

SI REVİZYONU; AMPERİN YENİDEN TANIMLANMASI VOLT ve OHM BİRİMLERİNE ETKİSİ

Mehedin ARİFOVİÇ
Saliha TURHAN

ÖZET

Uluslararası Birimler Sistemi'ndeki (SI) değişiklik kapsamında tanımı değişen 4 temel birimden biri de elektriksel akım birimi olan amper'dir. Amper yedi temel SI biriminden biri olmasına rağmen, tanımına göre gerçekleştirilmesindeki güçlük ve düşük doğruluk sebebiyle, pratikte, yüksek doğrulukta kuantum standartları ile gerçekleştirilen gerilim birimi "Volt" ve direnç birimi "Ohm" üzerinden elde edilmiştir. Amper, yeni tanımı ile evrensel bir sabit olan elektrik yüküne (e) bağlanmıştır. Amperin yeniden tanımlanması, pratikte amperin gerçekleştirilmesinde bir değişiklik getirmemek ile birlikte, yeni bir paradigma açmış ve özellikle yeni tanımına göre gerçekleştirilmesi noktasında bilim insanlarına önemli görevler yüklemiştir. Bu bildiride, amper birimin kısa tarihçesi, yeni tanımı ve ölçüm bilimine etkisi hakkında bilgi verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Amper, Uluslararası Birimler Sistemi, metroloji, elektriksel ölçümler, kuantum standartları, evrensel sabitler

ABSTRACT

The last change of the international system of units (SI) included 4 base units, including the ampere, unit for the electrical current. The ampere, whose practical implementation according to the existing definition was complicated and performable with low accuracy, in practice was realized with high accuracy through quantum standards for voltage unit Volt and resistance unit Ohm. With new definition ampere is related to the elementary charge (e), one of the fundamental constants of nature. Although it does not bring a significant change in the current measurement methodology, the redefinition of ampere has opened up a new paradigm and has imposed important tasks on scientists, particularly in the practical realization of the new definition. In this paper, the brief history of the ampere, its new definition and the effect of the last change on the metrology are given.

Key Words: Ampere, international system of units, metrology, electrical measurements, quantum standards, universal constants

1. GİRİŞ

Bilim, teknoloji, endüstri ve uluslararası ticaret alanında farklı ölçüm birim sistemlerinin kullanılmasının yarattığı karmaşayı önlemek için bir uluslararası birimler sisteminin oluşturulması, 1960 yılında yapılan 11. Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konferansı'nda (CGPM) görüşülmüş ve "SI" olarak ifade edilen "Uluslararası Birimler Sistemi (Système International d'Unités-SI)" kabul edilmiştir. SI sistemi; 7 temel birim ile, bu temel birim üzerinden türetilmiş birimlerden oluşmaktadır. SI, 1960 yılında CGPM tarafından resmi olarak kabul edildiğinden bu yana bilimsel ve teknolojik gelişmelere paralel olarak birkaç kez revize edilmiştir.

Yapılan revizyonların en önemli sebebi, ölçüm birimlerinin yapay nesnelere yerine, doğal olaylara bağlı evrensel sabitlere göre tanımlanma eğilimidir. Bu bağlamda en önemli adım, 1960 yılında, zaman birimi saniye'nin, gezegenimizin kendi etrafına dönüş frekansı yerine, sezyum atomunun sabit radyasyon frekansına bağlanarak tanımlanması ile atılmıştır. 1983 yılında ise, uzunluk birimi metre, Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu (BIPM) tarafından saklanan uluslararası uzunluk prototipi yerine ışık hızı sabiti (c) üzerinden tanımlanmıştır.

Tüm SI birimlerinin, zamandan ve konumdan bağımsız olarak sabit olmaları nedeniyle evrensel sabitler ile tanımlanması yaklaşımı, bu evrensel sabitlerin değerlerinin yüksek doğrulukta belirlenmesini gerektirmiştir. Bu alanda uzun yıllar yapılan çalışmalar ile elde edilen başarılı sonuçlar, SI sisteminde köklü bir değişim için şartların olgunlaştığını göstermiştir.

