

Kilogram

Yeniden Tanımlanıyor

Dr. Beste Korutlu [*Uzman Araştırmacı, TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME), Elektrodinamik Laboratuvarı*

Sevda Kaçmaz [*Araştırmacı, TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME), Kütle Laboratuvarı Sorumlusu*

Tarihi bir ana tanıklık ettiğimiz 16 Kasım 2018 tarihinde, kütle birimi kilogramın tanımında çığır açacak bir değişikliğe gidilmesi onaylandı. Bu yıl yirmi altıncısı düzenlenen Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konferansı'nda (CGPM), elli dört ülkenin temsilcilerinin katılımıyla oylamaya sunulan bu değişiklik ile kütle ölçüm standardı olarak kullanılan Uluslararası Kilogram Prototipi (IPK), 130 yılın sonunda emekliye ayrılacak ve yerini evrensel bir sabit olan Planck sabitine bırakacak. Böylece, kilogram tanımlanırken insan yapımı bir nesne olan IPK yerine, kuantum dünyaya açılan kapının anahtarı Planck sabiti kullanılacak. Erişimi kısıtlı fiziksel bir nesne yerine evrensel bir sabitin referans alınması sebebiyle, kullanıcıdan, zamandan ve konumdan bağımsız gerçekleştirilebilecek olan bu yeni tanım, dünya çapında bu alanda 228 yıldır sürdürülen bilimsel çalışmaların zirvesi olarak düşünülebilir.

Peki, bu yeni tanım için neden bu kadar uzun süre bekledik?

Bu sorunun cevabını anlamak için gelin hep beraber bu 228 yıllık yolculuğun izlerini sürelim.



Uluslararası Kütle Prototipi (IPK).
Kütle değeri KA'nın kütlesine eşit olacak şekilde
%90 platin ve %10 iridyum alaşımından
yaklaşık 39 mm yüksekliğinde ve çapında bir
silindir biçiminde üretilmiştir.



Pirinç grave standardı.

Kütlesi donma sıcaklığında 1 dm³ hacminde damıtılmış suyun kütlesine eşittir.

İlk Kütle Birimi Grave

Bilinen ilk metrik sistemde temel kütle birimi olarak “grave” kullanıldığını duymuş muydunuz? İngilizcede “mezar” ya da “kabir” anlamına gelen bu kelime, aslında Latince “ağırlık” anlamına gelen “gravitas” sözcüğünden türetilmiştir.

Aydınlanma çağının sonlarında, Fransa Kralı XVI. Louis, Fransız Bilimler Akademisi tarafından atanan âlimlerden oluşan Ağırlıklar ve Ölçüler Komisyonu’na, uzunluk ve ağırlık birimlerinde ölçüm birliğini sağlayacak yeni bir ölçü sistemi oluşturmalarını buyurdu. Böylece takas ve ticaret güvence altına alınacaktı. Kütlenin korunumu yasasını bulan, modern kimyanın öncülerinden Fransız Kimyacı Antoine Laurent Lavoiser gibi seçkinlerin de yer aldığı bu komisyon, onluk metrik sistemin temellerini attı. Komisyon tarafından kütle birimi grave, donma sıcaklığında 1 dm³ hacminde damıtılmış suyun kütlesi olarak tanımlandı. Bu tanım ile uyumlu, pirinçten üretilmiş grave standardı iki yıl boyunca kütle ölçüm birliğini sağlamak için kullanıldı.

Grave biriminin katları için “gravet” ve “bar” kullanılmıştır. Grave biriminin binde biri (donma sıcaklığında 1 cm³ hacminde damıtılmış suyun kütlesi) “gravet” diye adlandırılırken, bin katı (donma sıcaklığında 1 m³ hacminde damıtılmış suyun kütlesi) için “bar” sözcüğü kullanılmıştır.

Kütle Birimi Gram

Fransız İhtilali’ni takiben, Fransa tarihinde cumhuriyet yönetim şeklini benimsemiş ilk hükümetin yasama meclisi kararı ile Kral XVI. Louis (1754-1793) ve Fransız Bilim Akademisi’nde görevli Lavoiser (1743-1794) giyotin ile idam edildi. 1795 yılında, yeni yönetimin düzenlemesiyle, gravet yerini Latince “küçük ağırlık” anlamına gelen “gramme”a yani İngilizce yazılışıyla “gram”a bıraktı. Üst ve alt onluk katları için ise binde bir anlamında “mili” ya da bin katı anlamına “kilo” gibi ön ekler kullanılmaya başlandı. Böylece temel kütle biriminin her onluk katını yeni bir isimle tanımlamak yerine (gravet, grave, bar gibi) jenerik olarak gram kullanılırken, üst ve alt katlar için ön ekler kullanılmaya başlandı.



