



Not Defteri

V u r a l A l t ı n

Dünya'yı Geri İtmek

Enerji genelde, 'iş yapma yeteneği' olarak tanımlanır. İş nedir: 'Kuvvet çarpı yol'. Daha doğrusu kuvvet vektörüyle (\mathbf{F}), kuvvetin etki noktasının konumundaki diferansiyel değişimin ($d\mathbf{r}$) vektörel iç çarpımının, izlenen patika üzerinden integrali ($\int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$). Ama biz bu karmaşık tanım yerine, kuvvetle hareketin aynı yönde olduğu, basit bir doğrusal harekete bakalım.

Örneğin, bir cisim yerde duruyor olsun. Ağırlık mg , aşağıya doğru, zemine dik bir kuvvet oluşturur ve zeminde bu kuvvete karşı bir tepki oluşur. Tepki kuvveti F_N , zemine dik ve yukarı doğru olup, cismin taban alanına yayılmış bulunan aynı yöndeki dikey bir basınç dağılımının sonucudur. Basıncın büyüklüğü p , temas yüzeyinin alanı da A ile gösterilirse; $p=F_N/A=mg/A$ 'dır. Bu basıncı oluşturan ve yüzeylerin birbirine daha fazla yaklaşmasına engel olan kuvvet; yüzeyleri oluşturan atomların dış yörüngelerindeki elektronların arasındaki, hem elektrostatik, hem de 'Pauli'nin dışlama ilkesi'nden kaynaklanan 'kuantum mekaniksel' itme kuvvetleridir. Aksi halde cisim, bataklıkta bir filmiş gibi, zemine gömülürdü.

Cisme, büyüklüğünü giderek arttırdığımız yatay bir F kuvveti uygulayalım. Cisim başlangıçta hareket edemez. Halbuki mg , zemine dik olduğundan, bize karşı koymamaktadır. Bize karşı koyan kuvvet, cisimle zeminin temas ettiği yüzeyler arasındaki, yatay bir kuvvettir. İki yüzey arasında bir sürtünme direnci F_{sd} oluşmuştur ve uyguladığımız yatay F kuvvetini dengelemektedir. Nasıl bir direnç? Doğada bilinen dört temel kuvvetten birisi olan elektromanyetik kuvvetin belirti biçimlerinden birisi. Çünkü, herhangi bir malzemeyi oluşturan atom ya da moleküller, elektrik yükü açısından toplamda nötr olmakla beraber, aralarındaki elektron alışverişinin veya paylaşımının sonucu olarak, bazı yerlerinde artı, bazı yerlerinde de eksi yük fazlalıkları barındırmaktadır. Bu 'yerel' yük dengesizlikleri, atom veya moleküller arasında çekme ve itme kuvvetleri oluşturmakta, malzemeyi bir arada tutan 'molekül kuvvetleri' de zaten, bu 'elektrostatik kuvvet kalıntıları'nın toplamından oluşmaktadır. İki cisim birbiriyle temas ettirildiğinde, her birinin yapısında ayrı ayrı var olup, onları ayrı ayrı bir arada tutan elektrostatik kuvvet kalıntıları, aralarında da oluşmaya başlar. O kadar ki, temas yüzeyleri uygun niteliklere sahipse eğer, iki cisim zamanla birbirine kaynayabilir. Dönelim yerde ki cisme...

Cismin alt ve zeminin üst yüzeylerinin temas eden kısımları arasındaki yerel yüklerden, zıt işaretli olanlar birbirini çekerken, benzer işaretliler itmekte ve cismin yatay yönde harekete geçmesi için, bizim bu kuvvetle-

rin toplamının yatay bileşenini, yani sürtünme direncini yenmemiz gerekmektedir. Ancak, biz uyguladığımız yatay F kuvvetini arttırdıkça, sürtünme direnci F_{sd} artar. Çünkü, hareket ettirmeye çalıştığımız cismin alt yüzeyinde bazı esnemeler yer almakta ve iki yüzeydeki yerel yük fazlalıklarını birbirine yaklaştırıp, aralarındaki elektrostatik kuvvetlerle birlikte sürtünme direncinin büyümesine yol açmaktadır. Bu sırada sürtünme direnci, arayüzeye dik olan kuvvetlerden bağımsız olup, sadece uygulamakta olduğumuz yatay kuvvete bağlı ve hatta ona eşittir. O arttıkça büyür. Ta ki, uyguladığımız F kuvveti bir eşik değerini aşana kadar. Bu eşik değeri aşıldığında, cisim harekete geçecek ve günlük deneyimlerimizden bildiğimiz gibi, sürtünme direnci ansızın azalacaktır. Cismin harekete geçmesinden hemen önce uyguladığımız yatay kuvvet, daha doğrusu bu kuvvete karşı koyarak onu dengeleyen 'sürtünme direnci', F_{sd} 'nin maksimum değeridir. Bu $F_{sd,max}$ değerini, basit olarak F_s ile gösterelim. Büyüklüğü neye bağlı?..