Nitekim Kasım 2014'te gerçekleşen 25. Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konferansı'nda (CGPM), 7 temel SI birimlerinden olan kilogram, amper, kelvin ve mol birimlerinin de sırasıyla Planck, elektrik (elementer) yükü, Boltzmann ve Avogadro evrensel sabitlerine bağlı olarak yeniden tanımlanması tasarısı kabul edilmiştir. Bu karar, CGPM kararlarında talep edilen şartları yerine getirmek ve deneysel doğruluklara ulaşmak için metrolojinin farklı alanlarında dünya çapında eşzamanlı işbirlikleri gerektirmiştir.

13-16 Kasım 2018'de gerçekleşen 26. Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konferansı'nda (CGPM), revize SI tasarısı onaylanmıştır. Yeni tanımlar, 20 Mayıs 1875'de imzalanan Metre Konvansiyonu'nun 144. yıldönümü olan 20 Mayıs 2019 tarihinde yürürlüğe girmiştir.

SI revizyonunda, günlük yaşamda algılanabilir bir etkinin olmamasına ve birimlerin önceki tanımlarıyla yapılan ölçümlerin ölçüm belirsizlikleri içinde geçerli kalmasına dikkat edilmiştir. Ulusal metroloji enstitüleri dışında az sayıda kullanıcı bu değişiklikleri fark ederek etkilenmektedir.

Temel olarak SI'daki revizyon, eski temel birim tanımlarının kaldırılması ve yedi tanımlayıcı evrensel sabitin sayısal değerlerinin kabulüdür. SI sisteminde tanımlanan yedi evrensel sabit ve karşılık gelen değerlerin tanımladıkları yedi ölçüm birimi aşağıda verilmiştir:



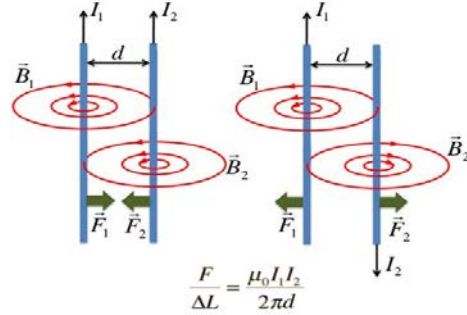
Tanımlayıcı Sabit	Sembol	Sayısal Değeri	Birimi
Cs'nin aşırı ince geçiş frekansı	$\Delta\nu_{Cs}$	9 192 631 770	Hz
Vakumda ışık hızı	c	299 792 458	$m s^{-1}$
Planck sabiti	h	$6,626 070 15 \times 10^{-34}$	J s
Elektrik (Elementer) yük	e	$1,602 176 634 \times 10^{-19}$	C
Boltzmann sabiti	k	$1,380 649 \times 10^{-23}$	$J K^{-1}$
Avogadro sabiti	N_A	$6,022 140 76 \times 10^{23}$	mol^{-1}
Işıksal etki	K_{cd}	683	$lm W^{-1}$

Bu yedi evrensel sabit, hem temel birimler hem de türetilmiş birimler olmak üzere SI birimlerine doğrudan SI izlenebilirliğini sağlamak için kullanılabilir. Buna bağlı olarak artık temel ve türetilmiş birimler arasında temel bir ayırım söz konusu değildir. Bununla birlikte tarihsel devamlılık ve pedagojik amaçlar için temel birim ve türetilmiş birim kavramlarının korunmasına karar verilmiştir.

2. AMPER'İN TARİHÇESİ

Danimarkalı bilim adamı Hans Christian Oersted 1820 yılında elektrik akımının manyetik etkisini keşfederek, o zamana kadar iki farklı alan olarak görülen elektrik ve manyetizmanın, aslında aynı olayın iki farklı yansıması olduğunu göstermiştir. Bu keşif üzerine Fransız bilim insanı André-Marie Ampère, elektrik akımının manyetik özelliklerini ayrıntılı bir şekilde incelemiştir (Şekil 1). Akımın geçtiği iki paralel tel arasında akımların yönüne bağlı olarak birbirini çeken veya iten, aralarındaki mesafe

kısalınca veya uzunlukları artınca artan bir kuvveti deneysel olarak tespit etmiş ve klasik amper kanunu olarak bilinen ilişkiyi formülize etmiştir. Bilime katkılarından dolayı, 1791 yılında akım birimine onun adı verilmiştir. Amper kanunu, 1960 yılından 20 Mayıs 2019 yılına kadar amper tanımının temelini oluşturmuştur. Elektriksel ölçümler ile ilgili bir diğer önemli buluş Alman fizikçi Ohm tarafından 1827 yılında gerçekleştirilmiştir. Ohm kanunu olarak bilinen kanun, çok basit bir şekilde gerilim, akım ve elektriksel direnci ilişkilendirir ve günümüze kadar elektriksel ölçümlerinde en çok kullanılan formül olmuştur.



