

Direnç Ölçümünün Serüveni

1980 yılının 4 Şubat'ını 5 Şubat'a bağlayan gece, Almanya Max Planck Enstitüsü'ndeki laboratuvarında çalışan Klaus von Klitzing isimli Alman araştırmacı o akşam defterine karalayacağı bir formülün kendisine bir Nobel Ödülü kazandıracağını düşünmüş müydü? Elbette bunu bilemiyoruz ama o akşam bulduğu formül metroloji dünyasında yeni bir sayfa açtı.

Direnç aslında isim olarak birçok çağrışım yapıyor; ısıl direnç, suyun direnci, elektriksel direnç gibi. Bu çalışmada elektriksel direnç serüveninden bahsedeceğim. Ohm, ilk kez Alman bilim insanı George Simon Ohm tarafından bulunduğu için onun soyadıyla anılan elektriksel ölçü birimidir. Herhangi bir malzemenin üzerinden elektrik akımı geçişine ne derece izin verip vermediğinin bir ölçüsüdür direnç. Örneğin gümüş en iyi iletendir, bir başka deyişle dünyada elektriksel direnci en düşük metaldir. Plastik malzemeler ise direnç değeri çok yüksek malzemelerdir ve yalıtkan olarak adlandırılırlar.

Direnç kullanımı birçok sektörde yer almaya başladı ve bu alanlarda vazgeçilmez hale geldi. Elektronik devrelerde ise akım akışını kontrol etmek amacıyla kullanılabilceği düşünülmüş ve istenilen değerde elektriksel dirence sahip komponent direnç üretilmeye baş-

lanmış durumda. Direnç, şu an elektronik devrelerin en temel yapıtaşlarından biridir. Düşünün, elektronik devrelerde direnç kullanılamasaydı şu an televizyon izliyor olamazdık, telefon ile konuşamazdık, hiçbir elektronik cihaz olamazdı. Hakkında bu kadar az şey bildiğimiz bir şeyin modern hayat için bu kadar önemli olması şaşırtıcı değil mi?

Şaşırtıcı olan yalnızca bu değil tabii ki. Elektriksel ölçü birimi olarak Ohm ismi ile ve Ω simgesi ile belirtilen direncin değerinin ne kadar doğru bilinmesi gerekli mi acaba? Eğer bu soruyu size 100 yıl önce sorsaydım bu sorunun cevabı %1 olabilirdi. Bir başka deyişle bir direncin değerini belirlerken yaptığımız hatanın %1 olması yeterli olurdu. Bu doğrulukta bir ölçüm o zamanlar için pekâlâ iyi bir ölçüm sayılabilirdi. Teknolojinin bugün geldiği seviye direnç ölçümündeki doğruluğun, sıkı durun, trilyonda 10'dan daha düşük bir seviyede olmasını gerekli kılıyor.



Anahtar Kavramlar

Von Klitzing sabiti: 1 Ocak 1990'da uluslararası mutabakatla değeri 25812,807 Ω olarak kabul edilmiş bir fiziksel sabittir.

Süperiletken: Üzerinden kayıpsız bir şekilde akım akabilen malzeme. En bilineni Niobium'dur. -260 °C'nin altında süperiletken olur.

Kapasitans: Herhangi bir yapının elektrik yükü depolama kapasitesidir.



George Simon Ohm

Peki neden bu kadar hassas ölçümlere gerek duyuyoruz? Neden yurtdışında bazı firmaların laboratuvarları tek bir direnç kalibrasyonu için ülkemizde rahatlıkla ikinci el araba alınabilecek bir parayı ödemeyi kabul ediyorlar. Bunun birden çok nedeni var. En önemlisi yüksek teknolojik ürünlerin gitgide hayatımızda daha fazla yer tutmaya başlaması. Bunun yanında kaliteli ürün üretmenin firmalar için çok daha hayati önem arz etmeye başlaması. Mesela Hubble Uzay teleskobunu uzaya fırlattınız ama teleskobun içindeki elektronik devrelerdeki dirençlerin değerlerini gerekli doğrulukta belirlemediniz. Sonuç, teleskop ile bir daha iletişim kuramamanız olabilir. Ya da dirençlerin bir yıl sonraki değerlerini iyi tahmin edemediniz. Sonuç aynı. Hatalı ölçmenin sonucu, füzelerin hedeflerini istenilen kesinlikle vuramamalarından, uydular ile haberleşememeye, televizyon yayınlarının karlı görünmesine kadar çeşitli alanlarda ve ölçeklerde karşımıza çıkabilir. Yalnızca bununla da bitmez. Örneğin sıcaklık ölçümünde kullanılan en hassas termometreler saf platinden yapılmış direnç termometrelerdir. Sıcaklık değiştiğinde değeri değişen dirençler bize sıcaklık ile ilgili bilgi verir. Endüstriyel süreçlerde sıcaklığın hatalı ölçülmesinin binlerce olumsuz sonucu olabilir. Örneğin arabamızın yapıldığı çelik doğru sıcaklıkta dökülmediğinden, sandığınız kadar sağlam olmayabilir. Ya da jet motorlarının parçaları üretilemeyebilir, kimyasal reaksiyonlar istenen verimde gerçekleşmeyebilir vb.

