

# Not Defteri

V u r a l A l t ı n

## Durgun sular neden soğuk, kanın rengi niye böyle?

Nerede kalmıştık? Enerji: Genelde, 'iş yapma yeteneği' olarak tanımlanır. İş nedir: 'Kuvvet çarptı yol'. Yani iş yapılabilmesi için, hem kuvvet olacak, hem de yol. Biri veya diğeri, tek başına yetersiz. Geçen sefer yatay bir zeminde duran,  $F_N = m \cdot g$  ağırlığındaki bir cismi, yatay bir kuvvet uygulayarak harekete geçirmiştik. Cism hareket etmedikçe, uyguladığımız kuvvet yol katetmiyordu. Sadece kas liflerimizde iş yapıyordu. Bu da bizi terletmiş ve uyguladığımız kuvvet sonunda, statik sürtünme kuvveti dediğimiz  $F_s = \mu_s \cdot F_N$  eşik değerini aşınca, cism harekete geçmişti. Geçer geçmez, sürtünme direnci, 'kinetik sürtünme kuvveti' denilen  $F_k = \mu_k \cdot F_N$  değerine azalmıştı. Bu durumda, uyguladığımız kuvvet  $F$ , kinetik sürtünme kuvvetinden, diyelim  $F - F_k = \Delta F$  kadar büyük kaldığından; cism,  $\Delta F = m \cdot a$  gereği ivmelenerek, hız kazanmaya başlar. Cism artık hareket ediyor olduğuna göre, üzerinde iş yapılmaktadır.  $F$  kuvvetini biz uyguladığımıza göre, işi yapan bizizdir. Cism üzerinde yaptığımız iş pozitif, cism bizim üzerimizde yaptığı iş negatif olur. Tıpkı bütçe hesaplarında gelirlerin artı, harcamaların eksi sayılmasında olduğu gibi.  $F$ 'nin,  $F_k$  kadarının yaptığı iş, kinetik sürtünmeyi yenmek için harcanmakta ve cisimle zeminin temas yüzeylerinde ısı olarak açığa çıkmaktadır.  $F$ 'nin,  $\Delta F$  kadarki kalan kısmı ise, cismi ivmelenendirir. Uyguladığımız kuvveti  $F_k$ 'ya indirirsek, ivmelenme durur. Cism hızı, diyelim bir  $v$  değerinde sabitleşmiştir. Uyguladığımız  $F = F_k$ , artık sadece kinetik sürtünme kuvvetini yenebilmekte ve yaptığı iş arayüzeyde ısıya dönüşmektedir. Peki, daha önce  $\Delta F$  kuvvetiyle yaptığımız iş nereye gitmiştir?  $KE = mv^2/2$ : Hareket enerjisi bu, kinetik enerji, cism belli bir hızla hareketinde bağlı olan enerji... İlginç, demek ki ben parmağımın masanın üzerindeki kibrit kutusunu iterken, ona enerji aktarıyorum, vücudumdan. Parmağım enerji aktarım aracı oluyor...

Bir de cism sürtünmesiz bir yüzeyin üzerinde olduğunu, hatta daha iyisi boşlukta olduğunu varsayalım. "Boşlukta nasıl durur?" dersiniz; etrafta kuvvet uygulayan bir gezegen, ya da başka cism yok. Öte yandan, boşlukta kimin durup kimin hareket ettiğini, arada ivmelenme yoksa belirlemek imkansız. Diyelim cisimle aynı başvuru sistemindeyiz ve onu  $x$  eksenini doğrultusunda hareket ettireceğiz. Eksenin başlangıcı cism kütle merkezinde, yönü sağa doğru olsun. Cisme  $F$  kuvveti uyguladığımızda, ivmesi,  $F = m \cdot a$ 'dan,  $a = F/m$  kadar olacaktır. Saatimizi sıfıra ayarlayıp çalıştırdığımız anda, kuvveti uygulamaya başlayalım. Cism sıfırla başlayan hızı, saat  $t$ 'yi gösterdiğinde, sabit  $F/m$  ivmesiyle,  $v = Ft/m$ 'ye ulaşır. Bu

