

10⁻⁴ Ω-10¹⁵ Ω ARALIĞINDA BİRİNCİL SEVİYE DİRENÇ ÖLÇÜMLERİNİN UME'DE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Denizhan ATEŞALP, Handan SAKARYA, Rabia INCE
TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü

ÖZET

UME Direnç laboratuvarında, dc direnç ölçümleri 10⁻⁴ Ω - 10⁷ Ω bölgesi için, yarı-otomatik Guildline 9975 akım karşılaştırma direnç köprüsü ve yeni kurulmuş olan Measurement International 6010B otomatik direnç köprüsü kullanılmaktadır. Otomatik sistemin kurulmasıyla ve grup ölçümlerine başlanması ile ölçüm belirsizliği düşürülmüş, 1Ω için 0.05 ppm'in altında A tipi belirsizlik elde edilmiştir. İzlenebilirliğin sağlanması amacıyla, uluslararası alanda BIPM ile karşılaştırılmaya girilmiştir. 10⁸ Ω - 10¹⁵ Ω aralığı için dc direnç ölçümleri, yeni kurulmuş Wheatstone köprüsü ve Measurement International 6000A otomatik direnç köprüleri ile gerçekleştirilmektedir. Daha önceden teraohmmetre kullanılarak bu aralıkta gerçekleştirilen direnç ölçümlerinde elde edilen standart sapma, oluşturulan yeni sistemlerle oldukça düşürülmüştür. Wheatstone köprüsünün otomatik olarak kontrol edilebilmesi için Lab Windows ile bir program yazılmıştır. Kurulmuş olan yeni sistemler kullanılarak ve geliştirilerek ölçüm belirsizliğinin düşürülmesi ve ölçüm aralığının genişletilmesi çalışmaları devam etmektedir.

1. GİRİŞ

Elektriksel direnç birimi olan OHM, 1787 - 1854 yılları arasında yaşamış olan Alman fizikçi Georg Simon Ohm'un adı ile anılmaktadır. DC direncin SI birimleri cinsinden tanımı, mekaniksel birimlere dayanmaktadır [1].

$$R = V / A$$

Burada;

R = Ohm cinsinden direnç değeri

V = W / A

A = SI birimi Amper

W = watt (Güç için türetilmiş SI birimi)

Watt, metre, kilogram ve saniye'den türetilmiş olan Joule ve Newton birimlerinden türetilmiştir;

Güç = enerji / zaman (J / s)

Enerji = kuvvet x yol (N x m)

N = kg . m . s⁻²

Buradan direnç birimi;

R = kg . m² . s⁻³ . A⁻²

olarak bulunmaktadır.

Ancak günümüzde direnç birimi, birincil seviye laboratuvarlar tarafından, bir katı hal cihazı olan Quantum Hall standardı kullanılarak muhafaza edilmektedir. Klaus von Klitzing'in 1980 yılında, Almanya'daki CPEM konferansında Quantum Hall etkisini ortaya atmasından sonra metrologlar bu etkiyi, direnç standardı olarak geliştirmek için çalışmalara başlamışlardır. Hall direnci R_H şu şekilde tanımlanmaktadır;

$$R_H(i) = R_K / i$$

Burada R_K von Klitzing sabiti, i ise bir tamsayıdır. Von Klitzing sabiti R_K , Hall potansiyel farkının, Quantum Hall etkisindeki $i = 1$ platosuna karşılık gelen akım değerine oranı olarak tanımlanmıştır. 1 Ocak 1990 tarihinden beri R_K değeri, Ohm biriminin temsilcisi olarak kullanılmakta, R_{K-90} ile ifade edilmekte ve 1×10^{-8} 'den daha düşük bir belirsizlikle elde edilmektedir. R_K değeri, 25812.807 Ω olarak kabul edilmiştir [2].

Günümüzde ohm değerinin izlenebilirliği, Quantum Hall sistemine sahip az sayıdaki ulusal metroloji enstitülerinden sağlanmaktadır. Bu enstitülerdeki sistemler, BIPM'in taşınabilir Quantum Hall sistemi kullanılmak sureti ile kendi aralarında karşılaştırılmaktadır.