Uluslararası birim sisteminde (SI)
“kilo” ön ekini alan tek birimin
(metre, saniye, amper, kelvin, mol, kandela)
KİLOgram olduğunu
daha önce fark etmiş miydiniz?

O zamanlar ticaret küçük ağırlıklar üzerinden yapıldığı için, temel kütle birimi gram, grave yerine gravet baz alınarak oluşturuldu. Bu yeni tanımda damıtılmış suyun donma sıcaklığı olan 0°C yerine, atmosfer basıncı altında yoğunluğunun en yüksek olduğu 4°C referans olarak kullanılmaya başlandı. Fakat bir gram küçük olması sebebiyle hem kullanım hem de üretim açısından zor olduğu için, yeni tanıma ait kütle standardının, gramın bin katı olan kilogram olarak üretilmesine karar verildi ve bu karardan dört yıl sonra, 1799’da, Arşiv Kilogram (KA) standardı oluşturuldu. Pirinç paslanmaya elverişli bir malzeme olduğu için, standart platinden oluşturuldu. Günümüzde Paris’te ulusal arşivlerde korunan KA, 90 yıl boyunca kütle ölçümlerinin referansı olarak kullanıldı. İlgili ülkelere KA’nın kopyaları ulusal kütle standardı olarak kullanılmak üzere gönderildi.

Son Kütle Birimi Kilogram

1870'li yıllara gelindiğinde, ulusal standartların birbirleri ile uyuşmayan kütle değerleri sebebiyle, Osmanlı Devleti'nin de yer aldığı 17 ülke arasında, evrensel bir ölçüm sistemi oluşturulması üzerine, Metre Anlaşması (20 Mayıs 1875) imzalandı. Osmanlı Devleti, metrik sisteme otuz ikinci Osmanlı padişahı Sultan Abdülaziz (1830-1876) döneminde geçmişti. O zamanlar kütle birimi "gram" yerine "dirhem-i aşari" terimi kullanılıyordu. Eski dilde "aşar" ondalık anlamına geldiği için bu terim ondalık ölçü birimini imlerdi. Metre Anlaşması'yla temel kütle birimi "kilogram" olarak güncellendi ve üç adet uluslararası organizasyon kuruldu:

- Uluslararası standartlar üzerine diplomatik kararların alındığı Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konferansı (CGPM),
- Metre anlaşmasına imza atan her üye ülkeden bir adet temsilcinin yer aldığı ve CGPM'ye tavsiyede bulunan Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Komisyonu (CIPM),
- Uluslararası standartların korunduğu Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu (BIPM).

Fransa o dönemde bilimde söz sahibiydi. Metrik sistemin temelleri de orada atıldığı için BIPM, Sevres, Paris'te kuruldu. Bu bağlamda, kütlesi KA'nın kütlesine eşit olacak şekilde, Uluslararası Kilogram Standardı (IPK) üretilmesine karar verildi. Saf platin yumuşak bir malzeme olduğu için, IPK % 90 platin %10 iridyum alaşımından üretildi. 1889 yılından beri kilogram tanımında IPK kullanılıyor. Evlerimizde kullandığımız banyo tartılarından, endüstriyel amaçlı kullanılan terazilere kadar bütün kütle ölçümlerinin değeri bu standarda göre belirleniyor. 3. CGPM'de kararlaştırıldığı üzere temel kütle standardı olarak IPK'nin kullanıldığı kilogram biriminin mevcut tanımı şöyledir:

"Kütle birimi kilogramdır ve uluslararası kilogram prototipinin kütlesine eşittir."

Bu tanımdan iki önemli sonuca varılabilir.

- Kilogram biriminin hem tanımı hem de gerçekleştirilmesi IPK üzerinden yapılır.
- Kilogram biriminin hatası ve belirsizliği sıfırdır.



Türkiye'nin 54 numaralı Ulusal Kilogram Standardı.

%90 platin ve %10 iridyum alaşımından yaklaşık 39 mm yüksekliğinde ve çapında bir silindirik biçimde üretilmiştir.

Daha basit bir ifadeyle, IPK'nin kütlesinin değişmediği varsayılır. Bunu sağlamak için de IPK 1889 yılından beri, BIPM'de hava ortamında üç adet cam fanus altında muhafaza edilmektedir.