Şekil 1. André-Marie Ampère ve klasik amper kanunu

19. yüzyıldaki elektrik teknolojisinin gelişimi ile birlikte, özellikle telgrafın icadı ve ilgili saha testleri doğru ve güvenilir elektriksel ölçümlere ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Bu ihtiyacı karşılamak amacıyla farklı ülkelerde çeşitli birimler ortaya çıkmıştır. Birimlerin birliğini sağlamak için 1861 yılında İngiliz Bilim Geliştirme Derneği'nin önerdiği 3 elektriksel birim, 1893 yılında Uluslararası Elektrik Kongresi'nde benimsenmiş ve uluslararası olarak adlandırılmışlar. Bu birimler, elektrik akımı için "Uluslararası Amper", elektrik gerilimi için "Uluslararası Volt" ve elektrik direnci için "Uluslararası Ohm"dur. İlk yapılan tanımlarına göre, "Uluslararası Amper" gümüş voltmetre olarak adlandırılan bir elektrokimyasal cihaz ile, "Uluslararası Volt" kimyasal yapıdaki Weston hücrenin ürettiği gerilimi ile ve "Uluslararası Ohm" ise belirli boyutlara sahip cam boru içinde yerleştirilen cıvanın direnci ile tanımlanmışlardır.

Gümüş voltmetre, gümüş nitrat çözeltisinde iki gümüş plakadan oluşur (Şekil 2a). Voltmetreye uygulanan akımın geçmesi sonucunda, anotta çözülen gümüş katotta birikir. "Uluslararası Amper", gümüş voltmetre üzerinden geçen, gümüş nitrat çözeltisinden saniyede tam olarak 0,001118 gram gümüş biriktirecek akım olarak tanımlanmıştır. Ölçümün başında kütlesi ölçülen katot, ölçüm bittiğinde tekrar ölçülür ve akımın uygulandığı süre göz önünde bulundurularak akım hesaplanır. Gümüş voltmetre ile yapılan akım ölçümlerinin doğruluğu, çözeltinin içeriği, elektrotların gümüş saflığı ve kullanım durumu, ortam şartları gibi parametrelere bağlı olup, farklı voltmetreler arasında ciddi uyumsuzluklara sebep oluyordu. Diğer taraftan, gerilim ölçümleri için kullanılan Weston hücreleri ve direnç ölçümleri için referans rezistörler çok daha kararlı ve uyumlu sonuçlar veriyordu. Bu sebeple ölçüm bilimciler kullanmadan önce gümüş voltmetrelerini, Ohm kanunu ile Weston hücre ve standart dirençler kullanılarak kalibre ediyorlardı. Bu durum "Uluslararası Amper" in tanımının sorgulanmasına ve yeni arayışlarına yol açmıştır.

CGPM, 1921 yılında uzunluk, kütle ve zaman birimlerinden oluşan uluslararası MKS sistemine mevcut tanımı ile amperi dördüncü temel birim olarak dâhil edilmiş ve MKSA sistemini kabul etmiştir. Ancak, mevcut amper tanımı yeterince doğru olmadığı ve değiştirilmesi gerektiği konusunda bilim dünyasında fikir birliği sağlanmıştır. Yeni arayışların ilk somut adımı 1933 yılında CGPM tarafından atılarak, amperin tanımı gümüş voltmetre yerine diğer temel birimlerine dayandırılarak yapılmasını önerilmiştir. Bu tavsiye 1935 yılında Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Kurulu (CIPM) tarafından onaylanmıştır. Ancak çalışmalara İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra devam edilebilmiş ve 1948 yılında, André-Marie Ampère'nin orijinal deney çalışmalarına dayandırılan amperin yeni tanımı kabul edilmiştir.