2. DÜŞÜK DEĞERLİ DİRENÇ ÖLÇÜM SİSTEMLERİ

UME dc direnç laboratuvarında 1Ω ve $10^4 \Omega$ değerleri sabit noktalar olarak muhafaza edilmektedir. İzlenebilirlik, BIPM ya da PTB üzerinden 1Ω ve $10^4 \Omega$ değerindeki standart dirençler ile sağlanmaktadır. BIPM ya da PTB'de Quantum Hall standardı ile karşılaştırılan bu dirençler daha sonra, laboratuvardaki referans standartlar ile karşılaştırılmakta ve standartların izlenebilirliği bu şekilde sağlanmaktadır.

$10^{-4} \Omega$ - $10^7 \Omega$ bölgesindeki dirençlerin ölçümleri, yarı otomatik ve otomatik ölçüm sistemleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Her iki sistemde de dirençler üzerine istenilen akım değerleri uygulanmakta ve köprü denge konumundayken, iki direncin oranı tespit edilmektedir. Yarı otomatik sistemde köprüyü dengeye getirmek için ayarlamalar elle gerçekleştirilmektedir. Oysa otomatik sistemde denge konumu otomatik olarak sağlanmakta, kullanılan standardın değeri belirtilmişse, doğrudan bilinmeyen direncin değeri hesaplanabilmektedir. Otomatik sistemin kurulması ile laboratuvarın ölçüm belirsizliği düşürülmüş, 1Ω için yapılan ölçümlerde standart sapma 0.05 ppm'in altında elde edilmiştir.

MI 6010B otomatik direnç köprüsüne dirençler, iki tarayıcı (scanner) yardımı ile bağlanmışlardır. Bu tarayıcılar, düşük ısı röle tarayıcılarıdır ve bu tarayıcıların ısıl gerilim etkileri, yarıiletken tarayıcılardan daha düşük olduğu için tercih edilmişlerdir. Bu tarayıcılara aynı anda 40

adet standart direnç dört uçlu olarak bağlanabilmekte ve gerekirse bu dirençlerin hepsi birbiri ile karşılaştırılabilmektedir. Pek çok kolaylık sağlayan bu durum, ilk olarak uzun süreli ölçümlerin, mesai saatleri dışında gerçekleştirilebilmesini ve gün boyunca laboratuvarında meydana gelebilecek sıcaklık değişimlerinden etkilenmemesini sağlamaktadır. Ayrıca grup ölçümü sırasında dirençler birbiri ile karşılaştırılabilmekte ve bu işlem için direnç bağlantılarının tekrar tekrar yapılması gerekmemektedir. Bunların yanı sıra en önemli avantajı, vakit kaybını en aza indiriyor olmasıdır.

