

Akışkanlar Mekaniği: Temelleri ve Uygulamaları

3. Baskı

**Yunus A. Cengel, John M. Cimbala
McGraw-Hill, 2014**

Bölüm 2

AKIŞKANLARIN ÖZELLİKLERİ

Slaytları Hazırlayan:

Prof. Dr.

Suat CANBAZOĞLU



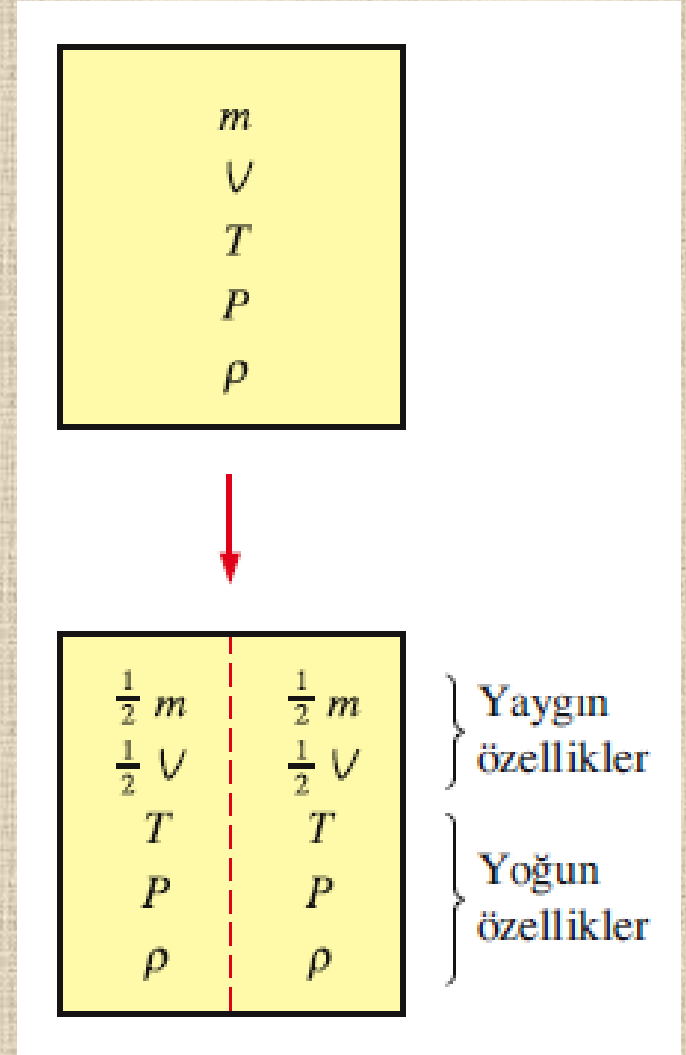
Bir sıvı küçük bir tüpten çıkmaya zorlandığında küçük bir damla meydana gelir. Bu damlanın şekli; basınç, yerçekimi ve yüzey gerilimi kuvvetleri arasındaki bir denge tarafından tayin edilir.

Öğrenim Amaçları

- Akışkanların temel özelliklerini hakkında bilgi sahibi olmalı ve sürekli ortam yaklaştırımını anlayabilmelidir.
- Viskoziteyi ve akışkan akımının bunun yol açtığı sürtünme etkilerinin sonuçları hakkında bilgi sahibi olmalıdır.
- Yüzey geriliminden kaynaklanan kılcal yükselmeleri (veya alçalmaları) hesaplayabilmelidir.

2-1 ■ GİRİŞ

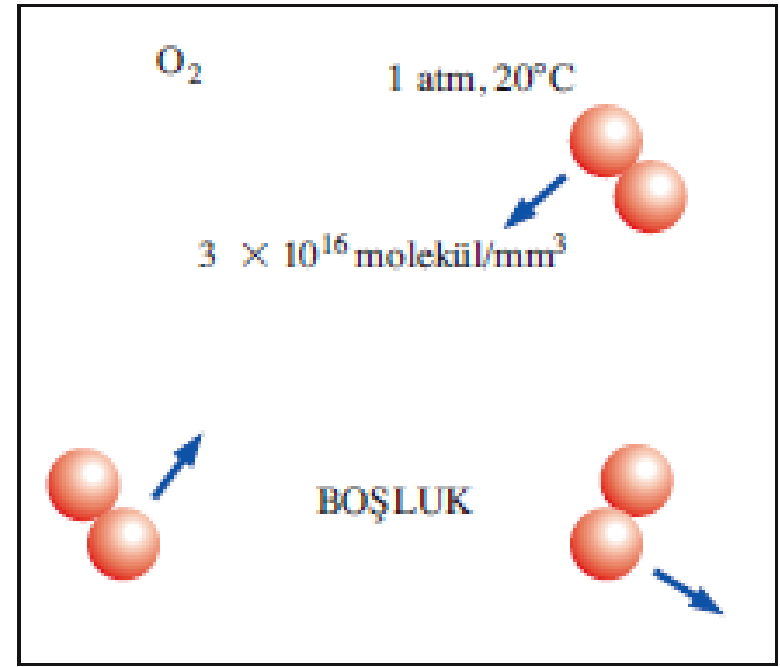
- **Özellik:** Bir sistemin herhangi bir karakteristiğidir.
- Yakından bilinen bazı özellikler; basınç P , sıcaklık T , hacim V ve kütle m olarak sıralanabilir.
- Özellikler *yoğun* veya *yaygın* olmak üzere iki grupta ele alınır.
- **Yoğun Özellikler:** Sıcaklık, basınç ve yoğunluk gibi bir sistemin kütlesinden bağımsız olan özelliklerdir.
- **Yaygın Özellikler:** Bir sistemin boyutuna—veya büyüklüğüne—bağlıdır. Toplam kütle, toplam hacim V ve toplam momentum yaygın özellikler için verilebilecek bazı örneklerdir.
- **Özgül Özellikler:** Birim kütle için verilen yaygın özelliklerdir.



Yoğun ve yaygın özelliklerin ayırt edilme ölçütü.

Sürekli Ortam

- Bir akışkan, özellikle gaz fazındayken, çok seyrek halde bulunabilen moleküllerden oluşur. Bununla birlikte akışkanın atomik doğasını göz ardı ederek sürekli, boşluksuz ve homojen bir madde yani **sürekli ortam** olarak göz önüne almak daha uygundur.
- Sürekli ortam idealleştirmesi, özellikleri nokta fonksiyonu olarak ele almamıza ve bu özelliklerin uzayda hiçbir süreksizliğe uğramaksızın değiştiklerini varsaymamıza imkan sağlar.
- Sürekli ortam modeli, ele alınan sistem boyutunun moleküller arasındaki mesafeye oranla yeterince büyük olması halinde geçerlidir.
- Bazı özel durumlar dışında, tüm problemlerde pratik olarak durum böyledir.
- Bu kitapta sürekli ortam olarak modellenebilen maddelerle sınırlı kalınacaktır.



Molekülleri arasındaki büyük boşluklara rağmen, son derece küçük bir hacimde bile çok fazla sayıda molekül bulunduğu için bir gaz çoğunlukla sürekli bir ortam olarak düşünülebilir.



Martıların uçmasında olduğu gibi çoğu akışla ilgili uzunluk ölçeği, hava moleküllerinin ortalama serbest yolundan daha büyük mertebelere sahiptir. Dolayısıyla bu kitapta göz önüne alınan bu ve diğer tüm akışlar için sürekli ortam modeli uygun olmaktadır.

2-2 ■ YOĞUNLUK VE BAĞIL YOĞUNLUK

Yoğunluk:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg/m}^3)$$

Özgül Hacim:

$$\nu = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$$

Bağıl Yoğunluk: Bir maddenin yoğunluğunun belirli bir sıcaklıktaki standart bir maddenin yoğunluğuna oranı olarak tanımlanır (su için genellikle 4°C'deki yoğunluk $\rho_{H_2O} = 1000 \text{ kg/m}^3$ dikkate alınır).

$$\rho_b = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}}$$

Özgül Ağırlık: Bir maddenin birim hacminin ağırlığına özgül ağırlık veya ağırlık yoğunluğu denir .

$$\gamma_s = \rho g \quad (\text{N/m}^3)$$

$$V = 12 \text{ m}^3$$
$$m = 3 \text{ kg}$$

$$\rho = 0.25 \text{ kg/m}^3$$

$$\nu = \frac{1}{\rho} = 4 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Yoğunluk birim hacmin kütlesi; özgül hacim ise birim kütlenin hacmidir.

Bazı maddelerin (aksi belirtilmedikçe) 0°C ve 1 atm basınçtaki bağıl yoğunlukları.

Madde	ρ_b
Su	1.0
Kan (37°C'de)	1.06
Deniz suyu	1.025
Benzin	0.68
Etil alkol	0.790
Cıva	13.6
Balsa ağacı	0.17
Sert meşe ağacı	0.93
Altın	19.3
Kemikler	1.7-2.0
Buz (0°C'de)	0.916
Hava	0.001204

İdeal Gazların Yoğunluğu

Hal Denklemi: Bir maddenin basıncı, sıcaklığı ve hacmi (veya özgül hacmi) arasındaki herhangi bir bağıntıya hal denklemi adı verilir.

İdeal Gaz Hal Denklemi: Gaz fazındaki maddeler için en basit ve en iyi bilinen hal denklemi:

$$Pv = RT \quad \text{veya} \quad P = \rho RT$$

$$R = R_u / M$$

$$R_u = 8.314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$$

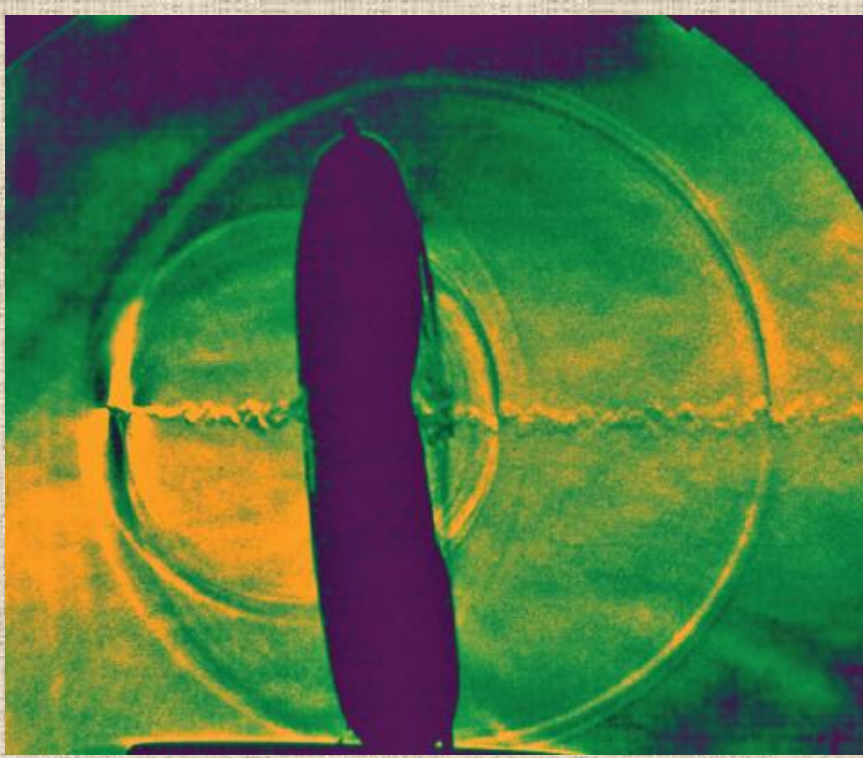
R_u : Evrensel (üniversal) gaz sabiti

$$PV = mRT \quad \text{veya} \quad PV = NR_u T$$

SI birim sisteminde termodinamik sıcaklık ölçeği **Kelvin ölçeği**dir ve bu ölçekte sıcaklık birimi kelvin olup K ile gösterilir. İngiliz birim sisteminde ise, sıcaklık biriminin rankine R olduğu **Rankine ölçeği** kullanılır.

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15 = T(\text{R})/1.8$$

$$T(\text{R}) = T(^{\circ}\text{F}) + 459.67 = 1.8 T(\text{K})$$



Hava çok yüksek hızlarda bile ideal gaz davranışı gösterir. Buradaki Schlieren görüntüsünde ses hızı civarında hareket eden bir mermi çekirdeği bir balonu iki tarafından patlatarak iki tane genişleyen sok dalgası meydana getirmiştir. Merminin arkasında bıraktığı türbülans izi açıkça görülmektedir.

İdeal gaz, $Pv = RT$ bağıntısına uyan hayali bir maddedir.

İdeal gaz bağıntısının, düşük yoğunluklardaki gerçek gazların P - v - T davranışını oldukça yakın biçimde temsil ettiği deneysel olarak gözlenmiştir.

Düşük basınç ve yüksek sıcaklıklarda bir gazın yoğunluğu düşer ve gaz ideal gaz davranışı sergiler.

Uygulamada karşılaşılan aralıklarda, hava, azot, oksijen, hidrojen, helyum, argon, neon ve kripton gibi yakından bilinen gazların yanı sıra, karbondioksit gibi havadan ağır gazlar da ihmal edilebilir bir hatayla (genellikle % 1'den az) ideal gaz olarak ele alınabilir.

Öte yandan termik santrallerindeki su buharı ve buzdolaplarında kullanılan çevrim akışkanlarının buharı gibi yoğun gazlar, genellikle doyma noktasına yakın halde buldukları için ideal gaz olarak göz önüne alınmamalıdır.

ÖRNEK 2-1 Bir Odadaki Havanın Yoğunluğu, Bağıl Yoğunluğu ve Kütlesi

İçerisinde 100 kPa basınç ve 25°C'de hava bulunan 4 m × 5 m × 6 m boyutlarındaki bir odadaki havanın yoğunluğunu, bağıl yoğunluğunu ve kütlesini belirleyiniz (Şekil 2-6).

ÇÖZÜM Bir odadaki havanın yoğunluğu, bağıl yoğunluğu ve kütlesi belirlenecektir.

Kabuller Belirtilen koşullarda hava ideal gaz olarak alınabilir.

Özellikler Havanın gaz sabiti $R = 0.287 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{K}$.