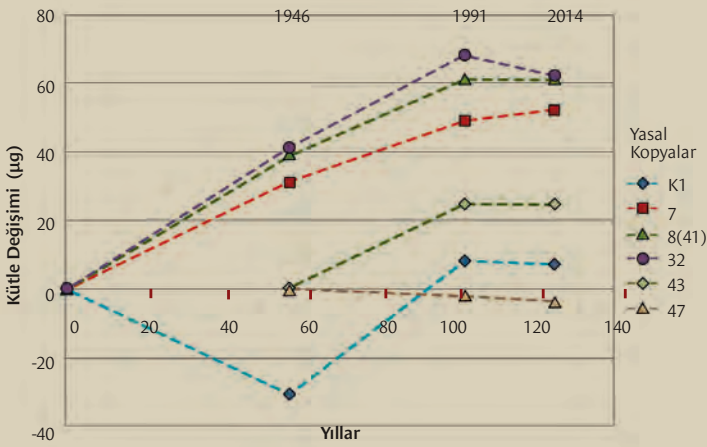
IPK ile birlikte, aynı koşullarda saklanan altı yasal kopya, sekiz çalışma standardı ve 2 adet özel kullanım için üretilmiş kopyalar da yine BIPM'de muhafaza edilmektedir. BIPM'de üretilen diğer standartlar ise metre anlaşmasını imzalayan ülkelere, ulusal kütle standardı olarak kullanılmak üzere gönderildi. Bu süreçte, Balkanlarda başlayan savaşlar sebebiyle Gerileme Dönemi'nde olan Osmanlı Devleti, Metre Anlaşması'na üye ülkelerin yapması gereken yıllık ödemeleri gerçekleştiremedi ve 1883 yılında Metre Anlaşması'ndan çekildi. Sultan II. Abdülhamit'in (1842-1918) padişah olduğu bu süreçte, Osmanlı Devleti'ne ulusal kütle standardı gönderilmedi. Osmanlı Devleti'nin dağılıp Türkiye Cumhuriyeti'nin kurulmasından 10 yıl sonra, 1933 yılının mart ayında, Metre Anlaşması'na yeniden imza atılması sonucunda, Türkiye'ye 42 numaralı kütle standardı gönderildi. Bu standartların kütle değerleri belirli aralıklarla düzenlenen uluslararası kütle karşılaştırma ölçümleriyle kontrol edilirdi.

42 numaralı kütlede ikinci karşılaştırma sırasında hasar tespit edilmesi sebebiyle yerine üretilen 54 numaralı standart kütle Türkiye'ye teslim edildi. 54 numaralı kütle standardı, günümüzde TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde (UME) muhafaza edilmekte ve ulusal kütle standardı olarak kullanılmaktadır.

IPK'nin üretilmesinin üzerinden tam 129 yıl geçti ve BIPM'de gerçekleştirilen karşılaştırma ölçümlerinde yasal kopyaların kütlelerinin zamanla değiştiği gözlemlendi (altta). IPK kütlesi yalnızca bu karşılaştırmalarda üçlü fanusun içerisinde çıkarılarak ölçümlerde kullanıldı. Bu periyodik doğrulama karşılaştırmaları, 1899-1911, 1939-1953 ve 1988-1992 yıllarında yapıldı. Bunların dışında, 2014 yılında, sadece BIPM kütlelerinin kullanıldığı bir karşılaştırma ölçümü de gerçekleştirildi. Değişimin 100 yılda ortalama 0.00005 gram civarında olduğu belirlendi. Değişim küçük gibi görünse de, eczacılık, kimya, ileri teknoloji gibi uygulama alanlarında bu küçük farklar büyük sonuçlar yaratabiliyor. Ayrıca, kilogram biriminin doğrudan ilişkili olduğu diğer birimler de bu sonuçtan etkileniyorlar. Pek tabii bu değişimler, IPK kütlelerinin zaman içerisinde değişmediği varsayımı sebebiyle, diğer kütlelerin IPK kütlelerine uzaklığı olarak tanımlanan bağıl değişimler.

BIPM standart kütlelerinin zaman içerisinde IPK kütlelerine göre değişimi.

IPK kütlelerindeki değişim tanım gereği sıfır kabul edilir. Dikey eksende μm eki çarpı 10⁻⁶ anlamına gelir. K1, 7, 8(41), 32, 43 ve 47 BIPM'de muhafaza edilen altı yasal kopyanın isimleridir.



43 ve 47 numaralı yasal kopyalar ilk olarak 1946 yılında diğerleri 1889 yılında kalibre edilmişlerdir.