Bir düşünün, sırf direnci doğru ölçüyoruz diye sıcaklığı doğru ölçebiliyoruz. Size tüm bunları anlatmadan başta bunu söyleseydim, bu dediğimi çok tuhaf bulacaktınız. Mesela şunu da söyleyebiliriz, sıcaklığı doğru ölçemeseydik, ulusal uzunluk standardını istediğimiz kadar hassas ölçemezdik, çünkü standardın sıcaklığını gereken kararlılıkta tutamazdık. Buradan şu tuhaf ama gerçek bir başka sonuca varabiliriz: Direnci doğru ölçemezsek uzunluğu da doğru ölçemeyiz.

Peki George Simon Ohm'un 1826'da bulduğu elektriksel direnci daha hassas ve doğru ölçmek için bugüne kadar yaklaşık 180 yıldır neler yapıldı?

1868 yılında 1 Ohm, 1 m uzunluğunda 1 mm² kesit alanı olan civa sütununun gösterdiği direnç olarak tanımlandı. 1881 yılına gelindiğinde çeşitli ülkelerde kullanılan 15 değişik direnç birimi vardı. Bunlardan biri 1 km uzunluğunda ve 4 mm çapında demirden yapılmış telgraf telinin direnç tanımıydı ve senelerce direnç prototipi olarak kullanıldı. Direnç, 1884 yılında 106 cm uzunluğunda ve 1 mm² kesit alanı olan civa sütununun buzun



Klaus von Klitzing

erime sıcaklığında gösterdiği direnç olarak yeniden tanımlandı. Tüm bu arayışlar hep tüm dünyada aynı sonucu verecek ve değişmeyecek bir direnç standardının belirlenmesi içindi. 1950'li yıllarda günümüzdeki baş döndürücü teknolojik gelişmenin temeli atılmaya başlandı. 1958 yılında Avustralya Metroloji Enstitüsü'nde Thompson ve Lampard isimli iki bilim insanının çalışmalarının sonucu olarak bir başka elektriksel birim olan kapasitans, milyarda 200-500 hassasiyetle ölçülmeye başladı. Bunun ardından 1960'lı yıllarda direnç değeri bu kapasitans değeri kullanılarak elde edilmeye başlandı. O zaman elde edilen hassasiyet milyarda 500 civarında idi. Unutmayalım ki o zamanki bu ölçüm hassasiyetleri ABD ile Sovyetler Birliği arasındaki uzay yarışının başlaması için yeterliydi.

Gelelim 1980'è...1980 yılının 4 Şubat'ını 5 Şubat'a bağlayan gece Almanya'da bulunan Max Planck Enstitüsü'ndeki laboratuvarında çalışan Klaus von Klitzing isimli Alman araştırmacı o ak-

Ülkemizde ölçme bilimi üzerinde araştırmaların yapıldığı ve en hassas ölçüm sistemlerinin bulunduğu kurum TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsüdür. Ülkemizde en hassas ve doğru direnç ölçümlerinin yapıldığı, Quantum Hall direnç sisteminin bulunduğu laboratuvarlar bu enstitüde yer almaktadır.



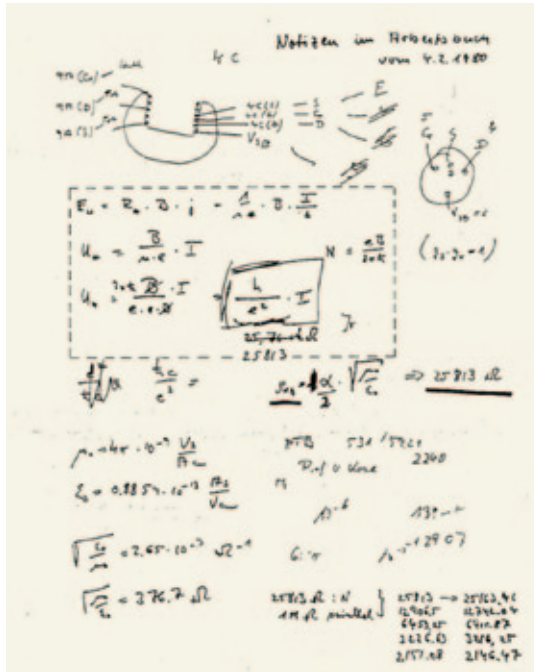
Enis Turhan, 1975 yılında Bandırma'da doğdu. Lise öğrenimini Bursa Fen Lisesi'nde, üniversite öğrenimini İTÜ Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünde tamamladı. 1997 yılından beri TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde Uzman Araştırmacı olarak çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.