Analiz Havanın yoğunluğu ideal gaz bağıntısı $P = \rho RT$ kullanılarak aşağıdaki gibi bulunur:

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{100 \text{ kPa}}{(0.287 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{K})(25 + 273.15) \text{ K}} = 1.17 \text{ kg/m}^3$$

Bu durumda havanın bağıl yoğunluğu:

$$\rho_b = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}} = \frac{1.17 \text{ kg/m}^3}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0.00117$$

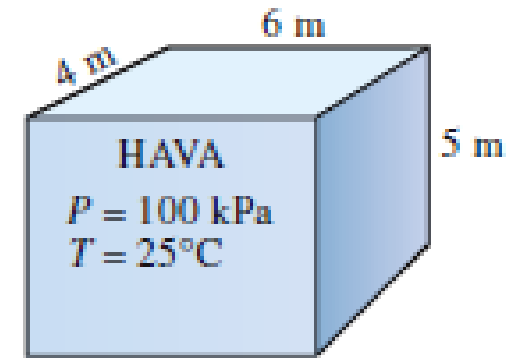
Son olarak odadaki havanın hacmi ve kütlesi,

$$V = (4 \text{ m})(5 \text{ m})(6 \text{ m}) = 120 \text{ m}^3$$

$$m = \rho V = (1.17 \text{ kg/m}^3)(120 \text{ m}^3) = 140 \text{ kg}$$

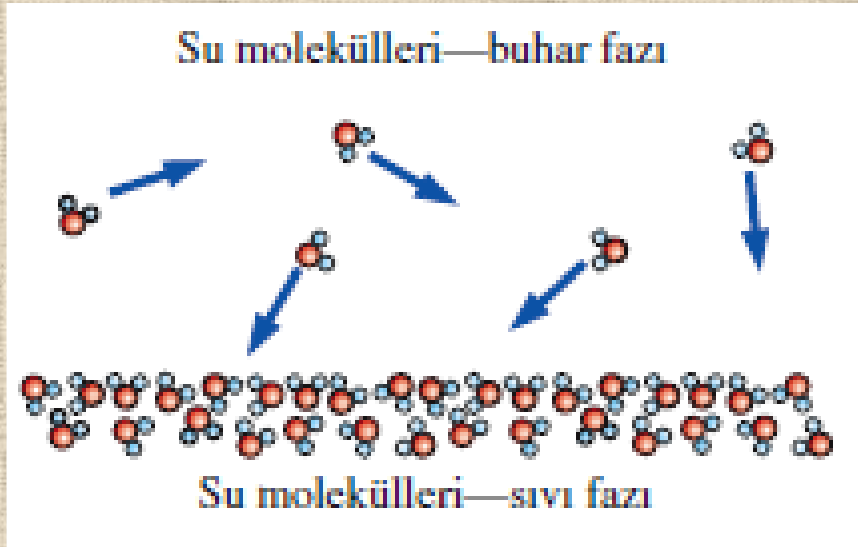
olarak elde edilir.

İrdeleme Ideal gaz bağıntısını kullanmadan önce sıcaklık biriminin °C'den K birimine çevrilmesi gerektiğine dikkat edilmelidir.



2–3 ■ BUHAR BASINCI VE KAVİTASYON

- **Doyma Sıcaklığı T_{doyma}** : Verilen bir basınçta, bir saf maddenin faz değiştirdiği sıcaklığa doyma sıcaklığı denir.
- **Doyma Basıncı P_{doyma}** : Belirli bir sıcaklıkta bir saf maddenin faz değişimine uğradığı basınca doyma basıncı denir.
- **Buhar Basıncı (P_v)**: Bir saf maddenin buhar basıncı P_v , bu saf maddenin verilen bir sıcaklıkta sıvısıyla faz dengesi halinde olan buharının yaptığı basınç olarak tanımlanır ($P_v = P_{\text{doyma}}$).
- **Kısmi Basınç**: Başka gazlarla karışım halinde bulunan bir gaz veya buharın basıncı olarak tanımlanır. Örneğin atmosfer koşullarındaki hava, kuru hava ile su buharının bir karışımıdır ve atmosfer basıncı, kuru hava ile su buharının kısmi basınçlarının toplamıdır.



Bir saf maddenin (örneğin suyun) buhar basıncı (veya doyma basıncı), verilen bir basınçta sistem sıvı molekülleriyle faz dengesinde bulunduğu zaman buhar molekülleri tarafından uygulanan basınçtır.

Suyun çeşitli sıcaklıklardaki doyma (veya buhar) basıncı

Sıcaklık $T, ^\circ\text{C}$	Doyma Basıncı $P_{\text{doyma}}, \text{kPa}$
-10	0.260
-5	0.403
0	0.611
5	0.872
10	1.23
15	1.71
20	2.34
25	3.17
30	4.25
40	7.38
50	12.35
100	101.3 (1 atm)
150	475.8
200	1554
250	3973
300	8581

- Buhar basıncına olan ilgimizin nedeni; sıvı akışının gerçekleştiği sistemlerde sıvı basıncının bazı yerlerde buhar basıncının altına düşme olasılığının bulunması ve ön görülmeyen bir buharlaşmanın başlamasıdır.
- Buhar kabarcıkları (sıvı içerisinde “boşluklar” meydana getirdiği için bunlara **kavitasyon kabarcıkları** da denmektedir), düşük basınç bölgelerinden uzaklaştıklarında oldukça yıkıcı etkilere sahip aşırı yüksek basınç dalgaları meydana getirerek patlar (tekrar sıvı hale geçer).
- Performansının kaybına ve hatta çark kanatlarının aşınmasına yol açan bu olaya **kavitasyon** denir. Kavitasyon olayı, hidrolik pompa ve türbinlerin tasarımında göz önüne alınması gereken önemli bir husustur.



60 m/s hızda 2.5 saat test edilen 16 mm × 23 mm boyutlarında bir alüminyum parça üzerindeki kavitasyon hasarı. Görülen parça, yüksek hasar oluşturabilen özel olarak tasarlanmış bir kabarcık üreticinin çıkışındaki kabarcık patlama bölgesine yerleştirilmiştir.

ÖRNEK 2-2 Kavitasyon Olmaması İçin Gerekli Minimum Basınç

Bir su dağıtım şebekesinde su sıcaklığının 30°C'ye kadar çıktığı gözlenmektedir. Kavitasyon olmaması için izin verilebilecek minimum basınç değerini belirleyiniz.

ÇÖZÜM Bir su dağıtım şebekesinde kavitasyona yol açmayacak minimum basınç belirlenecektir.

Özellikler Suyun 30°C'deki buhar basıncı 4.25 kPa'dır.

Analiz Kavitasyondan kaçınmak için, akış içerisinde herhangi bir yerdeki basıncın verilen sıcaklıktaki buhar basıncı altına düşmemesi gerekir. Buna göre izin verilebilecek minimum basınç

$$P_{\min} = P_{\text{doyma}@30^{\circ}\text{C}} = 4.25 \text{ kPa}$$

olmalıdır. Dolayısıyla akış içerisindeki basınç her yerde 4.25 kPa'ın üzerinde tutulmalıdır.

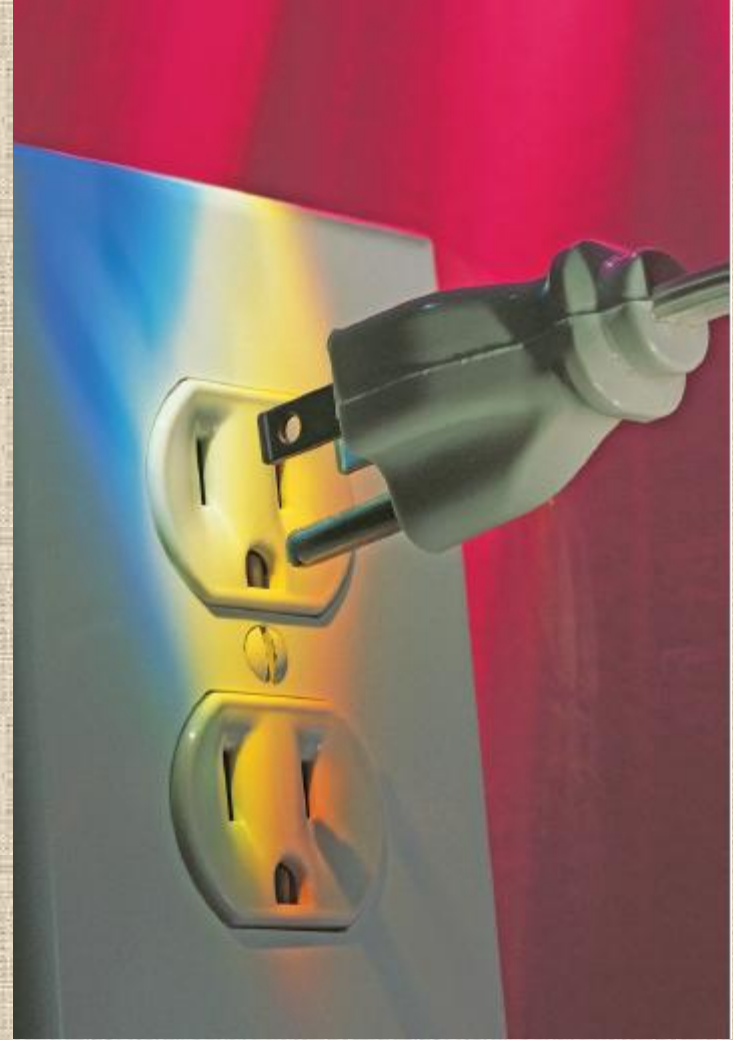
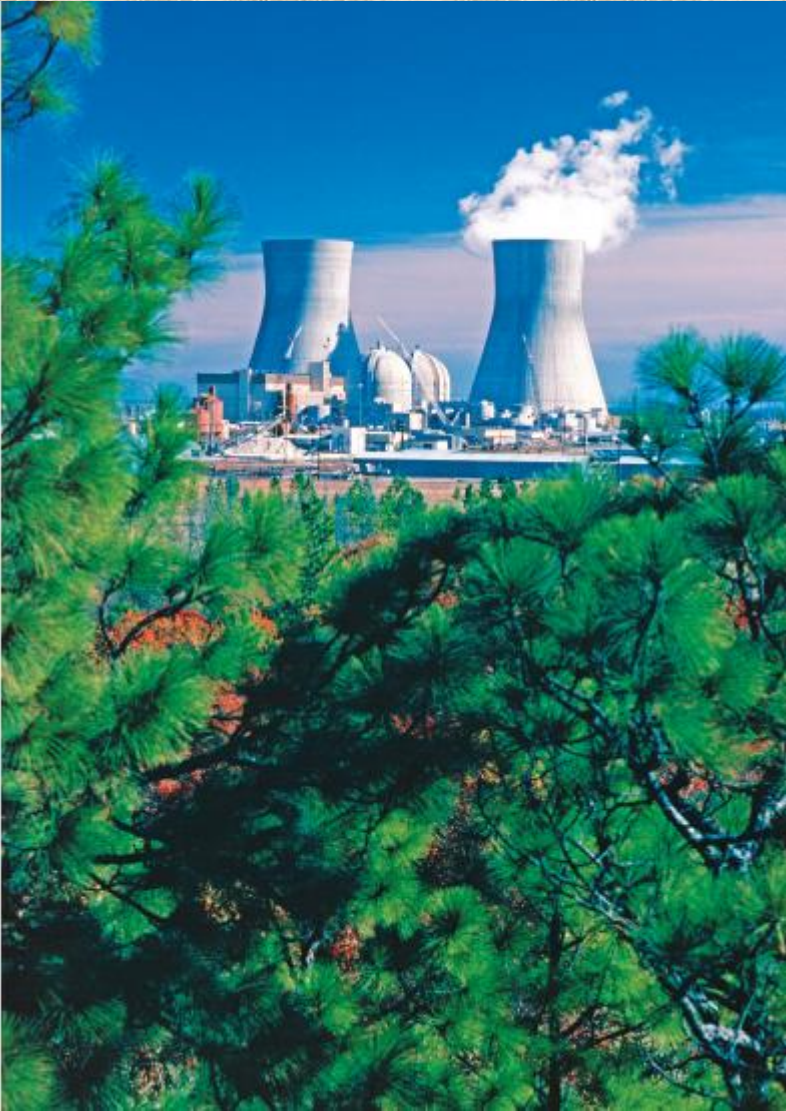
İrdeleme Buhar basıncının sıcaklığın artmasıyla yükseldiğine ve böylece yüksek akışkan sıcaklıklarında kavitasyon riskinin daha fazla olduğuna dikkat edilmelidir.

2-4 ■ ENERJİ VE ÖZGÜL ISILAR

- Enerji; ısı, mekanik, kinetik, potansiyel, elektriksel, manyetik, kimyasal ve nükleer gibi çok çeşitli biçimlerde bulunabilir. Bu enerjilerin toplamı bir sistemin **toplam enerjisini**, E (veya birim kütle için e) oluşturur.
- Termodinamik sadece, mühendislik açısından önem taşıyan bir husus olan **toplam enerjideki değişimler**le ilgilenir.
- **Enerjinin Makroskopik Biçimleri:** Sistemin tümünün bir dış referans noktasına göre sahip olduğu enerjidir, kinetik ve potansiyel enerji gibi
- **Enerjinin Mikroskopik Biçimleri :** sistemin moleküler yapısı ve moleküler hareketliliğiyle ilgilidir ve dış referans noktalarından bağımsızdır.
- **İç Enerji, U :** Mikroskopik enerjilerin tümünün toplamıdır.
- **Kinetik Enerji, KE :** Sistemin, bir referans noktasına göre hareketinden dolayı sahip olduğu enerjiye denir.
- **Potansiyel Enerji, PE :** Sistemin bir yerçekimi alanındaki yüksekliğine bağlı olarak sahip olduğu enerjiye denir.



Bir cismin makroskopik enerjisi hız ve yükseklikle değişir.



Elektrik enerjisinin güç santralinden evinize ulaştırılmasında en az altı farklı enerji biçimi söz konusudur. Bunlar nükleer, ısı, mekanik, kinetik, manyetik ve elektriksel enerji biçimleridir.

Özgül Entalpi: $h = u + Pv = u + \frac{P}{\rho}$

P/ρ terimi *akış enerjisi* olup, akışkanı hareket ettirmek ve akışı sürdürmek için birim kütle başına gerekli enerjidir ve *akış işi* olarak ta adlandırılır.