1948 yılında kabul edilen amper tanımı şu şekildedir:

Amper, sonsuz uzunlukta ve ihmal edilebilir dairesel kesitli iki doğrusal iletken, vakum altında birbirlerine göre paralel ve 1 m mesafede iken, bu iletkenler arasında metre başına 2×10^{-7} MKS kuvvet birimi (Newton) oluşturan ve zamanla değişmez sabit akımdır.



a) Gümüş Voltametre



b) Amper Balans

Şekil 2. Amper tanımı için kullanılan standartlar

Bu tanım ile amper, kilogram, saniye ve metre temel birimlerine bağlanmıştır. Tanımdan da görüleceği gibi, bu tanımın pratikte gerçekleştirilmesini imkânsız kılan bazı varsayımlar mevcuttur. Bununla birlikte, bu prensiple çalışan amper balansı (Şekil 2b) olarak adlandırılan düzenekler, 20 yüzyılın başında kullanılmaya başlanmıştır. Amper balansı düzeneğinde akım, geçtiği iki bobin arasında oluşan kuvvet, terazinin diğer koluna yerleştirilen bir kütlenin çekim kuvvetiyle dengelenerek hesaplanır. Amper balansının en önemli kusuru, akım hesabına katılması gereken bobinlerin geometrisi ve sabitliği olup, bu sebeple akım ancak 10^{-5} mertebesinde ölçülebiliyordu. Diğer taraftan, çok daha basit yöntem olan Ohm kanunu ile gerilim ve direnç üzerinden ölçülen akım aynı doğruluğu sağlıyordu.

1980'lere gelindiğinde ise, Volt ve Ohm kuantum fiziğin şemsiyesi altında girmiş ve Volt Josephson etkisi [1] üzerinden, Ohm ise Kuantum-Hall etkisi üzerinden sırasıyla 10^{-9} ve 10^{-8} gibi çok düşük belirsizlikler ile gerçekleştirilebilmeye başlanmıştır. Ohm kanunu kullanarak bu iki birim üzerinden amper de artık 10^{-7} belirsizlik ile ölçülebiliyordu. Bu durum, SI sisteminde, amperin temel birim, Volt ve Ohm'un türetilmiş birim olarak tanımlanmalarına rağmen, pratik uygulamaları arasında tezatlık oluşturmuş ve amper'in SI tanımının artık geçerliliğinin kalmadığını göstermiştir.

4. AMPER'İN YENİ TANIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

CGPM tarafından kabul edilen ve 20 Mayıs 2019 tarihinde yürürlüğe giren revize SI'da amperin yeni tanımı şu şekilde yapılmıştır:

Amper, "A" sembolü ile gösterilen elektrik akımını ifade eden bir SI birimidir. Amper, birim elektrik yükünün (e) sabit sayısal değeri $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C alınarak tanımlanır. Burada C birimi A·s'ye eşit olup, saniye (s) de $\Delta\nu_{Cs}$ olarak tanımlanır.

Basit olarak amper, saniyede geçen $6,241509 \times 10^{18}$ elektrik yükü ifade eder. Böylece, amper, elektron yükü (e) ve saniyeyi tanımlayan $\Delta\nu_{Cs}$ evrensel sabitlerine bağlanmıştır. Amperin yeni tanımındaki netliğe rağmen, yeni tanım amperi gerçekleştirmeyi kolaylaştırmamaktadır. Zira, çok yüksek sayıdaki elektronların son derece hassas bir şekilde sayılmasını gerektirmektedir.

SI Brochure Appendix 2: "Mise en pratique for the definition of the ampere and other electric units in the SI" [3] dokümanında, yeni amper'in gerçekleştirilmesi için üç teknik önerilmektedir:

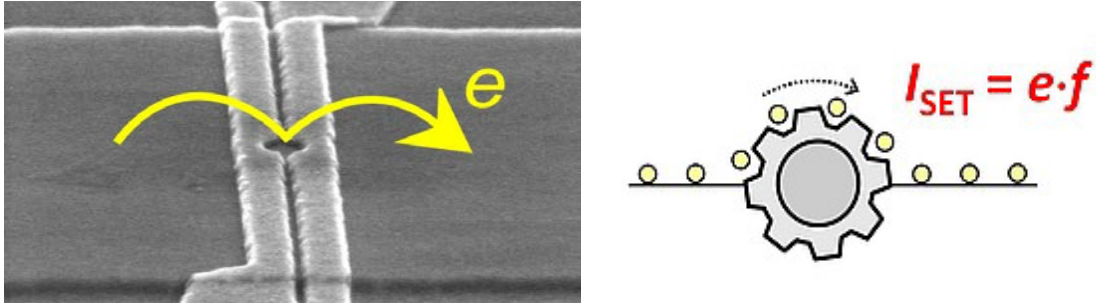
1. Ohm yasası ile; $A = V / \Omega$ birim ilişkisi, türetilmiş Volt (V) ve Ohm (Ω) SI birimlerinin sırasıyla Josephson ve Kuantum Hall etkilerine dayanan pratik gerçekleştirmeleri,
2. Tek Elektron Taşıma (SET) veya benzeri cihaz ile; $A = C / s$ birim ilişkisi, SI amper tanımında verilen e değeri ve SI temel birimi saniye'nin (s) gerçekleştirilmesi,
3. $I = C \cdot dU/dt$ ilişkisi ile; $A = F \cdot V/s$ birim ilişkisi ve Volt (V) ve Farad (F) SI türetilmiş birimleri ile SI temel birimi saniye'nin (s) pratik gerçekleştirmeleri.

