

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HESAPLANABİLİR AC DİRENCİN MODELLENMESİ VE  
UYGULANMASI**

**YÜKSEK LİSANS**

**Elo. ve Hab. Müh. Mehmet ÇINAR**

**Anabilim Dalı: Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği**

**Danışman: Yrd.Doç.Dr. Arif DOLMA**

**KOCAELİ, 2012**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HESAPLANABİLİR AC DİRENCİN MODELLENMESİ VE  
UYGULANMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

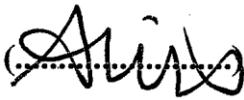
**Elo. ve Hab. Müh. Mehmet ÇINAR**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 04 Ocak 2012**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 28 Mart 2012**

**Tez Danışmanı**

**Yrd.Doç.Dr. Arif DOLMA**



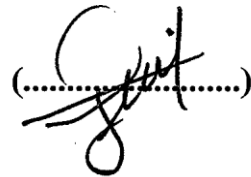
**Üye**

**Yrd.Doç.Dr. Kürşat AYAN**



**Üye**

**Yrd.Doç.Dr. Sibel ÇİMEN**



**KOCAELİ, 2012**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Üretimde kalite kontrolü olarak bilinen sistemin en önemli unsurlarından biri, yapılan ölçmelerin güvenilirliğidir. Ölçme güvenilirliği, kullanılan cihazın kalibrasyonunun yapılması, diğer bir deyişle cihazın göstermesi gereken değerle, gösterdiği değer arasındaki farkın standart bir sistemle belirlenmesi ile sağlanır. Ancak bu sistemi oluşturan cihazlar ile yapılan ölçümlerinde güvenilir olması sağlanmalı, dolayısıyla ölçme işleminde kullanılan cihazların, doğruluğunun daha iyi bir standart kullanılarak ayarlanması veya kalibrasyonunun gerçekleştirilmesi ile sağlanır. Bu şekilde kurulan zincir yardımıyla yapılan her ölçüme, BIPM (Bureau International de Poids et Mesures-Milletlerarası Ölçü ve Ağırlıklar Bürosu) tarafından kabul edilen yedi temel birime bağlanır. Avrupa Metroloji Birliği (EURAMET) AC (Alternatif akım) direnç ölçümlerinde hesaplanabilir AC dirençleri birincil seviye standart olarak kabul etmiştir. Hesaplanabilir AC direnç standartlarının ticari değeri olmadığı için piyasadan temin edilmesi mümkün değildir. Bu sebeple hesaplanabilir AC direnç standartların metroloji enstitüleri tarafından tasarlanması, üretilmesi ve karakterize edilmesi gerekmektedir.

Endüstri ve savunma sanayi alanlarında gerçekleştirilen araştırmalarda gittikçe artan bir ihtiyaç ile daha hassas AC direnç ölçümlerine ihtiyaç duyulmaktadır. AC direnç değerinin hassas bir şekilde ölçülmesi ile bu alanlarda kullanılan empedans ölçüm sistemlerinin kalibrasyonları düşük belirsizlikle gerçekleştirilir.

Bu çalışma, TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) bünyesindeki U.M.E’de (Ulusal Metroloji Enstitüsü) gerçekleştirilmiştir. TÜBİTAK U.M.E, ülkemizde yapılan ölçümleri güvence altına alan ve bu ölçümlerin uluslararası sisteme entegrasyonunu sağlayan bir kurumdur. Bu tez çalışması ile, Türkiye’de AC direnç ölçümleri konusundaki izlenebilirlik sorununun giderilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla 1 k $\Omega$  değerinde “Hesaplanabilir AC Direnç Standardı” 5 MHz’e kadar tasarlanmış, modellenmiş ve üretilmiştir. Tasarlanan hesaplanabilir AC direnç standardının kararlılığı 1 ppm/gün olarak elde edilmiştir. 1 k $\Omega$  nominal değerinde yapılan bu çalışmanın, farklı nominal değerlerde standartların üretilmesine örnek bir çalışma olması beklenmektedir.

Bu çalışma ile, ülkemizin çok düşük belirsizlik ve uluslararası kabul görmüş bir yöntemle ölçüm yapabilecek seviyeye gelmesi, uluslararası alanda rekabet etmesine katkıda bulunması, savunma sanayi ve endüstriyel firmaların yurtdışına bağımlılıklarının giderilmesi amaçlanmaktadır.

Tezin her aşamasında bana desteğini eksik etmeyen tez danışmanım, çok değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Arif DOLMA’ya, teorik ve pratik olarak desteklerini esirgemeyen U.M.E, DC Direnç Laboratuvarı çalışanlarından Yakup GÜLMEZ, Handan SAKARYA, Murat CELEP ve Ömer ERKAN’a teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	iii
TABLolar DİZİNİ .....	v
SEMBOLLER .....	vi
ÖZET .....	viii
İNGİLİZCE ÖZET .....	ix
1. GİRİŞ .....	1
2. GENEL TANIM VE KAVRAMLAR .....	4
2.1. Direncin Tanımı .....	4
2.2. Ohm Biriminin Elde Edilmesi .....	5
2.3. Kuantum-Hall Etkisi .....	5
2.4. Sıcaklık Katsayısı .....	8
2.5. Isıl İşlem .....	9
2.6. Termoelektrik E.M.K (Peltier etkisi) .....	11
2.6.1. Akımı ters çevirme metodu .....	12
2.6.2. Offset dengeleme metodu .....	14
3. ÖLÇÜMLERDE KULLANILAN BAĞLANTI TEKNİKLERİ .....	16
3.1. 4-Uçlu Ölçüm Tekniği .....	16
3.2. 4-Uçlu + Bağlantı Ekranları .....	17
4. AC DİRENÇ VE İZLENEBİLİRLİK .....	19
4.1. AC Direnç .....	19
4.2. İzlenebilirlik .....	21
4.3. Hesaplanabilir AC Direnç Standardı .....	23
4.3.1. Koaksiyel Tip Hesaplanabilir AC Direnç .....	23
4.3.2. Bifilar Tip Hesaplanabilir AC Direnç .....	28
4.3.3. Quadrifilar Tip Hesaplanabilir AC Direnç .....	32
5. HESAPLANABİLİR AC DİRENCİN MODELLENMESİ .....	34
5.1. Empedansa Etki Eden Faktörlerin Matematiksel İfadeleri .....	36
5.2. Empedansın Gerçel Kısmının Frekansa Bağlı Olarak Hesaplanması .....	38
5.3. Hesaplanabilir AC Direnç Değerine Etki Eden Diğer Faktörler .....	41
5.3.1. Deri etkisi (Skin-Effect) .....	41
5.3.2. Girdap akım kayıpları (Eddy-Current) .....	41
5.4. Toplam Bağlı Direnç Değişimi ve Sanal Empedans .....	42
6. HESAPLANABİLİR AC DİRENCİN MATEMATİKSEL MODELLEME ÇALIŞMALARI .....	45
6.1. Birinci Tasarım .....	45
6.2. İkinci Tasarım .....	54
6.3. Üçüncü Tasarım .....	56
7. HESAPLANABİLİR AC DİRENÇ STANDARINDA ÜRETİM VE ÖLÇÜM .....	64
7.1. Hesaplanabilir AC Direnç Standardının Üretilmesi .....	64
7.2. Zaman Sabitinin Belirlenmesi .....	74
7.3. Frekans Bağımlılığı Ölçümleri .....	75
8. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	78
KAYNAKLAR .....	80
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER .....	82
ÖZGEÇMİŞ .....	83

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Basit devre .....	4
Şekil 2.2: GaAs/AlGaAs malzeme üzerinde Kuantum-Hall etkisi ile elde edilmiş sabit Hall direnci .....	6
Şekil 2.3: Kuantum-Hall sisteminden görünüm .....	7
Şekil 2.4: Düşük sıcaklık direnç karşılaştırma köprüsü (4 K).....	7
Şekil 2.5: DC direnç çalışma standartları .....	7
Şekil 2.6: MI6010B otomatik DC direnç karşılaştırma köprüsü .....	8
Şekil 2.7: İsaohm'un direnç-sıcaklık değişim eğrisi .....	9
Şekil 2.8: Örnek bir standart direncin yıllık kayması.....	10
Şekil 2.9: Termal E.M.K değerinin akımı ters çevirme yöntemi ile ortadan kaldırılması .....	13
Şekil 2.10: Offset dengeleme metodu.....	15
Şekil 3.1: Dört uçlu direnç ölçüm yöntemi .....	16
Şekil 3.2: Ekranlanmış dört uçlu bağlantı .....	17
Şekil 3.3: Dört uç çift bağlantı .....	18
Şekil 4.1: İki uçlu AC direnç eşdeğeri .....	19
Şekil 4.2: Dört uçlu direncin eşdeğer devresi .....	20
Şekil 4.3: AC direnç izlenebilirlik zinciri .....	22
Şekil 4.4: Kapasitans izlenebilirlik zinciri .....	23
Şekil 4.5: Koaksiyel tip iletim hattı modeli.....	24
Şekil 4.6: İki konektör düzlemlili hesaplanabilir koaksiyel AC direnç [8] .....	24
Şekil 4.7: Tek konektör düzlemlili hesaplanabilir koaksiyel AC direnç [8] .....	25
Şekil 4.8: Direnç telinin eksenden sapmalarının direnç değeri üzerindeki değişimi .....	28
Şekil 4.9: Bifilar tip iletim hattı eşdeğer devresi .....	29
Şekil 4.10: Bifilar tip iletim hattı .....	30
Şekil 4.11: Bifilar tip 4 uçlu direncin kurşun topraklı bir metal gövde içinde eşdeğer devresi.....	31
Şekil 4.12: Bifilar tip hesaplanabilir AC direnç mekaniği.....	32
Şekil 4.13: Quadrifilar tip iletim hattı.....	32
Şekil 4.14: Quadrifilar tip hesaplanabilir AC direncin mekaniği .....	33
Şekil 5.1: Kayıp iletkenlik etkileri eşdeğer devresi .....	37
Şekil 6.1: Ekranla ve teller arasında oluşan kayıp iletkenliklerin frekansla değişimine ilişkin eğriler (5kHz'e kadar) .....	47
Şekil 6.2: $\Delta G$ 'nin 1.,2., ve 3. terimleri frekansla değişim eğrileri .....	48
Şekil 6.3: Girdap akımları, deri etkisi, $\Delta G$ ve toplam bağıl direnç değişiminin frekansa bağlı değişim eğrileri (5 kHz'e kadar) .....	49
Şekil 6.4: Ekranla ve teller arasında oluşan kayıp iletkenliklerin frekansla değişimine ilişkin eğriler (5MHz'e kadar) .....	50
Şekil 6.5: $\Delta G$ 'nin 1.,2., ve 3. terimleri frekansla değişim eğrileri .....	51
Şekil 6.6: Girdap akımları, deri etkisi, $\Delta G$ ve toplam bağıl direnç değişiminin frekansa bağlı değişim eğrileri (5 MHz'e kadar).....	52
Şekil 6.7: Girdap akımları, deri etkisi, $\Delta G$ ve toplam bağıl direnç değişiminin frekansa bağlı değişim eğrileri (Elektriksel ekran Kalınlığı= 2 cm ve 5 MHz'e kadar) .....	55

Şekil 6.8: Ekranla ve teller arasında oluşan kayıp iletkenliklerin frekansla değişimine ilişkin eğriler (Direnç telleri arasındaki mesafe = 2 mm ve 5 kHz'e kadar) .....	57
Şekil 6.9: $\Delta G$ 'nin 1.,2., ve 3. terimleri frekansla değişim eğrileri .....	58
Şekil 6.10: Girdap akımları, deri etkisi, $\Delta G$ ve toplam bağıl direnç değişiminin frekansa bağlı değişim eğrileri .....	59
Şekil 6.11: Ekranla ve teller arasında oluşan kayıp iletkenliklerin frekansla değişimine ilişkin eğriler .....	60
Şekil 6.12: $\Delta G$ 'nin 1.,2., ve 3. terimleri frekansla değişim eğrileri .....	61
Şekil 6.13: Girdap akımları, deri etkisi, $\Delta G$ ve toplam bağıl direnç değişiminin frekansa bağlı değişim eğrileri .....	62
Şekil 7.1: İsaohm direnç telleri.....	64
Şekil 7.2: Kimyasal işlemlerde kullanılan yağ temizleyici sprey, aggressive flux, kromik asit ve sülfirik asit .....	65
Şekil 7.3: Nokta kaynağı sistemi .....	66
Şekil 7.4: Fırın.....	67
Şekil 7.5: Ahşap düzenek .....	68
Şekil 7.6: Ahşap düzeneğin izolasyonlu dolap içerisine yerleştirilmesi .....	68
Şekil 7.7: Otomatik direnç ölçüm köprüsünde ölçülen direnç değeri verileri .....	69
Şekil 7.8: 1 numaralı direnç telinin 15 günlük kararlılığı (standart sapma 0,14 ppm) .....	69
Şekil 7.9: 2 numaralı direnç telinin 15 günlük kararlılığı (standart sapma 2,5 ppm) .....	70
Şekil 7.10: 3 numaralı direnç telinin 15 günlük kararlılığı (standart sapma 700 ppm) .....	70
Şekil 7.11: 4 numaralı direnç telinin 15 günlük kararlılığı (standart sapma 0,27 ppm) .....	70
Şekil 7.12: İzopropil alkol banyosu .....	72
Şekil 7.13: Hesaplanabilir AC direnç standardının teknik çizimi .....	72
Şekil 7.14: Geliştirilmiş hesaplanabilir AC direnç standardı.....	73
Şekil 7.15: LCR Metre ile R ve X'in sıfır hatası ölçümleri .....	74
Şekil 7.16: Empedans analizör ile AC direnç ölçümlerinin yapılması .....	75
Şekil 7.17: 1 kHz-5 kHz frekans aralığında Agilent 4294A ile hesaplanabilir AC direnç standardının değerinin ölçüm grafiği .....	76
Şekil 7.18: 1 kHz-5 MHz frekans aralığında Agilent 4294A ile hesaplanabilir AC direnç standardının değerinin ölçüm grafiği .....	76
Şekil 7.19: 1 kHz-5 kHz frekans aralığında Agilent 4294A ile sıfır hatası değerinin ölçüm grafiği.....	77
Şekil 7.20: 1 kHz-5 MHz frekans aralığında Agilent 4294A ile sıfır hatası değerinin ölçüm grafiği.....	77