süredeki ortalama hızı  $(0 + Ft/m)/2$  olduğundan, katettiği yol  $\Delta x = (Ft/2m) \cdot t$  olur. O halde; üzerindeki sabit  $F$  kuvvetinin yaptığı iş,  $W = F \cdot \Delta x = F^2 t^2 / 2m$  kadardır. Ya da,  $t$  anındaki hızı  $v = Ft/m$  cinsinden,  $W = mv^2/2$  kadar. Kuvveti uygulamaya son verdiğimiz  $t_0$  anından itibaren, cism  $v_0 = Ft_0/m$  sabit hızıyla yoluna devam eder. Hareketinde bağlı olan enerji tarafımızdan sağlanmıştır, kuvveti biz uygulamış olduğumuza göre... Kendiliğinden ivmelenemiyor. İvmelense eğer, hızıyla birlikte kinetik enerjisi artacak. Ama bu enerjinin bir yerden gelmesi lazım, örneğin birilerinin onun üzerinde kuvvet uygulayarak iş yapması... Öte yandan; kuvvet yoksa eğer, hızını koruyor. Yavaşlayacak olsa, hızıyla birlikte kinetik enerjisi azalacak. Bu enerjinin bir yere gitmesi lazım, nereye?... Etrafta bir başkası olacak ki; o başkasının üzerinde kuvvet uygulayıp iş yaparak, kendi enerjisini azaltsın. O zaman da, o başkasının enerjisi artıyor... Demek ki bu durumda, kinetik enerji korunuyor. Korunan unsurlarsa önemli. Değişen koşullar içeren problemleri çözerken, sendelenildiğinde omuz dayanacak duvarlar veya yola devam edebilmek için kullanılacak koltuk değnekleri gibiler.

Kinetik enerjinin korunumunu ilk öneren Alman bilimci Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) oldu. Çok parçacıklı sistemlerde  $mv^2$ 'lerin toplamının korunduğunu farketmişti. Buna sistemin 'canlı kuvveti' (*vis viva*) dedi. 1676-89 yılları arasında, bir korunum ilkesi formüllendirmeye çalıştı. Fakat, çağdaşı olan Isaac Newton (1642-1727), 'Doğa Felsefesinin Matematik İlkeleri' (*Philosophiae Naturalis Mathematica Principia*) başlıklı kitabını 1687 yılında yayınlamış ve çağının devi haline gelmişti. İngiltere'de Newton, Fransa'da René Descartes (1596-1650), asıl yönlendirici ilke'nin, korunan 'vis viva'nın momentum olduğunda ısrarlıydılar. Daha sonra Newton, bağımsız olarak geliştirdikleri integral hesabı konusunda Leibniz'le, onu 'intihal'le suçlamaya varan sert bir tartışmaya girdi. İtibarı, Leibniz'i gölgede bıraktı. Hem de " $mv^2$ 'lerin toplamı"nın bazı durumlarda korunmadığı, zaten gösterilmişti. Bu gelişmeden en fazla, mühendisler rahatsız oldu. Çünkü 'topçu okulları'nda, örneğin eğik atış problemini, yalnızca momentumun korunumu denklemiyle çözemiyorlardı. Bir denkleme daha ihtiyaçları olduğunu söylüyor, "bırakın da kullanalım" diyorlardı. Kullanmaya devam ettiler ve Avusturya topçusu Osmanlıları ardı ardına yenilgilere uğrattı. Buna ve aradan 319 yıl geçmiş olmasına karşın, Newton'un 'Mathematica Principia'sının orijinali hâlâ Türkiye'ye çevrilmedi. Leibniz'in korunumunu öner-