Herhangi bir andaki sürtünme direnci F_{sd} , temas yüzeyinin birim alanı başına oluşan sürtünme direnci f_{sd} 'nin toplamdaki sonucudur: $F_{sd}=f_{sd} \cdot A$. Birim alan başına sürtünme direnci f_{sd} , öncelikle temas eden yüzeylerdeki yerel yüklerin büyüklüğüne; bu ise yüzeyleri oluşturan atom veya moleküllerin türüne, yani yüzeylerin kimyasal bileşimine bağlıdır. Öte yandan yükler birbirine yaklaştıkça, aralarındaki kuvvetler büyüdüğünden; temas yüzeyleri arasındaki ortalama uzaklık ve üzerlerindeki girinti-cıktıntılar, birim alan başına sürtünme direnci f_{sd} 'nin büyüklüğünü belirleyen ikinci ana etkeni oluşturur. Örneğin temas yüzeylerinin birim alanı başına dikey kuvvet, yani dikey basınç $p=F_N/A$ ne kadar büyükse, yüzeyler birbirine o kadar yaklaşır. Bu karmaşık etkileşme şemasını, ilgili kuvvetlerin analitik ifadelerinden hareketle irdelemek zor olduğundan, sürtünme direnci veya kuvvetleri genelde, deneysel incelemelere dayalı 'empirik' yöntemle hesaplanır. Sürtünme daima iki cisim arasında yer aldığından, tek bir cisim için sürtünme katsayısı anlamsızdır. Dolayısıyla, cismin alt ve zeminin üst yüzeyini oluşturan malzemelerin cinsini belirleyerek, bir 'malzeme çifti' seçmiş olalım. İki malzeme arasındaki temas yüzeyinin birim alanı başına maksimum sürtünme direnci $f_{sd,max}$ 'ın büyüklüğü, birim alan başına dikey basınç p ile doğru orantılıdır. Orantı katsayısı μ_s ile gösterilirse, $f_{sd,max}=\mu_s \cdot p$ 'dir. Bu durumda, bizi asıl ilgilendiren, temas yüzeyleri arasındaki toplam statik sürtünme kuvveti $F_s=f_{sd,max} \cdot A=\mu_s \cdot p \cdot A$ olur. Yani: $F_s=\mu_s \cdot (F_N/A) \cdot A=\mu_s \cdot F_N$. Sonucun ilginç tarafı, maksimum statik sürtünme kuvveti F_s 'nin

büyüklüğünün, temas yüzeyinin alanından bağımsız olması; yani bu açıdan, cismin ağırlığını geniş bir alana yaymakla, sivri bir ucun üzerine oturtmak arasında bir fark olmamasıdır. Öte yandan, $F_N=mg$ olduğundan, $F_s=\mu_s \cdot mg$ 'dir. Sürtünme kuvvetinin bir diğer özelliği, harekete daima karşı koyması. Dönelim cisme...