Bağıl değişimleri anlamak için daha aşına olduğumuz bağıl hız problemine bakmak iyi olabilir. Birbirlerine doğru hareket eden iki gözlemci, diğer hareketlinin gerçek hızından daha hızlı hareket ettiğini düşünür. Referans noktasını kendi aracı olarak seçen gözlemci, referans noktası ile birlikte hareket ettiğinden, kendi hızını sıfır kabul eder, diğer hareketlinin hızını ise, kendi gerçek hızı ile diğer hareketlinin gerçek hızının toplamı olarak ifade eder. Bu aslında bir yanılsamadır ve bu yanılsamayı çözebilmenin tek yolu, gerçek hızları tespit edebilecek olan hareketsiz bir gözlemciyi devreye sokmaktır. Aslında kütle standartlarında da benzer bir durum söz konusudur. Kütle standartlarının değişimleri, IPK kütlelerindeki değişim sıfır kabul edildiğinden, bağıl değişimlerdir.



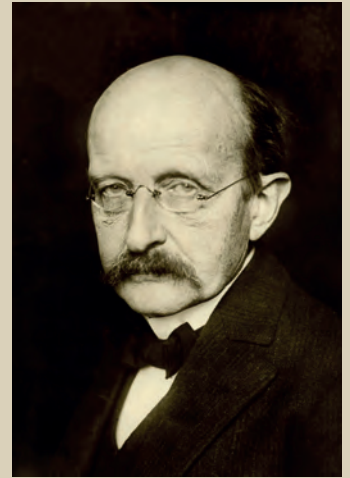
SI birimleri içerisinde hatası ve belirsizliği sıfır olan tek birimin kilogram olduğunu biliyor muydunuz?

Peki, değişimin IPK'de mi yoksa kopyalarda mı olduğunu söylemenin bir yolu var mı? Bunun gerçekleşebilmesi için, gerçek kütle değişimlerini ölçebilen bir hareketsiz gözlemciye ihtiyaç var. Bu hareketsiz gözlemci kilogram biriminin yeni tanımında evrensel bir sabit olan Planck sabiti olacak. Diğer bir deyişle kilogram birimi Planck sabiti ile tanımlanacak.

Max Karl Ernst Ludwig Planck, Alman teorik fizikçi. (1858-1947)

Kuantum kuramı ile ilgili çalışmalarından dolayı 1918'de Nobel Fizik Ödülü'nü aldı.

Termodinamik yasaları üzerine çalıştı. Kendi adıyla bilinen "Planck sabiti"ni ve "Planck ışınım yasası"ni bilim dünyasına kazandırdı.



Kilogramın Planck Sabiti ile Tanımı

Yazının başındaki kilogramın yeni tanımı için neden 228 yıl beklendi sorusuna geri dönecek olursak, kilogramın Planck sabiti ile tanımlanabilmesi için öncelikle Planck sabitinin keşfedilmesi gerekiyordu. Planck sabiti, 1901 yılında Alman teorik fizikçi Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858 -1947) tarafından, zamanın en önemli problemlerinden olan “Morötesi Felaketi”ni açıklamak için matematiksel bir model olarak ileri sürüldü. 1918 yılında, Max Planck’ın Nobel Fizik Ödülü’ne layık görülmesine yol açan bu keşif, bugün modern fiziğin başlangıcı olarak anılır ve makro ölçekteki gerçeklikten mikro ölçekteki tuhaflığa geçişin eşiği kabul edilir. Fakat kilogramın tanımında kullanılması için Planck sabitinin keşfedilmiş olması yeterli değildi. Planck sabitinin en azından kilogramın mevcut tanımını karşılayacak belirsizlikte ölçülebilmesi gerekiyordu. Keşfedildiği günden beri Planck sabitini ölçmek için birçok deney geliştirildi. Yandaki tabloda yıllara göre çeşitli deneylerden elde edilen Planck sabiti ve belirsizlik değerlerini görebilirsiniz.

Tablonun üçüncü kolonunda belirsizlik değerinin virgülden sonraki ikinci basamaktan sekizinci basamağa kadar küçüldüğünü fark etmişsinizdir. Günümüzde, Planck sabitini bu belirsizlikle ölçmemize izin veren iki yöntem bulunmaktadır. Elektrik ve mekanik güçlerin eşitlenmesi prensibine dayanan Kibble Balans Deneyi ve tek örütlü silisyumda atom sayma prensibine dayanan X Işını Kristal Yoğunluğu (XRCD) deneyi. Her iki yöntem de kilogram biriminin Planck sabiti ile yapılan yeni tanımını gerçekleştirmek için kabul görmüştür. TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) kendi geliştirdiği Salınlı Mıknatıs Kibble Balans deneyiyle dünya çapında yürütülen bu çalışmalara katkı sağlamaktadır.

