

1. AKIŞKANLARIN TEMEL ÖZELLİKLERİ

1.1. Giriş

Fizik doğada karşılaşılan her çeşit olayı inceleyen bilim dalıdır ve beş bölümden oluşmaktadır. Bunlar; ışık, ısı, elektrik, ses ve mekaniktir. Işık, cisimleri görmeyi, renkleri ayırt etmeyi sağlayan, ısı ise bir cismin uzamasına, erimesine, genişmesine, buharlaşmasına, sıcaklığının artmasına, bir iş yapmasına neden olan fiziksel enerjidir. Elektrik, maddenin elektron parçacıklarının hareketiyle ortaya çıkan enerji çeşididir. Kulağın duyabildiği titreşimlere ses denir. Mekanik, kuvvetlerin etkisi altında cisimlerin denge veya hareket koşullarını inceleyen bilim dalıdır. Mekanik; a) *Katı cisimler mekaniği*, b) *Şekli bozulabilen cisimler mekaniği* ve c) *Akışkanlar mekaniği* olmak üzere üç kısımdan meydana gelir.

Akışkanlar mekaniği durgun ve hareket halindeki gazların ve sıvıların davranışlarını inceleyen, uygulamalı bilim dalıdır. Vücudumuzdaki kan damarlarından petrol boru hatlarına kadar geniş bir alanı kapsar. Akışkanın bulunduğu her yerde akışkanlar mekaniği vardır. Akışkanlar bilindiği gibi gaz ve sıvılardan oluşmaktadır. Akışkan, kuvvet (kayma gerilmesi) uygulandığında sürekli deformasyona uğrayan bir maddedir. Akışkanlar mekaniği genel olarak; a) *Akışkan statik*, b) *Akışkan dinamik*, c) *Akışkan kinematik* bölümlerinden oluşur. Akışkan statik, akışkanların hareketsiz durumdaki mekaniğiyle ilgilenir. Denge koşullarını ve denge halindeki hareketsiz akışkanlara etki eden kuvvetleri ele alır. Akışkanların hızları ve akım çizgileriyle ilgilenen bölüm ise akışkan kinematiktir. Akışkan dinamikinde akışkanların hızları ve ivmeleri arasındaki ilişkiler ve hareket halindeki akışkanların üzerine gelen kuvvetler incelenir. Akışkanlar mekaniğinin sıvılarla ilgilenen bölümü teorik ve deneysel olmak üzere iki kısımda incelenir. Akışkanlar mekaniğinin sıvılarla ilgilenen deneysel kısmına hidrolik adı verilir. Hidrolik, akışkanlar mekaniğinin sıkıştırılmayan akışkanlara (sıvılar) ait deneysel esaslara dayalı teknikteki uygulaması ya da durgun ve hareket halinde bulunan sıvıların hareketlerini ve bunların ilgili tesislerle olan karşılıklı ilişkilerini inceleyen bilim dalıdır.

Evren'de madde dört halde bulunur. Bunlar katı, sıvı, gaz ve plazma halidir. Katılarla akışkanlar arasındaki en temel farklılık katıların sert ve kolayca deforme olmamasıdır. Gerçek katı cisimler, üzerine uygulanan kuvvetin yarattığı kayma gerilmesinin etkisiyle biçim değiştirir. Gerilmenin belli bir değerine kadar cisim esnek ve kuvvetin etkisi kalkınca eski biçimine geri döner. Ancak gerilme belli bir değeri aşınca esneklik kalmaz ve cisim eski durumuna dönme özelliğini kaybeder ve akmaya başlar. Akışkanlar ise değeri ne kadar küçük olursa olsun kayma gerilmesi yaratan kuvvetin etkisinde kalır. Dolayısıyla akışkan en küçük bir kuvvetin etkisinde, uygulanan kuvvet kayma gerilmesi yaratıyorsa hemen biçim değiştirir ve akmaya başlar. Bu nedenle duran bir akışkan hiçbir zaman kayma gerilmesi taşıyamaz. Akışkanlar içerisinde sıvılar buldukları kabın şeklini alırlar. Moleküller arasındaki çekim kuvvetleri sıvıları bir arada tutar. Ancak belli bir şekil almasını sağlayamaz. Moleküller arası bağlayıcı kuvvet nedeniyle atmosfer ile serbest yüzey oluştururlar. Gazlar buldukları kabı

doldurur ancak belirli bir hacim ve şekil meydana getiremez. Moleküller daima hareket halinde ve çarpışarak birbirlerinden uzaklaşma eğilimindedir. Gazların üzerindeki basınç kaldırılınca sürekli genişir ve bu nedenle gazlar hiçbir zaman serbest yüzey veya atmosferik yüzey oluşturamaz. Ancak bir sıvı veya katı ile ortak yüzey oluşturabilirler. Sıvılar sıkıştırılmayan ya da çok az sıkıştırılabilen akışkanlardır. Çok büyük basınçlar altında hacimlerinde çok küçük bir değişme meydana gelir. Gazlar kolay sıkıştırılabilir. Gaz, üzerine uygulanan basıncın durumuna göre kolayca sıkışıp, genişebilir.

Plazma, kimya ve fizikte *iyonize olmuş gaz* anlamına gelir. Kendine özgü niteliklere sahip olduğundan, plazma hali maddenin katı, sıvı ve gaz halinden ayrı olarak incelenir. Mikroskobik açıdan plazma, sürekli hareket eden ve etkileşen yüklü parçacıklar topluluğu olarak ifade edilir. Plazma, iyonlar, elektronlar, yüksüz atom ve moleküllerle fotonlardan oluşan, bazı atomlar iyonlaşırken bazı iyonların elektronlarla birleşip atoma dönüştüğü, protonların sürekli olarak bir yandan ortaya çıktığı bir yandan da soğutulduğu bir karışım olarak düşünülebilir. Evren'de en çok plazma bulunur ve evrenin % 96'sından fazlası plazma halindedir. Evren'deki tüm yıldızlar, güneş, gezegenler ve gezegenler arası boşluklar, üzerinde yaşadığımız Dünya'mız plazma halinden başlayarak bugünkü halini almışlardır (<https://secure.wikimedia.org/wikipedia/tr/wiki/>, Anonim 2000).

1.2. Boyutlar ve Birimler

Boyut fiziksel bir değişkeni miktar olarak ifade eden bir ölçüdür. Yani boyut sayısal değer olmaksızın fiziksel miktarın ölçüsüdür Birim ise boyut miktarına bir sayı iliştiirmenin özel bir yoludur ya da boyutu sayı ile ifade etme yoludur. Örneğin kütle bir boyut iken kg birimdir. Boyut "Boyut Analizi" gibi tekniğe büyük katkıları olan bir yaklaşım yönteminin geliştirilmesini sağlayan kavramdır. Birimler ise büyüklüklere ya da boyutlara anlam kazandırır. Yedi temel boyut vardır. Bunlar kütle, uzunluk, zaman, sıcaklık, elektrik akımı, ışık miktarı ve madde miktarıdır Akışkanlar mekaniğinde ise tüm boyutlar 4 asal boyuttan türetilmiştir. Bunlar; kütle (M), uzunluk (L), zaman (T) ve sıcaklık (θ)'dır. Sıcaklığı sabit alırsak asal boyutlar üçe iner. Elektromanyetik etkilerin önemli olduğu bazı akışkanlar mekaniği problemlerinde asal boyut sayısını elektrik akımı olan I'yı da ilave ederek beşe çıkarmak olanaklıdır. Ancak akışkanlar mekaniği dersinde sıcaklık sabit kabul edilerek, üç asal boyut kullanılacaktır.