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 6.1: U.M.E 1 k $\Omega$ bifilar tip AC direncin geometrik boyutları (Birinci tasarım) .....	45
Tablo 6.2: U.M.E-1 k $\Omega$ bifilar tip AC direncin değerleri (Birinci tasarım) .....	45
Tablo 6.3: Koller (1975), 1 k $\Omega$ bifilar tip AC direncin değerleri .....	46
Tablo 6.4: U.M.E - 1 k $\Omega$ bifilar AC direncin gerçel kısım, sanal kısım ve zaman sabiti değerleri .....	53
Tablo 6.5: Koller (1975), 1 k $\Omega$ bifilar tip hesaplanabilir AC direncin gerçel kısım, sanal kısım ve zaman sabiti değerleri .....	53
Tablo 6.6: U.M.E-1 k $\Omega$ bifilar tip AC direncin değişen elektriksel ekran kalınlığı değeri (İkinci tasarım) .....	54
Tablo 6.7: U.M.E-1 k $\Omega$ bifilar tip AC direncin değişen direnç telleri arasındaki mesafe değeri (Üçüncü tasarım) .....	56
Tablo 6.8: U.M.E-1 k $\Omega$ bifilar tip AC direncin değişen değerleri (Üçüncü tasarım) .....	56
Tablo 6.9: U.M.E - 1 k $\Omega$ bifilar tip hesaplanabilir AC direncin gerçel kısım, sanal kısım ve zaman sabiti değerleri .....	63
Tablo 7.1: İsaohm+manganin direnç teline uygulanan işlemler .....	67
Tablo 7.2: Zaman sabitinin belirlenmesi .....	75

## SEMBOLLER

a	: Direnç telleri arasındaki mesafe, (cm)
b	: Direnç telinin silindir ekseninden uzaklığı, (cm)
C	: Kapasitans, (F)
C <sub>0</sub>	: Teller ile ekran arasındaki kapasitans değeri, (pF)
C <sub>1</sub>	: Teller arasındaki kapasitans değeri, (pF)
C <sub>10</sub>	: Birinci tel ile ekran arasındaki kapasitans değeri, (pF)
C <sub>20</sub>	: İkinci tel ile ekran arasındaki kapasitans değeri, (pF)
d	: Ekran kalınlığı, (cm)
D	: Ekranın iç çapı (cm)
f	: Frekans, (Hz)
G	: Kayıp iletkenlik değeri, (S)
G <sub>0</sub>	: Teller arasındaki oluşan kayıp iletkenlik değeri, (S)
G <sub>1</sub>	: Telin ekranla arasındaki oluşan kayıp iletkenlik değeri, (S)
I	: Akım, (A)
I <sub>L</sub>	: Akım (Low)
I <sub>H</sub>	: Akım (High)
Λ	: Direnç telinin boyu, (cm)
Im	: Sanal kısmın empedansı, (Ω)
L	: İndüktans, (H)
M	: Teller arasındaki ortak indüktans değeri, (nH)
m	: Teller arasındaki indüktans değeri, (nH)
R	: Nominal direnç değeri, (Ω)
R <sub>AC</sub>	: Direncin AC değeri, (Ω)
R <sub>DC</sub>	: Direncin DC değeri, (Ω)
Re	: Gerçek kısmın empedansı, (Ω)
R <sub>t</sub>	: t °C'deki direnç değeri, (Ω)
R <sub>T</sub>	: T °C'deki direnç değeri, (Ω)
r	: DC akım direnç değeri, (Ω)
r <sub>w</sub>	: Direnç telinin çapı, (cm)
tanφ	: Sanal empedans değerinin gerçek empedans değerine oranı
U <sub>L</sub>	: Gerilim (Low)
U <sub>H</sub>	: Gerilim (High)
ω	: Açısal frekans, (rad/sn)
Z	: Empedans, (Ω)
z <sub>0</sub>	: Ekran malzemesinin özgül direnci, (Ω·cm)
μ	: İletkenin manyetik geçirgenliği, (V·s·A <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup> )
μ <sub>0</sub>	: Direnç malzemesinin özgül iletkenliği (1/Ω·cm)
ε <sub>0</sub>	: Boşluğun dielektrik katsayısı, (8,854x10 <sup>-12</sup> F/m)
ρ <sub>0</sub>	: Toprağa giden kayıp iletkenlik değeri, (S)
ρ <sub>1</sub>	: Toprağa karşı kayıp iletkenlik değeri, (S)



$\lambda$	: Direnç telinin özindüktansı, (nH)
$\zeta_{67}$	: Çift hattın gösterimi
$\tau$	: Zaman sabiti, (s)
$\alpha$	: T °C'deki eğrinin eğimi (ppm/°C)
$\beta$	: Eğrinin eğimindeki değişme oranı (ppm/°C <sup>2</sup> )

### Alt İndisler

AC	: Alternatif akım
DC	: Doğru akım
H	: Yüksek (High) bağlantı noktası
L	: Düşük (Low) bağlantı noktası
t	: Düşük sıcaklık değeri
T	: Yüksek sıcaklık değeri
$\omega$	: Direnç teli
67	: 6 ve 7 no.lu düğümler arası

### Kısaltmalar

B.P.O	: British Post Office tip konnektör
cm	: Santimetre
DC	: Doğru Akım
AC	: Alternatif Akım
E.M.C	: Elektro Manyetik Uyumluluk
E.M.K	: Elektro-motor kuvvet
EURAMET	:Avrupa Metroloji Birliği
kHz	: Kilo Hertz
k $\Omega$	: Kilo Ohm
kg	: Kilo Gram
LCR	: İndüktans-Kapasitans-Direnç
MHz	: Mega Hertz
nH	: Nano Henry
p $\Omega$	:Peta Ohm
ppm	: Milyonda bir (part per million)
pF	: Piko Farad
P.T.F.E	: Teflon
s	: Saniye
S	: Siemens
SI	: Uluslararası Birimler Sistemi
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
U.M.E	: Ulusal Metroloji Enstitüsü
$\mu$ m	: Mikro metre
$\mu$ V	: Mikro Volt

# HESAPLANABİLİR AC DİRENCİN MODELLENMESİ VE UYGULANMASI

**Mehmet ÇINAR**

**Anahtar Kelimeler:** Hesaplanabilir AC direnç, Kararlılık, Metroloji

**Özet:** Bu çalışmada, AC direnç kalibrasyonları için uluslararası alanda birincil seviye standart olarak kullanılan 1000 Ohm bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standardının üretilmesi amaçlanmıştır. 1000 Ohm bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standardının matematiksel modellemesi Matlab® programı kullanılarak 5 MHz'e kadar yapılmıştır. Matematiksel modelleme kullanılarak 1000 Ohm bifilar tip hesaplanabilir AC direncin geometrik boyutları belirlenlenmiş ve hesaplanabilir AC direncin üretimi gerçekleştirilmiştir. Hesaplanabilir AC dirence DC akım uygulanarak direncin kararlılığına etki eden hataların belirlenmesi için deneysel çalışmalar yapılmıştır. 1000 Ohm bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standardının DC akım uygulanarak yapılan ölçümleri, TÜBİTAK UME'de kurulu Quantum-Hall sistemine izlenebilir olarak gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen hesaplanabilir AC dirence, DC akım uygulanarak yapılan ölçümler sonucunda 1 ppm/gün kararlılık değeri elde edilmiştir.

## MODELLING AND DEVELOPMENT OF CALCULABLE AC RESISTOR

Mehmet ÇINAR

**Keywords:** Calculable AC Resistor, Metrology, Stability

**Abstract:** In this study, it is aimed to fabricate 1000 Ohm bifilar type AC calculable resistance standard used as primary level reference AC resistance standard internationally. Mathematical modeling of 1000 Ohm bifilar type AC calculable resistance standard is performed in Matlab<sup>®</sup> program up to 5 MHz. Geometrical dimensions of 1000 Ohm bifilar type AC calculable resistance standard is determined using the mathematical modeling and fabricated according to the geometrical dimensions defined in the mathematical modelling. Experimental studies are performed to define the parameters affecting the stability of the resistance standard by applying a DC current onto the resistance standard. DC resistance measurements of 1000 Ohm bifilar type AC calculable resistance standard are traceable to the Quantum-Hall resistance installed in TÜBİTAK UME (National Metrology Institute of Turkey). It is found that the stability of 1000 Ohm bifilar type AC resistance standard is 1 ppm/day as a result of DC measurements.

## 1. GİRİŞ

Ulusal metroloji enstitüleri 1990 yılından itibaren Quantum-Hall direnç standardını birinci seviye DC direnç standardı olarak kullanmaya başlamışlardır. DC Direnç standartlarının izlenebilirliği TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) U.M.E’de (Ulusal Metroloji Enstitüsü) 2000 yılından bugüne Quantum-Hall direnç standardı ile sağlanmaktadır. Laboratuvarında bulunan ulusal DC (Doğru akım) direnç standartları doğrudan veya dolaylı olarak Quantum-Hall sistemi ile birincil seviyede (ölçüm belirsizliği  $10^{-9}$   $\Omega$ ) düzenli olarak ölçülmektedir. İkincil seviyede (ölçüm belirsizliği  $10^{-8}$   $\Omega$ ) ölçümler ise MI6010B model otomatik akım karşılaştırmalı direnç ölçüm köprüsü ile gerçekleştirilmektedir.

DC direnç standartları fiziksel yapıları gereği metrolojik olarak AC (Alternatif akım) direnç standardı olarak kullanmak için uygun değildir. Çünkü DC direnç standartlarının DC akımdaki değerleri, AC akımda ortaya çıkan kapasitif, indüktif ve diğer etkilerden dolayı AC akımdaki değerleri ile farklılık gösterir. AC akımdaki değerleri belirlemek için DC-AC frekans bağımlılığı bilinen referans dirençlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu dirençler “Hesaplanabilir AC Direnç Standardı” olarak adlandırılır ve DC-AC frekans bağımlılıkları geometrik boyutları yardımıyla hesaplanabilir.

Hesaplanabilir AC direnç standartları, endüstriyel ve savunma sanayi laboratuvarlarında kullanılan elektrokimyasal empedans spektroskopisi, optik empedans spektroskopisi, LCR (indüktans, kapasitans, direnç) metre ve empedans analizör gibi cihazların AC direnç kısımlarının kalibrasyonlarında referans standart olarak kullanılırlar. Ayrıca kapasitans biriminin birincil seviyede türetilmesinde EURAMET’in (Avrupa Metroloji Birliği) kabul ettiği iki yol bulunmaktadır. Birinci yol hesaplanabilir kapasitör (cross capacitor) kullanılarak, ikinci yol ise Quantum-hall sistemi (Quantum-Hall effect), hesaplanabilir AC direnç

standardı ve AC köprü kullanılarak elde edilmesidir. Burada hesaplanabilir AC direnç “transfer standardı” olarak kullanılmaktadır.

Hesaplanabilir AC direnç standartlarının geliştirilmesi için öncelikle matematiksel modelleme yapıldı. Matematiksel modelleme ile iletim hattı Maxwell denklemlerinden elde edilen matematiksel eşitliklerin, bilgisayar yazılımı (Matlab®) ile hesaplanması sonucu direncin geometrik boyutları belirlendi. Daha sonra matematiksel modelde elde edilen boyutlar kullanılarak direncin üretimi gerçekleştirildi.

Direncin üretimi esnasında direnç telinin nikel-krom alaşım ve 20 µm çaplı olması nedeniyle kontak problemleri oluşmaktadır. Bunun sonucunda ortaya çıkan kontak direnci ve kontak noktalarında oluşan ısıl E.M.K (elektro-motor-kuvvet) direncin kararlılığını olumsuz yönde etkilemektedir.