Bu noktada akıllara kilogramın yeni tanımında diğer evrensel sabitler yerine neden Planck sabiti kullanıldığı gelebilir. Planck sabiti birimi, tabloda da görüldüğü gibi, enerji birimi joule ile zaman birimi saniyenin çarpımıdır. Joule türetilmiş bir birimdir ve SI temel birimleri cinsinden yazıldığında **Joule = kilogram x metre²/saniye²** eşitliği karşımıza çıkar.

Dolayısıyla Planck sabitinin tanımı gereği kilogram birimini içerdiğini görürüz. Kilogram biriminin yeni tanımında herhangi başka bir evrensel sabit yerine Planck sabitinin kullanılacak olması tam da bu yüzden.

Sonuç olarak, 228 yıl boyunca kilogramın tanımında kütle standartlarının kullanılmasının sebebi, Planck sabitinin 1901 yılında keşfedilmiş olmasına rağmen istenilen belirsizlik seviyesinde ölçülememesinden kaynaklanıyordu. 26. CGPM’de kilogram biriminin yeni tanımında kullanılacak olan 2017 Planck sabiti değeri oylamaya sunuldu ve 20 Mayıs 2019 tarihinden itibaren yeni tanımın geçerli olması kararlaştırıldı. Bu kararla birlikte kilogramın fiziksel nesneye bağlı tanımından, kullanıcıdan, zamandan ve konumdan bağımsız evrensel bir tanıma geçildi.

Yıl	Planck Sabiti (Joule x saniye)	Planck Sabiti Belirsizliği (Joule x saniye)
1919	$6,5543 \times 10^{-34}$	$0,0100 \times 10^{-34}$
1929	$6,547 \times 10^{-34}$	$0,008 \times 10^{-34}$
1969	$6,626196 \times 10^{-34}$	$0,000050 \times 10^{-34}$
1973	$6,626176 \times 10^{-34}$	$0,000036 \times 10^{-34}$
1986	$6,6260755 \times 10^{-34}$	$0,0000040 \times 10^{-34}$
1998	$6,62606876 \times 10^{-34}$	$0,0000052 \times 10^{-34}$
2002	$6,6260693 \times 10^{-34}$	$0,0000011 \times 10^{-34}$
2006	$6,62606896 \times 10^{-34}$	$0,00000033 \times 10^{-34}$
2010	$6,62606957 \times 10^{-34}$	$0,00000029 \times 10^{-34}$
2014	$6,626070040 \times 10^{-34}$	$0,000000081 \times 10^{-34}$
2017	$6,626070150 \times 10^{-34}$	$0,000000069 \times 10^{-34}$

Şunu da belirtmek gerekir ki yeni tanım bizim günlük hayatta kütle ölçümünde kullandığımız büyüklükleri etkilemeyecek. Örneğin kilonuzu kontrol etmek için tartıya çıktığınızda okuyacağınız değer, yeni tanımdan etkilenmeyecek. Yeni tanım ileri teknolojilerin yer aldığı sistemlerde, çok hassas kütle ölçümlerine ihtiyaç duyulan eczacılık gibi alanlarda ya da kilogram biriminin etkilediği diğer ölçü birimlerinde etkili olacak. ■

Kaynaklar

Richard Davis, “SI Kütle Birimi”, *Metrologia*, cilt 40, sayfa 299, 2003.

https://www.bipm.org/utls/common/pdf/si_brochure_8.pdf

<https://www.bipm.org/utls/en/pdf/si-mep/MeP-kg-2018.pdf>

<https://www.nist.gov/si-redefinition/kilogram-introduction>

http://www.ume.tubitak.gov.tr/sites/images/ume/metroloji_kitabi.pdf

Antonio Possolo ve ark., “Uluslararası birimler sisteminde Planck sabiti ölçümlerinin doğruluğu, tutarlılığı ve kararlılığı”, *Metrologia*, cilt 55, sayfa 29, 2018.

H. Ahmedov, N. Babayigit Aşkın, B. Korutlu and R. Orhan, “UME salınlı mıknatıs Kibble Balans ile Planck sabiti ilk ölçümleri”, *Metrologia*, cilt 55, sayfa 326-333, 2018.