diği 'vis viva'nın aslında,  $mv^2$ 'lerin değil,  $mv^2/2$ 'lerin toplamı olması gerektiği, büyük oranda, Gaspard-Gustave Coriolis (1792-1843) ve Jean-Victor Poncelet'in (1788-1867), 1819-39 yılları arasında yaptıkları çalışmaların sonucuydu. Birincisi bu niceliğe 'iş miktarı' derken, ikincisi 'mekanik iş' demişti. Şimdiki adıyla 'kinetik enerji'... İfadeedeki  $mv^2$ 'nin önüne  $1/2$  çarpanının konması, Leibniz'den o yanaki 150 yıla ek olarak, 20 yıl daha almıştı. Kinetik enerji böyle. Aslında:  $E = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{p} = \int \mathbf{F} \cdot (d\mathbf{p}/dt) dt$ . Kuvvet  $\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt = d(m\mathbf{v})/dt$  olduğuna göre,  $E = \int \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} dt$ . Bu ifade, relativistik olmayan hızlarda kütle pek değişmediğinden, yani  $\mathbf{F} = d(m\mathbf{v})/dt = m \cdot d\mathbf{v}/dt$  olduğundan,  $E = m \int \mathbf{v} \cdot d\mathbf{v} / dt = mv^2/2$  oluyor. Newton'un klasik limiti... Potansiyel enerji nedir?

Parmaklarımızın arasında, kütlesi  $m$  olan bir taş tuttuğumuzu düşünelim. Taşı bıraktığımız takdirde,  $z$  eksenini boyunca düşmeye başlayacak. Eksenin başlangıcı taşın kütle merkezinde, yönü aşağıya doğru olsun. Taş üzerindeki yerçekimi kuvveti  $F_g = m \cdot g$  kadardır. Bıraktığımızda ivmesi, havanın sürtünmesini



Isaac Newton

gözardı edecek olursak;  $F = m \cdot a = m \cdot g$ 'den,  $g$  kadar olacaktır. Saatimizi sıfıra ayarlayıp çalıştırdığımız anda taşı bırakalım. Taşın sıfırla başlayan hızı, saat  $t$ 'yi gösterdiğinde, sabit  $g$  ivmesiyle,  $gt$ 'ye ulaşmıştır. Bu süredeki ortalama hızı,  $(0 + gt)/2$  olduğundan, katettiği yol,  $\Delta z = (gt/2) \cdot t$  olur. O halde, üzerindeki sabit  $mg$  kuvvetinin yaptığı iş, 'kuvvet çarptı yol';  $W = F \cdot \Delta z = mg^2 t^2 / 2$  kadardır. Bu da;

$t$  anındaki hız,  $v = gt$  cinsinden,  $W = mv^2/2$ , kat edilen yol veya kaybedilen yüksekliği veren  $\Delta z = gt^2/2$  cinsinden ise,  $W = mg \Delta z$  olur. Taşın başlangıçtaki 'potansiyel enerji'si,  $mg \Delta z$  kadar azalarak kinetik enerjiye dönüşmüştür. Hatta, sarkaç bunun zirve örneği: Kütle en alta iken, kinetik enerjisi maksimum, potansiyel enerjisi minimum; en üstte iken tersi. Hepimizin bildiği gibi...

Ancak, potansiyel enerjinin, kinetik enerjiden bir farkı var. Tek bir parçacık kinetik enerjiye sahip olabilirken, potansiyel enerji, birden fazla parçacığın varlığını gerektiriyor. Daha teknik bir deyişle; 'potansiyel enerji, aralarında kuvvet etkileşimleri bulunan çok sayıda parçacıktan oluşan bir sistem, parçacıklarının birbirlerine göre konumu nedeniyle sahip olduğu iş yapma yeteneği'dir. Düşen taş örneğinde, ikinci cisim Dünya'dır. Aslında taş düşerken, Dünya da taşla doğru hareketlenir. Fakat kütlesi görece çok büyük olduğundan, kazandığı hız ve kinetik enerji, taşın kütlesine oranla gözardı edilebilecek kadar küçüktür. Sonuçta; taşın ve Dünya'nın kütle merkezlerinin, aralarındaki kütleçekim kuvveti nedeniyle, birbirlerine göre konumu değişmiş ve bu ikili sistemin 'kütleçe-