Kontakların birleştirilmesi için geleneksel lehimleme yöntemleri, metanol kaynağı ve nokta kaynağı yöntemleri uygulanmış kaplama teknikleri araştırılarak isaohm (Isabellenhutte firmasının ürettiği direnç teli) direnç telinin bakır ile kaplanması için çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucu sadece nokta kaynağı ile birleştirme işlemi başarılı bir şekilde yapılabilmektedir. Direncin kısa ve uzun dönem kararlılığını artırmak için kimyasal işlemler (pickling yöntemi ve agresive flux) uygulanmıştır. İsaohm direnç telinin 20 µm çaplı olması nedeniyle 4-uçlu bağlantı noktasında kullanılacak bakır çubuklar ile kolay bir şekilde birleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu sebeple 20 µm çaplı isaohm direnç teli ilk olarak 0,5 mm çaplı manganin direnç teli ile birleştirilerek direnç telinin kesiti artırılmıştır. Kimyasal işlemler sonucu isaohm direnç teli kirliliğe maruz kalmadan manganin direnç teli ile nokta kaynağı yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir. Bu aşamada direncin doğruluğunun ayarlanması için 40 µm hassasiyetle birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra her iki ucu manganin ile birleştirilen isaohm direnç teli lehimleme ile 4 uç bağlantı noktası alınacak olan 2,5 mm çaplı bakır tel ile birleştirildi. Hazırlanan iletim hattının kararlılığını artırmak amacıyla ısıl işlem yapıldı. Direnç telinin mekanik parçalara montajı yapıldıktan sonra hesaplanabilir AC direnç elde edildi. Bu aşamada direncin DC akım kararlılığını belirlemek amacıyla otomatik akım karşılaştırmalı direnç

ölçüm köprüsünde ölçüldü. Sonuçta 1 ppm/gün kısa dönem kararlılık değerleri elde edilmiştir.

Matematiksel modellemede elde edilen frekans bağımlılığı değerlerinin doğrulanması amacıyla, hesaplanabilir AC direncin zaman sabiti ölçülmüştür. Zaman sabitinin belirlenmesi için hassas LCR metre kullanılmıştır.

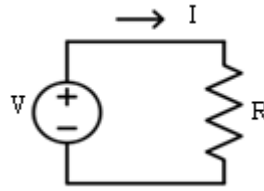
## 2. GENEL TANIM VE KAVRAMLAR

### 2.1. Direncin Tanımı

Devreye uygulanan gerilim ve akım bir uçtan diğer uca ulaşınca kadar izlediği yolda birtakım zorluklarla karşılaşır. Bu zorluklar elektronların geçişini etkileyen veya geciktiren kuvvetlerdir. İşte bu kuvvetlere direnç denir. Başka bir deyişle direnç, elektrik akımına karşı gösterilen zorluk olarak da ifade edilebilir. “R” harfi ile gösterilir ve simgesi “Ω” (Ohm) dur. 1827 yılında Georg Simon Ohm, bir elektrik devresindeki, akım, gerilim ve direnç arasındaki mevcut ilişkiyi (2.1) eşitliğinde belirtildiği şekilde Ohm kanunu olarak ortaya koymuştur.

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.1)$$

Burada “R” dirençtir ve bu direnç, rezistans veya empedans olabilir. “V” Volt, “I” da akım yani Amper’dir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1: Basit devre

Elektrik, elektronik devrelerinde en yaygın olarak kullanılan devre elemanları dirençlerdir. Direncin iki temel görevi vardır; akımı sınırlamak ve gerilimi bölmektir. Genellikle gerilim ölçümlerinde, akım ölçümlerinde, yükselteç kazançlarının

kontrolünde, zaman sabitinin ayarlanmasında, ısı üretiminde, nem ve sıcaklık ölçümlerinde kullanılır.

## 2.2. Ohm Biriminin Elde Edilmesi

1862 yılında İngiliz Bilimler Komitesi direnç birimini “ $\Omega$ ” olarak adlandırmıştır. Aynı komite daha sonraları elektriksel birimler ile mekanik birimler arasında uyum sağlamak için “mutlak” birimler sistemini kabul etmiştir. İlerleyen yıllarda birçok farklı birimler sisteminin ortaya çıktığı görülmüş ve bunu ortadan kaldırıp uluslararası alanda birliktelik sağlamak için 1960 yılında “Uluslararası Birimler Sistemi” (SI- International System of Units) kabul edilmiştir.

SI birimleri cinsinden Ohm’un tanımlanmasında mekaniksel birimlerden uzunluk - metre (m), kütle - kilogram (kg) ve zaman - saniye (s), elektriksel büyüklüklerden akım - amper (A) yer alır. Ohm’un ( $\Omega$ ) bu birimlerle ifadesi (2.2) eşitliğinde verilmiştir.

$$1 \cdot \Omega = 1 \cdot m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2} \quad (2.2)$$

Ohm biriminin birincil seviyede elde edilmesi

- Hesaplanabilir kapasitans standartları (Kros kapasitör)
- Kuantum Hall Etkisi

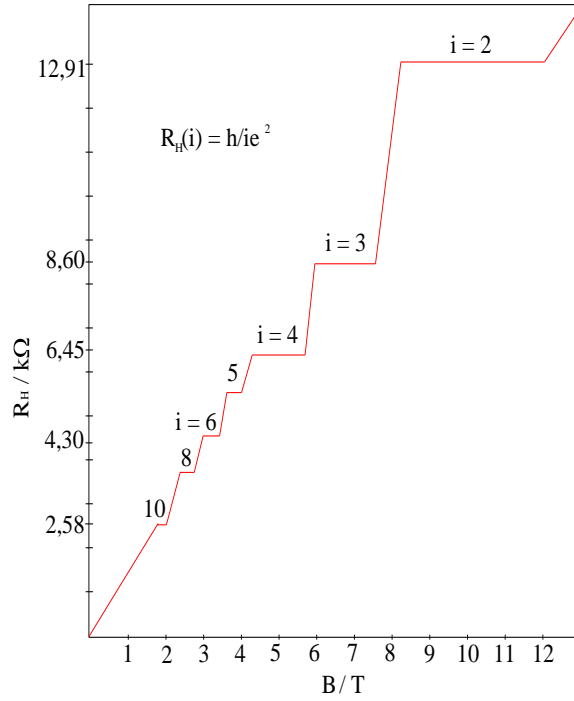
ile mümkündür [1]. Türkiye’de DC direnç biriminin izlenebilirliği TÜBİTAK U.M.E’de kurulu Kuantum- Hall sistemi ile sağlanmaktadır.

## 2.3. Kuantum-Hall Etkisi

1 Ocak 1990 yılında Kuantum-Hall etkisi ile elde edilen 25812,8092  $\Omega$  değeri uluslararası alanda Von Klitzing sabiti olarak kabul edilmiş ve bu tarihten itibaren direnç standardı olarak kullanılmıştır. Kuantum-Hall Etkisi, mosfet veya hetero yapılardaki yarıiletken malzemelerde gözlenebilmektedir. Bu etkiyi gözlemleyebilmek için malzemeler 4,2 K veya daha düşük sıcaklıklara soğutulur ve



üzerine 1 Tesla'dan daha büyük manyetik alan uygulanır. Bu durumda malzemenin üzerinden  $100 \mu\text{A}$ 'den daha düşük bir akım geçirildiğinde, sabit Hall geriliminin elde edildiği platolar diğer bir deyişle kuantum basamakları oluşur. Bu platolardan yarıiletken cihazın tipine bağlı olarak, kapı (gate) geriliminin veya manyetik alanın bir fonksiyonu olarak Hall direnci elde edilir. Oluşan platolar Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2: GaAs/AlGaAs malzeme üzerinde Kuantum-Hall etkisi ile elde edilmiş sabit Hall direnci

Hall direnci  $R_H$  ile gösterilir ve (2.3) eşitliğinde verildiği gibi ifade edilir.

$$R_H \left( \text{ } \right) = \frac{V_H}{I} = \frac{R_K}{I} \quad (2.3)$$

Burada  $V_H$  Hall gerilimi,  $I$  malzeme üzerinden akan akım,  $R_K$  Von Klitzing sabitidir. Von Klitzing sabitinin  $R_{K-90} = h/e^2$ 'ye eşit olduğu ( $h$  Planck sabiti,  $e$  yük) ve değerinin  $25812,807 \Omega$  olduğu kabul edilmiştir. Kuantum-Hall Etkisi ile direnç değeri  $0,001$  ppm doğrulukla elde edilmektedir.



Şekil 2.3: Kuantum-Hall sisteminden görünüm

Şekil 2.3’de verilen Quantum-Hall sisteminden elde edilen birinci seviye DC direnç değeri, Şekil 2.4’te verilen düşük sıcaklık akım karşılaştırma köprüsü kullanılarak izlenebilirlik referans dirençlere 0,001 ppm belirsizlikte aktarılır.



Şekil 2.4: Düşük sıcaklık direnç karşılaştırma köprüsü (4 K)



Şekil 2.5: DC direnç çalışma standartları

Referans dirençler kullanılarak DC direnç izlenebilirliği Şekil 2.6'da gösterilen otomatik akım karşılaştırmalı DC direnç köprüsü kullanılarak kalibrasyonu gerçekleştirilecek ikincil seviye standartların değerlerinin belirlenmesinde kullanılır (Şekil 2.5). Bu sistem ile 0,01 ppm belirsizlikte ölçümler yapılabilmektedir.



Şekil 2.6: MI6010B otomatik DC direnç karşılaştırma köprüsü

#### 2.4. Sıcaklık Katsayısı

Çevrenin sıcaklığına bağlı olarak, direnç değerinde de değişimler meydana gelir [2]. Her bir direnç, farklı sıcaklık katsayısına sahiptir, bu tamamen direncin yapısıyla ve nominal değeri ile ilgilidir. Direncin  $\alpha$  ve  $\beta$  sıcaklık katsayılarının bilinmesi ile Eşitlik (2.4) kullanılarak herhangi bir sıcaklıktaki direnç değerini hesaplamak mümkündür.

$$R_t = R_T \left( + \alpha (-T) + \beta (-T)^2 \right) \quad (2.4)$$

Burada;

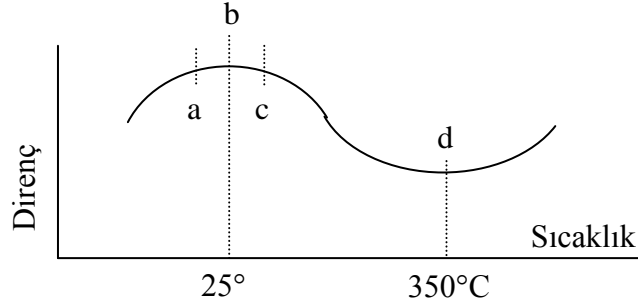
$R_t$  = t °C'deki direnç değeri

$R_T$  = T °C'deki direnç değeri

$\alpha$  = T °C'deki eğrinin eğimi (ppm/°C)

$\beta$  = Eğrinin eğimindeki değişme oranı (ppm/°C<sup>2</sup>)

Şekil 2.7’de gösterildiği üzere, bu denklem, her bir direnç için karakteristik bir eğrinin oluşmasına neden olur. Ancak Şekil 2.7’de gösterilen egride çok yüksek sıcaklıklarda da ikinci bir tepe noktası görülmektedir ki bu da (2.4) eşitliğinde üçüncü dereceden bir terimin daha olmasını gerektirir. Ancak ölçümler oda sıcaklığı civarında alındığından, (2.4) eşitliği yeterli olmaktadır.



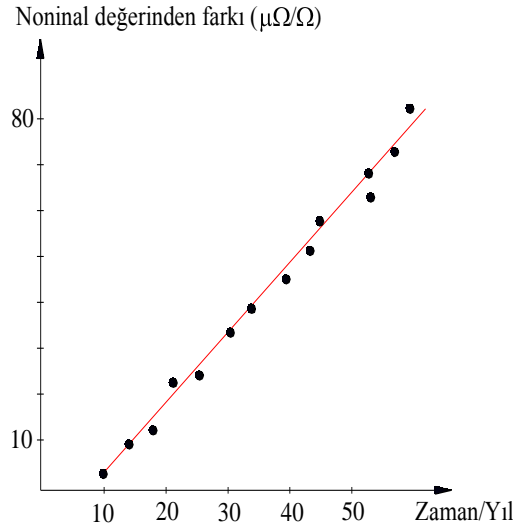
Şekil 2.7: İsaohm'un direnç-sıcaklık değişim eğrisi

Dirençlerde en iyi çalışma sıcaklığı, eğimin sıfır olduğu noktadır, oda sıcaklığında örneğin a-c aralığında direnç en düşük değişim oranına sahiptir.

Standart dirençlerin sıcaklık katsayıları 18°C'den 28°C'e sıcaklığa kadar direnç değerleri ölçülerek bulunur. Bu katsayılar, farklı sıcaklıklarda dirençlerin alacağı değerleri hesaplamak için gereklidir.