Cismi harekete geçirmek için uyguladığımız yatay kuvveti arttırırken, uzunca bir süre başarılı olamadığımızı varsayalım. İttire kaktıra nefes nefese kalmış, terlemeye başlamışızdır. Halbuki, cisim hareket etmediğine ve uyguladığımız yatay kuvvet 'yol' almadığına göre, harcadığımız 'kalori'lerin nereye gittiği sorusu doğar. Kaslarımızı oluşturan lifler, kuvvet uygularken kasılıp kısalmakta, ardından gevşeyip uzamaktadır. Herhangi bir lifi oluşturan hücreler dizisindeki ardışık üyeler, birbirleriyle kısmen çakışan yapıdadır. Örneğin bir çizgi üzerine, aralarında boşluklar bırakarak tuğlalar dizmiş, sonra da aralarındaki boşlukların üzerine birer tuğla daha yerleştirmiş olalım. Aradaki tuğlalardan herhangi birisi, komşu iki tuğlayla kısmen, alttan ya da üstten çakışmaktadır. Kas lifinin yapısı, kaba buna benzer. Ardışık hücreler, sırasıyla bir alttan bir üstten kızaklı kayar kapaklar dizisi gibi, birbirinin üzerinden kayabilmekte olup, uçlarına periyodik olarak, zıt işaretli iyonlar pompalamaktadırlar. İyon yoğunlukları arttığında, uçlar birbirini çekerek hücreleri daha fazla üst üste bindirdiğinden, lifin boyu kısalır. Yoğunluk azaldığında da, hücreler geri kayıp uç uca geldiğinden, boy uzar. Bu sırada, iyon grupları arasındaki kuvvetlerin lif boyuna teğet olan net bileşenlerine karşı iş yapılmaktadır. Cismi itmeye çalışır ve fakat hareket ettiremezken, düz ve çizgili kas hücrelerimizde tüketilen kaloriler bu işe harcanır. Hücreler gereken enerjiyi, depolamış oldukları ATP moleküllerini parçalayarak üretmektedir. Bu işlem ek oksijen gerektirdiğinden, daha güçlü bir şekilde soluyarak, hücrelere daha fazla oksijen pompalamamız gerekir. Soluduğumuz oksijenin yetersiz kalması halinde, bu işlemi bir süre için oksijensiz olarak da sürdürebilen 'çizgili' kas hücreleri, daha fazla görev üstlenir. Yapılan işin tümü, hücre sıvılarında ısıya dönüşür. Konveksiyon yoluyla kana aktarılmakta ve sıcaklığı yükselme eğilimine giren kan, gözeneklerimizden buharlaşma yoluyla soğutulmaktadır. Terleme nedenimiz budur. İşlem sırasında oluşan ürünlerden birisi laktik asit olup, kas hücrelerinde birikmesi halinde, yorgunluk hissine yol açar. Kol kaslarımızı giden 'geril' komutlarının periyodu uzamakta, kaslar kasıldıktan sonra daha uzun süreyle gevşek kalmaktadır. Öyle ki, kolumuzu kaldırıp yere paralel tutmaya çalışsak, kol; süresi uzamış olan gevşeme sırasında kendini taşıyamayıp biraz aşağı

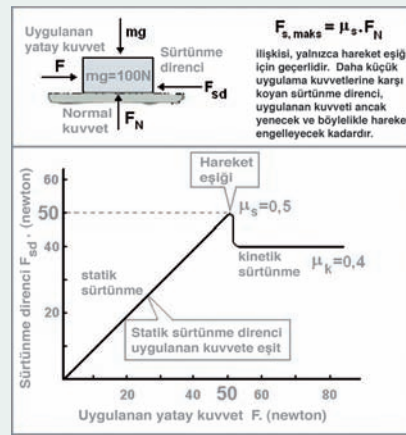
Not Defteri

düşecek, gerilme komutu nihayet gelip de kaslar gerildiğinde tekrar yükselecektir. Aşağı yukarı salınıp durur. Cismi itmeye çalışırken de zaten titremektedir.