şam uzun süredir yaptığı bir deneyin sonucunu anlamaya çalışıyordu. Yaptığı hesaplar sonucunda o akşam defterine şekilde görülen formülü yazdı ve bu formül kendisine 1985 yılının Nobel Fizik Ödülü'nü kazandırdı.

Klaus von Klitzing 5 yıldır bir problem üzerinde çalışıyordu. Uzun süren çalışmalarının sonucunda elde ettiği sonuç onu çok heyecanlandırmıştı. Yaptığı çalışmanın sonuçlarını yayınlamak için 2 ay sonra bilimsel bir dergiye (*Physical Review Letters*) başvuru yaptı ve yeni bir direnç standardının bulunuşu ile ilgili bir makale gönderdi. Ne oldu dersiniz? Düşündüğünüz gibi makale coşku ile karşılanmadı. Makaleyi değerlendiren hakemler onun gibi heyecanlanmadı. Sonuçta dergi hakemleri makaleyi yayınlamaya değer görmedi!

21. yüzyılda tüm dünyada uluslararası direnç standardı olarak kabul edilen ve kullanılan bu buluşu direnç standardı olarak kullanılmayacağı gerekçesi ile reddedildi. Von Klitzing makalede birkaç değişiklik yapıp direnç standardı vurgusunu kaldırınca, aynı dergi de o zamana kadar yayınladığı yayınlar içerisinde çok önemli bir yere sahip olacağını bilmeden makaleyi yayınladı.

O gün bugündür Von Klitzing'in bulunduğu bu etkiye Quantum Hall Etkisi, direnç standardına da Quantum Hall direnci deniyor. Quantum Hall direnci 1990 yılında tıpkı Planck sabiti ya da Avogadro sabiti gibi diğer sabitler arasında yerini alıyor ve $R_{K,90}$ von Klitzing sabiti olarak isimlendiriliyor.



Von Klitzing'in Nobel Ödüllü hesabı (kesikli çizgilerle belirtilmiş bölüm)

Gelelim işin biraz teknik ve de karışık kısmına. Bugün her bilgisayarda, her bir bellek hücresinde milyonlarca adet bulunan transistörler ve yarı iletkenler üzerinde çalışan von Klitzing, bir yarı iletkenin gösterdiği direncin belli ortam şartları sağlandığı takdirde h/e^2 ve bunun tam sayı bölenlerine eşit olduğunu gösterdi. Unutmadan; burada h 'nin Planck sabiti, e 'nin de bir elektron yükü olduğunu belirtelim. Tabii buradaki "belli ortam şartları" o kadar da kolay şartlar değil. Bir kamyonu kaldırmaya rahatlıkla yetecek bir manyetik alan (10 Tesla) ve -270 °C sıcaklık... Von Klitzing'in ilk çalıştığı su soğutmalı ve neredeyse 50.000 kişilik bir şehrin gereksinim duyduğu elektrikle çalışan yüksek manyetik alan üretici uzun süreli deneyler yapmak için uygun değildi. Bu nedenle deneyine devam edebilmek için daha iyi şartlara sahip Almanya'nın Metroloji Enstitüsü'ne (PTB) başvurdu, neyse ki bu sefer reddedilmedi. PTB'deki süperiletken teller kullanılarak çalışan yüksek manyetik alan üretici uzun süreli testler için von Klitzing'in hizmetine sunuldu ve deneyler sonucunda milyonda 1 doğrulukta bir direnç standardı elde edildi. Dünyada 1980-1990 arası yapılan çalışmalar sonucunda Quantum Hall direnci milyarda 10'dan daha düşük bir doğrulukla ölçülmeye başlandı. 1985 yılında da Klaus Von Klitzing Nobel Fizik Ödülü'nü almaya hak kazandı.