## 2.5. Isıl işlem

Standart dirençlerin değerleri, zaman içerisinde değişiklik gösterirler [2]. Bu değişiklikler direnç değerinin zamanla kayması olarak ifade edilebilir. Kayma, genellikle Şekil 2.8’de gösterildiği gibi düzgün bir doğru şeklindedir. Direncin kalitesi ne kadar iyi olursa, kayması da o kadar az olacaktır. Ulusal veya ikincil seviye laboratuvarlarda, deney sonuçları grafiğe dökülür ve lineer doğru denklemi kullanılarak, direncin herhangi bir anda alacağı değer önceden tahmin edilebilir ve bu değer için bir düzeltme yapılması mümkün olabilir.



Şekil 2.8: Örnek bir standart direncin yıllık kayması

Kaymanın başlıca nedeni, direnç telindeki baskı ve gerilimlerdir. Bunların iki ana kaynağı vardır.

1. Mekanik baskı : Telin sarım şekli, tipi ve boyutlarına bağlıdır.
2. Mikroskobik gerilim : Telin iç yapısından kaynaklanır.

Direnç teli malzemesi olarak kullanılan alaşımlar genelde yapı hataları içerdiklerinden, iç gerilimler hemen hemen kaçınılmazdır.

Direnç teli malzemesi moleküllerinin sürekli hareket etmesi ve bu nedenle direnç değerinde kayma meydana gelir. Direnç değerindeki zamana bağlı kaymanın tespit edilebilmesi için, standart dirençlerin ölçüm değerlerinin kayıtları tutularak, grafikleri çizilmelidir. Standart dirençlerin değerleri normal olarak senede bir ya da iki kere ölçülürler. Bu şekilde dirence ait bilgilerin saklanması ile ancak birkaç sene sonra bir direncin yıllık kayması en doğru şekilde tespit edilebilir. Ancak, çok hassas ölçüm sistemleri kullanılarak direncin değerindeki çok küçük kaymalar dahi tespit edilebilirse uzun seneler beklemeden sadece kısa bir zaman aralığında alınan ölçümlerin değerlendirilmesi ile yıllık kayma değerinin tespiti mümkün olabilir.

Direnç teli işlem görmemiş hali ile örneğin yıllık 50-200 ppm arasında değerlerde kayma gösterebilir. Bu seviyelerde yıllık kayma değeri ile üretilen standart direnç olarak kalibrasyonlarda kullanılamaz. Standart direnç olabilmesi için yıllık kayma değerinin bugünkü teknolojik şartlarda 5-10 ppm seviyesinde düşmesi gerekir. Hiçbir işlem uygulanmamış bir direnç teli 50-100 yıl gibi sürelerde moleküler yapıdaki iç gerilmelerin azalması ile 5-10 ppm seviyelerine düşebilir. Bu süreyi azaltmak için direnç teline ısı işlem uygulanır. Isıl işlem direnç telindeki alaşımlara göre farklılıklar gösterir.

Bunun için öncelikle direnç telinin mikroskobik çalışmalar yapılarak fiziksel ve yapısal homojenliğinin belirlenmesi gereklidir. Isıl işlem ile direnç teli şoklanarak moleküler anlamda gerilmelerin hareketsiz hale getirmek amaçlanmaktadır. Isıl işlem prosedürünün direnç teli alaşımına göre özel olarak hazırlanması gerekir [2]. Bunun için de iyi bir ısı işlem prosedürü hazırlanması gerekir. Çünkü malzemenin aşırı derecede şoklanması ile geriye dönüşü olmayan bir durum ortaya çıkabilir. O nedenle malzeme yapısının incelenerek en uygun ısı işlem prosedürünün belirlenmesi çok önemlidir. Uygun ısı işlem prosedürünün belirlenmesi ile direnç teline ısı işlem gerçekleştirilecek, devamında ısı işlemin sonuç verip vermediğinin belirlenmesi için tekrardan birkaç hafta ölçümler yapılması gerekmektedir. Sonuçlar değerlendirildiğinde yıllık kayma değeri istenen seviyelere getirilmiş ise Şekil 2.8'deki eğrinin eğimi azaltılmış ise ısı işlem tamamlanır. Eğer yıllık kayma değeri istenen seviyelerde elde edilemezse ısı işlemin tekrar uygulanması gerekecektir. Yapılan bu çalışmalarda ısı işlem prosedürünün sonuç vermemesi durumunda geri besleme çalışmaları yapılması gereklidir. Tüm bu çalışmalardan sonuç alınamazsa ısı işlem prosedürünün tekrar değerlendirilmesi gerekir.

## **2.6. Termoelektrik E.M.K (Peltier etkisi)**

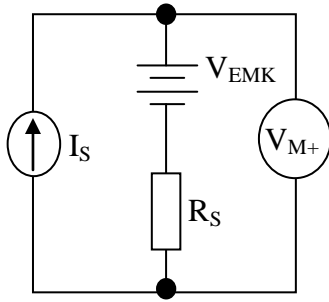
Termoelektrik gerilimler (termoelektrik E.M.K), düşük gerilim ölçümlerinde karşımıza çıkan en genel hata kaynaklarıdır. Termoelektrik E.M.K, farklı iletken malzemelerin veya farklı sıcaklıklardaki aynı tür iletkenlerin bir araya gelmesinden kaynaklanır [3]. Devrelerde, sıcaklıkları farklı ve değişik tür iletkenler kullanılması sonucu,  $\mu\text{V}$  mertebesinde bir E.M.K meydana gelir. Bu E.M.K, düşük seviyeli DC

ölçümlerinde hatalara sebep olur. Düşük değerli direnç ölçümleri de düşük değerli gerilim ölçümü gerektirdiğinden, termal E.M.K etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Eğer sıcaklık değişimi zamana bağımlı ise, buna bağlı olarak ortaya çıkan termo elektrik gerilimdeki değişiklik, düşük frekanslı bir gürültüye sebep olacaktır. Bu etkiyi azaltmak için, devre içindeki bağlantıları mümkün olduğu kadar birbirine yakın yapmak ve mümkün olduğu kadar termal iletkenliği yüksek olan yalıtkan malzemeler kullanmak faydalı olacaktır. Ayrıca cihazların kullanımdan önce yeteri kadar ısınmalarını beklemek ve ölçüm yapılacak cihazların ya da devrelerin mümkün olduğu kadar ısı kaynaklarından ve soğutucu fanlardan uzak tutulması gerekmektedir. Giriş uçlarını örtmek, uçları hava akımından korumak ve uçlar arasındaki sıcaklık farkını azaltmak açısından faydalı olabilir. Eğer termal E.M.K'nın nanovolt mertebesine düşmesi gerekiyorsa, devrenin her yerinde oksijensiz, çok saf bakır kullanılmalıdır. Kablolardaki gerilmeler de termoelektrik E.M.K'ya sebep olurlar. Lehim, bakıra nazaran daha yüksek termoelektrik E.M.K'ya sahip olduğundan dolayı, lehimle yapılan bağlantılar daha fazla termal E.M.K'ya sebebiyet verebilirler.

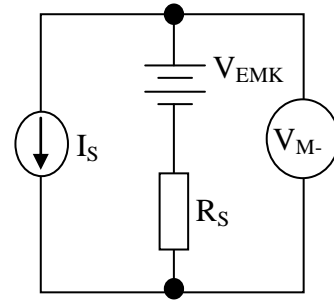
Düşük değerli DC gerilim ölçümlerinde, akımı ters çevirme metodu ve offset-dengeleme metotlarından biri kullanılarak bu etkiden kurtulmak mümkün olabilir.

### **2.6.1. Akımı ters çevirme metodu**

Şekil 2.9'dakine benzer bir düzenek kullanılarak gerçekleştirilen direnç ölçümlerinde, farklı polaritelerde iki ayrı ölçüm alınarak termal E.M.K etkisi ortadan kaldırılabılır [14]. Bu devrede voltmetre, çift yönlü bir akım kaynağı ile beraber kullanılmıştır.



a) Pozitif polariteli ölçüm



b) Negatif polariteli ölçüm

Şekil 2.9: Termal E.M.K değerinin akımı ters çevirme yöntemi ile ortadan kaldırılması

Şekil 2.9’da gösterildiği gibi akım her iki yönde standart direncin üzerine uygulandığında E.M.K geriliminin yönü değişmeyecektir. Akımın her iki yöndede standart dirence uygulanması ile (2.5) ve (2.6) eşitlikleri devre teorilerine göre elde edilir. (2.5) ve (2.6) eşitlikleri taraf tarafa toplandığında ise (2.7) eşitliği elde edilir.

$$V_{M+} = V_{EMK} + I_S \cdot R_S \quad (2.5)$$

$$V_{M-} = V_{EMK} - I_S \cdot R_S \quad (2.6)$$

$$V_M = \frac{V_{M+} + V_{M-}}{2} = I_S \cdot R_S \quad (2.7)$$

Bu durumda ölçülen direnç,

$$R_S = \frac{V_M}{I_S} \quad (2.8)$$

şeklinde (2.7) eşitliği kullanılarak hesaplanır. Bu yöntemle termal E.M.K tamamen ortadan kaldırılmış olur. Ancak kullanılan voltmetrenin algılama süresinin, devrede herhangi bir sıcaklık değişimi meydana gelmeden ölçüm sonucunu verebilecek kadar hızlı olması gerekmektedir.

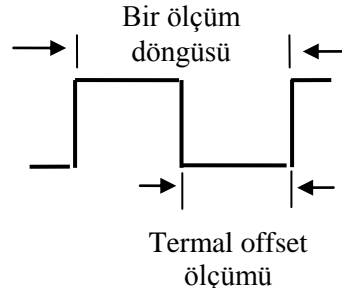
Otomatik direnç ölçüm köprüleri E.M.K problemini ortadan kaldıracak şekilde akımı ters çevirme metodunu kullanarak tasarlanmaktadır. Ancak dirence akım



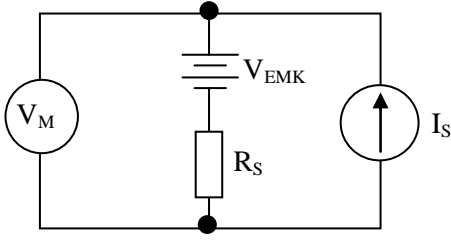
uygulayarak gerilim ölçme işlemi operatörün kontrolunda yapıyor ise akımın her iki yönde değiştirilerek ölçüm alınması bazı sorunlara yol açabilmektedir. Karşılaşılan en büyük problem akımın her iki yönde uygulanırken akım kaynağının üzerinde bulunan komitatör vasıtasıyla akım yönünün değiştirilmeye çalışılmasıdır. Bu durumda her iki yönde uygulanacak akımın doğruluklarının birbirine eşit olmaması yanlış ölçüm alınmasına neden olabilmektedir. Bu sorunu çözenin en kolay yolu bağlantı kablolarının yer değiştirilmesi suretiyle yapılması yani + akıma bağlı kablo ile – akıma bağlı kablonun yerlerinin değiştirilmesidir. Bu durumda akım aynı doğruluk ile ters yönden iletilebilecek ve termoelektrik E.M.K etkileri ortadan kaldırılmış olacaktır.

### **2.6.2. Offset dengeleme metodu**

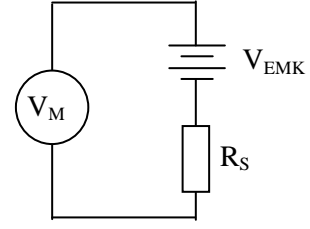
Bu yöntem Şekil 2.10'da gösterildiği gibi, akım ölçülecek direnç üzerine, ölçüm döngüsünün sadece bir bölümünde uygulanır. Akım kaynağı açık olduğu durumda, voltmetre tarafından okunan gerilim değeri, hem direnç üzerine düşen gerilimi ve hem de termal E.M.K değerini içermektedir. Ölçüm döngüsünün ikinci yarısında ise, akım kaynağı kapatılır ve tekrar bir gerilim ölçümü yapılır. Bu sefer ölçülen gerilim sadece devrede mevcut olan termal E.M.K değerini ( $V_{E.M.K}$ ) verecektir.  $V_{E.M.K}$  değeri doğru olarak ölçüldüğüne göre, döngünün ilk yarısında okunan gerilim değerinden ikinci yarısında okunan gerilim değeri çıkarıldığında ofset-dengelemesi yapılmış gerilim değeri elde edilir ve yine; Eşitlik (2.8) ile direnç değeri hesaplanabilir. Bu yöntem kullanıldığında da termal E.M.K etkisi tamamen ortadan kaldırılmış olur.



a. Offset dengeleme ölçüm döngüsü



b. Akım kaynağı açık durumda



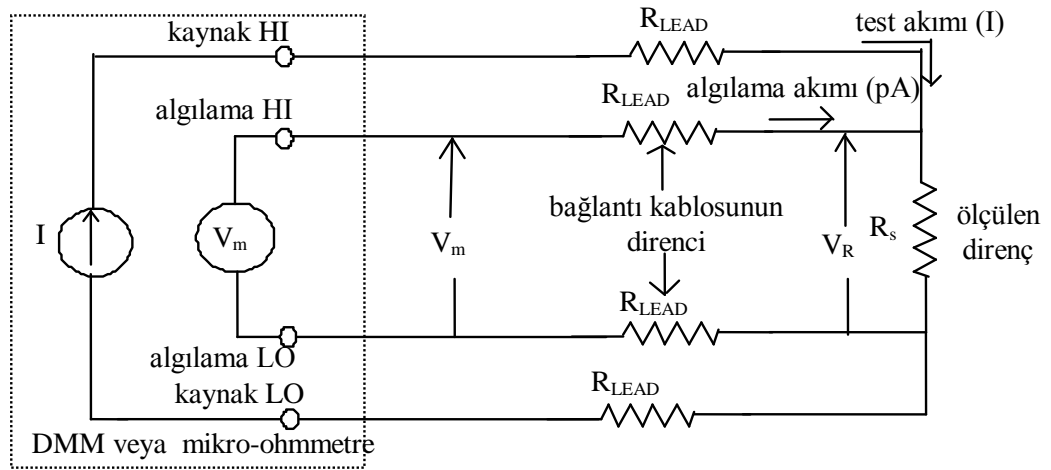
c. Akım kaynağı kapalı durumda

Şekil 2.10: Offset dengeleme metodu

### 3. ÖLÇÜMLERDE KULLANILAN BAĞLANTI TEKNİKLERİ

#### 3.1. 4-Uçlu Ölçüm Tekniği

DC direnç değeri genellikle yüksek çözünürlüğe sahip hassas multimetre veya diğer hassas direnç ölçer cihazlar ile iki uçlu olarak ölçülmektedir. 2- uçlu ölçümlerde dirence uygulanan akım ile algılama kablolarının aynı olması sebebiyle metrolojik düzeyde doğru ölçümler gerçekleştirilemez. Şekil 3.1’de gösterilen 4-uçlu ölçüm tekniğinde ise, dirence uygulanan akım kabloları ile algılama kabloları ayrılmaktadır [4]. Bu sayede daha düşük akım değerlerinde (tipik olarak pA veya daha az) algılama gerçekleştirilerek daha doğru ölçümler yapılabilir.