MLT ve FLT olmak üzere iki boyut sistemi vardır (Edis 1972, Bar-Meir 2011). MLT sisteminde temel boyut kütle (M), FLT sisteminde temel boyut kuvvet (F) alınmış olup diğer iki boyut (uzunluk ve zaman) aynıdır. Newton'un ikinci yasasına göre kütle ile ivmenin çarpımı kuvveti vermektedir. Bu nedenle FLT sisteminde kütle boyutu; $M = FL^{-1}T^2$; MLT sistemindeki kuvvetin boyutu ise; $F = MLT^{-2}$ ile gösterilir. Tüm büyüklüklerin boyutları o büyüklüğün tanımından elde edilebilir. Hangi sistemin kullanıldığı önemli değildir. Çizelge 1.1'de FLT ve MLT sistemindeki büyüklük ve boyutlar verilmiştir. Bugün uygulamada yaygın olarak CGS, SI ve Teknik Ölçü olmak üzere 3 birim sistemi kullanılır.

CGS birim sisteminde kuvvet veya ağırlık türetilmiş birim olup “g cm s⁻²” veya kısaca “dyn” ile ifade edilir. Kütle birimi gram (g)’dir. SI birim sisteminde kütle birimi kg olup kuvvet ve ağırlık birimleri türetilmiştir. Kuvvet ve ağırlığın birimi kg m s⁻² ya da Newton (N)’dur. Teknik ölçü birim sistemi ise FLT boyut sistemine dayalı birim sistemidir. Kütle yerine asal birim olarak ağırlık ya da kuvvet alınmış olup kilopond (kp) ile gösterilir. Kütle birimi türetilmiş olup birimi kp m⁻¹ s²’dir. SI ve teknik ölçü birimi sistemlerinde kütle ve kuvvetin geçmediği birimler aynı olup, kütle ve kuvvetin geçtiği birimlerde ise yerçekimi ivmesi (g= 9,81 m/s²) kadar bir farklılık bulunmaktadır. 1 kp= 9,81 kgm.s⁻² = 9,81 N alındığında birimler arasında kolayca uyum sağlanmış olur. Çizelge 1.2’de bazı büyüklüklerin birimleri ve Çizelge 1.3’de ise birimler arasındaki dönüşümler verilmiştir.

Çizelge 1.1. Temel fiziksel büyüklükler ve boyutları (Edis 1972, Giles 1980, Bar-Meir 2011)

Büyüklük	Boyutlar	
	FLT	MLT
İvme	LT ⁻²	LT ⁻²
Açı	F ⁰ L ⁰ T ⁰	M ⁰ L ⁰ T ⁰
Açısal ivme	T ⁻²	T ⁻²
Açısal hız	T ⁻¹	T ⁻¹
Alan	L ²	L ²
Özgül kütle	FL ⁻⁴ T ²	ML ⁻³
Enerji	FL	ML ² T ⁻²
Kuvvet	F	MLT ⁻²
Frekans	T ⁻¹	T ⁻¹
Isı	FL	ML ² T ⁻²
Uzunluk	L	L
Kütle	FL ⁻¹ T ²	M
Elastiklik modülü	FL ⁻²	ML ⁻¹ T ⁻²
Kuvvet momenti	FL	ML ² T ⁻²
Alan atalet momenti	L ⁴	L ⁴
Kütle atalet momenti	FLT ²	ML ²
Momentum	FT	MLT ⁻¹
Güç	FLT ⁻¹	ML ² T ⁻³
Basınç	FL ⁻²	ML ⁻¹ T ⁻²
Özgül ısı	L ² T ⁻² θ ⁻¹	L ² T ⁻² θ ⁻¹
Özgül ağırlık	FL ⁻³	ML ⁻² T ⁻²
Uzama	F ⁰ L ⁰ T ⁰	M ⁰ L ⁰ T ⁰
Gerilme	FL ⁻²	ML ⁻¹ T ⁻²
Yüzey gerilmesi	FL ⁻¹	MT ⁻²
Sıcaklık	θ	θ
Zaman	T	T
Tork ya da moment	FL	ML ² T ⁻²
Hız	LT ⁻¹	LT ⁻¹
Dinamik vizkozite	FL ⁻² T	ML ⁻¹ T ⁻¹
Kinematik viskozite	L ² T ⁻¹	L ² T ⁻¹
Hacim	L ³	L ³
Işık	FL	ML ² T ⁻²
Elektrik akımı	I	I
Işık miktarı (kandela)	C	C
Madde miktarı (mol)	N	N

Çizelge 1.2. Bazı büyüklükler ve birimler

Büyüklük	Birim		
	CGS	SI	Teknik Ölçü
Kütle (m)	g	kg	kp.s ² /m
Uzunluk (L)	cm	m	m
Zaman (t)	s	s	s
Kuvvet (F)	(gcm/s ²) dyn	Newton (kgm/s ²)	kp
Alan (A)	cm ²	m ²	m ²
Hacim (∇)	cm ³	m ³	m ³
Hız (V)	cm/s	m/s	m/s
İvme (a)	cm/s ²	m/s ²	m/s ²
Basınç (P)	dyn/cm ²	N/m ²	kp/m ²
Enerji (E)	dyn.cm	N.m	kp.m
Dinamik viskozite (μ)	dyn.s/cm ² (g/cm.s)	N.s/m ² (Pa.s=kg/m.s)	kp.s/m ²
Kinematik viskozite (ν)	cm ² /s	m ² /s	m ² /s
Özgül kütle (ρ)	g/cm ³	kg/m ³	kp.s ² /m ⁴
Özgül ağırlık (γ)	dyn/cm ³	N/m ³	kp/m ³
Güç (N)	Erg/s	N.m/s	kp.m/s

Çizelge 1.3. Birimler ve dönüşümler

Büyüklük	Dönüşüm
Uzunluk	1 m= 100 cm= 39,37 inç= 3,281 ft
Alan	1 m ² = 1.10 ⁴ cm ² = 1.10 ⁻² ar= 1.10 ⁻⁴ ha= 1.10 ⁻⁶ km ² = 1550 inç ² = 10,76 ft ²
Hacim	1 dm ³ (L)= 0,001 m ³ = 1000 cm ³ = 61,02 inç ³ = 3,532.10 ⁻² ft ³
Kütle	1 kg= 1000 g= 2,205 lb (pound)= 0,102 kp.s ² /m
Kuvvet	1 N= 1.10 ⁵ dyn= 0,102 kp
Basınç	1 Pa= 1 N/m ² = 1.10 ⁻⁵ bar= 0,102 kp/m ² = 10 dyn/cm ² = 0,7501.10 ⁻⁵ mHg= 10,25.10 ⁻⁵ mSS= 0,9869.10 ⁻⁵ atm = 1,0197.10 ⁻⁵ at
Güç	1 kW= 1000 W= 1,36 BG(PS)= 1,34 HP= 102 kpm/s = 0,239 kcal/s
İş ve enerji	1 J= Nm= 0.102 kpm= 2,778.10 ⁻⁷ kWh= 3,777.10 ⁻⁷ BGh = 2,388.10 ⁻⁴ kcal= 1.10 ⁷ erg
Hız	1 km/h= 0,2778 m/s= 16,67 m/min
Kütleli veri	1 kg/s= 3600 kg/h= 3,6 t/h
Hacimsel veri	1 m ³ /s= 3600 m ³ /h= 3,6.10 ⁶ dm ³ /s
Moment	1 Nm= 1.10 ⁷ dyncm= 10200 gcm= 0,102 kpm
Açısal hız	rad/s= 2πn/60 n= min ⁻¹
Dinamik viskozite	1 Pas= 1 N.s/m ² = 1 kg/ms= 10 poise (g/cm.s=dyn s/cm ²)= 1000 cp (santipoise)= 0,102 kp.s/m ²
Kinematik viskozite	1 m ² /s= 1.10 ⁴ st(stoke= cm ² /s)= 1.10 ⁶ cst (santistoke= mm ² /s)= 3,6.10 ³ m ² /h
Yüzey gerilimi	N/m= 1000 dyn/cm= 0,102 kp/m