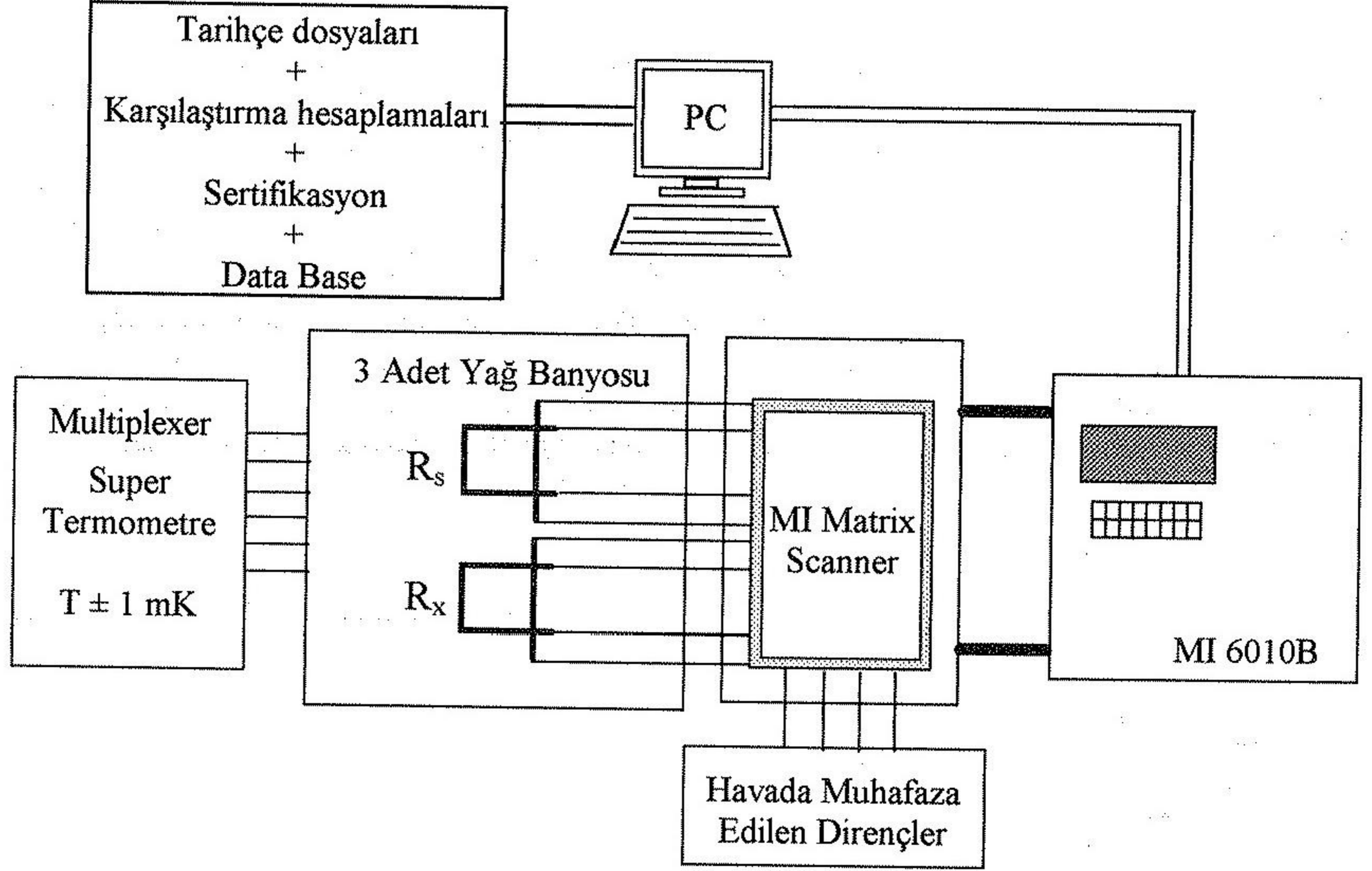
Otomatik direnç köprüsü kullanılarak $10^{-3}\Omega$ - $10^4\Omega$ aralığındaki standart direnç ölçümlerini gerçekleştirmek mümkündür. $10^4\Omega$ 'un üzerindeki ölçümlerde ya yarı otomatik köprü kullanılmakta, ya da aşağıda bahsedilecek olan otomatik yüksek direnç köprüsü kullanılmaktadır. Düşük değerli otomatik direnç köprüsünde tek bir direnç değeri için istendiği taktirde 1 milyar ölçüm gerçekleştirebilmektedir. Yüksek sayıda ölçüm yapmak bize daha düşük standart sapma getirecektir. Ayrıca direnç üzerine akım uygulandığında direnç değerinin kararlı hale gelmesini sağlamak için yapılan ilk ölçümlerin (istenilen sayıda) istatistiksel hesaplamalar dışında bırakılması mümkündür. Bu köprü ile karşılaştırılan dirençlerin nominal değerlerinin oranı 0 ile 10 arasında olabilir.

UME dc direnç laboratuvarında 1Ω değeri, altılı bir grup olarak muhafaza edilmekte ve her hafta grup değerleri tespit edilmektedir. Grup değerinin hesaplanmasında kullanılan dirençlerden biri veya bir kaçı, her sene Quantum Hall standardı ile karşılaştırılmak üzere BIPM'e ya da PTB'ye gönderilmekte ve yeni değeri ile gruba yeniden dahil edilmektedir. Bu şekilde grup değeri yeniden tespit edilmekte ve 1Ω değeri laboratuvarında en iyi şekilde muhafaza edilmektedir. Grup ortalaması ile direnç değerlerinin tespit edilmesi, direnç değerlerinin tek tek ölçülmesinden çok daha düşük belirsizlik sağlamaktadır. 1Ω direnç grubunun değeri tespit edildikten sonra bu değer, grubun elemanı olan diğer dirençlerin değerlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Değeri çok iyi bir doğrulukla tespit edilen 1Ω dirençler kullanılarak izlenebilirlik, karşılaştırma yöntemi ile diğer dirençlere aktarılmaktadır.