Cisim nihayet harekete geçtikten sonra, sürtünme direnci azalmış ve hem de, uyguladığımız yatay kuvvetten bağımsız bir hal almıştır. Yatay kuvveti ne kadar arttırsak artıralım, artık hep aynı büyüklükte kalır. Cisim ivmelenecek hız kazanmaya başlamıştır. Daha fazla hızlanmasını istemiyorsak, uyguladığımız kuvveti azaltmamız gerekir. Azalttığımızı ve hızın, diyelim bir v değerine ulaştıktan sonra, sabitleştirdiğimizi varsayalım. İvme artık sıfır olduğuna göre, uyguladığımız kuvvet, sürtünme direncini tam olarak dengelemektedir. Bu, cismin hareketi sırasındaki sürtünme direncine 'kinetik sürtünme kuvveti' denir ve F_k ile gösterilir. Kinetik sürtünme kuvveti F_k da, statik sürtünme kuvveti gibi, temas yüzeyindeki birim alan başına sürtünme direncinin toplamıdır sonucudur. Dolayısıyla büyüklüğünün, cismin zemine uyguladığı dikey kuvvetle orantılı olması beklenir. Orantı katsayısına, 'kinetik sürtünme katsayısı' denir ve μ_k ile gösterildiğinde, kinetik sürtünme kuvveti $F_k = \mu_k F_N$ olur. Hareketin başlamasıyla birlikte sürtünme kuvveti azaldığına göre, $\mu_k < \mu_s$ 'dir. Azalmanın nedeni, temas yüzeylerindeki pürüzlerin, hareket nedeniyle kısmen de olsa törpülenmesidir. Tıpkı birbirine sürtülen iki zımpara arasındaki sürtünme kuvvetinin, zımparalardaki pürüzler aşındıkça azalmasında olduğu gibi. Ya da temas yüzeyi üzerinde, hareket bir kez başladıktan sonra hareketin devamını kolaylaştıran yağ veya benzeri yabancı unsurların bulunması ve yüzeydeki girintileri doldurmasıdır. Tıpkı, birbirine sürtülen iki sünger taşı arasındaki sürtünme kuvvetinin, gözenekler tozla doldukça azalmasında olduğu gibi. Bu durumda, temas yüzeylerinde safsızlık veya kirliliklerin bulunmaması ve de geometrik girinti çıkıntılarının olmaması halinde, statik ve kinetik sürtünme katsayılarının farklı olması için ortada neden kalmaz. Nitekim, arayüzeyleri iyice temizlenip parlatılmış metal çiftleri için μ_k ve μ_s değerleri arasında bir fark gözlenmiyor. Sürtünme kuvveti aslında, hakkındaki genellemelerin herbirine karşı istisnalar bulunabilen karmaşık bir kuvvet. Örneğin, temas yüzeylerinin daha pürüzsüz ve temiz hale getirilmesi, her zaman için sürtünme kuvvetinin azalacağı anlamına gelmiyor. Çünkü aynı metalden iki parça alınıp da, arayüzeyleri yeterince temizlenip, dümdüz hale getirildiğinde; aralarındaki sürtünme kuvveti azalmak bir yana, iki parçayı tek bir parça haline getirecek kadar artabiliyor ve buna 'soğuk kaynak' deniyor.

Konuyu toparlamak üzere, yandaki şeklin üst kısmında, ağırlığı örneğin $F_N = mg = 100$ newton olan bir cisim ve üzerindeki kuvvetler gösteriliyor. Şeklin alt kısmında, cisimle zemin arasında oluşan sürtünme direncinin, uygulanan yatay kuvvete göre grafiği var.

Statik sürtünme direncinin büyüklüğü değişken ve normal kuvvetlerden bağımsız olup, her aşamada, cisme o an uygulanmakta olan yatay kuvvete eşit. Bu durum, şeklin alt tarafındaki grafikte 45° eğimli doğrusal kesim olarak görülüyor. Cismin harekete geçmesinden hemen önceki 'eşik' anında, statik sürtünme direnci maksimum değerine ulaşıyor. Bu değer artık, uygulanan yatay kuvvetten bağımsız ve ara yüzeye dik olan 'normal' kuvvetle doğru orantılı. Orantı katsayısı $\mu_s = 0,5$. Dolayısıyla, $F_s = \mu_s F_N = 0,5 \times 100 = 50$ newton. Eşik değeri aşıldı da cismin harekete geçmesinden sonra, kinetik sürtünme devreye giriyor. F_k 'nin büyüklüğü de F_s gibi; uygulanan yatay kuvvetten bağımsız olup, ara yüzeye dik olan 'normal' kuvvetle doğru orantılı. Orantı katsayısı $\mu_k = 0,4$. Bu durum, aynı grafiğin devamındaki yatay doğru olarak görülüyor. İki doğrusal kesim arasında, sürtünme kuvvetinde bir azalma gerçekleşmiş ve $F_k = \mu_k F_N = 0,4 \times 100 = 40$ newton. Statik sürtün-



meyle ilgili olarak dikkat edilmesi gereken husus, $F_s = \mu_s F_N$ ilişkisinin yalnızca, hareketin başlamasından hemen önceki statik sürtünme direncinin büyüklüğünü veriyor olmasıdır, daha öncekileri değil. Bu eşik değerinden öncesi için; statik sürtünme direnci F_{sd} 'nin büyüklüğü, tekrar pahasına; F_N 'den bağımsız olup, cisme uyguladığımız yatay kuvvete eşittir.