1.3. Kütle ve Ağırlık İlişkileri

Kütle: Bir cismin ağırlığının yerçekimi ivmesine bölümüne eşittir. Skaler bir büyüklüktür. Bir cismin madde miktarıyla ilgili bir özelliğidir. Birimi SI birim sisteminde kg'dır. Kütle terazi ile ölçülür. Her yerde aynıdır, değişmez. Sıcaklığı +4 °C ve 760 mmHg basıncında 1 cm³ saf suyun kütlelerine 1 g denmiştir. Aynı koşullarda 1 dm³ saf suyun kütlesi de 1 kg'dır. Ancak su buharlaşacağı için tanımlanan su kütlelerine eşit kütlede Platin-İridyum alaşımından yapılmış bir silindir alınmakta ve Paris yakınlarındaki Uluslararası Ağırlık ve Ölçüler Bürosu'nda saklanmaktadır.

$$m = \frac{W}{g} (kg)$$

Ağırlık: Bir cisme yerin uyguladığı çekim kuvvetidir. Kütle sabit olmasına karşılık ağırlık değişkendir. Bunun nedeni çekim alanının sabit olmamasıdır. Bu nedenle vektörel bir büyüklüktür. Birimi kuvvet biriminin aynısı olup N'dur. Ağırlık dinamometre ile ölçülür. Cismin ağırlığı bulunduğu yere göre değişir. Örneğin bir cismin aydaki ağırlığı dünyadaki ağırlığının altıda biridir. Ekvatordan kutuplara gidildikçe çekim alan şiddeti büyür. Yine 1 kg lık bir kütleyle etkileyen çekim kuvveti Kuzey Kutbunda 9.832 N, İstanbul'da 9.80 N, Ankara'da 9.79 N ve Ekvator'da 9.78 N olarak ölçülür. Yerden 100000 m yukarıda g=7.3218, 4500 m aşağıda 9.8295 m/s² olup 4500 m'den daha derinlere gittikçe yerçekimi ivmesi artmaya başlar.

$$W = m \cdot g (N)$$

Özgül (Öz) Kütle: Birim hacimdeki madde miktarıdır ve ρ (rho) ile gösterilir. Cisimler için ayırt edici özelliklerden birisidir. Bir bardak yağ ile bir teneke yağın hacim ve kütleleri farklı olmasına rağmen ikisi de aynı tür maddedir. Eğer özdeş iki bardağa yağ konulursa iki örneğin de kütleleri eşit olur. Düzgün demir çubuktan kesilen birer cm uzunluktaki parçaların kütlelerinin eşit olduğu görülür. Buna göre aynı tür maddelerin birim hacimlerinde eşit miktarlarda madde bulunur. Her maddenin birim hacminin kütlesi birbirinden farklıdır. Birimi kg/m³'dür. Çizelge 1.4'de bazı sıvıların ve Çizelge 1.5'de bazı gaz akışkanların özgül kütle ve diğer fiziksel özellikleri verilmiştir. Özgül kütle sıcaklık ve basınca bağlıdır. Gazlarda çoğunlukla basınçla doğru, sıcaklıkla ters orantılıdır. Sıvılar ve katılar sıkıştırılmaz olduğundan özgül kütlelerindeki basınca bağlı değişim ihmal edilir. Sıvılarda ve katılarda özgül kütle daha çok sıcaklığa bağlıdır. Kütle sabit kalmak koşuluyla özgül kütle hacimle ters orantılıdır. Hacim arttığında özgül kütle azalır.

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

Özgül hacim: Birim madde miktarının hacmi olup özgül kütleyle bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$u = \frac{1}{\rho} \text{ (m}^3\text{/kg)}$$

Özgül Ağırlık: Birim hacimdeki cismin ağırlığına özgül ağırlık denir ve γ (gamma) ile gösterilir. Birimi N/m³'dir. Özgül ağırlık ile özgül kütle arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir.

$$\gamma = \rho \cdot g = \frac{W}{\nabla}$$

Yoğunluk: Cismin özgül kütlesinin +4 C'deki damıtık suyun özgül kütlesine oranına ya da bir cismin birim hacim ağırlığının aynı hacimdeki ve +4 C'deki suyun ağırlığına oranına denir. Özgül kütle veya özgül ağırlığın oranı olması nedeniyle yoğunluk birimsiz olup SG ile gösterilmektedir

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{su}}$$

Yukarıdaki eşitliklerde; m: kütle (kg), W: ağırlık (N), ∇ : hacim (m³), g: 9,81 (m/s²), u: özgül hacim (m³/kg), SG: Yoğunluk (-), ρ : Akışkanın özgül kütlesi (kg/m³), ρ_{su} : Suyun özgül kütlesi (kg/m³) dir (Hewakandamby 2012).

1.4. İdeal Gaz Kanunu

Gaz akışkanlar, sıvı akışkanlarla karşılaştırıldıklarında yüksek oranda sıkıştırılabilirler. Gaz akışkanlar sıkıştırıldıklarında özgül kütlelerinde, basınçlarında ve sıcaklıklarında değişimler meydana gelir. Bu değişimler;

$$P = \rho RT \text{ ya da } P\nabla = mRT$$

bağıntısıyla ifade edilir (Douglas 1986b). Bu eşitliğe "ideal" ya da "mükemmel" gaz kanunu ya da ideal gazın "durum" eşitliği denir. Gazların tümü yüksek sıcaklıklarda ve düşük basınçlarda ideal gaz denkleminde uygun davranırlar. Yukarıdaki eşitlikte;

P : Mutlak basınç (Pa)
 ρ : Özgül kütle (kg/m³)
T : Mutlak sıcaklık (K)
R : Gaz sabiti (J/kg.K)
 ∇ : Hacim (m³)
m : Kütle (kg)'dır.

Gaz sabiti, üniversal gaz sabiti olan MR yardımıyla bulunabilir. MR=8312 (bazı kaynaklarda 8314) (Nm) / (kg mol K) olduğundan

$$R = \frac{8312}{M \text{ (kg/mol)}} \text{ elde edilir (Streeter ve Wylie 1983). Buradaki M, bağıl}$$

molekül kütlesi olup hava için 29, karbon monoksit için 28,00; helyum için 4,00; hidrojen için 2,02; nitrojen için 28,00; oksijen için 32,00 ve su buharı için 18,00 alınabilir.

Çizelge 1.4. Bazı sıvı akışkanların fiziksel özellikleri (Munson vd. 1994)

Akışkan	Özgül kütle ρ (kg/m ³)	Özgül ağırlık γ (kN/m ³)	Dinamik viskozite μ (Pas)	Kinematik viskozite ν (m ² /s)	Yüzey gerilimi (a) σ (N/m)	Buhar basıncı P_v (N/m ²) (mutlak)	Elastiklik modülü, (b) E_v (N/m ²)
Karbon Tetraklorid (20 °C)	1590	15,6	$9,58 \cdot 10^{-4}$	$6,03 \cdot 10^{-7}$	$2,69 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^4$	$1,31 \cdot 10^9$
Etil alkol (20 °C)	789	7,74	$1,19 \cdot 10^{-3}$	$1,51 \cdot 10^{-6}$	$2,28 \cdot 10^{-2}$	$5,9 \cdot 10^3$	$1,06 \cdot 10^9$
Gazyağı (15.6 °C)	680	6,67	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$5,5 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^9$
Gliserin(20 °C)	1260	12,4	$1,50 \cdot 10^{-10}$	$1,19 \cdot 10^{-3}$	$6,33 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$4,52 \cdot 10^9$
Civa(20 °C)	13600	133	$1,57 \cdot 10^{-3}$	$1,15 \cdot 10^{-7}$	$4,66 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$2,85 \cdot 10^{10}$
Yağ(c) (SAE 30) (15.6 °C)	912	8,95	$3,8 \cdot 10^{-1}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	-	$1,5 \cdot 10^9$
Deniz suyu(15.6 °C)	1030	10,1	$1,20 \cdot 10^{-3}$	$1,17 \cdot 10^{-6}$	$7,34 \cdot 10^{-2}$	$1,77 \cdot 10^3$	$2,34 \cdot 10^9$
Tatlı su (15.6 °C)	999	9,80	$1,12 \cdot 10^{-3}$	$1,12 \cdot 10^{-6}$	$7,34 \cdot 10^{-2}$	$1,77 \cdot 10^3$	$2,15 \cdot 10^9$

a: Havayla temas koşulunda; b : Ses hızından hesaplanan izoentropik elastiklik modülü; c : Elde edilen petrolün özelliğine göre değişebilir.