Ülkemizde Direnç Ölçümleri

Metroloji ya da ölçme bilimi gün geçtikçe ülkemizde de önem kazanıyor. Bunun nedenleri ülkemizde teknolojinin yalnızca kullanılması değil aynı zamanda üretilmeye başlanması, gelişmiş ülkelere yaptığımız sanayi ürünleri ihracatının artması ve ülkemizde de kaliteli tüketim mallarına olan talebin artması.

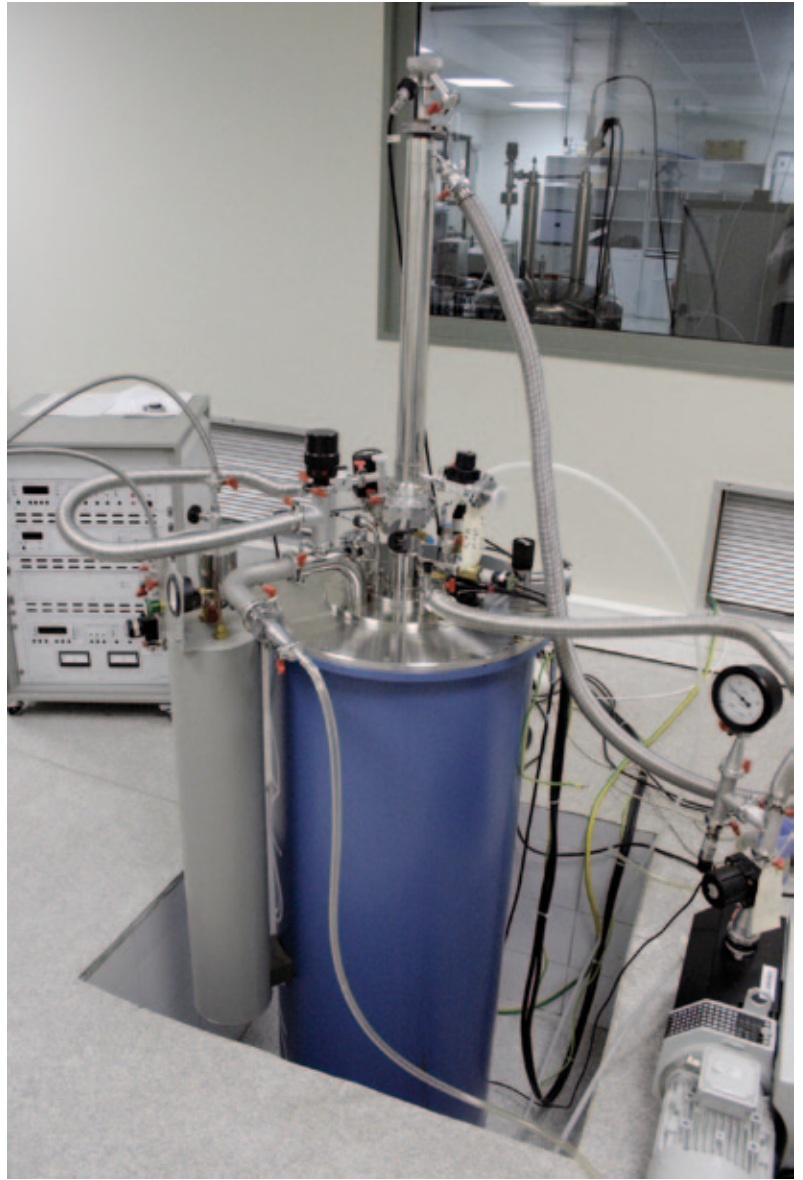
Ülkemizde ölçme bilimi araştırmalarının yapıldığı ve en hassas ölçüm sistemlerinin bulunduğu kurum TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsüdür (UME). Konumuzla bağlantı kuracak olursak ülkemizde en hassas ve doğru direnç ölçümlerinin yapıldığı, Quantum Hall direnç sisteminin bulunduğu laboratuvarlar bu enstitüde yer almaktadır.

Ülkemizdeki Ulusal Metroloji Enstitüsü'nden dünyada her gelişmiş ve gelişmekte olan ülkede bir tane bulunuyor. Bu enstitüler ölçüm konularında ülkelerindeki en hassas ölçümleri yapıyorlar. Örneğin elinde 1 kg'lık bir kütle bulunan bir kişi bu kütleli Türkiye'de ölçtürdükten sonra aldığı sertifikayı Almanya'da kullanabiliyor. Alman Metroloji

Enstitüsü TÜBİTAK ÜME'nin ölçümlerini tanıyor. Bu durum İngiltere, Fransa ya da Rusya için değişmiyor. 1999 yılında TÜBİTAK ÜME ve dünyadaki diğer metroloji enstitüleri (şu anda 74 ülke enstitüsü) "Karşılıklı Tanınma Anlaşması" imzalamıştır. Peki bu enstitüler neden birbirlerine güveniyor? Burada tamamen tarafsız, bilimsel karşılaştırmalar devreye giriyor. Buna bir çeşit sınav diyebiliriz.