Statik ve kinetik sürtünmeden başka, bir de 'yuvarlanma sürtünmesi'nden söz edilir. Örneğin bir araba tekerleğinin 'kaymadan yuvarlanma' sırasındaki, lastiğin en alt noktası her an için, yerdeki bir noktayla temas halindedir. O kısa süreli temas sırasında, iki nokta öpüşmüş olup; tekerin merkezinden bakıldığında aynı hızla geriye doğru kaçıyor olmakla beraber, yerden bakıldığında hareketsizdirler. Tekerle yer arasındaki sürtünme kuvvetinin tamamı, öpüşen bu iki nokta üzerinde toplanmıştır. Noktalar birbirine karşı hareket halinde olmadığından, bu bir statik sürtünme kuvvetidir ve kuvvet eşik değerine ulaşmışsa eğer, büyüklüğü normal kuvvetlerden hareketle hesaplanamaz. Sistemin dinamik denklemlerinin yazılıp çözülmesi gerekir.

Önemli olan şu ki; noktalar birbirine karşı hareket etmediğinden, bu sürtünme kuvvetine karşı iş yapılmamaktadır. Dolayısıyla kuramsal olarak, 'kaymadan yuvarlanma' sırasında, lastiklerde enerji kaybının olmaması gerekir. Fakat, lastik yol boyunca ezilip büzülerek, şekil değiştirip durmaktadır ve ideal esnek bir malzeme olmadığından, kısmen de plastik şekil değiştirmelerine uğramaktadır. Şekil değiştirmelerin bu plastik bileşeninin emdiği enerji, geriye alınmazdır ve ısıya dönüşür. Öte yandan, tekerleğin aksında, metalin metale sürtünmesinden dolayı sürtünme kayıpları vardır. Sonuç olarak; bu kayıpların hesabına yönelik, üçüncü bir; 'kaymadan yuvarlanmanın sürtünme katsayısı' μ_y tanımlanır. Kaldı ki, lastikler ara sıra patinaj yaparak kayar da...

Sürtünme kuvveti, katı cisimlere özgün değil. Sıvılar ve gazlar arasında da var. Bizim için bazen sorun oluşturmakla beraber, işimize çok yararlıdır. Örneğin, yerle aramızdaki sürtünme kuvveti olmasaydı, Dünya'yı geriye doğru itip, kendimiz ileri doğru hareket edemezdik. Bir otomobil, keza öyle. O zaman, yegane hareketli canlılar kuşlar olabilirdi. Onlar da, uçuş sonrasında bir dala konup pençeleriyle dalı kavradıklarında, dalın etrafında pervane gibi döner dururdu. Hayat zor olurdu. Sürtünme kuvvetinin sağladığı hareket imkanından yararlanıyor, yol açtığı enerji kayıplarını azaltmak için de yöntemler arıyoruz. Sürtünen yüzeyler arasına kaygan maddeler koyarak, bu kayıpları azaltmaya çalışıyoruz. Cisimlerin ve çeşitli yağlama malzemelerinin sürtünme özelliklerini inceleyen bilim dalına 'triboloji' deniyor. Ancak, iki cisim arasındaki sürtünmeyi azaltmanın tek yolu, arayüzeyi yağlamak değil. Bu amaçla, hızlı tren raylarında olduğu gibi, manyetik kaldırma kuvvetlerinden de yararlanılıyor. Keza, yüzeylerin sürtünme sırasında çıkardıkları ses dalgaları, iki yüzey arasında bir 'enerji yastığı' oluşturarak, bu kayıpları azaltıyor. Buna 'akustik yağlama' deniyor. II. Dünya Savaşı'nda kullanılan Panzer tanklarının paletlerinde olduğu gibi...

Malzeme çiftleri arasındaki sürtünme katsayıları, genelde 0-1 arasında değişmekle birlikte, 1'den büyük de olabilir. Örneğin, arayüzey temiz ve kuru olmak kaydıyla; gümüşün gümüş üzerindeki statik sürtünme katsayısı 1,4. Katıların kauçuk üzerindeki μ_k değeri, 1-4 arasında değişiyor. 'Soğuk kaynak' durumunda ise, sürtünme katsayısı daha da büyük değerler alabiliyor. Sürtünme katsayılarının en küçük değerlerine gelince, teflon üzerinde teflon için; $\mu_s = \mu_k = 0,04$. Eklemlerimiz için, bu iki değer, keza birbirine eşit ve daha bile küçük; 0,01. Harika bir yağlayıcı var. Fakat, uzun süredir sanılmanın aksine, sürtünme katsayısı 0 da olabilir. Yakınlarda, karbon yapıların incelenmesi sırasında keşfedilen ve 'süperyağlama' denilen etkide, birbirinin üzerinden kayan iki karbon yapı arasındaki sürtünme kuvvetinin 0 olduğu gözlemlendi.