Değerleri grup ortalaması yöntemi ile tespit edilen iki adet 1Ω değerinde direnç standardı kullanılarak, BIPM ile karşılaştırmaya girilmiştir. Karşılaştırma sonucunda BIPM'in ölçtüğü değer ile UME'de ölçülen değer arasında 0.3 ppm fark çıkmıştır. UME DC Direnç laboratuvarında, 1Ω grup ölçümlerinde standart sapma 0.05 ppm'den düşük çıkmasına rağmen, referans standart olarak kullanılan taşınabilir direncin belirsizliği 0.5 ppm'dir. Bu durumda, UME'nin kendi direnci için verdiği belirsizlik, BIPM ile UME ölçümleri arasındaki farkı kapsamaktadır.

UME DC direnç laboratuvarında değeri $10^7\Omega$ 'a kadar olan standart dirençler yağ banyolarında muhafaza edilmektedir. Bunun nedeni, dirençlerin laboratuvarında meydana gelebilecek olan sıcaklık değişimlerinden etkilenmelerini engellemektir. Standart dirençlerin değerleri, sahip oldukları sıcaklık katsayısının değerine göre farklılık gösterir. Standart dirençleri 0.05 ppm hassasiyet ile ölçtüğümüzü söyleyebilmemiz için, yağ banyolarının sıcaklıklarını da birkaç mK hassasiyetle biliyor olmamız gerekir. Bu amaçla, laboratuvarında bulunan üç adet yağ banyosunun sıcaklık değişimleri, termistörler ve supertermometreler kullanılarak izlenmektedir. Her bir yağ banyosunun içinde, 6 ya da 9 noktada termistör bulunmaktadır. Bu termistörler tarayıcılara bağlıdır ve supertermometreler kullanılarak ölçülmektedir. Bu şekilde yağ banyolarının içindeki sıcaklık değişimi hem noktasal olarak ve hem de profil olarak ölçülmektedir. Yapılan ölçümler sonucunda sıcaklığın noktasal olarak 1mK ve profil olarak da 3.5 mK değiştiği tespit edilmiştir [3].

Düşük değerli direnç ölçüm sistemini ve yağ banyolarının sıcaklık değişimlerini izlemek için kullanılan sistemler, Şekil 1'de gösterilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi, direnç ölçümlerine ait veriler, bir data base içerisinde saklanmakta, her türlü hesaplama ve sertifikasyon otomatik olarak gerçekleştirilmektedir.