SET yöntemi üzerine çalışmalar, mevcut bazı teknik sınırlamalara rağmen, yoğun olarak devam etmekte olup, son yıllarda kapsamı iyileştirilmiş ve gelecekte iyileşmenin devam edeceği tahmin edilmektedir. Bu sebeple bu teknik *Mise en pratique* olarak verilmiştir.

Bununla birlikte, birinci ve üçüncü teknik, TÜBİTAK UME dâhil, birçok metroloji enstitüsünde halen kullanılmaktadır.

4.1. Tek Elektron Taşıma (SET) Tekniği

SET tekniği, yeni amperin tanımına en uygun teknik ve doğal yaklaşım olarak değerlendirilebilir. Bu teknik, elektron pompası olarak adlandırılan nano boyuttaki aygıtın üzerinden zaman birimde geçen elektronların sayılması prensibine dayanmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Elektron pompa prensibi

SET prensibiyle çalışan aygıt, iki elektrotun elektrik durumu manipüle eder; Elektron önce kaynağından elektrotlar arasında bulunan adacığa alınır ve sonra drenaj kısmına transfer edilir. Tek elektronun transfer hızı elektrotların manipülasyonu için kullanılan ve her elektron transferi için sinyal sekansını üreten sinyal jeneratörün çalışma frekansına bağlıdır. Böylece, elektron pompasından geçen akım zaman içinde transfer edilen elektron sayısına eşit olacaktır. Bu mekanizma mükemmel işlemesine rağmen, en büyük problem zaman biriminde yeterli sayıda elektronu geçirmek olarak karşımıza çıkmaktadır. Örneğin, 100 MHz frekansı ile çalışan bir elektron pompasının ürettiği akım 1 pA olup, kullanılabilir bir akım standardı için oldukça düşük ve yetersiz bir değerdir. Birçok ölçüm bilimci, bu yöntemle 1 µA değerine ulaşılmasının pratik uygulama için yeterli olacağını öngörmektedir. Günümüzde elektron pompaları ile ulaşılan değer nA mertebesinde olup hedeften halen 1000 kat küçüktür. Bu anlamda, yeni amperin tanımı üzerinden, doğrudan elektron sayımı ile gerçekleştirilmesinde alınacak daha çok mesafe olduğu görülmektedir.

SET sistemlerinin 1 µA ulaşmasından sonra, “kuantum metroloji üçgeni” olarak tabir edilen ve SET ile gerçekleştirilen Amper, Josephson etkisi ile gerçekleştirilen Volt ve Kuantum Hall etkisi ile gerçekleştirilen Ohm birimlerinin, her birinin diğer ikisi üzerinden denetlenebileceği bir sistem kurulması amaçlanmaktadır.

4.2. Ohm Yasası Tekniği

SI amper'in önceki tanımına göre elde edilmesi oldukça zor ve düşük doğrulukta olmasından, yeni tanımına göre ise SET tekniğinin halen istenen düzeye ulaşmamasından dolayı, pratikte amper, halen en yüksek doğrulukla gerilim birimi Volt ve direnç birimi Ohm üzerinden elde edilmektedir.

Teorisi Dr. Brian Josephson tarafından oluşturulmuş olan “Josephson etkisi” [1] ve von Klitzing tarafından tanımlanmış olan “Kuantum-Hall etkisi” [2], günümüzde bir çok metroloji enstitüsünde sırasıyla SI Volt ve SI Ohm birimlerinin gerçekleştirilmesinde kullanılmaktadır. TÜBİTAK UME'de Josephson Gerilim Standardı 1997 yılından beri ve Quantum Hall Direnç Standardı ise 1999 yılından bu yana SI Volt ve SI Ohm birimlerinin gerçekleştirilmesinde kullanılmaktadır [5].