Akan akışkanın birim kütlesi başına toplam enerjisi:

$$e_{\text{akan}} = P/\rho + e = h + ke + pe = h + \frac{V^2}{2} + gz \quad (\text{kJ/kg})$$

$$du = c_v dT \quad \text{and} \quad dh = c_p dT$$

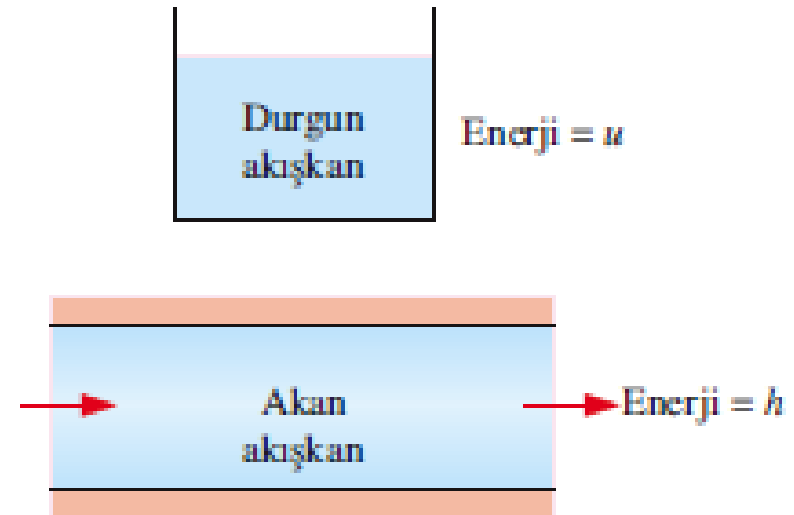
$$\Delta u \cong c_{v,\text{ort}} \Delta T \quad \text{ve} \quad \Delta h \cong c_{p,\text{ort}} \Delta T$$

$$\Delta h = \Delta u + \Delta P/\rho \cong c_{\text{ort}} \Delta T + \Delta P/\rho$$

Sıvıların sabit basınç ($P = \text{sabit}$) altındaki hal değişimleri için: $\Delta h = \Delta u \cong c_{\text{ort}} \Delta T$

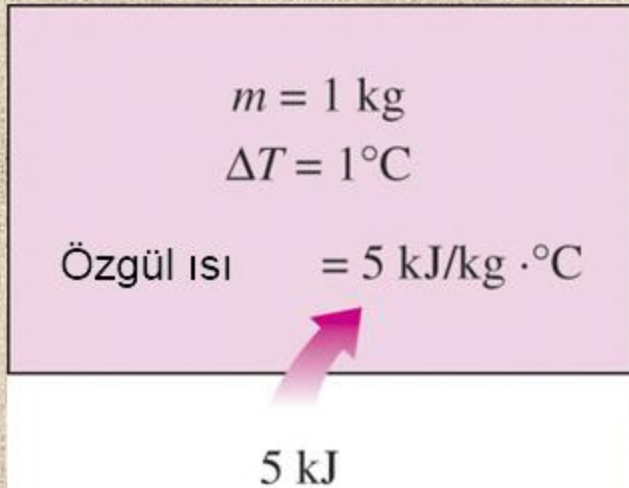
Sıvıların sabit sıcaklık ($T = \text{sabit}$) altındaki hal değişimleri için: $\Delta h = \Delta P/\rho$

İç enerji u , duran bir akışkanın birim kütlesi başına mikroskobik enerjisini, buna karşın entalpi h ise, akan bir akışkanın birim kütlesi başına mikroskobik enerjisini temsil eder.

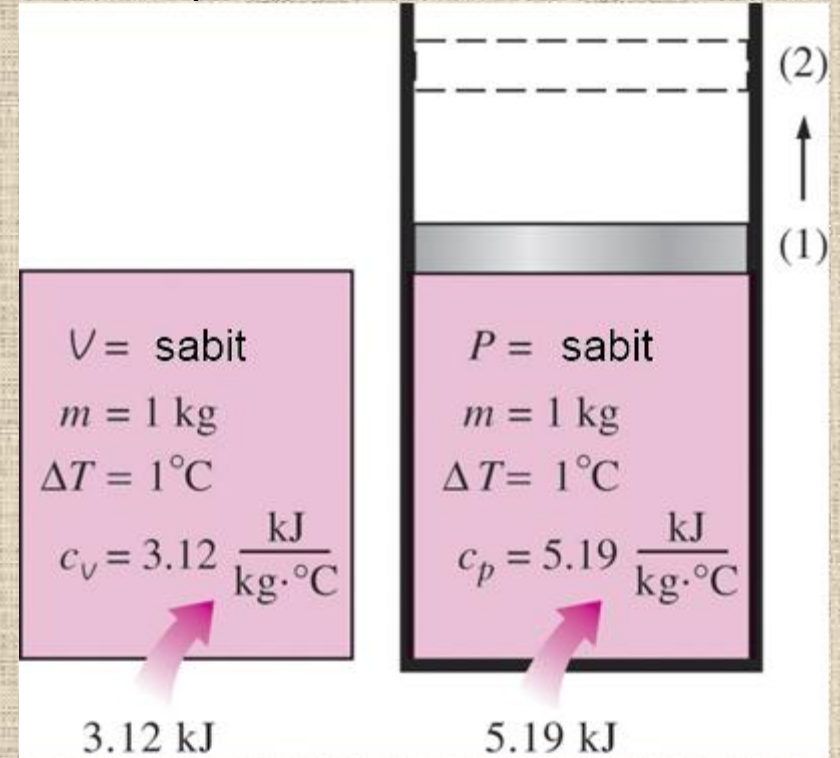


Özgül Isılar

- **Sabit Hacimdeki Özgül Isı, c_v :** Maddenin birim kütlesinin sıcaklığını sabit hacimde bir derece yükseltmek için gerekli enerjidir.
- **Sabit Basıncıdaki Özgül Isı, c_p :** Maddenin birim kütlesinin sıcaklığını sabit basınçta bir derece yükseltmek için gerekli enerjidir.



Özgül ısı, maddenin birim kütlesinin sıcaklığını bir derece artırmak için gerekli enerjidir.



Sabit hacimde ve sabit basınçta özgül ısılar c_v ve c_p (verilen değerler helyum gazı içindir).

2-5 ■ SIKIŞTIRILABİLİRLİK VE SES HIZI

Sıkıştırılabilirlik Katsayısı

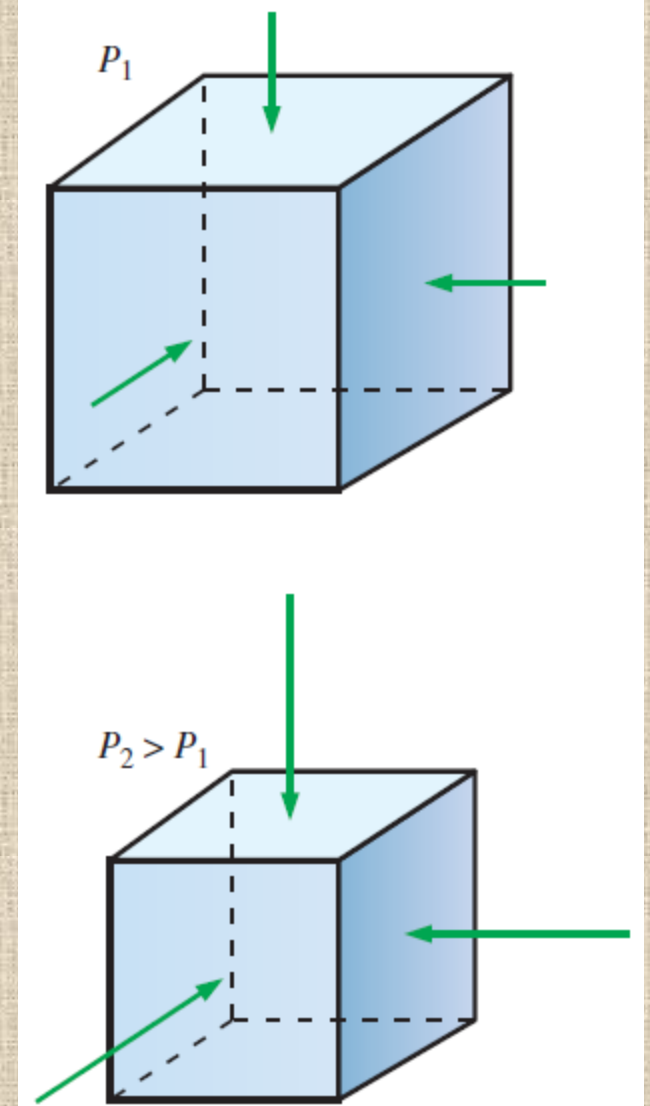
Sıcaklığı veya basıncı değiştiğinde bir akışkanın hacminin de (veya yoğunluğunun da) değiştiğini deneyimlerimizden biliyoruz.

Akışkanlar genellikle ısıtıldıklarında veya üzerlerindeki basınç kaldırıldığında genişler, buna karşın soğutulduklarında veya basınca maruz kaldıklarında ise hacimleri küçülür.

Ancak hacim değişiminin miktarı akışkandan akışkana farklılık gösterir. Dolayısıyla hacim değişimlerini sıcaklık ve basınç değişimleriyle ilişkilendiren özellikler tanımlamak gerekir.

Bu özellikler iki tanedir:

Bunlar hacimsel elastiklik modülü κ ve hacimsel genleşme katsayısı β' dir.



Katılar gibi akışkanlar da üzerlerine uygulanan basınç P_1 'den P_2 'ye artırıldığında sıkışır.

$$\kappa = -v \left(\frac{\partial P}{\partial v} \right)_T = \rho \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_T \quad (\text{Pa})$$

Akışkanların Sıkıştırılabilirlik Katsayısı (bu katsayı ayrıca **hacimsel sıkıştırılabilirlik modülü** veya **hacimsel elastiklik modülü** olarak da adlandırılır)

$$\kappa \cong -\frac{\Delta P}{\Delta v/v} \cong \frac{\Delta P}{\Delta \rho/\rho} \quad (T = \text{sabit})$$

Sıkıştırılabilirlik katsayısı sabit sıcaklıkta akışkanın hacminde veya yoğunluğundaki bir oransal değişime karşılık akışkanın basıncında meydana gelen değişimi temsil eder.

Bu durumda tamamen sıkıştırılmaz bir maddenin ($v = \text{sabit}$) sıkıştırılabilirlik katsayısı sonsuzdur.

Büyük bir κ değeri, hacimde küçük bir birim değişime neden olmak için basınçta büyük bir değişime gereksinim olduğunu gösterir. Buna göre büyük κ değerine sahip bir akışkan esas itibariyle sıkıştırılmaz.

Bu durum sıvılar için olağan bir durumdur ve sıvıların neden **sıkıştırılmaz** olarak göz önüne alındıklarını açıklamaktadır.

Su Darbesi: Su darbesinin varlığı, bir boruya “çekiçle vurulduğunda” çıkan sese benzer seslerden anlaşılır. Bu olay, akan bir sıvının boru şebekesinde ani bir kısıtlama (bir kapatma vanası gibi) ile karşılaşması ve yerel olarak sıkışması halinde ortaya çıkar.

Bunun sonucunda meydana gelen akustik dalgalar; boru boyunca yayıldıkça ve yansydıkça, boru yüzeylerine, dirseklere ve vanalara darbe yaparak borunun titreşmesine ve bilindik seslerin çıkmasına yol açar.

Sinir bozucu bu seslere ilave olarak, su darbesi oldukça yıkıcı etkilere sahip olabilir ve sızıntılara veya yapısal hasarlara yol açabilir. Bu etki bir su darbesi kesicisi kullanılarak ortadan kaldırılabılır.



(a) Boru hattını su darbesine karşı korumak için kurulan bir yükselme kulesi (denge bacası).
(b) Evde kullanılan çamaşır makinalarının su besleme hatlarında kullanılan daha küçük yapıdaki kesiciler.

Bir ideal gaz için $P = \rho RT$ ve dolayısıyla $(\partial P/\partial \rho)_T = RT = P/\rho$ olduğundan

$$\kappa_{\text{ideal gaz}} = P \quad (\text{Pa})$$

Bu sonuca göre bir ideal gazın sıkıştırılabilirlik katsayısı gazın mutlak basıncına eşittir ve basıncın artmasıyla beraber gazın sıkıştırılabilirlik katsayısı da artar.

$$\text{İdeal gaz:} \quad \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta P}{P} \quad (T = \text{sabit})$$

Bir ideal gazın sabit sıcaklık altında sıkıştırılması sırasında yoğunluğunda meydana gelen % artış, basıncında meydana gelen % artışa eşit olur.

İzotermal Sıkıştırılabilirlik: Sıkıştırılabilirlik katsayısının tersi olarak tanımlanır.

Bir akışkanın izotermal sıkıştırılabilirliği, basınçtaki bir birimlik değişime karşılık hacim veya yoğunlukta meydana gelen oransal değişimi temsil eder.

$$\alpha = \frac{1}{\kappa} = -\frac{1}{\nu} \left(\frac{\partial \nu}{\partial P} \right)_T = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T \quad (1/\text{Pa})$$

Hacimsel Genleşme Katsayısı

Bir akışkanın yoğunluğu, basınçtan çok sıcaklığa bağlıdır.

Yoğunluğun sıcaklıkla değişimi; rüzgârlar, okyanus akımları, bacalarda dumanın yükselmesi, sıcak hava balonlarının çalışması, doğal taşınım ve hatta sıcak havanın yükselmesi ve dolayısıyla “ısı arttı” denilerek anlatılmak istenen sayısız doğa olayının nedenini teşkil eder.

Bu etkilerin belirlenebilmesi için *bir akışkanın sabit basınçtaki yoğunluğunun sıcaklıkla değişimini temsil edecek bir özelliğe gereksinim vardır.*



Bir elin yüzeyinden gerçekleşen doğal taşınım.

Hacimsel Genleşme Katsayısı (veya hacimsel genleşebilirlik): Bir akışkanın sabit basınçta yoğunluğunun sıcaklıkla değişimidir.

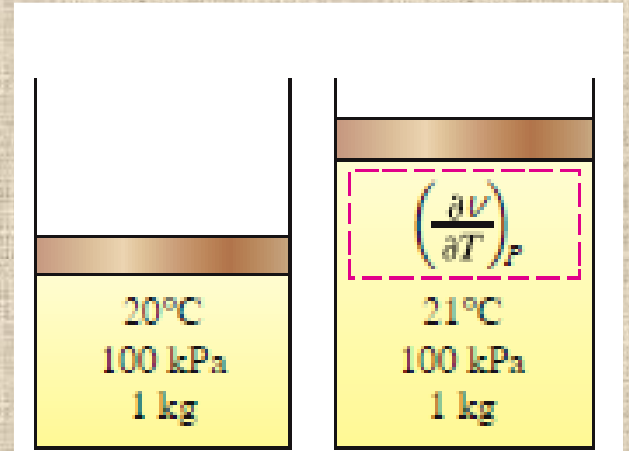
$$\beta = \frac{1}{\nu} \left(\frac{\partial \nu}{\partial T} \right)_P = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \quad (1/K)$$

$$\beta \approx \frac{\Delta \nu / \nu}{\Delta T} = -\frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta T} \quad (P = \text{sabit})$$

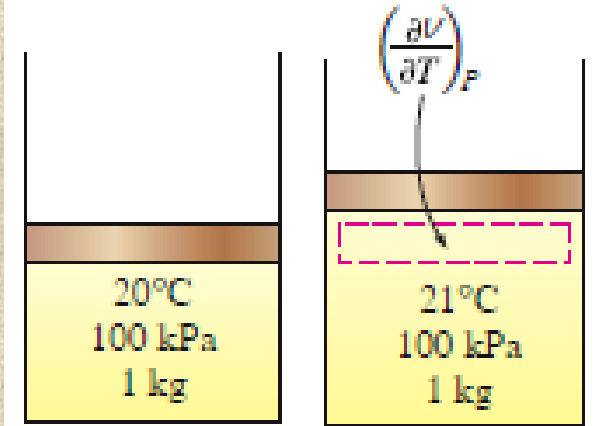
Bir akışkan için yüksek bir β değeri, sıcaklıkla beraber yoğunlukta büyük bir değişim olacağı anlamını taşır ve $\beta \Delta T$ çarpımı, sabit basınç altındaki ΔT lik bir sıcaklık değişimine karşılık akışkanın hacmindeki değişim miktarını temsil eder.