Çizelge 1.5. Bazı gaz akışkanların fiziksel özellikleri (Munson vd. 1994)

Gazlar	Özgül kütle (ρ) (kg/m ³)	Özgül ağırlık γ (N/m ³)	Dinamik viskozite μ (Pas)	Kinematik viskozite ν (m ² /s)	Gaz sabiti R^* (J/kg.K)	Özgül ısı oranı (k)**
Hava (standart) (15 °C)	1,23	$1,20 \cdot 10^1$	$1,79 \cdot 10^{-5}$	$1,46 \cdot 10^{-5}$	$2,869 \cdot 10^2$	1,4
Karbondioksit(20 °C)	1,83	$1,80 \cdot 10^1$	$1,47 \cdot 10^{-5}$	$8,03 \cdot 10^{-6}$	$1,889 \cdot 10^2$	1,30
Helyum(20 °C)	$1,66 \cdot 10^{-1}$	1,63	$1,94 \cdot 10^{-5}$	$1,15 \cdot 10^{-4}$	$2,077 \cdot 10^3$	1,60
Hidrojen(20 °C)	$8,38 \cdot 10^{-2}$	$8,22 \cdot 10^{-1}$	$8,84 \cdot 10^{-6}$	$1,05 \cdot 10^{-4}$	$4,124 \cdot 10^3$	1,41
Metan (Doğal gaz) (20 °C)	$6,67 \cdot 10^{-1}$	6,54	$1,10 \cdot 10^{-5}$	$1,65 \cdot 10^{-5}$	$5,183 \cdot 10^2$	1,31
Nitrojen(20 °C)	1,16	$1,14 \cdot 10^1$	$1,76 \cdot 10^{-5}$	$1,52 \cdot 10^{-5}$	$2,968 \cdot 10^2$	1,40
Oksijen(20 °C)	1,33	$1,30 \cdot 10^1$	$2,04 \cdot 10^{-5}$	$1,53 \cdot 10^{-5}$	$2,598 \cdot 10^2$	1,40

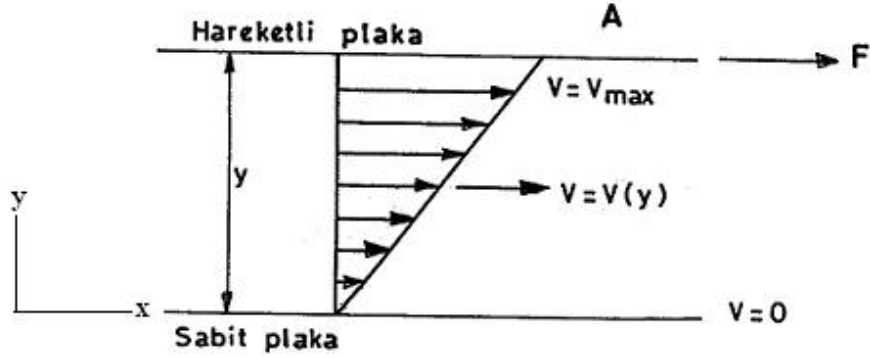
*: Gaz sabitleri sıcaklıktan bağımsızdır. **: Özgül ısı oranı az miktarda sıcaklığa bağlıdır.

1.5. Viskozite

Özgül kütle ve özgül ağırlık akışkanların ayırt edici özelliklerindedir. Ancak akışkanların akış karakteristiklerini bu iki özellikle belirlemek her zaman olanaklı değildir. Özgül kütlesi birbirine çok yakın olup da tamamen farklı akış karakteristiklerine sahip olan akışkanlar da bulunmaktadır.

Örneğin su (1000 kg/m^3) ve yağ (912 kg/m^3). Bu nedenle akışkanların birbiriyle olan farklılıklarını ortaya koyabilmek için ilave özelliklere gereksinim vardır. Bu özelliklerden birisi de viskozitedir.

Viskozite, akışkanların akıcılığa (deformasyona) karşı gösterdikleri dirençtir. Viskoziteyi açıklarken biri sabit diğeri hareketli iki plaka arasındaki akışkan gözönüne alınır (Şekil 1.1). Plakalar arasındaki düşey uzaklık y (m), plaka arasındaki akışkan hızı V (m/s), üst hareketli plakaya uygulanan teğetsel kuvvet F (N), üst hareketli plakanın alanı A (m^2) olarak tanımlanırsa bu sistemde uygulanan kuvvetin plaka alanına bölümü (F/A) ile hız gradyenti (hız eğimi, kayma hızı, dv/dy) arasında aşağıdaki ilişkinin olduğu görülür. Bu ilişki laminer akımda geçerlidir. Maksimum hızın olduğu akış noktasından uzaklaştıkça; y artar, V azalır ve dv/dy negatif olur.



Şekil 1.1. İki paralel plaka arasındaki akışkan hareketi (Giles 1980)

Kayma gerilmesi şu şekilde yazılabilir (Giles 1980, McDonough 2009, Hewakandamby 2012).

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \cdot \frac{dv}{dy}$$

τ : Kayma (kesme) gerilmesi (N/m^2),

μ : Dinamik (mutlak) viskozite (N.s/m^2),

$\frac{dv}{dy}$: Hız eğimi ya da kayma hızı (s^{-1})'dir.

İki plaka arasındaki akışkanın hızı sabit plakada sıfır olmakta hareketli plakaya yaklaştıkça artmaktadır. Hareketli plakada maksimuma ulaşmaktadır. Bu hız dağılımı Şekil 1.1'de görülmektedir. İki plaka arasındaki hız eğiminin bulunabilmesi için plaka arasındaki uzaklıklara bağlı hız profil denkleminin bulunması gerekmektedir. Ancak çoğu zaman plakalar arasında uzaklık çok küçük (mm düzeyinde) olduğundan hız dağılımı homojen kabul edilmekte ve viskozite ile kayma gerilmesi arasındaki ilişki aşağıdaki gibi olmaktadır (Giles 1980).

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \cdot \frac{V}{y}$$

Akışkan molekülleri sürekli gelişigüzel hareket etseler de akışa neden olacak bir basınç uygulanmadığı sürece belirli yöndeki bileşke akışkan hızı sıfır olacaktır. Akışkanı belirli bir hızda hareket ettirmek için gerekli olan kuvvetin büyüklüğü akışkanın viskozitesiyle ilgilidir. Akış, akışkan moleküllerinin yer değiştirilmesiyle meydana gelir. Akışta bir birine bitişik moleküller arasında bir hız farkı ya da hız eğimi vardır. Akış doğrultusuna paralel herhangi bir düzlemdeki moleküller, kendilerinden daha hızlı hareket etmesini sağlayan kuvvete karşı bir direnç gösterirler. İşte akışa ya da deformasyona karşı oluşan bu dirence *kayma gerilmesi* denir. Kayma gerilmesi moleküllerin birbirine geçişini sağlayan gerilmedir. Hız eğimi bir molekülün geçiş hızını gösterir ve bu nedenle *kayma hızı* adı da verilir. Hız eğiminin hesaplandığı mesafenin başlangıç noktası hızın maksimum olduğu akış alanındaki noktadır. Bu nedenle y mesafesi bu noktadan uzaklaştıkça artar, V hızı azalır ve böylece hız eğimi negatif olur.