Mevcut Volt ve Ohm birimleri, kuantum standartları olan Josephson Gerilim Standardı ve Kuantum-Hall Direnç Standardı üzerinden 10^{-8} seviyelerinde gerçekleştirilmektedir. SI amper, Kuantum-Hall sistemi kullanarak ölçülen direncin üzerinden geçen akımın oluşturduğu gerilimin Josephson Gerilim Standardı ile ölçülmesi suretiyle elde edilir. Bu teknik ile, SI amper, 1 μA – 100 A aralığında 10^{-7} belirsizlik ile gerçekleştirilebilmektedir.

4.3. Kapasitör Şarjı Tekniği

$I = C \cdot dU/dt$ ilişkisi, kapasitör şarjı tekniği, belirli zaman aralığında uygulanan test akımın kapasitör plakaların üzerinde oluşturduğu gerilimin ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. Bu teknik düşük akım ölçümleri ($<1 \mu\text{A}$) için uygun olup, elde edilen en iyi belirsizlik değeri 10^{-5} mertebesindedir.

TÜBİTAK UME tarafından üretilen Düşük DC Akım Kaynağı, 1 fA-100 pA aralığında SI akım ölçümlerinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir [4].

5. SI REVİZYONUNUN VOLT VE OHM BİRİMLERİNE ETKİSİ

SI Volt'un gerçekleştirilmesinde kullanılan Josephson Gerilim Standardı, sezyum atomik saati ile 10^{-14} seviyesinde elde edilebilen frekansı DC gerilim ile ilişkilendiren bir sistemdir. Bu gerilim-frekans ilişkisi, $V_J = n (h/2e)f$ formülü ile ifade edilir. Burada h Planck sabiti, e elektrik yükü, f frekans, n ise bir tam sayıdır.

SI Ohm'un gerçekleştirilmesinde kullanılan Kuantum-Hall Direnç Standardının temeli ise, $R_{QHE} = (h/e^2)/n$ formülü ile ifade edilen Kuantum-Hall etkisine dayanmaktadır. Burada h Planck sabiti, e elektrik yükü, n ise bir tam sayıdır.

1 Ocak 1990'da CIPM tarafından, $2e/h$ oranı Josephson sabiti (K_{J-90}) olarak adlandırılarak değeri 483 597,9 GHz/V, h/e^2 oranı ise von Klitzing sabiti (R_{K-90}) olarak adlandırılarak değeri 25 812,807 Ω olarak sabit kabul edilmiştir (konvansiyonel sabit).

Revize SI sisteminde, h ve e sabitlerinin gerçek değerleri (true value) belirlenmiş ve K_{J-90} ve R_{K-90} sabitleri yürürlükten kaldırılmıştır. Buna bağlı olarak K_J ve R_K değerleri dolayısıyla SI Volt ve SI Ohm değerleri değişmiştir.

Josephson Sabiti ve von Klitzing Sabiti'nin yürürlükten kaldırılan konvansiyonel eski değerleri ve revize SI'da tanımlanan yeni değerleri aşağıda verilmiştir.

Josephson Sabiti ($2e/h$) (GHz/V)		von Klitzing Sabiti (h/e^2) (Ω)	
K_{J-90}	K_J	R_{K-90}	R_K
483 597,9	483 597,84 8 416 984	25 812,807	25 812,807 459 3045

Josephson Sabiti ve von Klitzing Sabitinin önceki değerlerine göre bağlı değişimleri (d) sırasıyla yaklaşık $1,0667 \times 10^{-7}$ ve $1,7793 \times 10^{-8}$ dir. Buna göre, Josephson sabitindeki söz konusu değişim gerilim ölçümlerinde yaklaşık $1,0667 \times 10^{-7}$ oranında bir ofset etkisi getirirken, von Klitzing Sabitindeki değişim ise direnç ölçümlerinde $1,7793 \times 10^{-8}$ oranında bir ofset etkisi getirmiştir. Bu durum, Josephson Gerilim Standardı ve Kuantum-Hall Direnç Standardı ile gerçekleştirilen ölçümlerde, değişikliğin yürürlüğe girdiği 20 Mayıs 2019 sonrası bir ofset düzeltilmesini gerekli kılmıştır.