Şekil 1. Düşük değerli direnç ölçüm sistemi

2. YÜKSEK DEĞERLİ DİRENÇ ÖLÇÜM SİSTEMLERİ

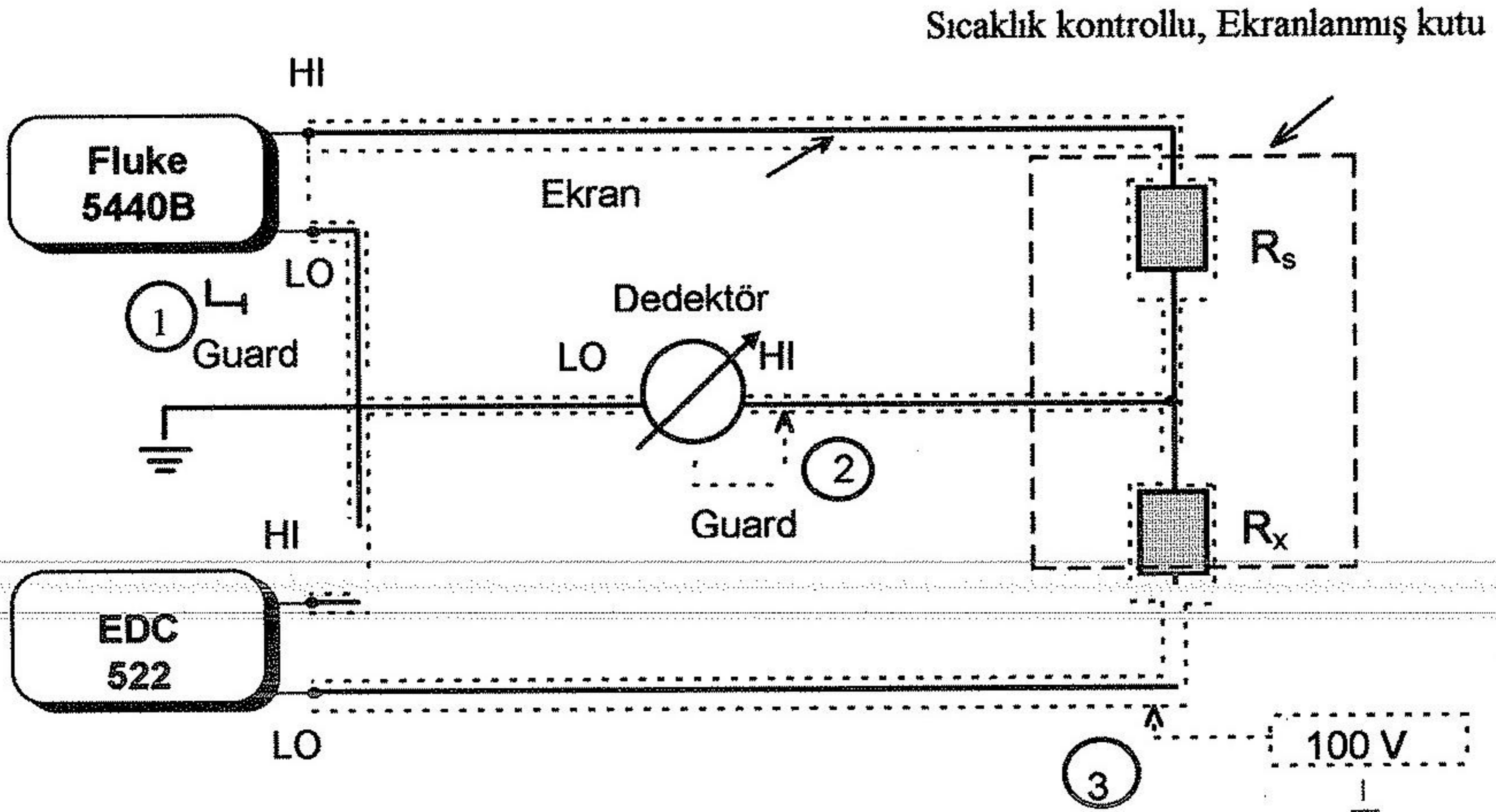
UME DC direnç laboratuvarında $10^4\Omega$ 'un üzerindeki standart direnç ölçümlerinde MI 6000A otomatik yüksek değerli direnç köprüsü ve $10^9\Omega$ 'un üzerindeki ölçümler için laboratuvarda kurulmuş olan Wheatstone köprüsü kullanılmaktadır. Otomatik yüksek değerli direnç köprüsünün ölçüm aralığı $10^2 - 10^9 \Omega$ olup, kurulan Wheatstone köprüsü $10^8\Omega - 10^{15}\Omega$ aralığında kullanılabilir. MI 6000A köprüsünün izlenebilirliği, düşük değerli direnç standartları üzerinden sağlanmaktadır. $10^4\Omega$ değeri, düşük değerli ölçüm sistemlerini yüksek

değerli ölçüm sistemlerine bağlamak için kullanılmaktadır. Wheatstone köprüsünün izlenebilirliği de $10^9 \Omega$ üzerinden sağlanmaktadır.

Yüksek değerli direnç kalibrasyonlarında bu iki sistem kurulmadan önce Teraohmmetre kullanılmaktaydı. Ancak teraohmmetre, doğrudan gerilim uygulayıp, oluşan akımı ölçmekte ve bir mikro işlemci yardımı ile direnç değerini hesaplamaktadır, iki direnci karşılaştırmak mümkün olmamaktadır. Düşük ve yüksek değerli direnç ölçümlerini birbirine bağlamak açısından uygun olmadığı gibi, belirsizliği ve elde edilen standart sapma da, diğer iki sistemle karşılaştırıldığında oldukça yüksektir.

Laboratuvarda, yüksek değerli direnç ölçümlerinde kullanılan sistemlerden biri olan MI 6000A köprüsü ile nominal değerlerinin oranı 1000/1 olan dirençleri karşılaştırmak mümkündür. MI 6000A köprüsünde de, MI 6010B'de olduğu gibi, iki adet tarayıcı bağlanmak sureti ile 40 adet direnç birbiri ile karşılaştırılabilmektedir. Köprü tamamen bilgisayar kontrollü çalışmakta ve gerilim kaynağı olarak 10 V'luk bir kaynak ve dedektör olarak da bir DVM kullanılmaktadır. Köprünün çalışma prensibi, binary (ikili) gerilim bölücü prensibine dayanmaktadır.