Kayma gerilmesi ile kayma hızı arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığı *Non-Newtoniyen* akışkanlarda akışı karakterize eden iki önemli eşitlik vardır. Bunlar Üs Kanunu ve Herschel-Bulkley modelidir (Toledo 1991). Toledo (1991)'ya göre Non-Newtoniyen akışkanlarda aşağıdaki ilişkiler yazılabilir. Üs Kanununda (McDonough 2009)

$$\tau = K \left(\frac{dv}{dy} \right)^n = K(\delta)^n = [K(\delta)^{n-1}] \delta$$

ve Herschel-Bulkley modelinde

$$\tau = \tau_0 + K(\delta)^n \quad \tau - \tau_0 = [K(\delta)^{n-1}] \delta$$

ilişkileri vardır. Bu bağıntılarda;

τ : kayma gerilmesi (Pa)

K: Koyuluk, kıvam ya da yoğunluk indeksi (Pa sⁿ)

$\delta = \frac{dv}{dy}$: Kayma hızı ya da hız eğimi (s⁻¹)

n: Akım davranış indeksi (-)

τ_0 : Akışın başlaması için gerekli olan ön kayma gerilmesi (Pa)'dır.

Non-Newtoniyen akışkanlarda kayma gerilmesinin (τ), kayma hızına

($\delta = \frac{dv}{dy}$) oranı olan görünür viskozite (μ_{ap}) aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$\mu_{ap} = \frac{K(\delta)^n}{\delta} = K(\delta)^{n-1}$$

$$\mu_{ap} = \frac{\tau}{\delta}$$

$$\mu_{ap} = \frac{(\tau - \tau_0)}{\delta}$$

Görünür viskozitenin birimi dinamik viskozite biriminin aynıdır. Ancak değeri kayma hızına bağlıdır ve bu nedenle görünür viskoziteden bahsederken belirlenme koşulları tanımlanmalı ya da verilmelidir. Görünür viskozite formülünde ($n < 1$) ise kayma hızının artmasıyla görünür viskozitenin azalacağı anlaşılır. Bu tip akışkanlar pseudoplastik davranış gösterir. Bu davranış çoğunlukla emülsiyon ve süspansiyonlarda görülür. Akma sınırına kadar katı gibi davranır, akma sınırından sonra ise gerçek akışkan gibidir. Eğer akım davranış indeksi birden büyükse ($n > 1$) görünür viskozite kayma hızının artışıyla artar ve bu özellik dilatant akışkanlarda görülür. Dilatant akışkanlara gıda sanayisinde rastlanmaz. Kil, balçık ve yüksek moleküllü ağır organik polimerlerde görülür. Gerilme arttıkça katı gibi davranmaya, katılaşmaya başlarlar.

Viskozite, sıvılarda moleküller arasındaki çekim kuvvetleri, gazlarda ise moleküllerin çarpışması nedeniyle ortaya çıkar ve sıcaklıkla değişir. Basına bağımlılık azdır. Şekil 1.2'de bazı akışkanların sıcaklıkla viskoziteleri arasındaki ilişkileri görülmektedir. Sıcaklık arttıkça viskozite, gazlarda artmakta sıvılarda azalmaktadır. Viskozitenin sıcaklıkla gazlarda artarken sıvılarda azalması molekül yapılarıyla ilgilidir. Sıcaklık artarken sıvılardaki kohezif (iç) kuvvetlerin harekete karşı gösterdikleri direnç azalır ve moleküller yüksek sıcaklıkta daha rahat hareket eder ve viskozite azalır. Gazlarda moleküller arasındaki aralıklar daha geniştir ve iç molekül kuvvetleri ihmal edilebilir. Bu durumda birbirine bitişik moleküller arasındaki gaz moleküllerinin momentumunun değişimiyle bağlı harekete karşı direnç meydana gelir. Gazların sıcaklığı artarken, artan molekül hareketi ve çarpışma viskozitede artışa neden olur. Sıcaklığın viskozite üzerindeki etkisi; gaz akışkanlar için Sutherland eşitliği ve Üs kanunu, sıvılar için Andrade eşitliği kullanılarak incelenebilir (Soğukoğlu 1995, White 2012).

Üs kanunu: $\mu = \mu_0 \cdot (T/T_0)^n$

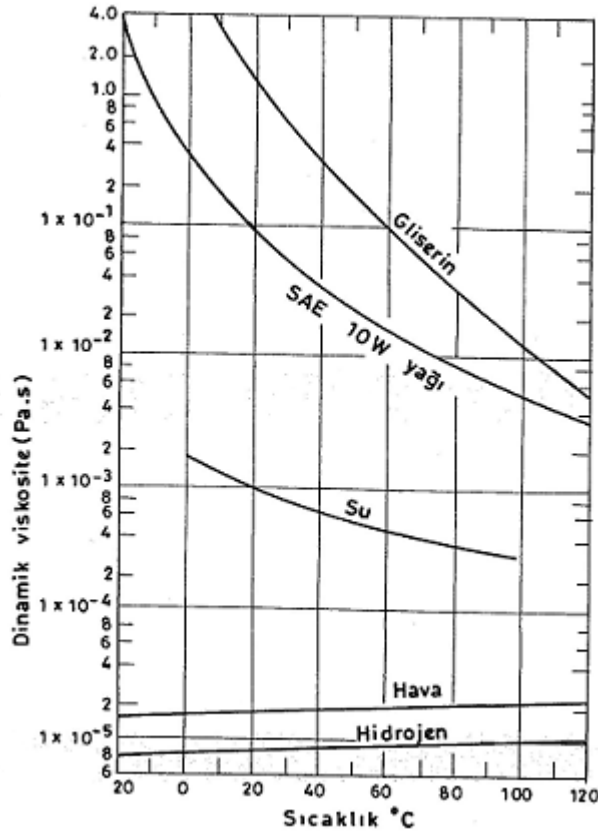
Sutherland eşitliği: $\mu = \mu_0 \cdot (T/T_0)^{3/2} \cdot (T_0 + S)/(T + S)$

Burada;

- μ : İstenen sıcaklıktaki viskozite (Pas)
- μ_0 : T_0 (273 K) mutlak sıcaklığındaki bilinen viskozite değeri (Pas)
- T : Viskozitesi bulunmak istenen sıcaklık (K)
- n ve S: Sabitler olup hava için $n = 0.67$ ve $S = 110$ K alınabilir.

Andrade eşitliği: $\mu = D \cdot e^{B/T}$

- μ : İstenen sıcaklıktaki viskozite değeri (Pas)
- D ve B : Sabit
- T : Viskozitesi bulunmak istenen mutlak sıcaklıktır (K).



Şekil 1.2. Bazı akışkanların viskozitelerinin sıcaklıkla değişimi (Munson vd. 1994)

Yine sıvılar ve özellikle de su için sıcaklıkla viskozite arasındaki ilişki aşağıdaki iki bağıntıyla verilebilir (Soğukoğlu 1995, White 2012).

$$\ln \frac{\mu}{\mu_0} = a + b \left(\frac{T_0}{T} \right) + c \left(\frac{T_0}{T} \right)^2$$

μ : İstenen sıcaklıktaki viskozite (Pas)

μ_0 : T_0 (273 K) mutlak sıcaklığındaki bilinen viskozite değeri (Pas)
olup su için 0,001792 Pas alınabilir.

a, b, c sabit olup su için $a = -1,94$, $b = -4,80$ ve $c = 6,74$ alınabilir.

Sıvılar için verilen ve Poiseuille adı verilen eşitlik ise;

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + a \cdot t + b \cdot t^2} \text{ ile tanımlanabilir (Douglas 1986, Soğukoğlu 1995).}$$

μ : İstenen sıcaklıktaki viskozite değeri (Pas),

μ_0 = Sıcaklık 0 iken viskozite katsayısı

t : Sıcaklık olup birimi °C'dir

Su için $\mu_0=0.0179$ Poise(p) =0,00179 kg / m s (Pas), $a = 0.033368$ ve $b = 0.000221$ alınabilir.