Josephson Sabiti ve von Klitzing Sabitindeki bağlı değişimler dikkate alındığında, gerilim ve ilgili büyüklükler için 0,107 $\mu\text{V/V}$, direnç ve ilgili büyüklükler için ise 0,018 $\mu\Omega/\Omega$ civarında bir düzeltme söz konusudur. Bu etkiler birinci seviyedeki ölçümlerde etkili olup, diğer elektriksel ölçümlerin üzerinde kayda değer etkisi olmamaktadır.

CIPM Elektrik ve Manyetizma Danışma Kurulu (CCEM) tarafından revize SI'nın uygulanmasına dair hazırlanan rehberde [6], ulusal metroloji enstitüleri ve onların kullanıcıları için, revize SI sistemine geçişte gereksiz çabaları önlemek ve kritik ölçümler için izlenebilirliğin sürdürülmesini sağlayarak "Revize SI" sistemine sorunsuz bir geçişi sağlamak için asgari eylemler tanımlanmıştır.

Bu rehberde göre, genel olarak, mevcut $k = 2$ kapsam faktörü için genişletilmiş bağıl belirsizliğe (U) sahip herhangi bir ölçüm veya cihaz için aşağıdaki eylemler tanımlanmıştır;

Durum	Eylem
$2,5 d \leq U$	Bir sonraki kalibrasyona (veya ölçüm) kadar herhangi bir işlem yapılması gerekmez. Önceki kalibrasyon verileri hala metrolojik olarak geçerlidir ve bu verilerin uygulama günü ile bir sonraki kalibrasyon tarihi arasında herhangi bir şekilde kullanılması önemsiz bir etkiye sahip olmalıdır (yeniden tanımlama güvenilirlik aralığının olasılığı %95'ten %87'ye değişmektedir). Bu durum, $2,5 \times 10^{-7}$ 'den daha büyük bağıl belirsizliğe sahip gerilim ve ilgili ölçüm büyüklükleri ile ilgili bir eylem gerekmediğini gösterir. Benzer şekilde, 5×10^{-8} 'den daha büyük belirsizliğe sahip direnç ve ilgili büyüklükler için de herhangi bir eylem gerekmez. Bu kriter, elektriksel güç gibi bileşik büyüklükler için de kolayca genişletilebilir ve elektriksel cihazların çoğu için uygulanabilir.
$U < 2,5 d$	İzlenebilirlik için bir sayısal düzeltme veya standardın bir sonraki kullanımından önce yeniden kalibre edilmesi gerekir. Bu kriter, tüm kuantum standartlarının yanı sıra, Zener gerilim standartları ve yüksek doğruluklu direnç ve kapasitans standartları gibi bazı birincil seviye ölçüm standartları için de geçerlidir. Ayrıca, bu ölçümleri kontrol eden veya ölçüm sonuçlarını istatistiksel olarak izlemek için kullanılan yazılımlar için de bu kriter uygulanmalıdır. Josephson Gerilim Standardı ve Kuantum Hall Direnç Standardı ölçümlerinde ve yazılımlarında kullanılan $2e/h$ ve h/e^2 sabit değerleri aşağıdaki gibi güncellenmelidir. $2e/h = 483\,597,848\,416\,984\text{ GHz/V}$ $h/e^2 = 25\,812,807\,459\,3045\ \Omega$

Görüldüğü gibi, gerilim için sayısal bir düzeltme veya yeniden kalibrasyon gerektiren durumlar, ancak $0,25\ \mu\text{V/V}$ seviyesinden daha düşük belirsizliğe sahip, DC gerilim standartlarının Josephson Gerilim Standardı ile kalibrasyonu için söz konusu olup, diğer ölçümlerde herhangi bir eylem gerekmemektedir. Josephson Gerilim Standardı ile kalibre edilen bir standardın belirtilen tarihteki gerilim değeri ise, 20 Mayıs 2019 tarihi sonrasında aynı belirsizlik ile $0,1067 \times 10^{-6}$ oranında daha büyük olduğu dikkate alınmalıdır.