# Not Defteri

kimsel potansiyel enerji'si azalarak, hemen tümle taşın kinetik enerjisine dönüşmüştür. Parçacıkların arasındaki kuvvetin türüne bağlı olarak, değişik potansiyel enerji türlerinden söz edilir. Örneğin artı yüklü iki parçacığı birbirine yaklaştırmak için, üzerlerine, hareket yönünde kuvvet uygulamamız gerekir. Bu iki parçacıklı sistemi, bir yay gibi sıkıştırmakta ve sistemde, yaptığımız iş kadar 'elektrostatik potansiyel enerji' depolamaktayızdır. Bir yay da zaten, sıkıştırılırken atomları arasındaki elektros- tatik itme kuvvetlerine karşı iş yapılarak potan- siyel enerjinin depolandığı, serbest bırakıldığın- da da bu enerjinin, ısıya dönüşen kısmı hariç hemen tümünün kinetik enerji olarak geri alın- dığı, çok parçacıklı bir sistemdir. Öte yandan, potansiyel enerji açısından önemli olan, siste- min herhangi bir halindeki 'mutlak değer'i de- ğil, bir halden diğerine geçerkenki değişimidir. Buna, sistemin iki hali arasındaki 'potansiyel farkı' da denir. Haller böyle olunca, 'sistemin hangi durumundaki potansiyel enerjiye 0 de- ğeri vereceğiz' sorusunun yanıtı basitleşir: Han- gisini istersek ona... Örneğin, iki protonun oluşturduğu ikili sistemin, aralarındaki uzaklık sonsuz ikenki halini, potansiyel enerjinin 0 ol- duğu hal olarak alabiliriz. Genelde böyle yapı- lır zaten.

Zıt yüklü parçacıklar için, iki protonunkine ters bir durum sözkonusudur ve parçacıklar, birbirlerinden örneğin sonsuz uzaklığa konu- lup serbest bırakıldıklarında, kendiliklerinden hızlanır. Başlangıçta durağan olduklarından, hızlar ve kinetik enerjiler sıfırdır. Sistemin kütle merkezini de öyle. Hatta, momentumun korunumu gereği, parçacıklar birbirlerine kar- şı, kütleleriyle ters orantılı hız kazandıkların- dan, kütle merkezi hep sabit kalır. Zaten, siste- me dışardan etkiyen bir kuvvet bulunmadığına göre, kütle merkezinin hızının değişmemesi ge- rekir. Dolayısıyla, sistemin kinetik enerjisi tüm- müyle, parçacıkların birbirlerine göre hareke- tenden kaynaklanmaktadır. Buna, 'sistemin iç kinetik enerjisi' de denilebilir. Öte yandan, siste- min potansiyel enerjisi, içerdiği parçacıkların birbirlerine göre konumlarından kaynaklan- makta olup, bir 'iç potansiyel enerji'dir. Zaten, ortada sistemin bir kuvvet aracılığıyla etkileş- ceği başka sistemler bulunmadığına göre, siste- min için bir 'dış potansiyel enerji' sözkonusu değildir. Parçacıklar birbirlerine doğru hız ka- zandıkça; ikili sistem, elektros- tatik iç potan- siyel enerjisini iç kinetik enerjiye dönüştürmek- tedir. İç potansiyel enerji giderek azaldığına ve başlangıç değeri de 0 olduğuna göre, giderek negatifleşir. Parçacıkların kinetik enerjilerinin toplamı ise, sistemin iç kinetik enerjisini ver- mekte olup, daima pozitifdir. Değeri her an için, iç potansiyel enerjinin mutlak değerine eşittir. Dolayısıyla bu durumda, ikisinin topla- mı hep sıfır olur. Benzeri durumlarda da sıklık- la korunduğundan, bir sistemin kinetik ve po- tansiyel enerjilerinin toplamına özel bir ad ve- rilip, 'mekanik enerji' denir. Aslında, kütleçek- mi ve elektromanyetik kuvvetlerin yanında, güçlü ve zayıf kuvvetlerle taşıyıcıları da göz önünde bulundurulduğunda, bilinen tüm ener-

| Tek atomlu gaz | $C_{v,m}$ (J K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> ) | $C_{v,m} / R$ |
|----------------|--------------------------------------------------|---------------|
| He             | 12.5                                             | 1.50          |
| Ne             | 12.5                                             | 1.50          |
| Ar             | 12.5                                             | 1.50          |
| Kr             | 12.5                                             | 1.50          |
| Xe             | 12.5                                             | 1.50          |