Mutlak (dinamik) viskozitenin içerisindeki kütle birimi yok edilerek aşağıdaki gibi elde edilen viskoziteye *kinematik viskozite* denir (Bar-Meir 2011).

$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho}$$

Burada;

- ϑ : Kinematik viskozite (m²/s)
 μ : Mutlak (dinamik) viskozite (Pas)
 ρ : Özgül kütle (kg/m³)

Çizelge 1.6'da bazı akışkanların sıcaklığa bağlı yoğunluk ve kinematik viskoziteleri verilmiştir. Sıvıların viskozitelerinin ölçülmesinde;

- Döner viskozimetre,
- Kılcal viskozimetre,
- Akma yönteminden yararlanılmaktadır.

Döner viskozimetrelerde Şekil 1.3'de görüldüğü gibi döner bir küçük silindir, daha büyük silindire içerisindeki sıvıya daldırılır. Döner silindire uygulanan moment sıvı tarafından dengelenir. Sıvının dinamik viskozitesi aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$\mu = \frac{M.(R - r)}{2.\pi.r^3.h.w}$$

Burada;

- μ : Dinamik viskozite (Pas),
 M : Küçük silindire uygulanan moment (Nm),
 h : Küçük silindirin büyük silindire girme uzunluğu (m),
 w : Küçük silindirin açısal hızı (rad/s),
 r : Küçük silindirin yarıçapı (m),
 R : Büyük silindirin yarıçapı (m)

Döner viskozimetrelerde duvar kayma gerilmesi (τ_w) ve kayma hızı (δ_w) aşağıdaki bağıntılarla hesaplanabilir (Sitkei 1986, Toledo 1991).

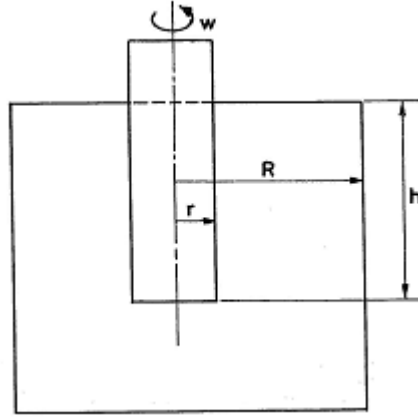
$$\tau_w = \frac{M}{r^2(2\pi h)}$$

$$\delta_w = \frac{2\pi r n}{(R - r)60}$$

Çizelge 1.6. Bazı akışkanların yoğunluk ve kinematik viskoziteleri

Akışkan	Yoğunluk	Kinematik Viskozite (cst= mm ² /s)
Freon	1,37-149 (21 °C)	0,27-0,32 (21 °C)
Propilen	1,038 (20 °C)	52 (21 °C)
Trietilen	1,125 (20 °C)	40 (21 °C)
Dietilen	1,12 (16 °C)	32 (21 °C)
Etilen	1,125 (16 °C)	17,8 (21 °C)
Hidroklorik asit (% 100)	1,05 (20 °C)	1,9 (20 °C)
Karbolik asit	0,95-1,08 (16 °C)	11,7 (18 °C)
Kemik yağı	0,918 (16 °C)	47,5 (54 °C) 11,6 (100 °C)
Balık yağı	0,928 (16 °C)	32,1 (38 °C) 19,4 (54 °C)
Domuz yağı	0,912-0,925 (16 °C)	41-47,5 (38 °C) 23,4-27,1 (54 °C)
Ringa balık yağı	0,933 (16 °C)	29,8 (38 °C) 18,2 (54 °C)
Sığır parçasından alınan kösele için kullanılan yağ	0,917 (16 °C)	49,7 (38 °C) 27,5 (54 °C)
Ispermeçet yağı	0,883 (16 °C)	23,0 (38 °C) 15,2 (54 °C)
Balina yağı	0,925 (16 °C)	35-39,6 (38 °C) 19,9-23,4 (54 °C)
SAE 10 yağı	0,880-0,935 (16 °C)	35,4-51,9 (38 °C) 18,2-25,3 (54 °C)
SAE 20 yağı	0,880-0,935 (16 °C)	51,9-86,6 (38 °C) 25,3-39,9 (54 °C)
SAE 30 yağı	0,880-0,935 (16 °C)	86,6-125,5 (38 °C) 39,9-55,1 (54 °C)
SAE 40 yağı	0,880-0,935 (16 °C)	125,5-205,6 (38 °C) 55,1 (54 °C) 15,6 (99 °C)
SAE 50 yağı	0,880-0,935 (16 °C)	205,6-352 (38 °C) 15,6-21,6 (99 °C)
SAE 60 yağı	0,880-0,935 (16 °C)	352-507 (38 °C) 21,6-26,2 (99 °C)
SAE 70 yağı	0,880-0,935 (16 °C)	507-682 (38 °C) 26,2-31,8 (99 °C)
SAE 80 yağı	0,880-0,935 (16 °C)	22,000 (0 °C)
SAE 90 yağı	0,880-0,935 (16 °C)	173,2-324,7 (38 °C) 64,5-108,2 (54 °C)
SAE 140 yağı	0,880-0,935 (16 °C)	205,6-507 (54 °C) 25,1-42,9 (99 °C)
SAE 250 yağı	0,880-0,935 (16 °C)	>507 (54 °C) >42,9 (99 °C)
Benzin	0,68-0,74 (16 °C)	0,46-0,88 (16 °C) 0,40-0,71 (38 °C)

Hint yağı	0,96 (20 °C)	259,8-324,7 (38 °C) 97,4-129,9 (54 °C)
Cin ahşap yağı	0,943 (20 °C)	308,5 (21 °C) 125,5 (38 °C)
Hindistan cevizi yağı	0,925 (20 °C)	29,8-31,6 (38 °C) 14,69-15,7 (54 °C)
Mısır yağı	0,924 (20 °C)	28,7 (54 °C) 8,59 (100 °C)
Pamuk tohumu yağı	0,88-0,925 (20 °C)	37,9 (38 °C) 20,6 (54 °C)
Keten tohumu yağı	0,925-0,939 (20 °C)	30,5 (38 °C) 18,94 (54 °C)
Zeytin yağı	0,912-0,918 (20 °C)	43,2 (38 °C) 24,1 (54 °C)
Hurma yağı	0,924 (20 °C)	47,8 (38 °C) 26,4 (54 °C)
Yerfıstığı yağı	0,920 (20 °C)	42 (38 °C) 23,4 (54 °C)
Kolza tohumu yağı	0,919 (20 °C)	54,1 (38 °C) 31 (54 °C)
Reçine yağı	0,980 (16 °C)	324,7 (38 °C) 129,9 (54 °C)
Reçine	1,09 (16 °C)	108,2-4400 (93 °C) 216,4-11000 (88 °C)
Susam yağı	0,923 (16 °C)	39,6 (38 °C) 23 (54 °C)
Soya yağı	0,927-0,98 (16 °C)	35,4 (38 °C) 19,64 (54 °C)
Terebentin	0,86-0,87 (16 °C)	2,11 (16 °C) 2,0 (38 °C)
Mısır şurubu	1,4-1,47 (16 °C)	1100-110000 (38 °C) 324,7-13200 (54 °C)
Glikoz	1,35-1,44 (16 °C)	7700-22000 (38 °C) 880-2420 (66 °C)
Bal (İşlenmemiş)	-	73,6 (38 °C)
Yazıcı mürekkebi	1,00-1,38 (16 °C)	550-2200 (38 °C) 238,1-660 (54 °C)
Mum yağı	0,918 (16 °C)	9,07 (100 °C)
Süt	1,02-1,05 (16 °C)	1,13 (20 °C)



Şekil 1.3. Döner viskozimetre (Sitkei 1986)

Kılcal viskozimetrelerde kılcal boruya konan sıvının içinde madeni kürenin inmesi esaslı kullanılarak sıvının viskozitesi hesaplanmaktadır. Bu yöntemde sıvı ortam içerisinde limit hızı ile düşen küreye etki eden direnç kuvvetinden yararlanılmaktadır (Topkaya 1983).

$$\mu = \frac{2}{9} \cdot \frac{g}{V} \cdot R^2 (\rho_{\text{cis}} - \rho_{\text{sivi}})$$

Burada;

$$\mu: \text{Dinamik viskozite} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm.s}} = \frac{\text{dyn.s}}{\text{cm}^2} = \text{poise} \right) \text{ (Pas)}$$

g : 981 (cm/s²) (9.81 m/s²),

V : Kürenin limit hızı (cm/s) (m/s),

R : Kürenin yarıçapı (cm) (m),

ρ_{cis} : Kürenin özgül kütlesi (g/cm³) (kg/m³),

ρ_{sivi} : Sıvının özgül kütlesi (g/cm³) (kg/m³) dir.