Şekil 3.1: Dört uçlu direnç ölçüm yöntemi

$V_M$  = Multimetreden okunan gerilim değeri

$V_R$  = Direncin üzerine düşen gerilim

Algılama akımı önemsenmeyeceğinden dolayı,  $V_M = V_R$  ve ölçülen direnç,

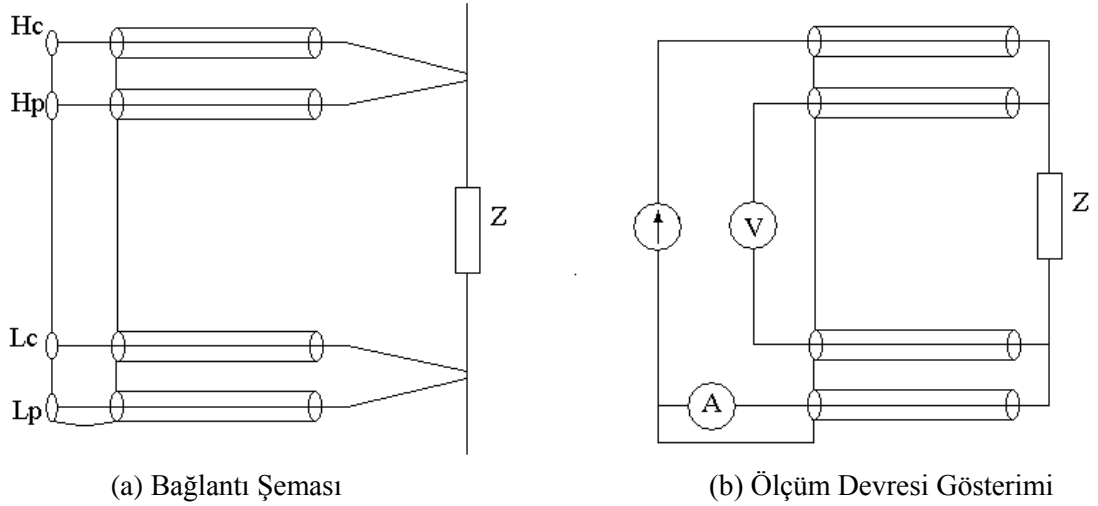
$$\frac{V_M}{I} = \frac{V_R}{I} \quad (3.1)$$

Sonuç olarak, direnç değeri bu yöntemle, iki uçlu ölçüm yöntemine nazaran daha doğru olarak ölçülebilir. Ölçüm sırasında bağlantı kablolarından gelen hataları azaltmak için algılama kablolarının olabildiğince kısa olmasına dikkat edilmelidir. Yüksek değerli direnç ölçümlerinde ( $>10 \text{ k}\Omega$ ), bağlantı kablosunun direnci büyük bir katkı yapmayacağından, iki uçlu ölçüm yöntemi kullanılabilir. Ancak, yüksek değerli dirençlerin ölçümünde tam bir kesinlik aranıyorsa, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi dört uçlu bağlantı kullanılması gereklidir

### 3.2. 4-Uçlu + Bağlantı Ekranları

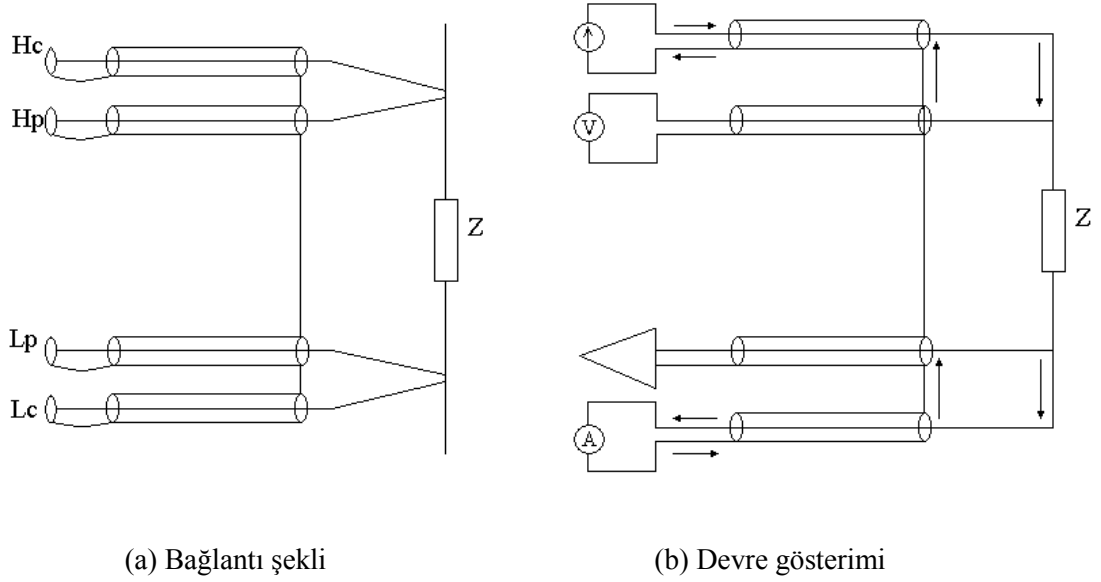
Doğru akımda dört uçlu bağlantı şekli kullanılırken, alternatif akımda bu ölçüm sisteminin ekranlanması gereklidir [4]. Ekranlama AC ölçümlerin elektromanyetik gürültüden etkilenmemesi için gereklidir.

Bu ekranlama Şekil 3.2'deki gibi yapılırsa devredeki ortak indüktans problemi ortadan kaldırılmış olmaz. Bu durumda tüm ekranların Şekil 3.3'deki gibi dört uç çift bağlantı şeklinde yapılması gerekir.



Şekil 3.2: Ekranlanmış dört uçlu bağlantı

Şekil 3.3’deki gibi bir bağlantı sonucunda değişken akımda ölçüm sisteminin tüm dış gürültülerden yalıtılması ve düşük empedans değerlerinin yüksek hassasiyetle ölçülebilmesi sağlanmış olur.



Şekil 3.3: Dört uç çift bağlantı

Şekil 3.3(a)’da oklar devreden geçen akımın yönünü belirtir. Bu devrede akım canlı uçtan verilir ve ekrandan geri alınır. İdealde ekran ile canlı uç arasında birbirine eşit fakat zıt yönlü akımlar oluşması gereklidir ki elektromanyetik ekranlama sağlanabilsin.

Dört uç çift bağlantılı ölçüm tüm parametrelerin hassas ölçümlerinde kullanılabilir. Fakat ölçüm frekansı yükseldikçe kullanılan kablo uzunluğuna dikkat edilmesi gerekir. Kablo uzunluğuna karar vermek için (3.2) denklemi kullanılır.

$$f \cdot l \leq 15 \quad (3.2)$$

f : Ölçüm frekansı (MHz)

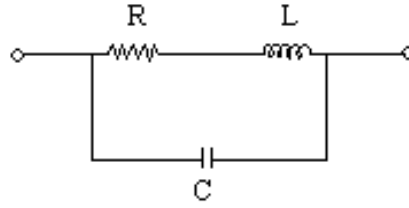
l : Kablo uzunluğu (m)

Örneğin 1 m’lik kablo kullanılıyorsa ölçme frekansı en fazla 15 MHz’e kadar olabilir.

## 4. AC DİRENÇ VE İZLENEBİLİRLİK

### 4.1. AC Direnç

AC direnç, direnç elemanının üzerine AC işaret uygulandığında ortaya çıkan bir parametredir [5]. AC işaret uygulandığında direnç eşdeğer devresi Şekil 4.1'deki gibi olur.

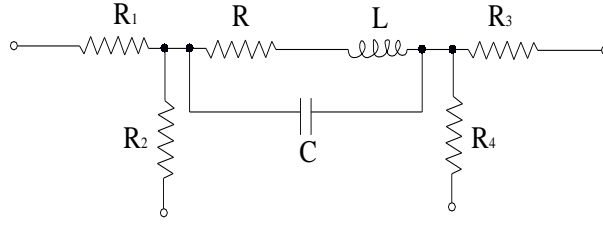


Şekil 4.1: İki uçlu AC direnç eşdeğeri

Herhangi bir direnç elemanı AC işaret uygulandığında bu direncin uçları arasında kapasitans ve direncin kendi indüktansı oluşur. DC işaretle yalnızca R olarak ortaya çıkan direnç değeri AC işaretle kapasitif ve indüktif bileşenleri olan Z empedansı şekline dönüşür.

Temel eşdeğer devrenin (Şekil 4.1) empedansı incelendiğinde empedansın gerçel ve sanal kısımlarını L ve C'nin etkilediği görülmektedir. Bu durumda frekans değiştikçe direnç değeri de değişecektir.

Direnç standartları yüksek hassasiyetle ölçülmek isteniyorsa dört uçlu ölçüm yapılmalıdır. AC akım uygulanmış dört uçlu direncin basit eşdeğer devresi Şekil 4.2'deki gibidir.



Şekil 4.2: Dört uçlu direncin eşdeğer devresi

AC akım uygulanmış dört uçlu direnç devresinin empedansı ise Eşitlik (4.1)'de gösterildiği şekilde yazılabilir.

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R + j\omega L} + j\omega C} \quad (4.1)$$

Empedans formülünde gerçel (reel) ve sanal (imajiner) kısımları birbirinden ayrılırsa (4.2) eşitliğinde gösterildiği şekilde elde edilir.

$$Z = \frac{R}{(-\omega^2 LC)^2 + (RC)^2} \left[ 1 + j\omega \left( \frac{L}{R} - RC \right) \right] \quad (4.2)$$

$$R_w = \frac{R}{1 - \omega^2 (LC - R^2 C^2)} \quad (4.3)$$

$$\tau = \frac{L}{R} - RC \quad (4.4)$$

$$Z = R_w + j\omega\tau \quad (4.5)$$

Eşitlik (4.3)'de verilen  $R_w$  ifadesi direncin DC değeridir. Empedansın sanal kısmını oluşturan ve zaman sabiti olarak adlandırılan  $\tau$  terimidir ve Eşitlik (4.4)'de gösterildiği şekildedir. Eşitlik (4.5)'de ise empedansın genel olarak tanımlandığı ifade gösterilmiştir.

Empedansın gerçek kısmının değişimi sanal kısmının değişimine göre ihmal edilebilir seviyelerdedir. Bu yüzden hesaplanabilir dirençlerin zaman sabitlerinin hesaplanması önem kazanmaktadır.

