŞ, TERMODİNAMİK HATIRLATMALAR

1.1-Termodinamik hatırlatmalar

- 1.1.1- Mükemmel gaz
- 1.1.2- İç enerji ve entalpi
- 1.1.3- Termodinamiğin 1. kanunu
- 1.1.4- Entropi ve termodinamiğin 2. kanunu
- 1.1.5- Entropinin hesaplanması
- 1.1.6- İzentropik bağıntılar

1.2- Sıkıştırılabilir akımın tanımı

1.3- Akım rejimleri

- 1.3.1- Sesaltı akımlar
- 1.3.2- Ses civarı akımlar
- 1.3.3- Sesüstü akımlar
- 1.3.4- Sesin çok üstü akımlar

1.1-Termodinamik hatırlatmalar

1.1.1- Mükemmel gaz

Moleküller arası kuvvetlerin ihmal edilebilir düzeyde olduğu gazlardır.

Mükemmel gazlar için [hal denklemi](#)

$$p = \rho RT$$

veya

$$pv = RT$$

p : [basınc](#)

$v = \frac{1}{\rho}$: [özgül hacim](#) (birim kütle başına hacim)

1.1.2- İç enerji ve entalpi

e : [İç enerji](#) : Akışkan moleküllerinin rastgele titreşim ve rotasyonlarıyla ilgili enerjisidir

h : [Entalpi](#)

$$h = e + pv$$

[Reel gazlar](#) ve [kimyasal reaksiyondaki gazlar](#) için

→

$$\begin{cases} e = e(T, v) \\ h = h(T, p) \end{cases}$$

[Kimyasal reaksiyonda olmayan gazlar](#) ve [moleküller arası kuvvetlerin ihmal edildiği gazlar](#) için

$$\begin{cases} e = e(T) \\ h = h(T) \end{cases}$$

→

$$\begin{cases} de = c_v dT \\ dh = c_p dT \end{cases}$$

[Isıl olarak mükemmel gaz](#)

$$\begin{cases} c_v = Sb \\ c_p = Sb \end{cases}$$

ise

$$\begin{cases} e = c_v T \\ h = c_p T \end{cases}$$

[Kalorik olarak mükemmel gaz](#)

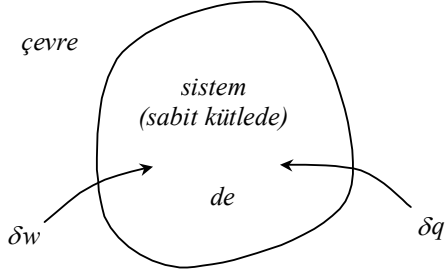
$$\begin{cases} c_p - c_v = R \\ \frac{c_p}{c_v} = \gamma \end{cases}$$

olup →

$$\begin{cases} c_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1} \\ c_v = \frac{R}{\gamma - 1} \end{cases}$$

bulunabilir.

1.1.3- Termodinamiğin 1. kanunu



Termodinamiğin 1. kanunu

Durağan (kinetik enerjinin olmadığı) bir sistem için birim kütle başına

$$\delta q + \delta w = de$$

δw Çevre tarafından sistem üzerinde yapılan iş (hacmin daralması)

δq Çevreden sisteme sokulan ısı (Radyasyon, sıcaklık farkı nedeniyle ısı iletimi gibi)

de Sistemin iç enerjisindeki artış

Çeşitli termodinamik prosesler

Adyabatik proses Sistemle çevre arasında ısı alışverişinin olmadığı süreçtir

Tersinir proses Viskozite etkisi, ısı iletimi etkisi, kütle difüzyonu etkisi gibi dissipatif etkilerin olmadığı süreçtir.

İzantropik proses hem adyabatik hem de tersinir olan süreçtir.

NOT:

Tersinir olaylar için

$$\delta w = -p dv$$

olup

Termodinamiğin 1. kanunu

$$\delta q - p dv = de$$

şeklinde yazılabilir.

1.1.4- Entropi ve Termodinamiğin 2. kanunu

Sıcak bir metal levhanın üzerine bir buz kalıbı konulduğunda levha ile buz kalıbı arasında bir ısı alışverişi olur.

Termodinamiğin 1. kanunu metal levha ile buz kalıbı arasında bir ısı alışverişi olabileceğini ortaya koyarken sadece enerji toplamının sabit kalacağını (enerjini korunacağını) belirtir. Yani alışverişin hangi yönde olacağı hakkında bilgi vermez. Bu kanuna göre enerji korunmak kaydıyla buzun soğuması da mümkündür.

Oysa tecrübelerimiz buzun ısınıp muhtemelen eriyeceğini, metal levhanın ise soğuyacağını gösterir.