T sıcaklığındaki bir *ideal gazın* ($P = \rho RT$) hacimsel genleşme katsayısının bu sıcaklığın K cinsinden tersine eşit olduğu kolayca gösterilebilir:

$$\beta_{\text{ideal gaz}} = \frac{1}{T} \quad (1/K)$$



(a) Büyük β değerine sahip madde



(b) Küçük β değerine sahip madde

Hacimsel genleşme katsayısı; bir maddenin sabit basınç altında hacminde sıcaklık nedeniyle meydana gelen değişimin bir ölçüsüdür.

Doğal taşınım akımlarının incelenmesinde; sonlu büyüklükteki sıcak veya soğuk bölgeleri çevreleyen ana akışkan kütesinin durumu, verilen değerlerin sıcak veya soğuk bölgelerin varlığının hissedilmediği bir mesafede olduğunu vurgulamak amacıyla “sonsuz” alt indisi ile gösterilir. Bu tür durumlarda hacimsel genleşme katsayısı yaklaşık olarak aşağıdaki biçimde ifade edilebilir.

$$\beta \approx -\frac{(\rho_\infty - \rho)/\rho}{T_\infty - T} \quad \text{veya} \quad \rho_\infty - \rho = \rho\beta(T - T_\infty)$$

Sıcaklık ve basıncın bir akışkanın hacim değişimi üzerindeki toplam etkisi, özgül hacmi T ve P nin bir fonksiyonu olarak belirlenebilir.

$$dV = \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T dP = (\beta dT - \alpha dP)V$$

Basınç ve sıcaklıklardaki değişimlerden ötürü akışkanın hacmindeki (veya yoğunluğundaki) meydana gelen oransal değişim, yaklaşık olarak, aşağıdaki biçimde ifade edilebilir.

$$\frac{\Delta V}{V} = -\frac{\Delta \rho}{\rho} \cong \beta \Delta T - \alpha \Delta P$$



Ses hızına yakın uçan F/A-18F Super Hornet savaş uçağının etrafında oluşan buhar bulutu.

ÖRNEK 2-3 Yoğunluğun Sıcaklık ve Basınçla Değişimi

20°C sıcaklık ve 1 atm basınçta su bulunmaktadır. Bu suyun son yoğunluğunu; (a) sabit 1 atm basınçta 50°C'ye kadar ısıtılması ve (b) 20°C sabit sıcaklıkta 100 atm basınca kadar sıkıştırılması halinde belirleyiniz. Suyun izotermal sıkıştırılabilirliğini $\alpha = 4.80 \times 10^{-5} \text{ atm}^{-1}$ alınız.

ÇÖZÜM Belirli bir sıcaklık ve basınçtaki su göz önüne alınmaktadır. Suyun ısıtıldıktan sonraki ve sıkıştırıldıktan sonraki yoğunlukları belirlenecektir.

Kabuller 1 Suyun hacimsel genleşme ve izotermal sıkıştırılabilirlik katsayıları verilen sıcaklık aralığında sabittir. 2 İfadelerde yer alan diferansiyel değişimler, sonlu değişimlerle yer değiştirilerek yaklaşık bir analiz yapılacaktır.

Özellikler 20°C ve 1 atm'de suyun yoğunluğu $\rho_1 = 998.0 \text{ kg/m}^3$ 'tür. $(20 + 50)/2 = 35^\circ\text{C}$ ortalama sıcaklığında $\beta = 0.337 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ olarak alınabilir. Suyun izotermal sıkıştırılabilirliği $\alpha = 4.80 \times 10^{-5} \text{ atm}^{-1}$ olarak verilmiştir.

Analiz Diferansiyel büyüklükler sonlu farklarla yer değiştirilir, ayrıca α ve β özellikleri sabit kabul edilirse; sıcaklık ve basınçlardaki değişimler cinsinden yoğunluktaki değişim yaklaşık olarak

$$\Delta\rho = \alpha\rho \Delta P - \beta\rho \Delta T$$

biçiminde ifade edilebilir (Denklem 2-23).

(a) Sabit basınç altında sıcaklığın 20°C'den 50°C'ye değişmesinden dolayı yoğunlukta meydana gelen değişim,

$$\begin{aligned}\Delta\rho &= -\beta\rho\Delta T = -(0.337 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1})(998 \text{ kg/m}^3)(50 - 20) \text{ K} \\ &= -10.0 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

olarak bulunur. $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$, olduğu dikkate alınarak suyun 50°C ve 1 atm'deki yoğunluğu,

$$\rho_2 = \rho_1 + \Delta\rho = 998.0 + (-10.0) = \mathbf{988.0 \text{ kg/m}^3}$$

olarak elde edilir. Bu değer Tablo A-3'te 50°C için verilen 988.1 kg/m³ değeriyle hemen hemen aynıdır. Bunun nedeni β 'nin Şekil 2-16'da gösterildiği gibi, sıcaklıkla neredeyse doğrusal olarak değişmesidir.

(b) Sabit sıcaklıkta 1 atm'den 100 atm'e kadar olan bir basınç artışından ötürü yoğunlukta meydana gelen değişim

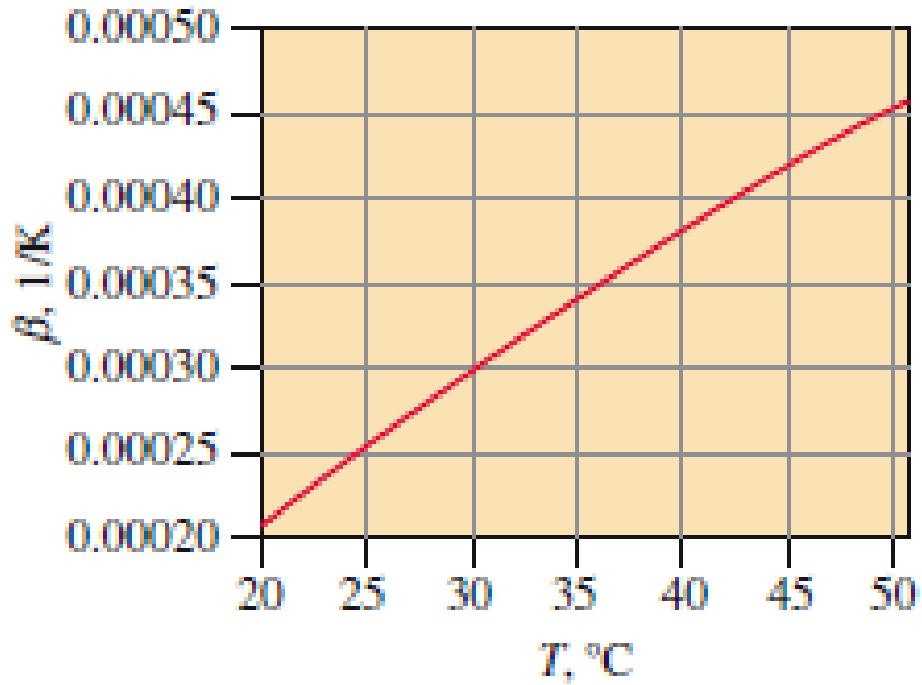
$$\Delta\rho = \alpha\rho\Delta P = (4.80 \times 10^{-5} \text{ atm}^{-1})(998 \text{ kg/m}^3)(100 - 1) \text{ atm} = 4.7 \text{ kg/m}^3$$

olarak bulunur. Bu durumda suyun 100 atm basınç altında 20°C'deki yoğunluğu

$$\rho_2 = \rho_1 + \Delta\rho = 998.0 + 4.7 = \mathbf{1002.7 \text{ kg/m}^3}$$

olarak elde edilir.

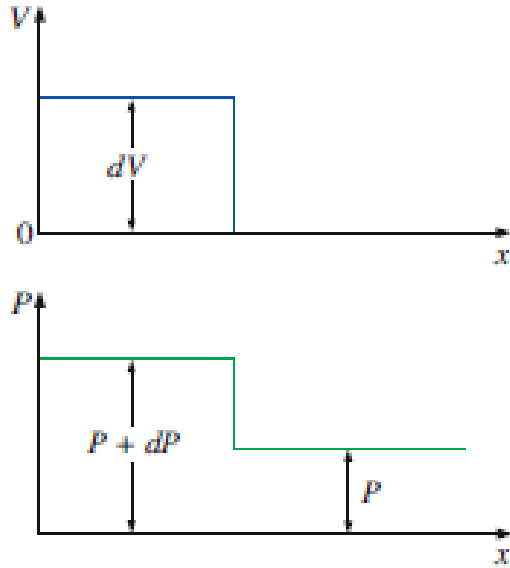
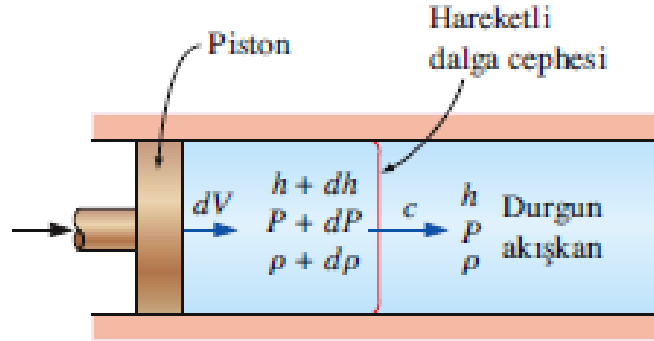
İrdeleme Beklendiği gibi suyun yoğunluğu ısıtılırken düşmekte, sıkıştırılırken ise artmaktadır. Özelliklerin fonksiyon şeklinde mevcut olması halinde bu problem diferansiyel analiz kullanılarak daha hassas biçimde çözülebilir.



Suyun hacimsel genleşme katsayısının 20°C – 50°C aralığında sıcaklıkla değişimi.

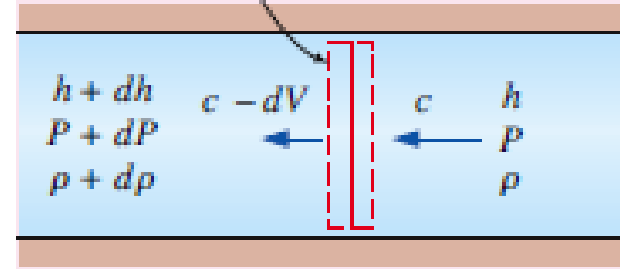
Ses Hızı ve Mach Sayısı

Ses Hızı (sonik hız): Ses hızı, bir ortamda yayılan sonsuz küçük bir basınç dalgasının hızı olarak tanımlanır.



Bir kanalda küçük bir basınç dalgasının yayılması.

Kontrol hacmi ile hareket eden dalgacığı



Bir kanal boyunca küçük bir basınç dalgası ile hareket eden kontrol hacmi.

Herhangi bir akışkan için:

$$c^2 = k \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_T$$

İdeal gaz için:

$$c = \sqrt{kRT}$$



Hava içerisinde sesin yayılma hızı sıcaklıkla artar. Normal şartlarda hava içerisindeki ses hızı $c = 340$ m/s civarındadır. Bu nedenle çakan bir şimşekten kaynaklanan bir yıldırım 3 s içerisinde yaklaşık olarak 1 km yol kat eder. Eğer şimşegi gördükten sonra, yıldırım sesini 3 s'den daha kısa bir süre sonra duyuyorsanız, şimşek yakınınızda demektir ve eve girmek için acele etseniz iyi olur.

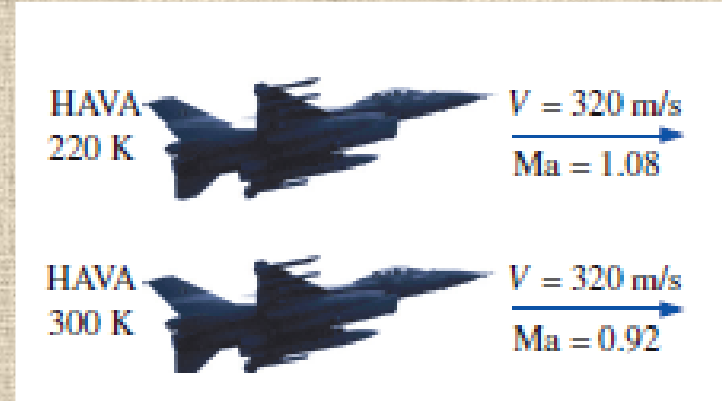
Mach Sayısı Ma : Bir akışkanın (veya durgun bir akışkan içindeki bir cismin) gerçek hızının, bu akışkan içerisinde aynı koşullarda sesin yayılma hızına oranıdır:

$$Ma = \frac{V}{c}$$

Mach sayısı ses hızına, ses hızı da akışkanın termodinamik haline bağlıdır.

HAVA		HELYUM
284 m/s	200 K	832 m/s
347 m/s	300 K	1019 m/s
634 m/s	1000 K	1861 m/s

Ses hızı sıcaklık ile değişir ve akışkandan akışkana farklılık gösterir.



Uçuş hızı aynı olsa bile farklı sıcaklıklarda Mach sayısı farklı olabilir.

ÖRNEK 2-4 Bir Yayıcıya Giren Havanın Mach Sayısı

Şekil 2-22'de gösterilen yayıcıya 200 m/s hızla hava girmektedir. (a) Akışın ses hızını ve (b) hava sıcaklığının 30 °C olması halinde yayıcı girişindeki Mach sayısını bulunuz.

ÇÖZÜM Hava yayıcıya yüksek bir hızla girmektedir. Yayıcı girişindeki ses hızı ve Mach sayısı bulunacaktır.

Kabuller Belirtilen şartlarda hava ideal gaz gibi davranmaktadır.

Özellikler Havanın gaz sabiti $R = 0.287 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$, 30°C'deki özgül ısı oranı ise 1.4'tür.

Analiz Bir gaz içerisindeki ses hızı sıcaklık ile değişir, burada sıcaklık 30 °C olarak verilmiştir.