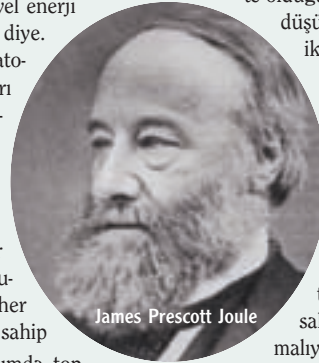
ji türleri, mikro ölçekte bu ikisine indirgenebi- lir. Dolayısıyla, mekanik enerji mikro ölçekte, klasik olarak hep korunur. Ancak makro ölçek- te, korunmaz görüldüğü durumlar vardır. Isı- ya dönüşerek gözden kaçtığı. Nedir ısı?...

Isı, mikro ölçekteki kinetik enerjinin, mak- ro ölçekteki belirtisidir. Örneğin tek atomlu ideal gazlar için, atom başına ortalama kinetik enerji  $mv^2/2 = 3k_B T/2$ . Burada T, Kelvin cinsin- den sıcaklık,  $k_B$  ise Boltzman sabiti. Niye böy- le? Önce, niye "tek atomlu" gaz? En basit hali- ni ele alalım diye. "İdeal gaz" ne demek? Yete- rince seyreltik olan ve atomları, sert toplar gi- bi, tümüyle elastik şekilde çarpışan bir gaz. Ni- ye seyreltik? Atomları arasındaki uzaklıklar, atom boyutlarına göre çok büyük olsun da; atomlar; çarpışma anı dışında, aralarındaki kuvvetler aracılığıyla potansiyel enerji depolayabiliyor olmasınlar diye.

Böyle bir gazın herhangi bir ato- mu, kısa süren çarpışma anları dışında, sadece kinetik enerji- ye sahip olabilir ve birbirine dik üç doğrultuda, (x,y,z), ha- reket özgürlüğüne sahiptir. Bu sayıya atomun, 'hareket özgürlüğünün derecesi' denir ve atom, 'eş paylaşım' ('equi- partition') teoremine göre, her derece başına  $k_B T/2$  enerjiye sahip olabilir. Bu yüzden, bu durumda top- lam kinetik enerji:  $mv^2/2 = 3k_B T/2$ . Bir mol gaz için bu miktar  $3N_A k_B T/2$  olur.  $R = N_A k_B$ 'ye, 'ideal gaz sabiti' denir. Dolayısıyla, tek atomlu bir mol ideal gazın sıcaklığını, hacmi sabit kal- mak kaydıyla 1 K arttırmak için gereken ener- ji miktarı,  $C_v = 3R/2$  olur. Buna 'sabit hacimde- ki mol ısı kapasitesi' denir. 'Sabit basınçtaki mol ısı kapasitesi' ise,  $C_p = 5R/2$  olup,  $C_v$ 'den; gaz, hacmi değişirken çevreye karşı iş yapmak zorunda kaldığından dolayı, R kadar daha bü- yükür.  $C_p = C_v + R$  ilişkisine, ilk üreticisi Julius Robert von Mayer'in anısına 'Mayer ilişkisi' de- niyor. Kullandığımız gaz tanımına en yakın tek atomlu asal gazlar için, 1 atmosfer basınç ve 25 °C'de ölçülmüş olan  $C_v$  değerleri yandaki tab- loda veriliyor. Uyum olağanüstü. İki atomlu gazlar için de oldukça iyi. Daha karmaşık gaz- lar, sıvılar ve katılar için, durum daha karışık.