[Termodinamiğin 2. Kanunu](#) termodinamik [olayın hangi yönde gelişeceği](#) hakkında bilgi verir.

[Antropi](#)

$$ds = \frac{\delta q_{\text{tersinir}}}{T}$$

T	Sistemin sıcaklığı
$\delta q_{\text{tersinir}}$	Sisteme tersinir olarak sokulan ısı
ds	Antropi değişimi

Antropi bir durum (state) değişkeni olup, prosesten bağımsızdır. Yani tersinir ve tersinmez hallerin her ikisinde de tanımlanabilir.

Alternatif ve daha net bir bağıntı

$$ds = \frac{\delta q}{T} + ds_{\text{tersinmez}}$$

şeklinde yazılabilir. Burada

$ds_{\text{tersinmez}} \geq 0$

Dissipatif etkilerin katkısı olup antropiyi daima arttırır.

Buna göre

$$ds \geq \frac{\delta q}{T}$$

Proses adyabatik ise

$$ds \geq 0$$

Sonuç olarak [Termodinamiğin 2. kanunu](#)

Termodinamik prosesin [SİSTEM + ÇEVRE 'nin antropisi artacak](#) biçimde (yönde) gelişeceğini belirtir.

1.1.5- Antropinin hesaplanması

Tersinir olaylar için termodinamiğin 1. kanunu			$\delta q - p dv = de$
Isı ilavesi tersinir ise	$\delta q = T ds$	→	↓
			$T ds - p dv = de$
			$T ds = p dv + de$
Antalpi tanımı	$h = e + pv$		
	$dh = de + pdv + vdp$	→	↓
			$T ds = dh - v dp$

$T ds = dh - v dp$		$T ds = de + p dv$
↓← $dh = c_p dT$	Isıl mükemmel gaz için	$de = c_v dT$ →↓
$T ds = c_p dT - v dp$		$T ds = c_v dT + p dv$
$ds = c_p \frac{dT}{T} - \frac{v dp}{T}$		$ds = c_v \frac{dT}{T} + \frac{p dv}{T}$
↓← $\frac{v}{T} = \frac{R}{p}$	Mükemmel gaz için hal denklemleri	← $pv = RT$ → $\frac{p}{T} = \frac{R}{v}$ →↓
$ds = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p}$		$ds = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$
$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p \frac{dT}{T} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$		$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$
↓← $c_p = Sb$	Kalorik mükemmel gaz için	$c_v = Sb$ →↓
$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$		$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$

1.1.6- İzantropik bağıntılar

$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$	İzantropik proses $ds = 0$	$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$
↓ ←		→ ↓
$\ln \frac{p_2}{p_1} = \frac{c_p}{R} \ln \frac{T_2}{T_1}$		$\ln \frac{v_2}{v_1} = -\frac{c_v}{R} \ln \frac{T_2}{T_1}$
$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{c_p}{R}}$		$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{-\frac{c_v}{R}}$
↓ ←	$\frac{c_p}{R} = \frac{\gamma}{\gamma - 1}$	→ ↓
$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$		$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{-\frac{1}{\gamma - 1}}$
↓	$v = \frac{1}{\rho}$	→ ↓
↓		$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}}$
↓ → →	$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{\gamma}$	← ← ↓

1.2- Sıkıştırılabilir akımın tanımı

Sıkıştırılabilir akım çoğu zaman "değişken yoğunluklu akım" olarak tanımlanır

v hacmindeki küçük bir akışkan elemanına çevre akışkan tarafından etkilenen ρ basıncında dp kadarlık bir artış olduğunda akışkanın hacminde $-dv$ miktarında bir değişme (azalma) varsa sıkıştırılabilir

$$\tau = \frac{-dv/v}{dp}$$

şeklinde tanımlanabilir. Yani sıkıştırılabilir, basıncıdaki birim değişime karşılık hacimdeki oransal değişme miktarıdır.

Buradaki τ büyüklüğünün tersi literatürde genellikle Bulk Elastisite Modülü olarak bilinir.

Şayet sıkışma sırasında gazın sıcaklığı sabit tutulabiliyorsa buna izotermal sıkıştırılabilir adı verilir.

$$\tau_T = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T$$

Sıkışma sırasında akışkan elemanı ile çevre arasında ısı alışverişi yoksa (adyabatik sıkışma) ve dissipatif bir olay (viskoz etkiler vb) yoksa buna izantropik sıkıştırılabilir denir.

$$\tau_s = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_s$$

Sıkıştırılabilir bir akışkan özelliğidir.