(a) 30 °C'deki havada ses hızı Denklem 2-26'dan

$$c = \sqrt{kRT} = \sqrt{(1.4)(0.287 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K})(303 \text{ K})\left(\frac{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2}{1 \text{ kJ/kg}}\right)} = 349 \text{ m/s}$$

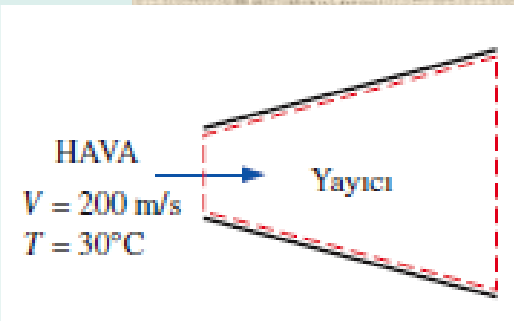
olarak bulunur.

(b) Böylece Mach sayısı,

$$\text{Ma} = \frac{V}{c} = \frac{200 \text{ m/s}}{349 \text{ m/s}} = 0.573$$

olur.

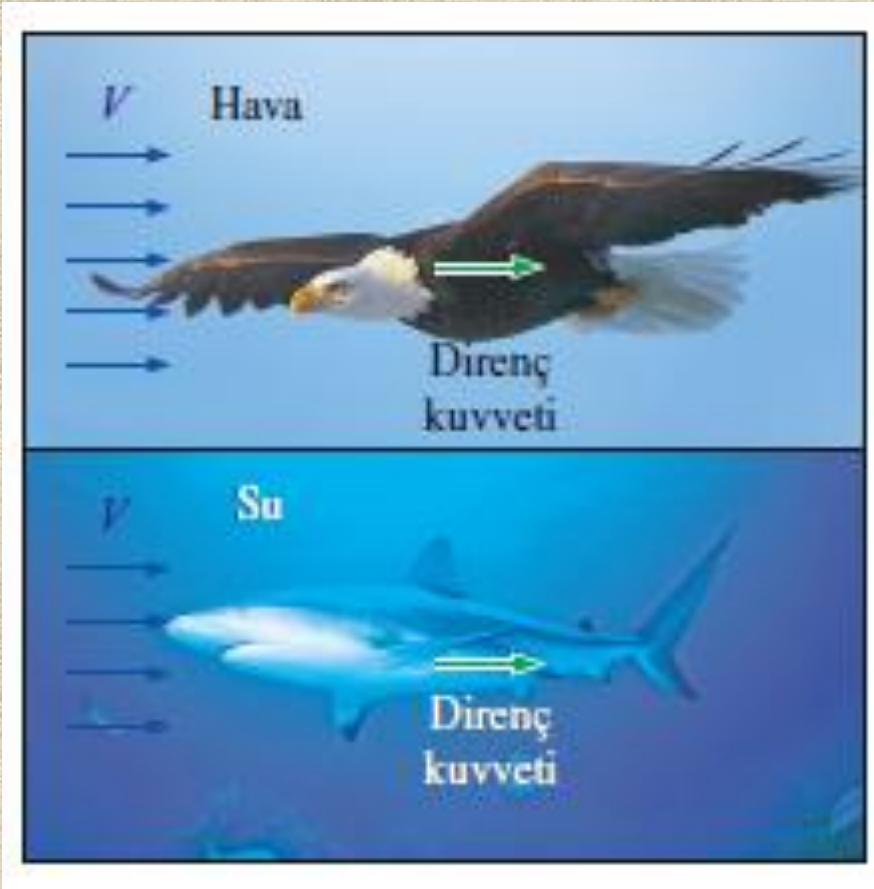
İrdeleme $\text{Ma} < 1$ olduğundan yayıcı girişindeki akış sesaltıdır.



2-6 ■ VİSKOZİTE

Viskozite: Bir akışkanın akmaya karşı iç direncini veya “akışkanlığını” temsil eden bir özelliktir.

Direnç Kuvveti: Akan bir akışkanın bir cisme akma yönünde uyguladığı kuvvete direnç kuvveti denir ve bu kuvvetin büyüklüğü kısmen viskoziteye bağlıdır.



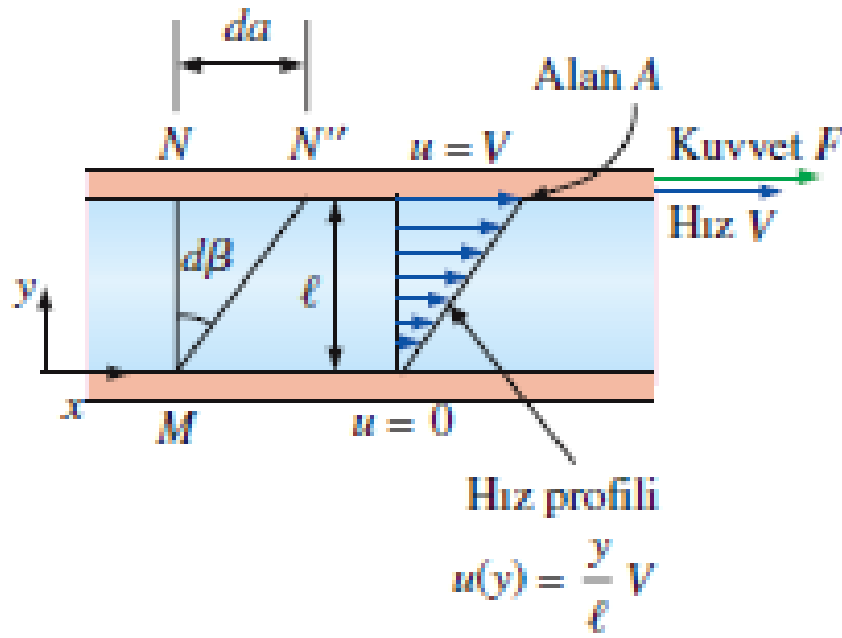
Bir akışkanın viskozitesi, “*şekil değişimine (deformasyona) karşı gösterdiği direncinin*” bir ölçüsüdür.

Viskozite, farklı hızlarda hareket etmeye zorlanan akışkan tabakaları arasında gelişen içsel sürtünme kuvvetinden kaynaklanır.

Bir cismin üzerinden geçen akışkan, kısmen viskozitenin neden olduğu sürtünmeden dolayı bu cisme bir direnç kuvveti uygular.

Newton Tipi (Newtoniyen) Akışkanlar:

Deformasyon hızının kayma gerilmesiyle orantılı olduğu akışkanlardır. Su, hava, benzin ve yağlar ile genel olarak gazlar gibi yakından bilinen bazı akışkanlar örnek olarak verilebilir.



$$\tau \propto \frac{d\beta}{dt} \quad \text{veya} \quad \tau \propto \frac{du}{dy}$$

Kayma Gerilmesi:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (\text{N/m}^2)$$

Kayma Kuvveti:

$$F = \tau A = \mu A \frac{du}{dy} \quad (\text{N})$$

Üstteki levhanın sabit bir hızla hareket etmesi halinde, iki paralel levha arasındaki bir akışkanın laminar akış davranışı.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad u(y) = \frac{y}{l}V \quad \text{ve} \quad \frac{du}{dy} = \frac{V}{l}$$

$$d\beta \approx \tan d\beta = \frac{da}{l} = \frac{V dt}{l} = \frac{du}{dy} dt \quad \frac{d\beta}{dt} = \frac{du}{dy}$$

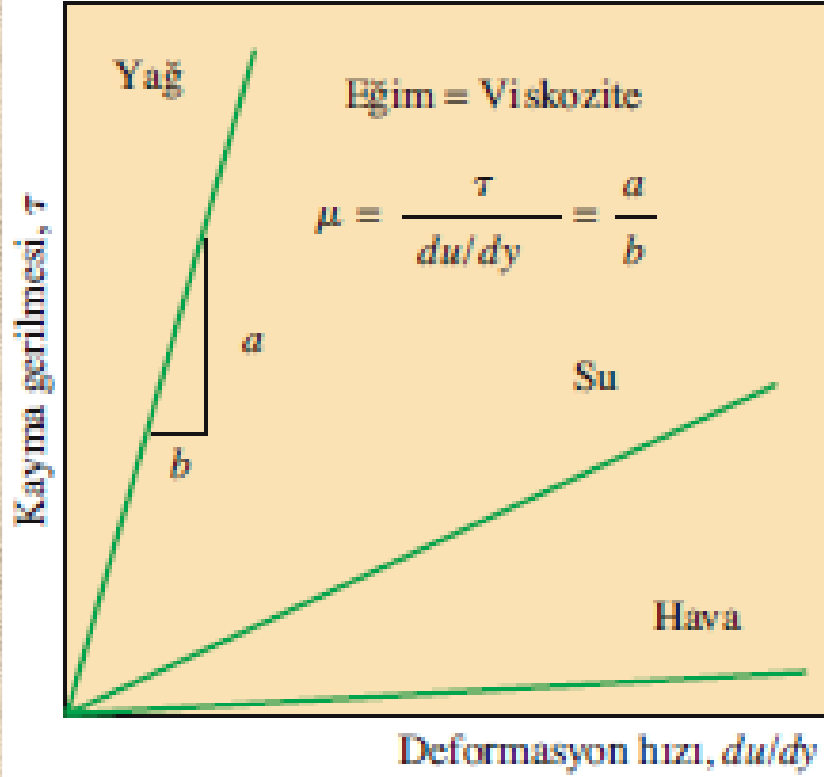
μ : Akışkanın viskozite katsayısı veya dinamik (mutlak) viskozite katsayısı

SI: (Pa · s = N · s/m² = kg/m · s)

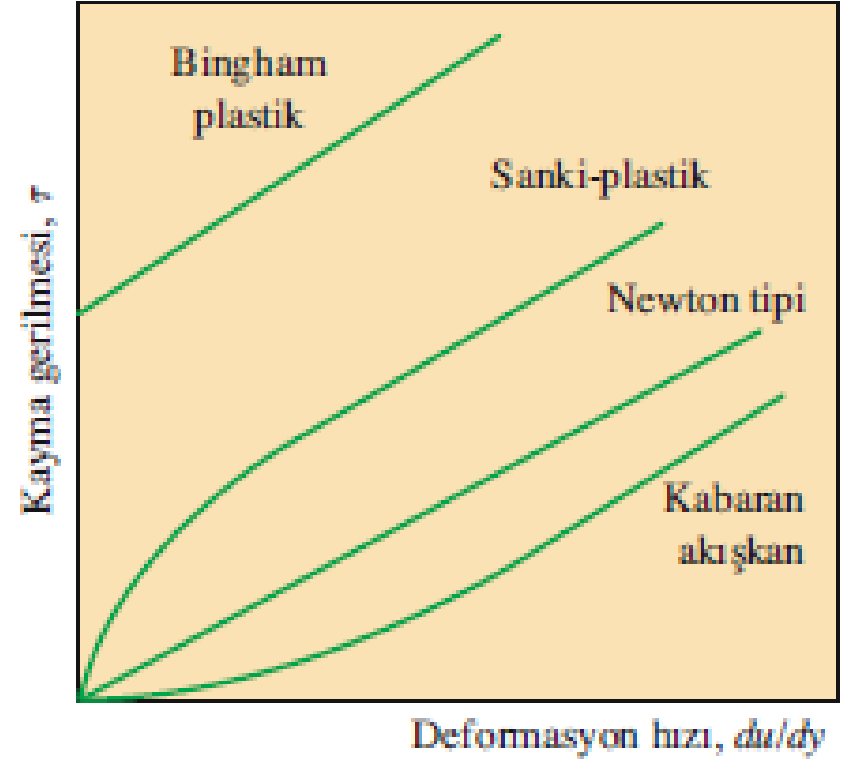
CGS: poise (P) veya santipoise (cP)

1 P = 1 dyn · s/cm² = 1 g/cm · s = 0.1 Pa · s

1 cP = 0.01 P = 0.001 Pa · s = 1 mPa · s



Bir Newton tipi akışkanın deformasyon hızı (hız gradyeni) kayma gerilmesiyle doğru orantılıdır ve orantı sabiti viskozitedir.



Newton tipi ve Newton tipi olmayan akışkanlar için kayma gerilmesinin deformasyon hızıyla değişimi (bir eğrinin herhangi bir noktadaki teğetinin eğimi, akışkanın o noktadaki görünür viskozitesini verir).

Kinematik Viskozite: $\nu = \mu/\rho$ 1 St = 10^{-4} m²/s = 10^2 mm²/s, 1 cSt = 10^{-6} m²/s

SI: m²/s veya mm²/s

CGS: stoke: (St) veya santistoke: (cSt)

1 St = 1 cm²/s, 1 cSt = 0.01 St = 1 mm²/s

Bir akışkanın viskozitesi genel olarak hem sıcaklığa hem de basınca bağlıdır. Bununla birlikte basınca bağımlılık oldukça zayıftır.

Pratik olarak *sıvılar için* dinamik ve kinematik viskozitenin basınçtan bağımsız olduğu kabul edilir. Aşırı yüksek basınçlar dışında basınç değişiminden kaynaklanan küçük viskozite değişimleri ihmal edilir.

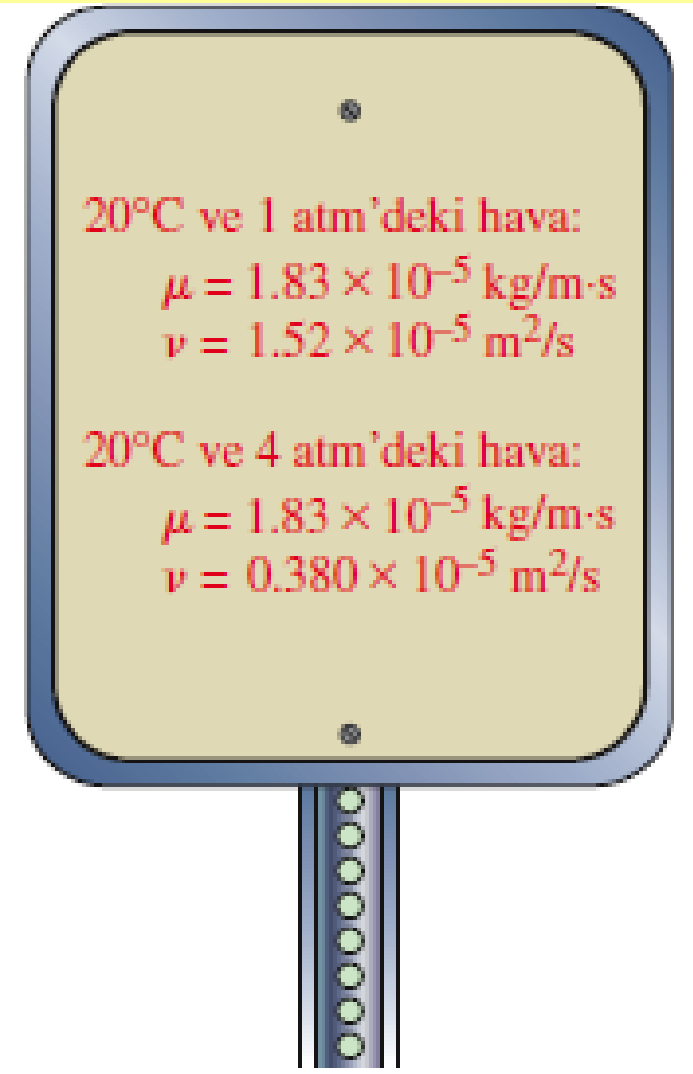
Bu durum, dinamik viskozite söz konusu olduğunda düşükten orta seviyeli basınçlara kadar *gazlar için* de geçerlidir. Öte yandan bir gazın yoğunluğunun basıncıyla orantılı olmasından ötürü, kinematik viskozite için aynı şey söylenemez.