## 4.2. İzlenebilirlik

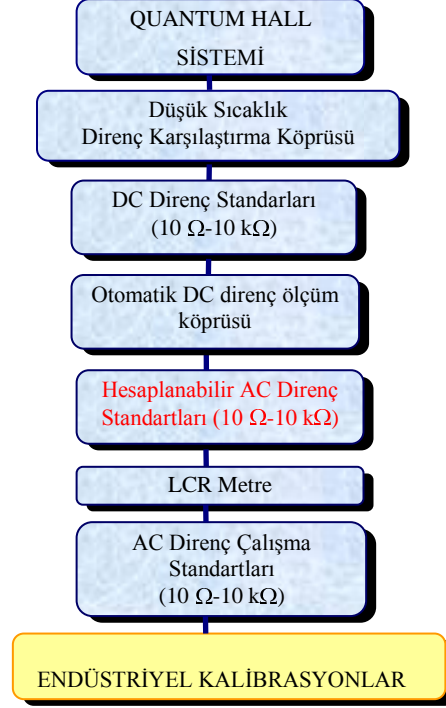
AC direnç biriminin izlenebilirliği uluslararası düzeyde hesaplanabilir AC direnç standartları ile sağlanmaktadır [1,2]. Hesaplanabilir AC direnç standartları frekans bağımlılığı çok düşük olarak tasarlanan standartlardır. DC değerleri ile AC değerleri arasındaki fark az olduğundan ve bu fark hesaplanabildiğinden dolayı AC değerlerinin izlenebilirliğini sağlamak için DC değerleri kullanılmaktadır.

Şekil 4.3'de AC direnç standartlarının izlenebilirlik zinciri gösterilmiştir. EURAMET tarafından birincil seviye olarak kabul edilen Quantum-Hall sistemi ile DC direnç izlenebilirliği fiziksel sabitlere bağlanmıştır. İlk adımda Quantum-Hall sistemi ve düşük sıcaklık direnç ölçüm köprüsü kullanılarak DC direnç standartlarına  $10^{-9} \Omega$  belirsizlikte değer aktarımı yapılabilmektedir. İkinci adımda DC direnç standartları ve otomatik direnç ölçüm köprüsü kullanılarak hesaplanabilir AC direnç standartlarına  $10^{-8} \Omega$  belirsizlikte değer aktarımı yapılmaktadır. Üçüncü adımda LCR metre ile yerine koyma yöntemi ile (bu yöntemle LCR metrenin ölçüm hatası ortadan kaldırılmaktadır.) hesaplanabilir direnç standartları üzerinden AC direnç çalışma standartlarına izlenebilirlik aktarılmaktadır. AC direnç standartları kullanılarak ülke içerisinde ikinci seviye kalibrasyon laboratuvarlarına ait standartların ve endüstriyel cihazların kalibrasyonları yapılmaktadır.

Şekil 4.3'de verilen izlenebilirlik zincirinde hesaplanabilir AC direnç standartlarına  $10^{-8} \Omega$  belirsizlik seviyesinde değer aktarılmaktadır. Gerekmesi durumunda hesaplanabilir AC direnç standardı direkt olarak Quantum-Hall sistemi ile



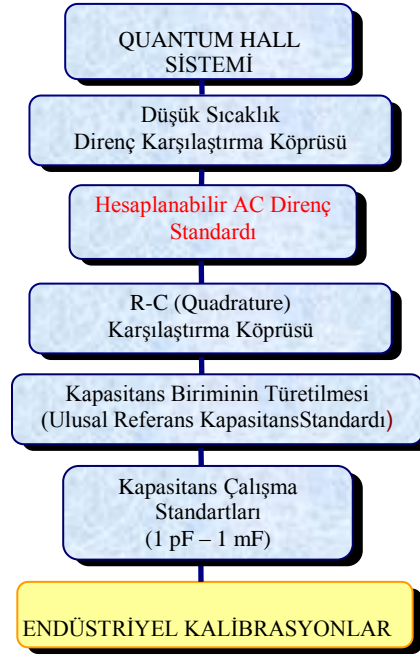
karşılaştırılarak  $10^{-9} \Omega$  belirsizlik seviyesinde değer aktarımı da gerçekleştirilebilir [1].



Şekil 4.3: AC direnç izlenebilirlik zinciri

Hesaplanabilir AC direnç standartları AC direnç biriminin elde edilmesinin yanı sıra kapasitans biriminin birincil seviyede türetilmesinde de transfer standardı olarak kullanılmaktadır.

Şekil 4.4 incelendiğinde Quantum-Hall sisteminden düşük sıcaklık direnç karşılaştırma köprüsü vasıtası ile hesaplanabilir AC direnç standartlarına, hesaplanabilir AC direnç standartları ve R-C (Quadrature) karşılaştırma köprüsü kullanılarak kapasitans birimi türetilmiş olur [3].



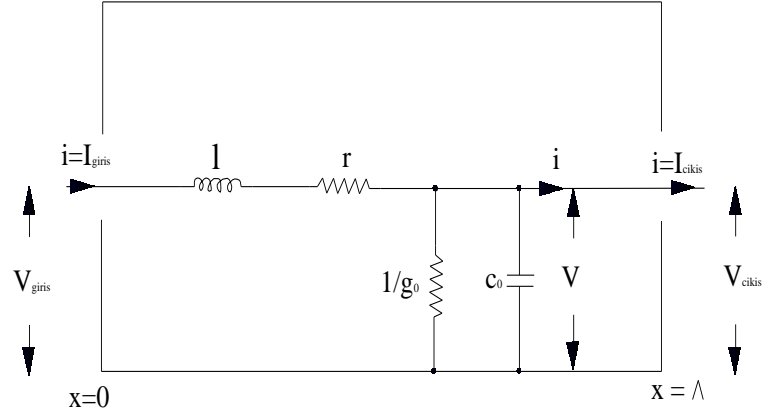
Şekil 4.4: Kapasitans izlenebilirlik zinciri

### 4.3. Hesaplanabilir AC Direnç Standardı

Hesaplanabilir direnç standartları yapıları basit ve frekans bağımlılıkları çok düşük olan dirençlerdir ve fiziksel özellikleri kullanılarak AC direnç değerleri hesaplanabilmektedir [6]. Hesaplanabilir direnç yalnızca bir telden oluşmaktadır [7]. Bu yalnızca düzgün bir hat olabilmekle beraber ikiye katlanmış ya da dörde katlanmış bir şekilde de olabilir.

#### 4.3.1. Koaksiyel Tip Hesaplanabilir AC Direnç

Hesaplanabilir AC direnç tasarımında en çok tercih edilen yöntem koaksiyel tiptir. Matematiksel olarak modellenmesi ve üretimi bifilar tip ve quadrifilar tip hesaplanabilir AC dirençlere göre daha kolaydır. Koaksiyel hesaplanabilir AC dirençte, direnç teli silindirik eksen boyunca bir uçtan diğer uca uzanacak şekilde merkeze yerleştirilir [7,8]. İdealde akım Şekil 4.5’de verildiği gibi bir uçtan girer, diğer uçtan çıkar.

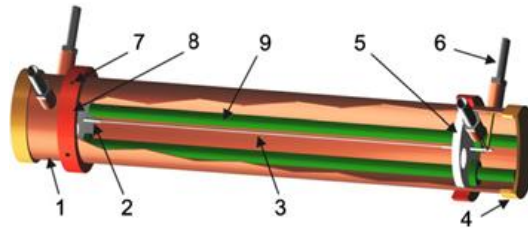


Şekil 4.5: Koaksiyel tip iletim hattı modeli

Şekil 4.5’de koaksiyel tip bir iletim hattı modeli gösterilmiştir [7]. Bu iletim hattında iç iletkenin uzunluğu boyunca  $r$ ,  $l$ ,  $g_0$  ve  $c_0$  sırasıyla direnç, indüktans, toprağa kaçak iletkenlik ve toprağa kaçak kapasitansdır. Burada toprak merkezlenmiş dış silindirdir. Dış silindir akımı taşımaz ve yalnızca ekran olarak kullanılır.  $R$ ,  $L$ ,  $G_0$  ve  $C_0$  tel uzunluğu boyunca ilgili sabitlerdir. Yani  $R=\Delta r$ ,  $L= \Delta l$  vb.

Koaksiyel tip hesaplanabilir direnç standartları bağlantı şekline göre tek konektör yüzeyli veya iki konektör yüzeyli olarak tasarlanmaktadır. İki konektör yüzeyli koaksiyel hesaplanabilir AC direnç Haddad (1969) tipi direnç olarak da isimlendirilir.

Şekil 4.6’da Kucera ve diğ.(2009)’nin bir tasarımı olan hesaplanabilir AC direnç gösterilmiştir. Bu tasarımda konektörler her iki uç düzleme yani direnç telinin uçlarına yakındır. Bu tip koaksiyel tasarım genellikle düşük frekans uygulamaları için uygundur.

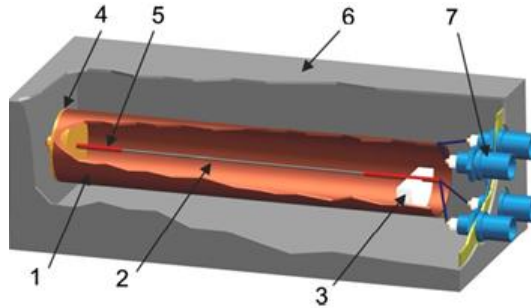


Şekil 4.6: İki konektör düzlemlili hesaplanabilir koaksiyel AC direnç [8]

Şekil 4.6' da,

- 1.Dış tüp
- 2.Destek tübü
- 3.Direnç teli
- 4.Kapak
- 5.P.T.F.E (Teflon) disk
- 6.B.P.O (British Post Office) konektör
- 7.Vida
- 8.Sabitleme halkası
- 9.Boşluk çubuğudur.

Tek konektör yüzeyli koaksiyel hesaplanabilir AC dirençte döngü dış silindir üzerinden gerçekleştirilmektedir [7,8]. (Elektrostatik ekran olarak başka bir silindir eklenebilir) Benimsenen bu yaklaşımda direnç elemanı katlanmıştır. Yine de koaksiyel direnç teli 4 uçlu bağlantının başlangıç noktası olacaktır.



Şekil 4.7: Tek konektör düzlemli hesaplanabilir koaksiyel AC direnç [8]

Şekil 4.7'de,

- 1.Dış tüp
- 2.Direnç teli
- 3.P.T.F.E disk
- 4.Sonlanma düzlemi
- 5.Destek tüpü

6. Termostatik kutu

7. BNC konektördür

Şekil 4.7’de Kucera ve diğ. (2009)’nin tasarladığı diğer bir koaksiyel tip hesaplanabilir AC direnç gösterilmiştir. Bu tasarımda tüm konektörler birbirine yakındır. Bu sayede boyu uzun bir direnç yapılsa dahi kısa bağlantı kabloları kullanılabilir. Sonuçta kablo düzeltmeleri en aza indirilebilir ve 1MHz’e kadar kullanılması metrolojik ölçümler için uygun olabilir.

Şekil 4.7’de gösterilen tek konektör yüzeyli hesaplanabilir AC dirençte iç kısımda veya dış kısımda hava akışı olmayacak şekilde hazırlamıştır. Hava akışını engellemek için ise termostatik kutu tasarlamıştır [8]. Bu şekilde sıcaklık etkisinden gelen belirsizliği azaltmaya çalışmıştır.

Kucera ve diğ. (2009)’nin her iki tasarımında da 4-uçlu direncin tanım noktası değişmemektedir.

Hesaplanabilir AC dirençlerde, direnç değerinin matematiksel ifadesi Maxwell denklemlerinden elde edilir. Eşitlik (4.6) ve Eşitlik (4.7)’de klasik iletim hattı denklemleri verilmiştir [9,11].

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = \epsilon_0 + j\omega C_0 \bar{v} \quad (4.6)$$

ve

$$-\frac{\partial v}{\partial x} = \epsilon + j\omega l \bar{i} \quad (4.7)$$

Bunlar  $(v)_{x=0} = V_{\text{giriş}}$  ve  $(v)_{x=\Lambda} = 0$  sınır koşulları ile  $(i)_{x=\Lambda}$  çözüldüğünde,

$$I_{\text{çıkış}} = \frac{V_{\text{giriş}}}{Z \cosh(\beta l)} \quad (4.8)$$

Burada,

$$Z = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g_0 + j\omega C_0}} \quad (4.9)$$

ve

$$\beta = \sqrt{(r + j\omega l)(g_0 + j\omega C_0)} \quad (4.10)$$

Bu tanımlamalara göre,

$$\frac{I_{\text{çıkış}}}{V_{\text{giriş}}} = \frac{1}{Z \cosh(\beta l)} \quad (4.11)$$

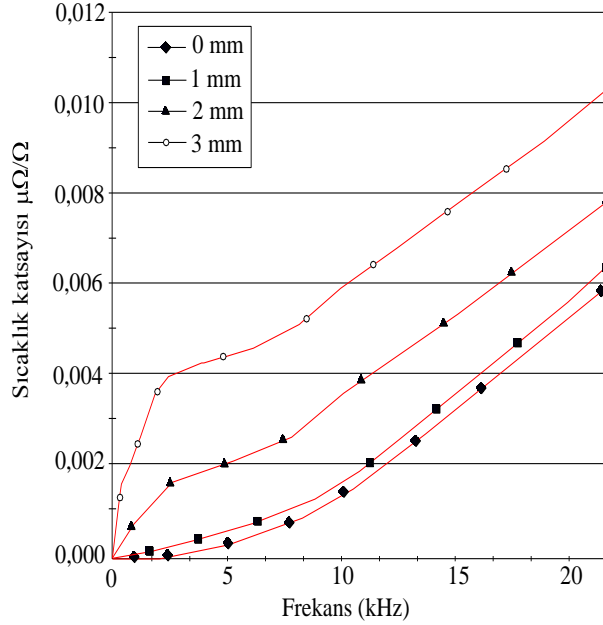
Bu ifade de ve Z yerine konulduğunda yaklaşık ifade olarak,

$$Y_{4T} \cong \frac{1}{R} \frac{1}{1 + \frac{1}{6} (G_0 - 2\omega^2 LC_0) + \frac{1}{120} (\omega^2 C_0^2) + j\omega \left( \frac{L}{R} + \frac{1}{6} RC_0 \right)} \dots \dots \dots \quad (4.12)$$

admittans değeri elde edilir. Buna göre  $G_{4T}, Y_{4T}$ 'nin gerçel kısmıdır (4.13) [9,11,12].