Benzer şekilde direnç için sayısal bir düzeltme veya yeniden kalibrasyon gerektiren durumlar, ancak $0,05\ \mu\Omega/\Omega$ seviyesinden daha düşük belirsizliğe sahip, DC direnç standartlarının Kuantum Hall Direnç Standardı ile kalibrasyonu için söz konusu olup, diğer ölçümlerde herhangi bir eylem gerekmemektedir. Sonuç olarak, direnç için $0,018\ \mu\Omega/\Omega$ 'lık bir değişim, yalnızca ulusal metroloji enstitülerinde muhafaza edilen üst düzey çalışma standartlarının kalibrasyonlarında etkili olabilir.

SONUÇ

20 Mayıs 2019 tarihinde ölçüm bilimi açısından çok önemli bir değişim gerçekleştirilmiş ve revize SI yürürlüğe girmiştir. Bu değişimden nasibini alan SI amper, evrensel sabit olan elektrik yükü (e) üzerinden tanımlanmıştır. Her ne kadar bu değişiklik amperin elde edilmesi ve pratik ölçümlerinde önemli bir fark yaratmasa da, yeni tanım ölçüm bilimi insanları önüne önemli görev getirmiştir; amperin yeni tanımına göre elde edilmesi, gerçekleştirilmesi.

Bununla birlikte revize SI evrensel sabitlerin değerlerini de düzenlemiş ve bunlara bağlı olan 1990 yılında tanımlanmış olan konvansiyonel Josephson ve von Klitzing sabitlerini yürürlükten kaldırmıştır. Revize SI'da, Josephson Sabiti ve von Klitzing Sabitindeki bağıl değişimler dikkate alındığında, gerilim ve ilgili büyüklükler için 0,107 $\mu\text{V/V}$, direnç ve ilgili büyüklükler için ise 0,018 $\mu\Omega/\Omega$ civarında bir değişiklik söz konusudur. Bu değişime bağlı olarak, 20 Mayıs 2019 sonrasında DC gerilim değerleri aynı belirsizlik ile 0,107 $\mu\text{V/V}$, direnç değeri ise yine aynı belirsizlik ile 0,018 $\mu\Omega/\Omega$ oranında artmıştır. Bu artışın, birinci seviyedeki ölçümlere etkisi önemli olup, diğer elektriksel ölçümler üzerinde kayda değer etkisi olmamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Josephson B. D., "Possible new effects in superconductive tunnelling", *Phys. Letter* 1, 251–3, 1962
- [2] K. v. Klitzing; G. Dorda; M. Pepper, "New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized Hall resistance", *Phys. Rev. Lett.*, **45**(6), 494–497, 1980
- [3] BIPM, "The International System of Units (SI Brochure)", 9th edition, 2019, <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/>.
- [4] Erkan, Ö., Gülmez, Y., Hayırlı, C., Gülmez, G., Turhan, E. "Reference Ultralow DC Current Source between 1 fA and 100 pA at TÜBİTAK UME", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68:6, 2201-2207, 2019
- [5] S. Selcik (Turhan), B. Akyel and P. Gutmann, "The 10V Fixed Frequency Josephson Junction Voltage Standard at UME", *CPEM 1998 Conf. Digest*, p. 556 - 557, June 1998.
- [6] CCEM, "CCEM Guidelines for Implementation of the 'Revised SI', Version 1.0, 8/12/2017, https://www.bipm.org/utills/common/pdf/CC/CCEM/ccem_guidelines_revisedSI.pdf

ÖZGEÇMİŞ

Mehedin ARİFOVİÇ

1997 yılında Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. 1997 yılında TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Gerilim Laboratuvarında araştırmacı olarak çalışmaya başlamıştır. 2001 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsünde Elektronik alanında yüksek lisans çalışmasını tamamlamıştır. Halen UME Gerilim Laboratuvarında laboratuvar sorumlusu olarak görev yapmaktadır. Birincil seviyede elektriksel ölçümler, referans cihazlar yapımı ve ölçüm otomasyonu konularında çalışmaktadır.

Saliha TURHAN

1992 yılında Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 1993 yılında TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Gerilim Laboratuvarında çalışmaya başladı. 1999 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programını tamamlayarak Elektronik ve Haberleşme Yüksek Mühendisi unvanını aldı. 2007 yılından bu yana UME Kalite Yönetim Temsilcisi Yardımcılığı görevini de yürütmektedir. Birinci seviyede DC ve düşük frekans gerilim ölçüm sistemleri, kalibrasyonları ve belirsizlik hesaplamaları, laboratuvarlararası karşılaştırmalar ile TS EN ISO/IEC 17025 standardı uygulamaları konularında çalışmaktadır.