17. Yüzyıl'da ısı ve yanma olayları birbirine karıştırılıp, birlikte ele alınıyor ve bazı malze- melerin 'filojiston' denilen bir madde içerdiği düşünülüyordu. Kurama göre, böyle bir malze- me filjistsonsuz hava ile karşılaştığında yanıyor ve filojistonunu havaya verip onu ısıtırken, kendisi kül ('calx') olup, 'gerçek formu'na dö- nüşüyordu. Bu durumda, yanan her cismin

kütlesinin azalması lazımdı. Halbuki, örneğin magnezyum yandığında kütle artıyordu. Sa- vunucularından bazıları, filojistonun negatif kütleli, bazıları da havadan hafif olduğunu ile- ri sürerken, Antoine-Laurent Lavoisier (1743- 94) 1778 yılında oksijeni ayrıştırarak bu kura- mı öldürdü. Yerine, yanmanın 'kalorik ku- ram'ını önerdi. Buna göre 'kalorik', maddeye bağlanma eğilimi olan, fakat kendi kendisini de iten, elastik ve kütsüz bir akışkandı. İçine ak- tığı cismi ısıtıyordu. Bir cismin içeriğindeki ka- lorik yoğunluğu ne kadar fazla ise, sıcaklığı o kadar yüksekti. Bu durumda, belli bir madde- nin miktarı arttıkça, içerdiği 'kalorik'in de art- ması gerekiyordu. Halbuki Kont Rumford (1753-1814), top namlularını oyarken, oyğun çapı büyüyüp de malzeme miktarı azaldıkça, çı- kan ısının azalmak bir yana, arttığını gözlemle- mişti. 1789'da yayınladığı kitabıyla 'kalorik ku- ramı'na karşı çıktı. Öte yandan, Alman tıpçı Ju- lius Robert von Mayer (1814-78), 1840 yılında, gemi doktoru olarak Doğu Hint adalarına seya- hatı sırasında, fırtınanın kamçıladığı dalgaların sularının, dingin deniz suyundan daha sıcak ol- duğunu farketmişti. Tedavi ettiği bir yerlinin kanının, kendisinininkinden çok daha koyu renk- te olduğunu görünce, bunun da nedenini düşündü. Bu insanlar daha sıcak bir iklimde yaşadıklarından, vücut ısı- larını korumak için daha az enerjiye gereksinim duyuyor, dolayısıyla da daha az oksijen soluyor olsalar gerekti. Kan- daki oksijen miktarı azaldığın- da rengi koyulaşıyor, aksi hal- de kıpkırmızılaşıyordu. Oksije- nin yanmanın aracı olduğu art- tık bilindiğine göre, vücut kimya- sal enerjiyi ısıya dönüştürüyor ol- malıydı. Kamçılanan dalgalar da, me- kanik enerjiyi...



James Prescott Joule

Döndüğünde fizik çalıştı ve adıyla anılan ilişkiyi türetti. 1843 yılında James Prescott Joule (1818-89) ünlü kalorimetre de- neyiyle, mekanik enerjinin ısıya dönüştüğünü gösterdi. Rudolph Clausius (1822-88) 1850'de, termodinamiğin birinci yasasını oluşturan ener- jinin korunumu ilkesini geliştirdi. Kalorik ku- ram yıkılmıştı. Yerini 'kinetik kuram'a bıraktı.

Fakat, Sadi Carnot'un (1796-1832) kinetik kuramdan haberi yoktu. 1824 yılında 28 yaşın- da iken, kalorik kuramdan hareketle 'Carnot döngüsü'nü geliştirip, termodinamiğin ikinci yasasının temelini attı. Halbuki, birinci yasanın keşfine daha 10, mekanik enerjinin ısıya eşde- ğerliliğine 20 yıl vardı. Pierre-Simon Laplace (1749-1827) ise, aynı eski kuramı kullanarak, Newton'un 'puls denklemi'ne bir düzeltme ek- ledi. 'Carnot döngüsü', 2006 yılında hala, kul- landığımız ısı makinalarının davranışını yöne- tirken, Laplace'ın kuramsal düzeltme faktörü, 'adiyabatik gaz indisi' olarak ses hızı hesapla- rında kullanılıyor. Bu olgu bilim felsefesinde, bir kuramın başarısının doğruluğunda yattığını savunan 'bilimsel realizm' taraftarlarına karşı kullanılmakta: Doğru sonuçların yanlış bir ku- ramdan da türetililebileceğinin nadir bir örneği olarak... Sahi?... Kimyasal enerji neydi?...