Gazlar için:

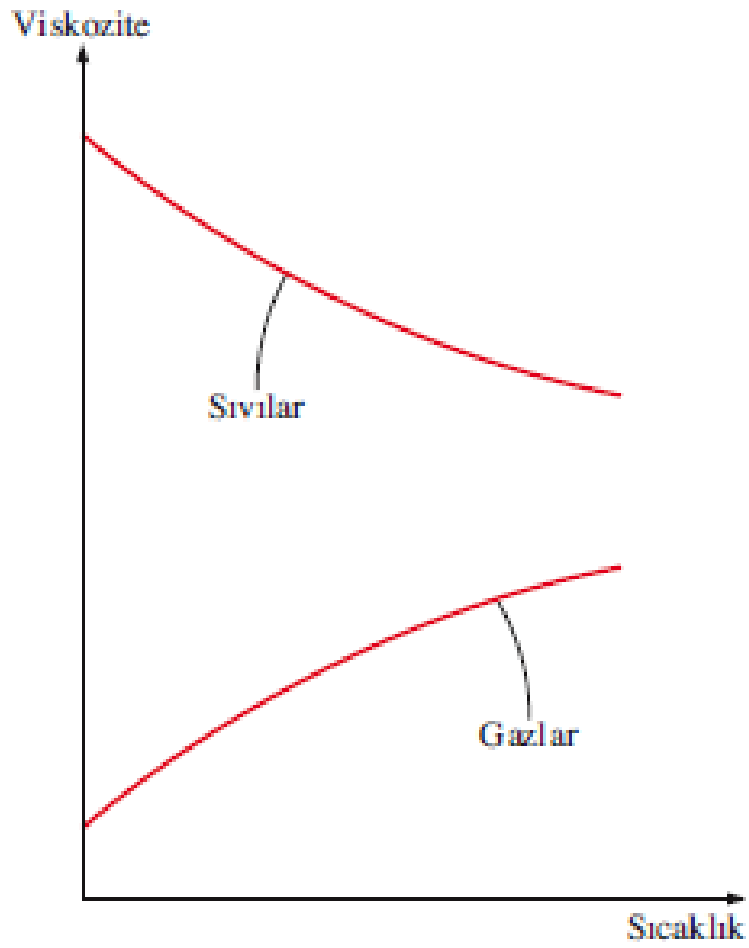
$$\mu = \frac{aT^{1/2}}{1 + b/T}$$

Sıvılar için:

$$\mu = a10^{b/(T-c)}$$



Genel olarak dinamik viskozite basınçtan bağımsızdır, ancak kinematik viskozite basınca bağlıdır.



Sıvıların viskoziteleri sıcaklıkla azalır, gazlarınkı ise artar.

Bir akışkanın viskozitesi, onu bir boru içerisinde nakletmek için gerekli pompalama gücü veya bir cismi bu akışkan içerisinde (hava içindeki bir araba veya denizdeki bir denizaltı gibi) hareket ettirmek için gerekli olan kuvvetle doğrudan ilişkilidir.

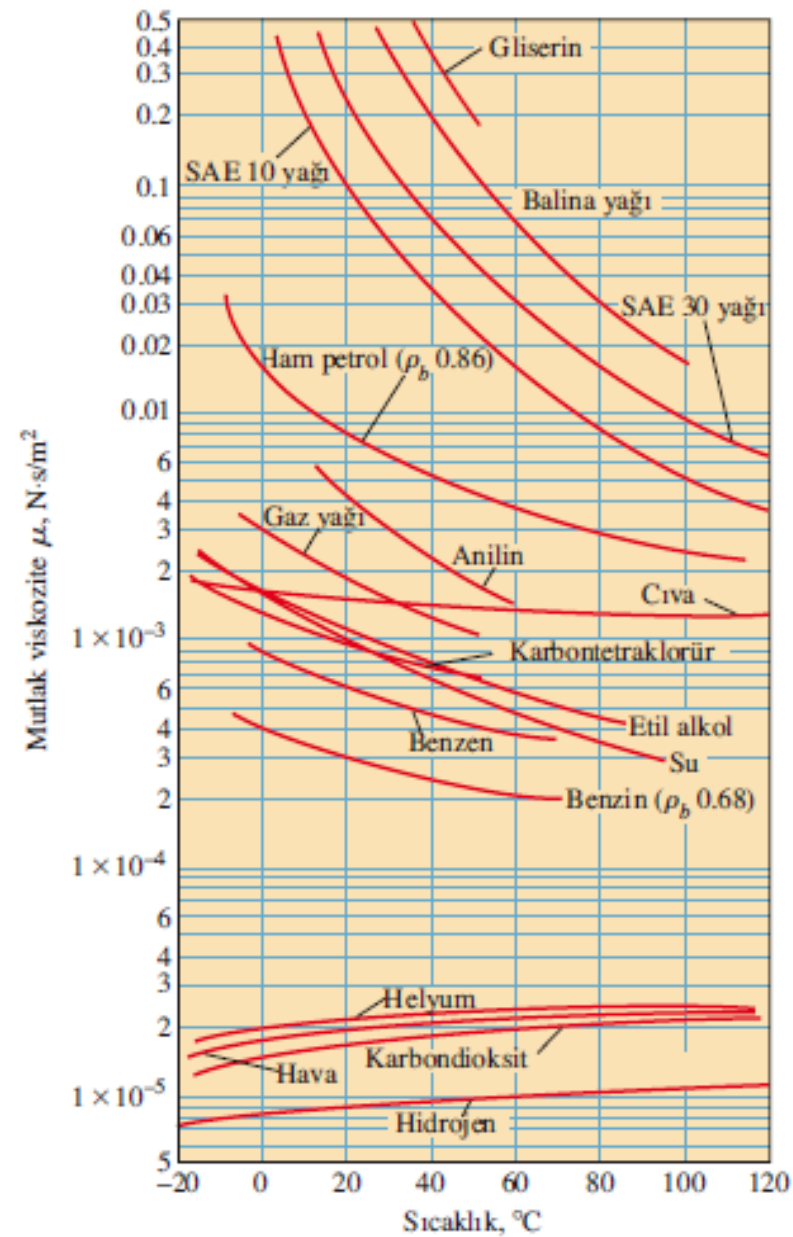
Viskozite sıvılarda moleküller arasındaki çekim kuvvetleri; gazlarda ise moleküllerin çarpışması nedeniyle ortaya çıkar ve sıcaklıkla önemli ölçüde değişir.

Bir sıvı için bunun nedeni, sıvı moleküllerin yüksek sıcaklıkta daha fazla enerjiye sahip olmaları ve moleküller arası büyük çekim kuvvetlerine karşı daha güçlü biçimde karşı koyabilmeleridir. Sonuç olarak enerji yüklenmiş sıvı molekülleri daha serbest hareket etme olanağı bulmaktadır.

Diğer yandan **bir gazda** moleküller arası kuvvetler ihmal edilebilecek düzeydedir. Gaz molekülleri yüksek sıcaklıklarda daha yüksek hızlarda ve gelişigüzel şekilde hareket eder. Bu durum, birim zamanda birim hacim içerisinde daha fazla moleküller çarpışmanın meydana gelmesine neden olur ve dolayısıyla akışa karşı daha büyük bir direnç meydana gelir.

Bazı akışkanların 1 atm basınçta 20°C'deki (aksi ifade edilmedikçe) dinamik viskoziteleri

Akışkan	Dinamik Viskozite μ , kg/m·s
Gliserin:	
-20°C	134.0
0°C	10.5
20°C	1.52
40°C	0.31
Motor yağı:	
SAE 10W	0.10
SAE 10W30	0.17
SAE 30	0.29
SAE 50	0.86
Cıva	0.0015
Etil alkol	0.0012
Su:	
0°C	0.0018
20°C	0.0010
100°C (sıvı)	0.00028
100°C (buhar)	0.000012
Kan, 37°C	0.00040
Benzin	0.00029
Amonyak	0.00015
Hava	0.000018
Hidrojen, 0°C	0.0000088



Yaygın bulunan bazı akışkanların dinamik (mutlak) viskozitelerinin 1 atm basınç altında sıcaklıkla değişimi. (1 N·s/m² = 1 kg/m·s = 0.020886 lbf·s/ft²)

12 34 20W-50 Ne Demek?

- **20W** → "W" = Winter (kış).
Soğukta yağın akışkanlığını gösterir.
20W, düşük sıcaklıklarda orta seviyede akışkanlık sağlar (0°C civarında sorun çıkarmaz, ama 5W kadar akışkan değildir).
- **50** → Yüksek sıcaklıktaki viskoziteyi gösterir (100°C'de).
50 sınıfı yağ, yüksek sıcaklıkta **kalın film tabakası** oluşturur.



⚙️ Teknik Özellikleri

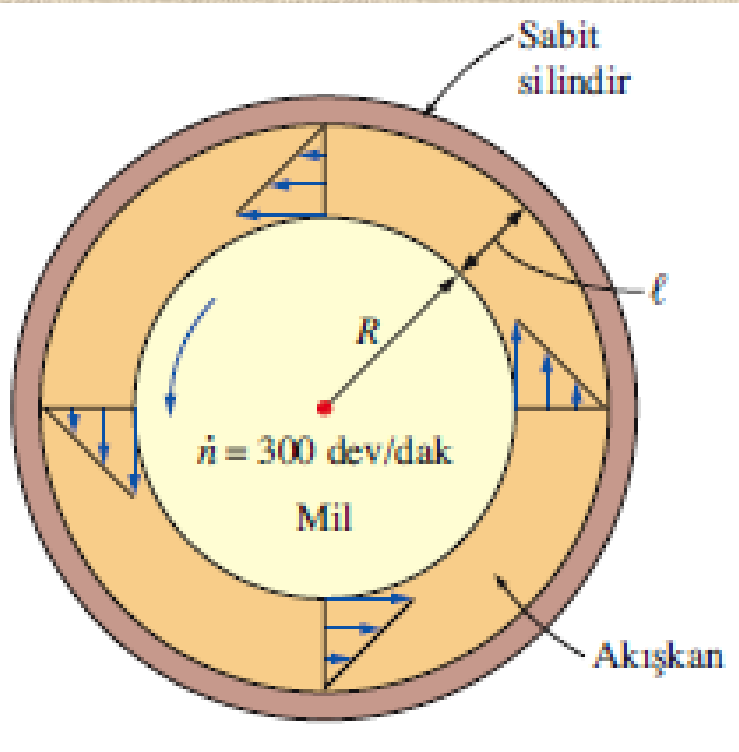
Özellik	Açıklama
Yüksek viskozite	Sıcak çalışmada kalın yağ filmi oluşturur
Yüksek sıcaklık dayanımı	100°C+ motor sıcaklıklarında stabilite
Yağ filmi kalınlığı	Aşınmış motorlarda boşlukları daha iyi doldurur
Yağ basıncı artırıcı etki	Eski motorlarda düşük yağ basıncını toparlar

🌡️ Sıcaklık Performansı

Yaklaşık çalışma aralığı:

- Soğukta: ~ -5°C'ye kadar makul
- Sıcakta: 40°C ortam sıcaklığında bile stabil

Türkiye'nin yaz şartlarında (özellikle Tekirdağ – İstanbul hattı gibi) yaz aylarında teknik olarak uygun olabilir; ancak modern motor ise üretici tavsiyesi belirleyicidir.



L Silindirin uzunluğu: m

\dot{n} Devir (birim zamandaki dönme) sayısı: devir/dakika

$$T = \tau \times A \times R \quad : \tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{\omega R}{l} = \mu \frac{2\pi n R}{l}$$

Kuvvet Moment Kolu

$$T = \mu \frac{2\pi n R}{l} \times 2\pi R L \times R = \mu \frac{4\pi^2 n R^3}{l}$$

Silindir Yanal Alan

$$T = FR = \mu \frac{2\pi R^3 \omega L}{l} = \mu \frac{4\pi^2 R^3 \dot{n} L}{l}$$

Belirli bir açısal hızda oluşan tork ölçülerek bu denklemden viskoziteyi hesaplamak mümkündür.

Dolayısıyla iç içe geçmiş iki silindir, viskozite ölçümüne yarayan bir **vizkozimetre** olarak düşünülebilir.

ÖRNEK 2-5 Bir Akışkanın Viskozitesinin Belirlenmesi

Bir akışkanın viskozitesi; 40 cm boyunda iç içe geçmiş iki silindirden oluşan bir viskozimetre ile ölçülecektir (Şekil 2-30). İçteki silindirin dış çapı 12 cm ve iki silindir arasındaki boşluk 0.15 cm'dir. İçteki silindir 300 devir/dakika hızla döndürüldüğünde oluşan tork 1.8 N·m olarak ölçüldüğüne göre akışkanın viskozitesini belirleyiniz.

ÇÖZÜM Çift silindirli bir viskozimetrenin torku ve dakikadaki dönme sayısı verilmiştir. Akışkanın viskozitesi belirlenecektir.

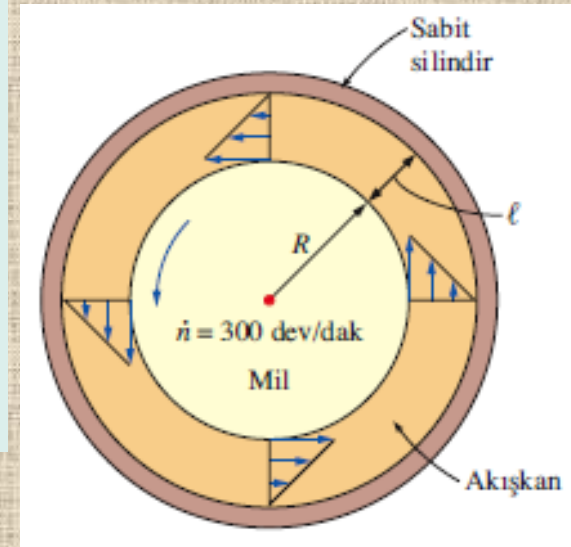
Kaubuler 1 İçteki silindir tamamen yağ içerisindedir. 2 İçteki silindirin her iki ucundaki viskoz etkiler ihmal edilebilir.