$$G_{4T} \cong \frac{1}{R} \left( 1 - \frac{1}{6} R G_0 - \frac{\omega^2 L^2}{R^2} - \frac{7}{360} R^2 \omega^2 c_0^2 \right) \quad (4.13)$$

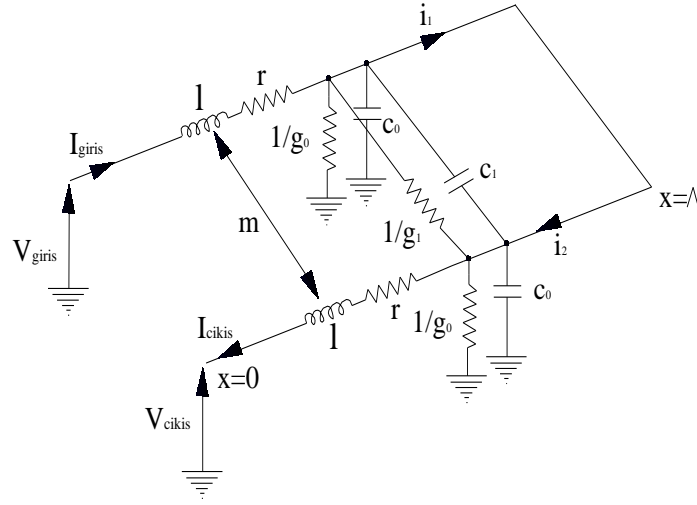
Direnç telinin eksenden sapmalarına bağlı olarak deri etkisi ve akma akım kayıpları ve diğer etkilerden gelen hatalar literatürde incelenmiş ve Şekil 4.8’de verilmiştir. Şekil 4.8 incelendiğinde direnç telinin eksenden 1 mm’den küçük ölçülerde sapmasının kritik bir değişime neden olmadığı görülmüştür [8]. Bu durum tasarlayacağımız hesaplanabilir AC direncin direnç teli merkezden 1 mm sapsa dahi metrolojik ölçümler açısından sorun oluşturmayacağını göstermektedir.



Şekil 4.8: Direnç telinin eksenden sapmalarının direnç değeri üzerindeki değişimi

#### 4.3.2. Bifilar Tip Hesaplanabilir AC Direnç

Bifilar tip hesaplanabilir AC direnç giriş ve çıkış konektörlerinin aynı yüzeyde olması için pratik bir yöntemdir ve genellikle 1 kΩ nominal değerinde direncin tasarlanması için uygundur.



Şekil 4.9: Bifilar tip iletim hattı eşdeğer devresi

Şekil 4.9'daki yapıda ekranla dönüş yolunun kenarları arasında simetrik olarak yerleşmiş olan kaçak iletkenlik ve kapasitans oluşur [5]. Telin her bir elementi kendi indüktansı kadar ikiye bölünmüş durumdadır. Bir de teller arasında ortak indüktans (mutual indüktans) oluşur. Elektriksel ekran ile direnç telleri arasındaki toplam kapasitans  $C_0$ ,  $2\Lambda c_0$ 'a eşittir. Teller arasında  $g_1$  ve  $c_1$  kaçak iletkenlikleri vardır. Tellerin arasındaki toplam kapasitans  $C_1$ ,  $2\Lambda c_1$ 'e eşittir.  $L$  ve  $r$  telin kendi indüktansı ve direnci, uzunluk birimi başına  $L=2\Lambda\lambda$  ve  $m$  ise iki tel arasındaki ortak indüktanstır. Yani toplam ortak indüktans döngünün iki yarımında  $M=\Lambda m$  dir. Düz tel olarak devam ettiğimizde elimizde  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $i_1$  ve  $i_2$  dört diferansiyel denklem vardır. İlave sınır koşulları  $(v_1)_{x=\Lambda} = (v_2)_{x=\Lambda}$  ve  $(i_1)_{x=\Lambda} = (i_2)_{x=\Lambda}$  ile sonuç ifadesi [5],

$$G_{4T} \cong \frac{1}{6} \left( \begin{array}{c} 1 - \frac{1}{6} R G_0 - 2G_1 - \frac{\omega^2 (L - 2M)^2}{R^2} \\ \frac{1}{720} R^2 \omega^2 (5C_0^2 - C_0 + 4C_1) \end{array} \right) \quad (4.14)$$

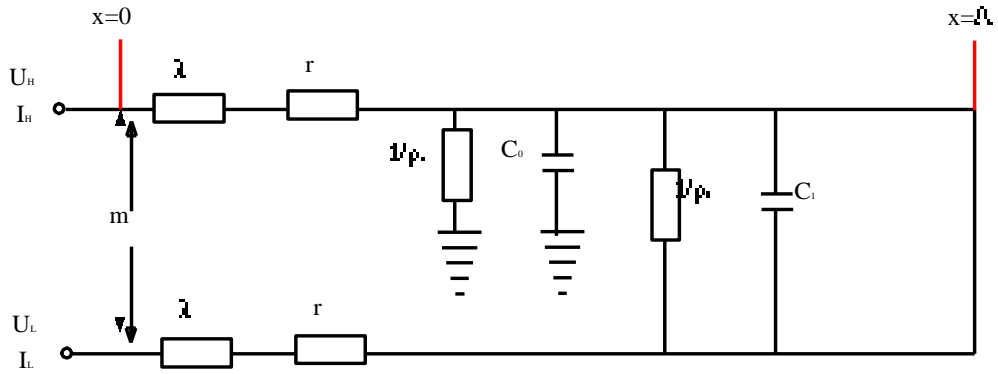
denklem (4.14)'da belirtildiği şekildedir.  $G_1$  ve  $C_1$ 'in karşı yöndeki  $G_0$  ve  $C_0$ 'a etkisi olacaktır. Bu yine iletim hattının direnç bölümleri arasındaki kapasitans, indüktans veya toprağa kaçak kapasitanstan kaynaklanan faz açısını dengelemek için



kullanılabilir. Sıfır faz açısı için olsa bile bu durum ikinci derece değişmezlik için aynı değildir.

$$\frac{L-2M}{R} = \frac{1}{6} R (C_1 - C_0) \quad (4.15)$$

Tel aralığında deneysel dirençler kullanılarak ortak indüktansın çok küçük elde edilmesi sonucu (mutual indüktans) bu durum toplam indüktansı azaltmada belirgin bir etkiye sahiptir. Düşük dirençler sayesinde olabildiğince küçük (L-2M) yapılmak istenir (4.15).



Şekil 4.10: Bifilar tip iletim hattı

Şekil 4.10'a göre

$\rho_0$  = Tellerin toprakla arasındaki kayıp iletkenlik değeri

$\rho_1$  = Tellerin arasındaki kayıp iletkenlik değeri

$C_0$  = Toprakla teller arasındaki kapasitans değeri

$C_1$  = Tellerin arasındaki kapasitans değeri

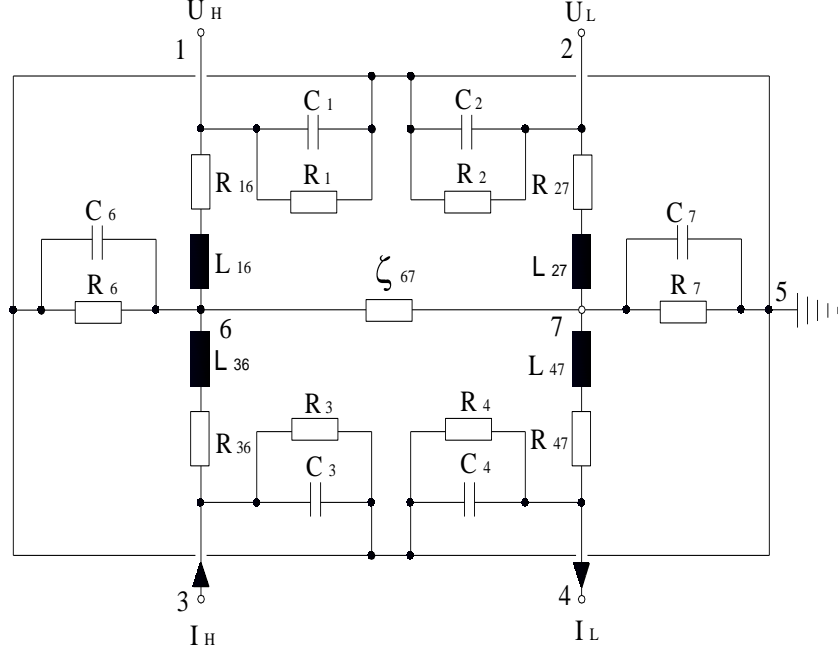
$m$  = Teller arasındaki ortak indüktansın değeri

$r$  = DC akım direnç değeri

$\Lambda$  = Çift iletkenin uzunluğu

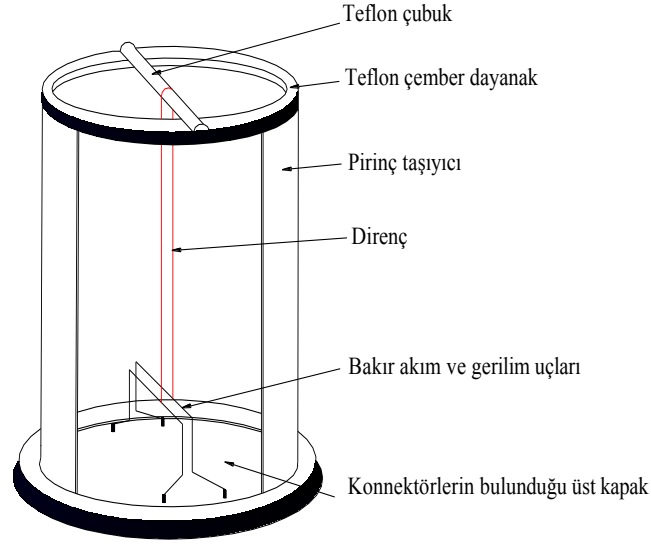
$\lambda$  = Direnç telinin indüktansı

Şekil 4.11’de bifilar tip bir iletim hattının ekranlanması ile oluşan kapasitans, indüktans ve dirençler görülmektedir [5].



Şekil 4.11: Bifilar tip 4 uçlu direncin kurşun topraklı bir metal gövde içinde eşdeğer devresi

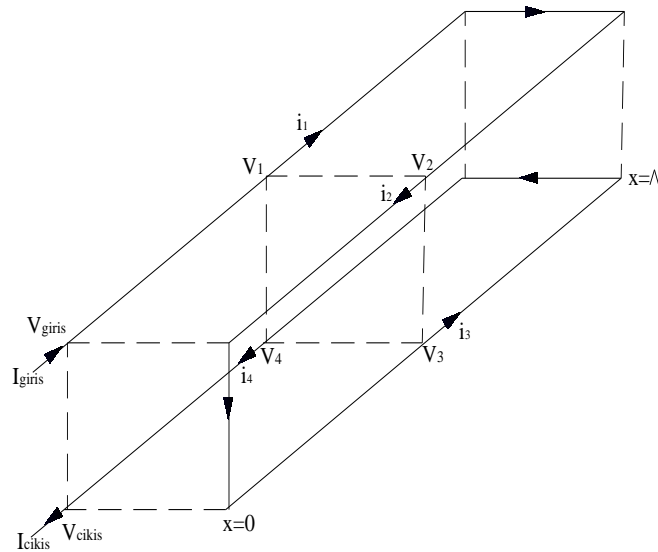
Şekil 4.11’de  $\zeta_{67}$  ile gösterilen bölüm çift hattı belirtmektedir. Diğer dirençler, kapasitanslar, ve indüktanslar hesaplanabilir dirence giden hatlardan hesaplanır [9]. Şekil 4.12’de ise tasarımı tamamlanmış bifilar tip hesaplanabilir AC direncin mekaniksel tasarımı gösterilmektedir. Mekanik tasarımda kullanılan her bir malzemenin teknik özelliğine dikkat edilerek ve metroloji bilimi dikkate alınarak tasarım gerçekleştirilir.