Sıvıların sıkıştırılabilmesi çok küçüktür (1 atm basınçta)

$$\tau_T = 5 \times 10^{-10} (m^2 / N)$$

Gazların sıkıştırılabilmesi büyüktür (1 atm basınçta)

$$\tau_T = 5 \times 10^{-5} (m^2 / N)$$

$$\begin{array}{ccccccc} \tau = -\frac{1}{v} \frac{dv}{dp} & & & & & & \\ \downarrow & \leftarrow & \frac{dv}{v} = -\frac{d\rho}{\rho} & \leftarrow & dv = -\frac{d\rho}{\rho^2} & \leftarrow & v = \frac{1}{\rho} \\ \tau = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} & & & & & & \\ d\rho = \rho \cdot \tau \cdot dp & & & & & & \end{array}$$

Bir akışkanın hareketi çoğu zaman bir basınç farkıyla oluşur. Yüksek hızlı akımlarda dp basınç farkı da yüksek olacaktır.

Bir sıvı akışında dp büyük olsa bile sıkıştırılabilirlik (τ) küçük olduğundan yoğunluk değişimi de küçüktür. Akım sıkıştırılmaz kabul edilebilir.

Gaz akımında ise sıkıştırılabilirlik (τ) büyük olup yoğunluk değişimi de büyüktür. Bu bakımdan akım sıkıştırılmaz kabul edilemez. Ancak $M < 0.3$ halinde basınç değişimleri küçük olup, yoğunluk değişimleri de küçük kalır, ve akım sıkıştırılmaz kabul edilebilir.

1.3- Akım rejimleri

1.3.1- Sesaltı akım rejimi

Hızların bütün akım alanında ses hızının altında olduğu akımlardır. Çoğu yüksek hızlı kanat profilleri için hücum açısı büyük olmamak kaydıyla $M_\infty < 0.8$ halinde akım sesaltı rejimde kabul edilir.

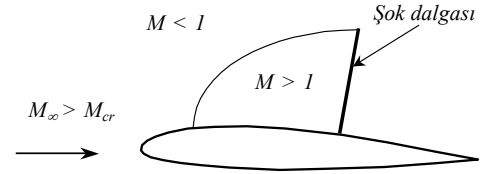
Sıkıştırılmaz akım rejimi

Sesaltı akımın $M_\infty \rightarrow 0$ özel halidir. Pratikte genellikle $M_\infty < 0.3$ halindeki akımlar sıkıştırılmaz kabul edilir.

Matematiksel olarak	$M_\infty = \frac{V_\infty}{a_\infty} \rightarrow 0$	için	$V_\infty = 0$	veya	$a_\infty \rightarrow \infty$	olması gerekir.		
	$V_\infty = 0$	olamaz.	Zira bu durumda hiç akım olmaz.					
	$a_\infty \rightarrow \infty$	olabilir.	Zira	$\tau \propto \frac{l}{a^2}$	olup	$\tau \propto \frac{l}{a_\infty^2} \rightarrow 0$	ve böylece	$d\rho = \rho \cdot \tau \cdot dp \rightarrow 0$
olur.								

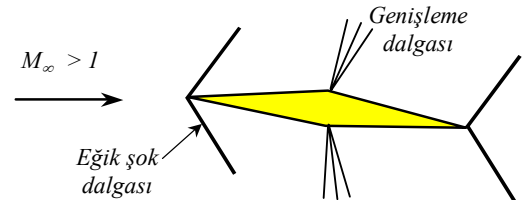
1.3.2- Ses civarı (transonik) akım rejimi

Hızların akım alanının genelinde sesaltı iken bazı bölgelerde sesüstü olması halindeki akımdır. Transonik akım rejimi, kritik Mach sayısından itibaren başlar ve genellikle $0.8 < M_\infty < 1.2$ aralığındadır.



1.3.3- Sesüstü akım rejimi

Akım alanının bütün noktalarında $M > 1$ olması halidir. Akımda eğik şoklar ve genişleme dalgaları görülür. Şoku geçen akım özelliklerinde ani değişimler olur



1.3.4- Sesin çok üstü (hipersonik) akım rejimi

$M_\infty > 5$ halindeki akım rejimidir. Bu akımda bir köşe üzerinde oluşan şokun eğimi o kadar fazladır ki, yüzeye çok yaklaşır. Şokla yüzey arasındaki akım çok sıcak olup gazın iyonlaşmasına neden olur.



Viskoz olmayan akım rejimi

Viskozite, ısı iletimi ve kütle difüzyonu gibi dissipatif etkilerin ihmal edilebilecek mertebede olduğu akımlar viskoz olmayan akım olarak kabul edilir.