Analiz Hız profili yalnızca eğrilik etkileri ihmal edilebildiğinde doğrusaldır. Verilen durumda $\ell/R = \ll 1$ olduğundan hız profili doğrusal olarak düşünülebilir. Denklem 2-38'den viskozite terimi çekilir ve verilen değerler yerine yazılırsa, akışkanın viskozitesi

$$\mu = \frac{T\ell}{4\pi^2 R^3 n L} = \frac{(1.8 \text{ N}\cdot\text{m})(0.0015 \text{ m})}{4\pi^2 (0.06 \text{ m})^3 \left(300 \frac{1}{\text{dak}}\right) \left(\frac{1 \text{ dak}}{60 \text{ s}}\right) (0.4 \text{ m})} = \mathbf{0.158 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2}$$

olarak elde edilir.

İrdeleme Viskozite sıcaklığa karşı çok duyarlı olduğundan, hangi sıcaklıkta olduğu belirtilmemiş bir viskozite değerinin pek bir önemi yoktur. Dolayısıyla deney süresince akışkanın sıcaklığı da ölçülmeli ve yapılan hesaplamada belirtilmelidir.



- 1.72 A piston of weight 21 lb slides in a lubricated pipe, as shown in Fig. 1-7. The clearance between piston and pipe is 0.001 in. If the piston decelerates at 2.1 ft/s^2 when the speed is 21 ft/s , what is the viscosity of the oil?

$$\tau = \mu (dv/dy) = \mu [v/(0.001/12)] = 12\,000\mu v$$

$$F_f = \tau A = 12\,000\mu v [(\pi)(\frac{6}{12})(\frac{5}{12})] = 7854\mu v$$

$$\Sigma F = ma \quad 21 - (7854)(\mu)(21) = (21/32.2)(-2.1) \quad \mu = 1.36 \times 10^{-4} \text{ lb} \cdot \text{s}/\text{ft}^2$$

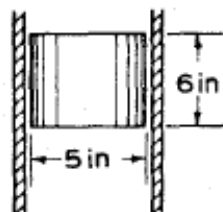


Fig. 1-7

- 1.73 A piston is moving through a cylinder at a speed of 19 ft/s , as shown in Fig. 1-8. The film of oil separating the piston from the cylinder has a viscosity of $0.020 \text{ lb} \cdot \text{s}/\text{ft}^2$. What is the force required to maintain this motion?

Assume a cylindrically symmetric, linear velocity profile for the flow of oil in the film. To find the frictional resistance, compute the shear stress at the piston surface.

$$\tau = \mu \frac{dv}{dr} = 0.020 \left[\frac{19}{(5.000 - 4.990)/2} \right] (12) = 912 \text{ lb}/\text{ft}^2 \quad F_f = \tau A = 912 \left[\pi \left(\frac{4.990}{12} \right) \left(\frac{3}{12} \right) \right] = 298 \text{ lb}$$

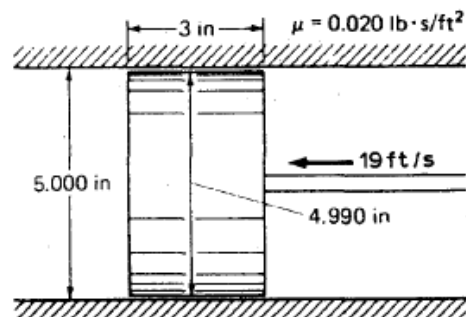


Fig. 1-8(a)

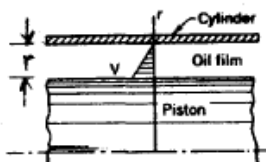


Fig. 1-8(b)

2-7 ■ YÜZEY GERİLİMİ VE KILCALLIK ETKİSİ

- Kan damlasının yatay bir cam üzerinde bir tümsek oluşturduğu, cıva damlasının neredeyse mükemmel bir küre şeklini aldığı ve pürüzsüz bir yüzeyde çelik bilye gibi yuvarlandığı, su veya çiy damlacıklarının ağaçların dallarında veya yapraklarında asılı durduğu, motor içerisine püskürtülen sıvı yakıtın küresel damlacıklar halinde bir sis oluşturduğu, sızdıran bir musluktan suyun küresel damlalar halinde çıktığı, havaya bırakılan bir sabun kabarcığının küresel şekil aldığı ve suyun çiçek yapraklarında boncuk şeklinde damlalar oluşturduğu sıklıkla gözlemlenen olaylardır.
- Bütün bunlarda ve diğer gözlemlerde, sıvı damlacıklarının içleri sıvıyla dolu küçük küresel balonlar gibi davrandığı görülür. Sıvı yüzeyi ise gerilmiş elastik bir zar benzeri davranış sergiler.
- Bu gerilime neden olan çekme kuvveti, yüzeye paralel olarak etkir ve sıvı moleküllerinin birbirlerini çekmelerinden kaynaklanır.
- Birim uzunluk için bu kuvvetin büyüklüğüne yüzey gerilimi veya *yüzey gerilim katsayısı* σ_s adı verilir ve genellikle N/m birimiyle ifade edilir.
- Bu etki ayrıca *yüzey enerjisi* olarak da adlandırılır ve N·m/m² veya J/m² birimiyle ifade edilir.

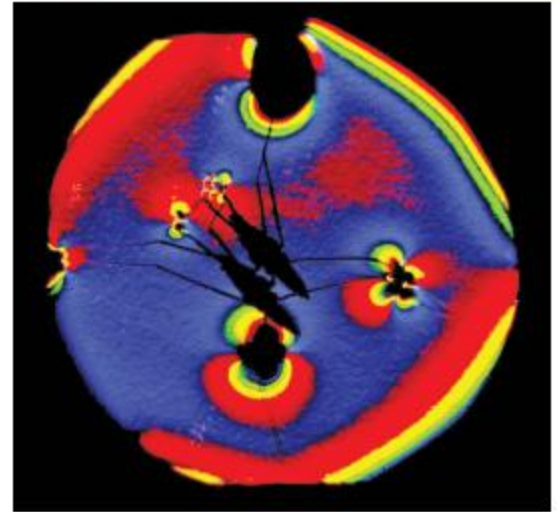
Yüzey geriliminin bazı sonuçları: (a) Bir yaprak üzerinde boncuk şekilli su damlaları, (b) Su yüzeyinde duran bir böcek, (c) Su üzerinde duran böceğin renkli Schlieren görüntüsü, böceğin ayaklarının suya temas ettiği yerlerde su yüzeyinin battığını ortaya koymaktadır (sanki iki böcek varmış gibi görünmektedir, ancak ikincisi yalnızca bir gölgeden ibarettir).



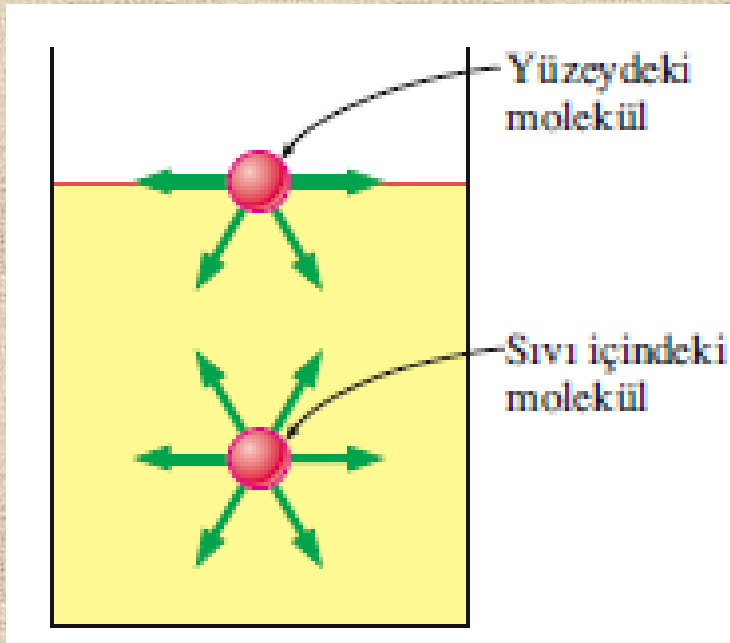
(a)



(b)



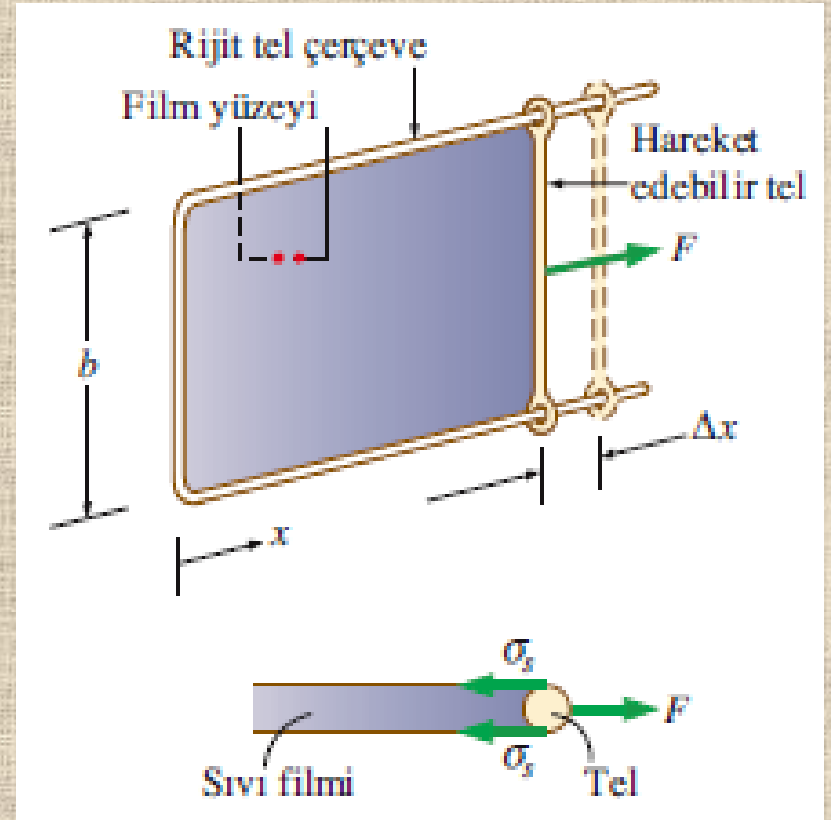
(c)



Sıvı yüzeyinde ve sıvı içerisinde bulunan iki sıvı molekülüne etkiyen çekim kuvvetleri.

$$\sigma_s = \frac{F}{2b}$$

$$W = \text{Kuvvet} \times \text{Mesafe} = F \Delta x = 2b\sigma_s \Delta x = \sigma_s \Delta A$$



Bir sıvı filminin U şekli verilmiş bir tel ile uzatılması ve b uzunluğundaki hareket edebilir tele etkiyen kuvvetler.

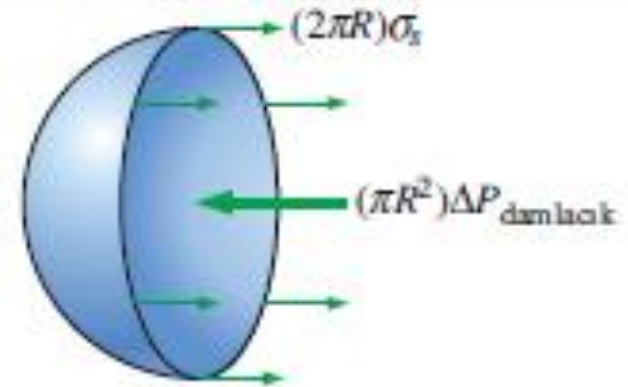
Yüzey Gerilimi: Sıvının yüzey alanında birim artış başına yapılan iş olarak da tarif edilebilir.

Bazı sıvıların 1 atm ve 20°C'deki (aksi belirtilmedikçe) yüzey gerilimleri

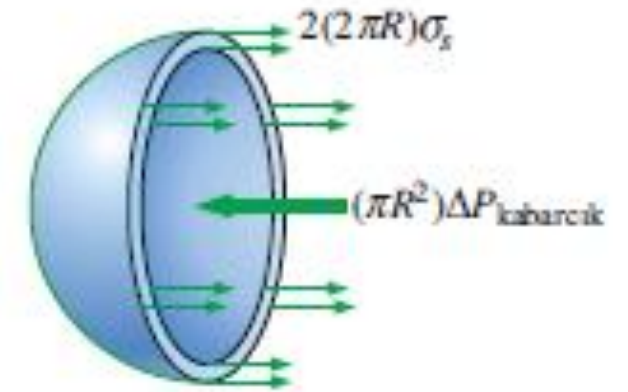
Akışkan	Yüzey Gerilimi σ_s , N/m
[†] Su:	
0°C	0.076
20°C	0.073
100°C	0.059
300°C	0.014
Gliserin	0.063
SAE 30 yağı	0.035
Cıva	0.440
Etil alkol	0.023
Kan, 37°C	0.058
Benzin	0.022
Amonyak	0.021
Sabun çözeltisi	0.025
Gazyağı	0.028

[†] Su için daha kesin veriler Eklerde verilmiştir.

Yarım damlacık (veya hava kabarcığı) ve yarım sabun kabarcığı için serbest cisim diyagramları.



(a) Yarım damlacık



(b) Yarım sabun kabarcığı

Damlacık veya
hava kabarcığı:

$$(2\pi R)\sigma_s = (\pi R^2)\Delta P_{\text{damlacık}} \rightarrow \Delta P_{\text{damlacık}} = P_i - P_o = \frac{2\sigma_s}{R}$$

Sabun

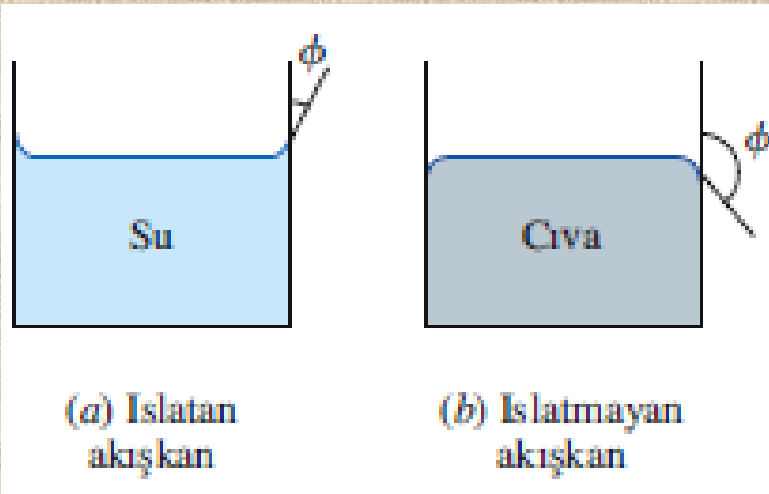
kabarcığı: $2(2\pi R)\sigma_s = (\pi R^2)\Delta P_{\text{kabarcık}} \rightarrow \Delta P_{\text{kabarcık}} = P_i - P_o = \frac{4\sigma_s}{R}$

Kılcallık (Kapilerite) Etkisi: Yüzey geriliminin diğer bir ilginç sonucu olup, sıvıya daldırılan küçük çaplı (genellikle 1 cm'den küçük) bir tüpteki sıvı yükselmesi veya alçalması olarak bilinir.