Dinamik viskozitenin bulunmasında kullanılan 3. yöntem olan akma yönteminde belirli bir çaptan akan sıvının akma süresi yardımıyla viskozite hesaplanmaktadır. Şekil 1.4'deki sistemde borudan akan sıvının viskozitesi aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\mu = \frac{\pi \cdot R^4}{8 \cdot L \cdot Q} (P_1 - P_2)$$

Burada;

μ : Dinamik viskozite (Pas),

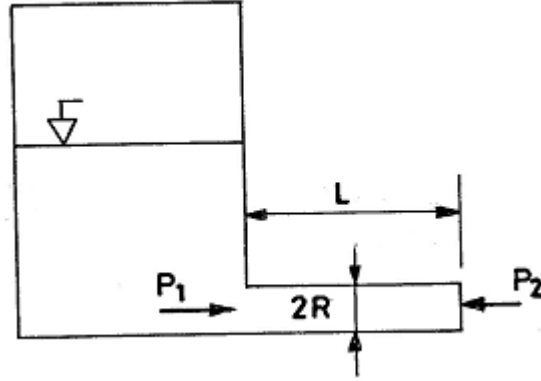
R : İnce borunun yarıçapı (m),

L : İnce borunun uzunluğu (m),

Q : İnce borudan akan sıvının verdisi (m³/s),

P_1 : İnce boruya girişteki sıvı basıncı (Pa),

P_2 : İnce boruda sıvının çıktığı noktadaki basınç (Pa).



Şekil 1.4. Akma yöntemi

Akma yönteminde viskozitenin saptanmasında yararlanılan kılcal viskozimetrelerde yukarıdaki formül kullanılabilir gibi Newtoniyen akışkanlar için Laminer akımda aşağıdaki formül de kullanılabilir (Toledo 1991).

$$\mu = \frac{\Delta P R^2}{8LV}$$

Burada $\Delta P = P_1 - P_2 = \rho gh$ alınabilir. Kılcal viskozimetredeki akışkan yüksekliği h 'dir. Viskozimetredeki, akışkanın h yüksekliğini akma zamanı (t), kılcal boru uzunluğunu (L) ve akışkanın ortalama hızı (V) gösterirsek aşağıdakiler yazılabilir (Toledo 1991).

$$V = \frac{L}{t}$$

$$\mu = \frac{\Delta P R^2}{8LV} = \frac{\rho gh R^2}{8L^2} t$$

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{ghR^2}{8L^2} t = k_v t$$

Buradaki $\frac{ghR^2}{8L^2} = k_v$ faktörüne viskozimetre sabiti denir.

Kılcal viskozimetrelerde boru duvarındaki kayma hızı (δ_w) , Newtoniyen akışkanlarda

$$\delta_w = \frac{4V}{R}$$

ve Non-Newtoniyen akışkanlarda $\delta_w = \frac{4V}{R} \left[\frac{3}{4} + \frac{1}{4n} \right]$ bağıntısıyla bulunur.

Burada R, boru yarıçapıdır (Toledo 1991).

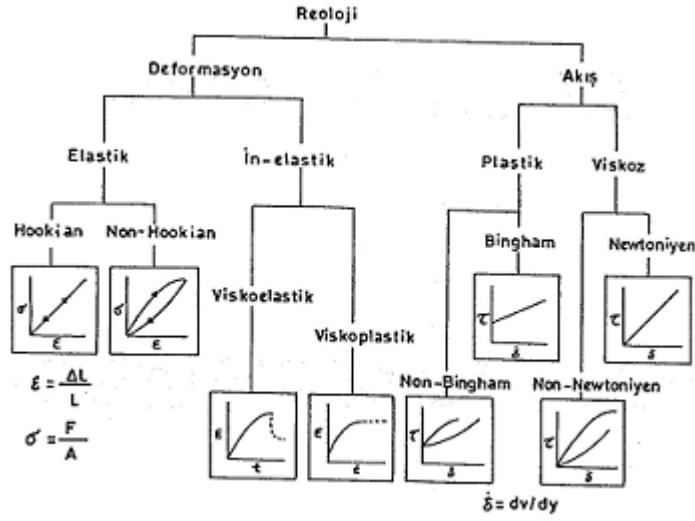
1.6. Reoloji

Çelik ve diğer metallere belirli bir kuvvet uygulandığında biraz deforme olabilmekteler. Ancak bu deformasyon sürekli olmamaktadır. Su, yağ ve hava gibi akışkanlar kuvvet altında sürekli deformasyona uğramaktadırlar. Diş macunu, dondurma, reçel, katran gibi bazı akışkanlar küçük kuvvet altında katı gibi davranırken kuvvet artırıldığında akışkan gibi davranabilmektedirler. İşte doğadaki tüm materyallerin (katı-sıvı-gaz) davranışları reoloji bilimi altında incelenmektedir. Reoloji cisimlerin kuvvet-zaman-deformasyon ilişkilerini inceleyen bilim dalıdır. Reoloji bilminde cisimlerin davranışları Şekil 1.5'de gösterilen davranış gruplarından birisine girmektedir.

Kayma gerilmesi ile hız eğimi arasındaki ilişkinin doğrusal olduğu akışkanlara Newtoniyen akışkanlar, kayma gerilmesi ile hız eğimi arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığı akışkanlara Non-Newtoniyen akışkanlar denildiğini biliyoruz (Edis 1972). Kayma (kesme) gerilmesinin hız eğimine oranına *görünür viskozite* (μ_{ap}) denir. Görünür viskozite Newtoniyen akışkanlarda dinamik viskoziteye eşittir. Newtoniyen olmayan akışkanlarda ise sabit kalmamakta ve kayma gerilmesinin bir fonksiyonu olarak değişmektedir.

Kayma gerilmesi ile hız eğimi arasındaki eğrinin kayma gerilmesi eksenine göre konveks olduğu *pseudoplastik* akışkanlarda görünür viskozite kayma gerilmesinin artmasıyla azalmaktadır. Örneğin kauçuğun hammaddesinden yapılan boyalar fırçadan damlamazlar. Çünkü kayma hızları küçüktür ve görünür viskoziteleri büyüktür. Bununla birlikte duvarda düzgün bir şekilde yayılırlar çünkü duvar ve fırça arasındaki ince boya tabakası; büyük kayma hızına (dv/dy büyük olduğu için) ve çok küçük görünür viskoziteye sahiptir.

Kayma gerilmesi ile hız eğimi arasındaki eğrinin kayma gerilmesi eksenine göre konkav olduğu *dilatant* akışkanlarda görünür viskozite kayma gerilmesinin artmasıyla artar. Buna örnek olarak su-mısır nişastasası karışımı ve su-kum karışımı verilebilir. Su-kum karışımından bir cismi çekip çıkarmak için gerekli olan kuvvet çekme hızı arttıkça artar



Şekil 1.5. Doğadaki materyallerin reolojik davranışları (Mohsenin 1980)

Hookian davranışta gerilme (σ) ile şekil değiştirme (ϵ) doğru orantılıdır. Akma sınırına kadar cisim üzerindeki yük kaldırıldığında uzama ortadan kalkmakta ve materyal kuvvet uygulanmadan önceki konumuna gelmektedir (örneğin çelik). Tarım ürünlerinde bu davranışı görmek olanaksızdır.