Bu sınav nasıl yapılıyor? Şöyle; direnç konusundan örnek verirsek, değeri bilinmeyen bir direnç standardını her enstitü tek tek ölçüyor. Ölçüm sonuçları konusunda birbirleri ile görüşmeleri yasak... Tüm sonuçlar yalnızca bir hakem enstitüye gönderiliyor. Bu hakem enstitü de ölçümler bitir bitmez sonuçları yayınlıyor. Sonuçlarda enstitülerin sonuçlarının ortalama değerden ne kadar saptığı belirleniyor. Bu sonuçları isteyen herkes internetten görebiliyor. Aşağıdaki grafikte, Avrupadaki metroloji enstitülerinin katıldığı bir karşılaştırmanın sonuçları görülüyor. Bu enstitüler 100 Ohm değerinde bir standart direnci ölçtüler. Sol sütundaki sayılar ölçüm sonucunun ortalamadan milyarda ne kadar saptığını gösteriyor. Örneğin bir ülke enstitüsünün sonucu 200 çıkmışsa bu, enstitünün ölçüm sonucunun ortalama değerden milyarda 200 saptığını gösteriyor. Burada ortalamaya ne kadar yakın olduğunuz ve bunu yaparken ne kadar az hata yapmış olabileceğiniz önemli. Buna belirsizlik deniyor ya da daha anlaşılır tabiri ile kesinlik. Kendinden eminliğin bir ölçüsü. Ölçüm sonucu küçük siyah karelerle, kesinlik de uzun dikey çizgilerle gösterilmiş. Grafiğin alt satırındaki kısaltmalar katılımcı enstitülerin kısaltılmış isimleri. Karşılaştırma yapmanız için söyleyelim; SP İsveç, DFM Danimarka, OMH Macaristan, VNIIM Rusya, EIM Yunanistan, NPL İngiltere, PTB Almanya metroloji enstitülerinin kısaltmaları. Kırmızı ile belirtilen nokta da ÜME'nin yani Türkiye'nin Ulusal Metroloji Enstitüsü'nün ölçüm sonucu.

Bu grafiği ülkemizde yapılan ölçümlerin doğruluğu ve güvenilirliği ile ilgili bilgi sahibi olma-

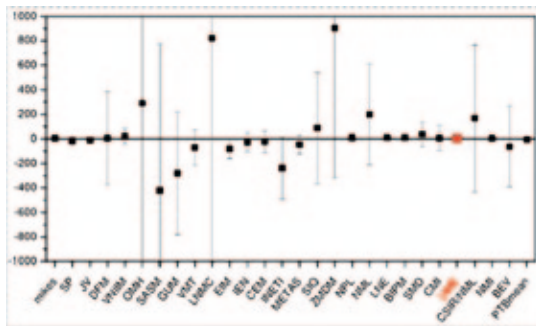


Ulusal Metroloji Enstitüsü

nız için veriyoruz. ÜME her ölçüm biriminde Avrupadaki metroloji enstitüleri içerisinde en iyilerden biri olmak için çalışıyor. Şunu rahatlıkla söyleyebiliriz ki ÜME bu yolda ciddi yol almıştır. Quantum Hall Direnci'nden elde ettiği değeri daha alt seviyedeki dirençlere aktarmak için birçok ölçüm cihazı ve dirençten oluşan bir sistem kuran ÜME, sürekli alınan ölçümlerle direnç ölçüm doğruluğunu iyileştirmekte ve muhafaza etmektedir.

Bu yazıyı okuduktan sonra hayatımıza aynen devam edelim ama bu ülkede birilerinin bizim yaşam konforumuz için milyarda bir, trilyonda bir doğrulukla ölçüm almaya çalıştığını ve bu amaçla bir ömür geçirdiklerini de bilelim...

Ulusal Metroloji Enstitüsü'ndeki Quantum Hall direnç sistemi



2004 yılında yapılan 100 ohm karşılaştırması

Kaynaklar

Klitzing, K. V., Dorda, G., Pepper, M., *Physical Review Letters*, 45, 494 (1980)
Landwehr, G., "The Discovery of the Quantum Hall

Effect", *Metrologia*, 22, 118-127 (1986)
<http://www.bipm.org/en/cipm-mra/>