Kılcal Borular (Tüpler) veya Kanallar: Bu tür dar borular (tüpler) veya katı yüzeylerle sınırlandırılmış akış kanallarıdır. Bir gazyağı lambasının haznesinden gazyağının pamuk bir fitil boyunca yükselmesi bu nedendir. Kılcallık etkisi ayrıca suyun ağaçların tepesine yükselmesinde de kısmen önemli rol oynar.

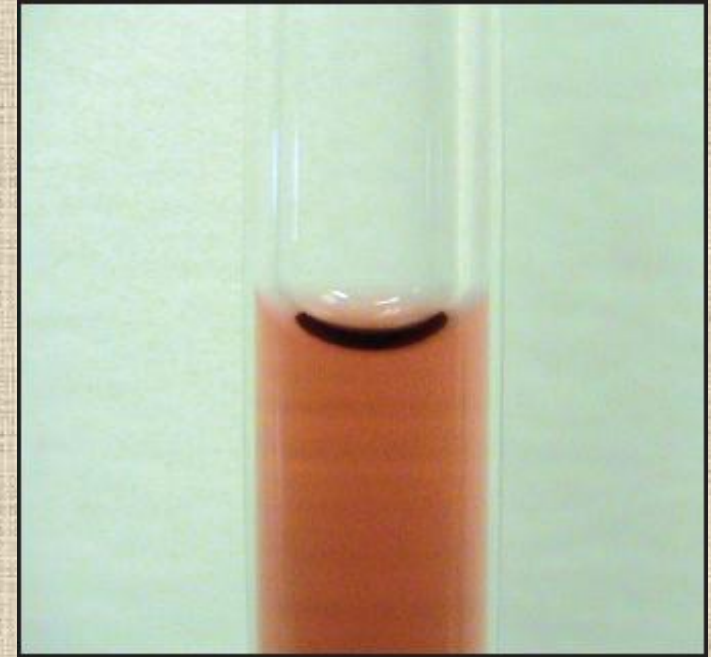
Menisk: Kılcal bir boruda yükselmiş bir sıvının eğrisel serbest yüzeyine menisk adı verilir.

Kılcallık etkisinin büyüklüğü **temas açısı** (veya *ıslatma*) açısı ϕ ile belirtilir. Bu açı, *temas noktasında katı yüzey ile sıvının teğeti arasında kalan açı* olarak tanımlanır.

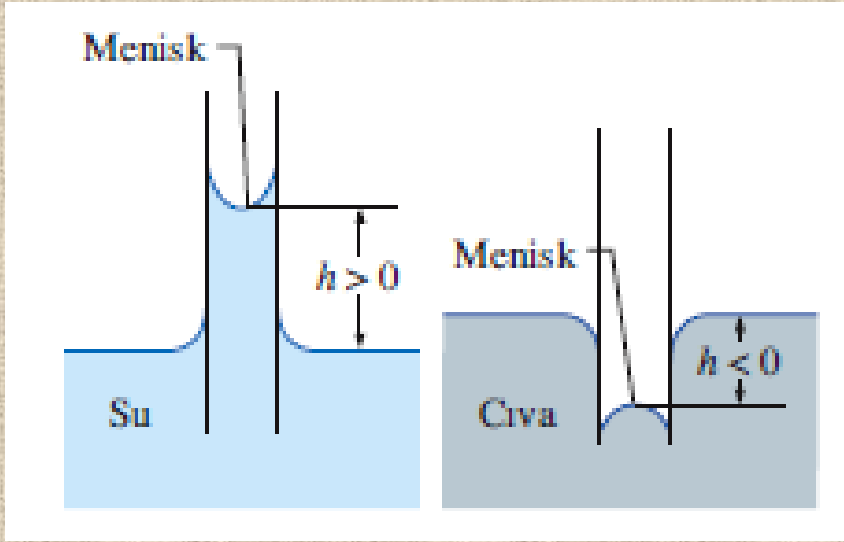


Islatan ve ıslatmayan akışkanlar için temas açıları.

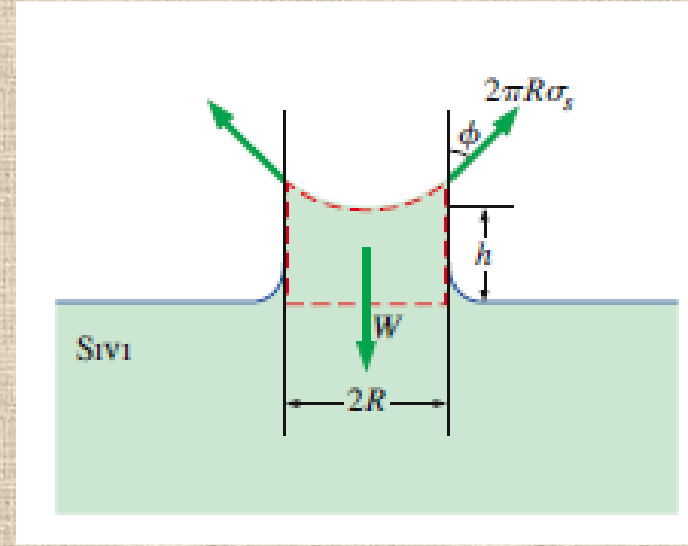
Kılcallık Etkisi



İç çapı 4 mm olan bir cam tüpte oluşan renklendirilmiş su meniski. Dikkat edilirse menisk kenarı kılcal tüpte boru yüzeyiyle çok küçük bir açıda temas etmektedir.



Küçük çaplı bir tüpte suyun kılcal yükselmesi ve cıvanın kılcal alçalması.



Kılcallık etkisinden dolayı bir tüpte yükselen sıvı sütununa etkiyen kuvvetler.

Kılcal yükselme:

$$h = \frac{2\sigma_s}{\rho g R} \cos \phi \quad (R = \text{sabit})$$

- Dikkat edilirse kılcal yükselme tüp çapıyla ve sıvı yoğunluğu ile ters orantılıdır. Dolayısıyla tüp ne kadar inceyse ve sıvının yoğunluğu ne kadar küçükse borudaki sıvı o denli fazla yükselir (veya düşer).

ÖRNEK 2-6 Bir Tüpte Suyun Kılcal Yükselmesi

0.6 mm çapında bir cam tüp, içerisinde 20°C'de su bulunan bir kaba daldırılmıştır. Suyun borudaki kılcal yükselmesini belirleyiniz (Şekil 2-39).

ÇÖZÜM İnce bir tüpte kılcallık etkisiyle meydana gelen kılcal su yükselmesi belirlenecektir.

Kabuller 1 Suda hiçbir katışkı bulunmamaktadır ve cam tüp yüzeylerinde bir kirlilik yoktur. 2 Deney, atmosfer basıncında yapılmaktadır.

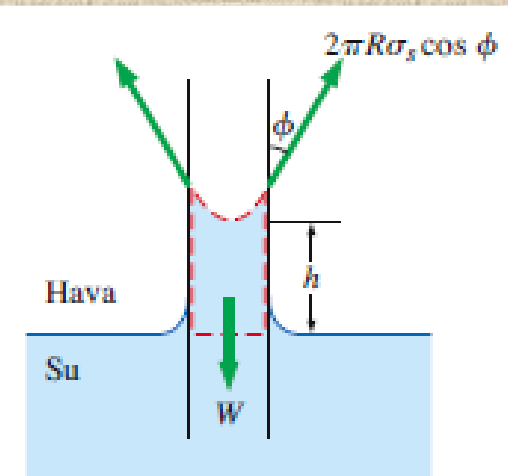
Özellikler Suyun 20°C'de yüzey gerilimi 0.073 N/m'dir (Tablo 2-4). Suyun cam ile temas açısı ise 0° dir. Sıvı haldeki suyun yoğunluğu 1000 kg/m³ olarak alınabilir.

Analiz Kılcal yükselme miktarı, verilen değerlerin doğrudan Denklem 2-42'de yazılmasıyla,

$$h = \frac{2\sigma_s \cos \phi}{\rho g R} = \frac{2(0.073 \text{ N/m})}{(1000 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(0.3 \times 10^{-3} \text{ m})} (\cos 0^\circ) \left(\frac{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2}{1 \text{ N}} \right) \\ = 0.050 \text{ m} = \mathbf{5.0 \text{ cm}}$$

olarak bulunur. Dolayısıyla su, tüp içerisinde kaptaki su seviyesinden itibaren 5 cm yükselir.

İrdeleme Eğer boru çapı 1 cm olsaydı, kılcal yükselme 0.3 mm olurdu ve bu da gözle zor fark edilirdi. Aslında büyük çaplı bir tüpte kılcal yükselme sadece kenarlarda meydana gelir. Merkezde hiçbir yükselme olmaz. Bu nedenle büyük çaplı tüplerde kılcallık etkisi ihmal edilir.



ÖRNEK 2-7

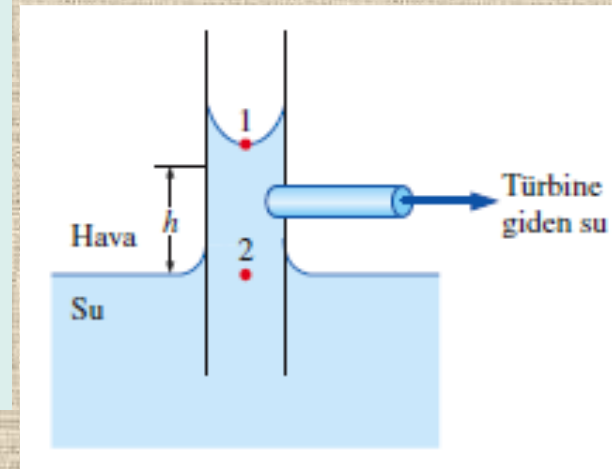
Kılcal Yükselmenin Hidrolik Türbinle Elektrik Üretiminde Kullanılması

Örnek 2-6 tekrar göz önüne alınmış olsun. Bir dış kaynaktan enerji almaksızın sadece yüzey gerilimi etkisiyle suyun tüpte 5 cm yükseldiğini gerekçesiyle, bir kimse tüpteki su seviyesinin altında bir noktadan bir delik açılarak ve buradan boşalacak suyun bir türbine yönlendirilerek elektrik enerjisi üretilebileceğini öne sürmektedir (Şekil 2-40). Bu kimse ayrıca fikrini daha da ileri taşıyarak, bu amaçla tüp demetlerinin kullanılabilirliğini ve daha elverişli debiler ve su yükseklikleri elde etmek için bu demetlerin birlikte çalıştırılabileceğini iddia etmektedir. Bu fikrin yararlı bir tarafının olup olmadığını belirleyiniz.

ÇÖZÜM Kılcallık etkisiyle tüplerde yükselen su bir türbine beslenerek elektrik enerjisi üretimi yapılacaktır. Bu önerinin geçerli olup olmadığı incelenecektir.

Analiz Günümüzde yaygın olarak kullanılan hidroelektrik santraller yüksek bir seviyede bulunan suyun potansiyel enerjisinden faydalanmaktadır. Kılcallık etkisi, herhangi bir enerji ihtiyacı almaksızın suyu istenilen yüksekliğe çıkaracak bir mekanizmaya sahip olduğuna göre, önerilen sistem dâhiyane bir fikir gibi görünmektedir.

Termodinamik açıdan bakıldığında, dışarıdan herhangi bir enerji almaksızın sürekli olarak enerji üreten bu sistemin bir devridaim makinası olduğu söylenebilir. Diğer bir anlatımla bu sistem enerjiyi yoktan var etmekte ve bu yönüyle termodinamiğin birinci yasasını veya enerjinin korunumu ilkesini açıkça ihlal etmektedir. Bu nedenle üzerinde daha fazla durulmasına gerek yoktur. Ancak enerjinin korunumu ilkesi bir çok kişiyi, doğanın hatalı olduğunu gösteren ve böylece dünyanın enerji problemini bir çırpıda sonsuza kadar çözen ilk kişi olma hayalinden vazgeçirememiştir. Dolayısıyla önerilen sistemin imkansız olduğu gösterilmelidir.



Fizik derslerinden statik haldeki bir akışkan içerisindeki basıncın derinlikle lineer olarak değiştiğini hatırlıyor olmalısınız (bu konu bir sonraki bölümde ayrıca işlenecektir). Buna göre tüpte yükselen 5 cm su sütunu boyunca basınç farkı şöyle hesaplanır:

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{tüpteki su sütunu}} &= P_2 - P_1 = \rho_{\text{su}} gh \\ &= (1000 \text{ kg/m}^2)(9.81 \text{ m/s}^2)(0.05 \text{ m}) \left(\frac{1 \text{ kN}}{1000 \text{ kg}\cdot\text{m/s}^2} \right) \\ &= 0.49 \text{ kN/m}^2 (\approx 0.005 \text{ atm})\end{aligned}$$

Dolayısıyla su sütununun üst yüzeyindeki (tavanındaki) basınç, tabanındaki basınçtan 0.005 atm *daha düşüktür*. Su sütununun tabanındaki basıncın atmosfer basıncına eşit olduğu (çünkü kaptaki su yüzeyiyle aynı seviyededir) göz önüne alınırsa, tüpün içerisindeki her yerde basıncın atmosfer basıncının altında olduğu ve aradaki farkın su sütununun üst yüzeyinde 0.005 atm'e çıktığı anlaşılır. Bu nedenle eğer tüpe bir delik açılacak olursa, suyun dışarı akması bir tarafa, delikten içeri hava girmeye başlayacaktır.

İrdeleme Tüpteki su sütunu hareketsiz olduğundan, bu sütun üzerine etki eden dengelenmemiş bir kuvvet bulunamaz (yani sütuna etkiyen net kuvvet sıfır olmalıdır). Atmosfer şartlarındaki hava ve su sütununun tepesindeki su arasında menisk boyunca olan basınç farkından kaynaklanan kuvvet yüzey gerilimi tarafından dengelenir. Yüzey gerilimi kuvveti ortadan kalkarsa, atmosfer basıncının etkisiyle tüpteki su tüpün dışındaki serbest yüzey seviyesine düşer.

Özet

- Giriş
 - ✓ Sürekli Ortam
- Yoğunluk ve bağıl Yoğunluk
 - ✓ İdeal Gazların Yoğunluğu
- Buhar Basıncı ve Kaviteasyon
- Enerji ve Özgül Isılar
- Sıkıştırılabilirlik ve Ses Hızı
 - ✓ Sıkıştırılabilirlik Katsayısı
 - ✓ Hacimsel Genleşme Katsayısı
 - ✓ Ses Hızı ve Mach sayısı
- Viskozite
- Yüzey Gerilimi ve Kılcallık Etkisi