Non – Hookian ürünlerde, deformasyon; gerilmeyle uzama arasında doğrusal olmayan bir ilişkiyle meydana gelmektedir. Kuvvet kaldırıldığında eski konumuna bir eğri izleyerek dönmektedir. Kauçukta bu davranış görülür.

Viskoelastik ürünlerde birim uzama (ϵ) zamanın bir fonksiyonudur. Gerilme-uzama ilişkileri zamana bağlıdır. Gerilmenin neden olduğu uzama yük kaldırılrsa bile ortadan kalkmamaktadır. Denemeler tarımsal ürünlerin visko-elastik yapıya sahip olduğunu göstermiştir.

Viskoplastik davranışta viskoelastikliğe göre biraz daha doğrusallık vardır. Eğri düzgün artmakta ve belli bir noktadan sonra eğride eğilme ya da kırılma olmamaktadır.

Newtoniyen sıvılarda kayma gerilmesiyle hız gradyenti arasındaki ilişki doğrusaldır. Eğri düz bir doğru olup orijinden geçmektedir. Eğrinin eğimi viskoziteyi vermektedir.

Non-Newtoniyen sıvılarda kayma gerilmesiyle hız gradyenti arasındaki ilişki doğrusal değildir. Bu tip sıvılarda pseudoplastik ve dilatant olmak üzere iki tip eğri vardır. Yarı viskoz akış olarak adlandırılmaktadır. Eğriler orijinden geçer ancak kayma gerilmesiyle hız gradyenti arasındaki ilişki doğrusal değildir. Örnek: Kan ve sıvı haldeki plastikler.

Bingham davranışta akışın oluşması için başlangıçta bir gerilmeye ihtiyaç vardır. Bu eğri pseudoplastikle viskozluğun karışımı kabul edilmektedir. Diş macunu, yağlı boya, elma ve domates püresi ve mayonez Binghamdır. Yani akışa bir direnç göstermekte ancak geri dönüşsüz bir eğri çizmektedir. İdeal plastik davranış göstermektedir. Ne katı ne de sıvıdır. Böyle materyaller hareket etmeden belli bir kayma gerilmesine dayanabilir. Çünkü akışkan değildir. Ancak belli bir noktadan sonra akarlar. Çünkü katı değildir. Non-Bingham eğrisi yarı-plastik akış biçimini temsil etmektedir. Doğrusal bir ilişki yoktur. Tereyağı Non-Binghamdır. Non-Bingham (yarı plastik) ve Non-Newtoniyen (yarı viskoz) eğri arasındaki fark, Non-Bingham eğrisinde akış olmadan önce bir kayma gerilmesine gereksinim olmasıdır.

Elma suyu (berrak), üzüm suyu ve konsantresi, armut suyu ve konsantresi, portakal suyu, domates suyu Newtoniyen iken krema, çikolatalı süt, tereyağı, yoğurt, dondurma karışımları, süttozu Newtoniyen olmayan akışkanlardır. Elma ve domates püresi plastik davranış gösterir. Yani akışın başlaması için başlangıç gerilmesine gereksinim vardır.

1.7. Elastiklik Modülü (Sıkıştırılabilirlik Katsayısı)

Akışkanların sıkıştırılabilirliğinin bir ölçüsü olan elastiklik modülü akışkanların basınç değişimiyle hacminin ya da özgül kütlelerinin nasıl değiştiğini gösterir. Sabit sıcaklıkta sıvılardaki elastiklik modülü

$$E_v = -\nabla_0 \cdot \frac{dP}{d\nabla} = -\nabla_0 \cdot \frac{(P - P_0)}{(\nabla - \nabla_0)}$$

ile hesaplanabilir (Sümer vd. 1995). Eşitlikteki eksi (-) işareti basıncın artmasıyla hacmin azaldığını gösterir. Hacimdeki azalış özgül kütlede artışa neden olur. Buna göre sabit sıcaklıkta elastiklik modülü aşağıdaki biçimde tekrar düzenlenebilir.

$$E_v = \rho \cdot \frac{dP}{d\rho} = \frac{\rho_0(P - P_0)}{(\rho - \rho_0)}$$

E_v : Elastiklik modülü (Pa),

∇_0 : Başlangıçtaki toplam hacim (m^3),

∇ : Akışkanın sıkıştırıldıktan sonraki hacmi (m^3),

dP : $d\nabla$ hacmi kadar değişimi meydana getiren basınçtaki diferansiyel değişim (Pa),

$d\nabla$: Hacimdeki diferansiyel değişim (m^3),

ρ : Akışkanın son özgül kütlesi (kg/m^3),

ρ_0 : Akışkanın başlangıçtaki özgül kütlesi (kg/m^3),

$d\rho$: Özgül kütledeki değişim (kg/m^3),

P : Sıkıştırıldıktan sonraki basınç (Pa),

P_0 : Başlangıçtaki basınç (Pa)'tır.

Gaz akışkanlarda sıkışma ya da genişleme sırasında basınç ve özgül kütle arasındaki ilişki işlemin türüne bağlıdır. Eğer sıkışma ya da genişleme sabit sıcaklıkta (izotermal koşul) meydana gelirse $P = \rho \cdot R \cdot T$ bağıntısından

$$\frac{P}{\rho} = \text{sabit}$$

elde edilir. Eğer sıkışma ya da genişleme sürtünmesiz ortamda gerçekleşiyor ve çevreyle ısı alışverişi olmuyorsa (izoentropik koşul) aşağıdaki formüller yazılabilir (Giles 1980).

$$\frac{P}{\rho^k} = \text{sabit} \quad \text{ve} \quad \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^k = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

k : Sabit basınçtaki özgül ısının (c_p) sabit hacimdeki özgül ısıya (c_v) oranıdır (adyabatik üs) ve ideal gazlar için boyutsuz önemli bir parametredir.

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

Bu iki özgül ısı gaz sabiti ile ilgilidir. İki özgül ısı arasındaki fark sabittir ve ideal koşullarda R 'ye eşittir (White 2012).

$$R = c_p - c_v \quad c_p = \frac{Rk}{k-1} \quad c_v = \frac{R}{k-1}$$

Sabit basınçtaki özgül ısı (c_p), sabit basınçtaki gazın sıcaklığını 1 °C artırmak için birim gaz kütleğine verilen ısı miktarıdır. Sabit hacimdeki özgül ısı (c_v) ise sabit hacimdeki gazın sıcaklığını 1 °C artırmak için birim gaz kütleğine verilen ısı miktarıdır. Gaz akışkanlarda elastiklik modülünün bulunabilmesinde sıvılar için verilen elastiklik modülü bağıntısında yukarıdaki ilişkiler yerine konursa izotermal koşul için elastiklik modülü

$$P \cdot dV + V_0 \cdot dP = 0 \Rightarrow -\frac{dV}{V_0} = \frac{dP}{P} \quad \text{bulunur.} \quad \text{Sıvılar için verilen}$$

elastiklik modülünü burada yerine koyar ve gerekli düzenlemeleri yaparsak $E_v = P$ elde edilir.

İzoentropik koşulda $P \cdot V^k$ sabit olup bu ifadenin diferansiyeli alınırsa elastiklik modülü

$$P \cdot k \cdot V^{k-1} \cdot dV + V^k \cdot dP = 0 \quad \text{olup} \quad P \cdot k \cdot V^{k-1} \cdot dV - V^k \cdot E_v \cdot \frac{dV}{V} = 0 \Rightarrow E_v = kP$$

bulunur (Streeter ve Wylie 1983). Gaz akışkanlar için yukarıdaki bağıntılarda mutlak basınç değeri kullanılmalıdır. Yukarıdaki bağıntılarda P , Pa; ρ , kg/m³; c_p ve c_v , j/kgK ve R , j/kgK alınacaktır.