$10^9 \Omega$ 'un üzerindeki direnç standartlarının ölçümleri için kurulan Wheatstone köprüsü, iki adet gerilim kaynağı, bir dedektör ve değeri bilinen bir standart direnç yardımı ile, değeri bilinmeyen direncin değerini tespit etmekte kullanılmaktadır. Köprüye ait devre şeması şekil 2'de verilmiştir. Standart dirençler, sıcaklık kontrollü kabinin içinde muhafaza edilmektedirler.



Şekil 2. Yüksek değerli dirençlerin karşılaştırılmasında kullanılan Wheatstone köprüsü

Köprü, $10^{11}\Omega$ değerine kadar gerilim dedekte edilerek, daha yüksek değerler için ise akım dedekte edilerek kontrol edilmektedir. Düşük değerlerde gerilim dedekte edilmesinin nedeni, gerilim ölçme doğruluğunun bu bölge için akım ölçme doğruluğundan daha yüksek olmasıdır. Gerilimin dedekte edildiği durumlarda dedektör olarak HP 3458A multimetre, akımın dedekte edildiği durumlarda ise Keithley 617 Elektrometre kullanılmıştır. Burada kullanılan iki adet gerilim kaynağı, kararlılıkları çok iyi olan kalibratörlerdir. Bu kalibratörlerden, karşılaştırılan dirençlerin değerlerine uygun gerilim değerleri uygulanmakta ve dedektörden sistemin denge durumunda olup olmadığı kontrol edilmektedir. Sistem, gerilim kaynaklarından biri ya da ikisinin ayarlanması sureti ile dengeye getirilir. Denge konumu sağlandıktan sonra bilinmeyen direncin değeri, aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanır [4];

$$\frac{V_s}{V_x} = \frac{R_s}{R_x} \quad 1.$$

Burada;

V_s = Standart direnç üzerine uygulanan gerilim değeri,

V_x = Bilinmeyen direnç üzerine uygulanan gerilim değeri,

R_s = Standart direncin değeri,

R_x = Bilinmeyen direncin değeri.

Kurulan Wheatstone köprüsü sistemi ile elde edilen standart sapma, diğer iki sistem ile karşılaştırılmış ve oldukça düşük bulunmuştur. Standart sapma $10^9\Omega$ için Wheatstone köprüsü ile yaklaşık 1 ppm olarak bulunurken, aynı direnç değeri için MI 6000A 5 ppm, Teraohmmetre ise 20 ppm standart sapma değeri vermektedir. Ayrıca yüksek değerlere çıkıldığında, akım dedekte yönteminin standart sapmasının daha düşük olduğu da tespit edilmiştir [5].

Wheatstone köprüsünün otomatik olarak kontrol edilebilmesi için Lab Windows yazılımı kullanılarak bir program hazırlanmıştır. Hazırlanan program, uygulanan gerilim değerlerinin kararlılıklarının kontrol edilmesinde ve köprünün denge konumunun tespit edilmesinde kullanılmaktadır. Sistemin tamamen otomatik olarak kontrol edilebilmesi için program geliştirilmektedir.

3. SONUÇ

Düşük değerli ve yüksek değerli direnç ölçüm sistemleri kullanılarak, ölçüm belirsizliklerinin düşürülmesi için çalışmalara devam edilmektedir. Bundan sonraki aşamalarda düşük ve yüksek değerli direnç grupları oluşturulacak ve her değer için grup ölçüm yöntemleri geliştirilecektir. Önümüzdeki yıllarda Quantum Hall sisteminin laboratuvarında kurulmasından sonra, birincil seviyede direnç ölçümleri gerçekleştirilecektir. Yüksek direnç ölçümlerinin doğruluklarının kanıtlanabilmesi için $100\text{ M}\Omega$ ve $1\text{ G}\Omega$ değerlerinde NIST ile karşılaştırmaya girilecektir. Ayrıca $10^9\Omega$ 'un üzerinde yüksek değerli direnç standartlarının tasarlanması ve yapılması planlanmaktadır.

4. KAYNAKLAR

1. Calibration, Philosophy in Practice, Fluke, 8-1, 1994
2. Hartland A., Metrologia, 29, 175, 1992
3. Sakarya H., Ince R., VIII. Imeko TC4 International Symposium proceeding, 255, 1996
4. Henderson L.C.A., J. Phys. E: Sci. Instrum. 20, 1987
5. Ince R., Ateşalp D., XIV. Imeko World Congress proceedings, Vol. 4B, 91, 1997