Şekil 4.12: Bifilar tip hesaplanabilir AC direnç mekaniği

### 4.3.3. Quadrifilar Tip Hesaplanabilir AC Direnç

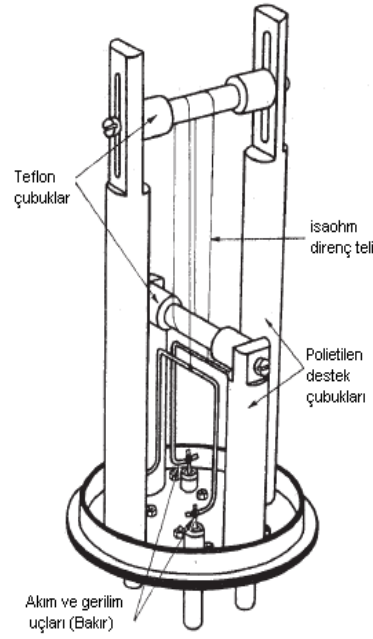
Quadrifilar direnç tipi genellikle  $10 \text{ k}\Omega$  hesaplanabilir AC direnç tasarımlarında uygulanmaktadır. Tasarlanması koaksiyel ve bifilar tip hesaplanabilir AC dirençlere göre daha zordur. Quadrifilar tip hesaplanabilir AC direnç seri olarak düzenlenmiş iki dönüş yolu içerir. Dört tel karenin köşelerine uzanır (Şekil 4.13).



Şekil 4.13: Quadrifilar tip iletim hattı

Geliştirilmiş quadrifilar tip hesaplanabilir AC direncin mekaniği Şekil 4.14’de, direnç değerinin gerçel kısmına etkisi ise Eşitlik (4.16)’da verilmiştir [5].

$$G_{4T} \cong \frac{1}{R} \left( \begin{array}{l} 1 - \frac{1}{6} R (G_0 - 5G_1 - 3G_2) - \frac{\omega^2 (-8M_1 + 4M_2)}{R^2} \\ \frac{R^2 \omega^2}{11520} (40C_0^2 - 15C_0 + 8C_1 + 8C_2) - C_0 + 16C_1 \end{array} \right) \quad (4.16)$$



Şekil 4.14: Quadrifilar tip hesaplanabilir AC direncin mekaniği

## 5. HESAPLANABİLİR AC DİRENCİN MODELLENMESİ

Bu çalışmada bifilar tip hesaplanabilir AC direncin matematiksel modelinin çıkarılması ve matematiksel modellemeye uygun olarak üretilmesi amaçlanmıştır.

Hesaplanabilir AC direncin geliştirilmesi için öncelikle matematiksel modellemede geometrik boyutlarında elde edilmesi gerekir [10,11]. Bu sebeple hesaplanabilir direncin tasarımında ilk olarak matematiksel modelleme gerçekleştirilir. Matematiksel modellemenin gerçekleştirilebilmesi için geliştirilecek hesaplanabilir AC direnç standardının tipi ve nominal değeri öncelikle belirlenmiştir. Belirlenen iletim hattı tipine uygun olarak eşdeğer devrenin oluşturulması ve AC akım uygulandığında direncin değerine olumsuz yönde etki eden faktörlerin ortaya konulması gerekir. Daha sonra bu faktörlerin etkilerini azaltmak için çalışmalar yapılır. Bu çalışmalarda direncin mekanik olarak üretimine dikkat edilmeli ve kullanılacak malzemelerin elektriksel olarak etkileri gözönüne alınarak doğru malzemeler seçilmelidir. Kısaca oluşturulacak matematiksel model, malzeme bilimi ve mekanik üretim teknikleri düşünülerek hazırlanmalıdır.

Bu çalışmada nominal değeri 1 k $\Omega$  olan bifilar tip hesaplanabilir AC direnç yapmak için çalışılmıştır. Hesaplanabilir AC direnç tipinin bifilar seçilmesinin iki sebebi vardır. Birincisi nominal değeri 1 k $\Omega$  direnç yapıldığında üretilen direncin boyutlarının önemi, ikinci sebebi ise direncin yüzeyinin artması durumunda sıcaklık katsayısının artmasıdır. Geliştirilecek bifilar tip iletim hattının eşdeğer devresi Şekil 4.10'da gösterildiği gibidir.

Şekil 4.11’de bifilar tip bir iletim hattının ekranlanması ile oluşan kapasitans, indüktans ve dirençler görülmektedir [5]. Şekil 4.11’de  $\zeta_{67}$  ile gösterilen bölüm çift hattın iletim elemanını belirtmektedir. Diğer dirençler, kapasitanslar, ve indüktanslar dirence giden hatlardan hesaplanır.

Bifilar tip hesaplanabilir AC dirençte teller arası kapasitans, manyetik ekran ile tel arasındaki kapasitans, telin kendi indüktansı, teller arasında oluşan indüktans değerleri (mutual indüktans), toprağa kaçak iletkenlik ve kapasitans, teller arasındaki kaçak iletkenlik ve kapasitans etkilerinden gelen değerler Maxwell denklemlerinden elde edilen matematiksel ifadeler kullanılarak belirlenir. Belirlenen bu değerlerin toplamı  $\Delta G$  (Eşitlik (5.13)) değerini verir. Daha sonra parametre değerleri değiştirilerek  $\Delta G$  değeri azaltılmaya çalışılır [9].

Direncin değerinin değişmesine sebep olan diğer iki faktör ise deri etkisi ve girdap akımları etkisidir. Bu etkilerin değerlerinin de  $\Delta G$  değerine paralel olarak ve en az etki getirecek şekilde belirlenmesi gerekir. Bu etkilerin değerleri ve  $\Delta G$  değeri o frekansta direncin AC değerinin DC değerinden ne kadar farklı olduğunu, yani toplam hata değerini verir.

Toplam hata değerinin kolay bir şekilde belirlenmesi için Matlab<sup>®</sup> kullanılarak bir program hazırlanmıştır. Bu program ile parametre değerlerindeki değişimlere göre ayrı ayrı hata etkileri ve toplam hata değerindeki değişim frekansa bağlı olarak oluşturulmuştur. Toplam hata değerinin en küçük şekilde belirlenmesi ile optimum parametre değerleri elde edilir ve hesaplanabilir AC direncin geometrik boyutları belirlenir.

Direnç değerinin frekansla değişimi iki kısımdan oluşur. Bunlar gerçel ve sanal kısımlardır. Gerçek ve sanal kısımların ayrı ayrı hesaplanması gerekir [9].

## 5.1. Empedansa Etki Eden Faktörlerin Matematiksel İfadeleri

Direnç telinin ekranlanması ile tellerin ekranla ve kendi aralarında kapasitanslar oluşur. Oluşan kapasitans değerleri parametrelere bağlı olarak hesaplanır. Birinci telin ekranla arasında oluşan kapasitans değeri  $C_{10}$ , ikinci telin ekranla arasında oluşan kapasitans değeri  $C_{20}$  ile ifade edilir. Tellerin ekranla oluşturdukları kapasitansların simetrik olmasından dolayı her iki kapasitans değeri ( $C_{10}=C_{20}$ ) birbirine eşittir. Bu durumda tellerin ekranla arasında oluşan toplam kapasitans,

$$C_0 = C_{10} + C_{20} \quad (5.1)$$

olur. Direnç teli ile ekran arasında oluşan toplam kapasitansın ifadesi ise [9],

$$C_0 = \frac{11,13\Lambda\varepsilon_0}{\left(\ln \frac{2a}{r_w} + \ln \frac{D^2}{8a^2}\right)} \text{ pF}^- \quad (5.2)$$

şeklindedir. Burada,

- $\Lambda$  : Çift hattın uzunluğu (cm)
- $a$  : Direnç telleri arasındaki mesafe (cm)
- $r_w$  : Direnç telinin çapı (cm)
- $D$  : Ekranın iç çapı (cm)
- $\varepsilon_0$  : Boşluğun dielektrik sabiti (F/cm)

Teller arasında oluşan kapasitans değerinin matematiksel ifadesi ise [9],

$$C_1 = \frac{11,13\Lambda\varepsilon_0}{12} \left( \frac{1}{\left(\ln \frac{2a}{r_w} - \ln \left(\frac{D^2 + a^2}{D^2 - a^2}\right)\right)} + \frac{1}{1,5 \left(\ln \frac{2a}{r_w} + \ln \frac{D^2}{4a^2}\right)} \right) \text{ pF}^- \quad (5.3)$$

şeklinde ifade edilir. Direnç telinin indüktansı ve teller arasında oluşan ortak indüktans (mutual indüktans) etkisinin belirlenmesi gerekmektedir. Çünkü her iki indüktans etkisi direncin değerinde değişikliğe sebep olmaktadır. Direnç telinin indüktansından kaynaklanan etki [6,9],

$$L = 4\Lambda \left( \ln \frac{2a}{r_w} \right) + 1 - 4a \quad \mu H \quad (5.4)$$

olarak ifade edilir. Teller arasındaki ortak indüktans etkisi ise [6,9],

$$M = 2 \left( \Lambda \left( \ln \frac{1 + \sqrt{\Lambda^2 + a^2}}{a} \right) - \sqrt{\Lambda^2 + a^2} + a \right) \quad \mu H \quad (5.5)$$

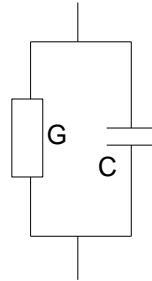
şeklindedir. Burada,

$\Lambda$  : Çift hattın uzunluğu (cm)

$a$  : Direnç telleri arasındaki mesafe (cm)

$r_w$  : Direnç telinin çapı (cm)

şeklindedir. Bağlı direnç değerine etki eden diğer bir faktör ise kayıp iletkenlik etkisidir. Kayıp iletkenlik etkileri kapasitanslara paralel olarak oluşur. Eşdeğer devresi, Şekil 5.1’de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.1: Kayıp iletkenlik etkileri eşdeğer devresi



$$G = \tan \delta \omega C \quad (5.6)$$

(5.6) ifadesi kullanılarak kayıp iletkenlik değerleri belirlenebilir. Kayıp iletkenlik değerleri ekranla telin arasında oluşan toplam iletkenlik ve teller arasında oluşan iletkenlik değeri için Eşitlik (5.7) ve (5.8) kullanılarak ayrı ayrı belirlenir [9].

$$G_0 = \tan \delta \omega C_0 \quad (5.7)$$

$$G_1 = \tan \delta \omega C_1 \quad (5.8)$$

Bu ifadelerde kullanılan parametrelerin ifadeleri aşağıda verildiği gibidir.

$\tan \delta$  : Kayıp faktörü

$\omega$  : Açısal frekans (rad/sn)

$C_0$  : Ekran ile direnç teli arasında oluşan toplam kapasitans etkisi (pF)

$C_1$  : Direnç telleri arasında oluşan kapasitans etkisi (pF)

## 5.2. Empedansın Gerçel Kısımının Frekansa Bağlı Olarak Hesaplanması

Tüm kapasitans, indüktans ve kayıp iletkenlik değerleri kullanılarak gerçel kısmının sapması elde edilir. Gerçel kısmının empedansı [5,9],

$$Re \cong \frac{R}{1 - \frac{1}{6} R \left( G_0 - 2G_1 \right) - \frac{\omega^2 \left( L - 2M \right)^2}{R^2} - \frac{1}{720} R^2 \omega^2 \left( 5C_0^2 - C_0 - 4C_1 \right)} \quad (5.9)$$

Burada,

$R$  : Nominal direnç değeri ( $\Omega$ )

$C_0$  : Ekran ile direnç teli arasında oluşan toplam kapasitans etkisi (pF)

$C_1$  : Direnç telleri arasında oluşan kapasitans etkisi (pF)

- L : Direnç telinin indüktans etkisi (nH)  
M : Teller arasındaki ortak indüktans etkisi (nH)  
G<sub>0</sub> : Ekranla tel arasında oluşan iletkenlik (S)  
G<sub>1</sub> : Teller arasında oluşan iletkenlik (S)  
Ω : Açısal frekans (rad/sn)

Bifilar tip dirençler için gerçel kısmın empedansı (5.9) ifadesi kullanılarak belirlenir. Daha önceden belirlenen kapasitans, indüktans ve kayıp iletkenlik değerleri bu ifadede yerine konularak belirlenir. Bu bölümün toplam hata değerine etkisi paydada bulunan üç terimin ((5.10),(5.11) ve (5.12)) toplanması ile elde edilir.

1.Terim:

$$\frac{1}{6} R (G_0 - 2G_1) \quad (5.10)$$

Burada,

- R : Nominal direnç değeri (Ω)  
G<sub>0</sub> : Ekranla tel arasında oluşan iletkenlik (S)  
G<sub>1</sub> : Teller arasında oluşan iletkenlik (S)

şeklindedir.

2.Terim:

$$\frac{\omega^2 (L - 2M)}{R^2} \quad (5.11)$$

Burada,

- R : Nominal direnç değeri (Ω)

- L : Direnç telinin indüktans etkisi (nH)  
M : Teller arasındaki ortak indüktans etkisi (nH)  
 $\omega$  : Açısal frekanstır. (rad/sn)

şeklindedir.

3.Terim:

$$\frac{1}{720} R^2 \omega^2 (5C_0^2 - C_0 - 4C_1) \quad (5.12)$$

Burada,

- R : Nominal direnç değeri ( $\Omega$ )  
 $C_0$  : Ekran ile direnç teli arasında oluşan toplam kapasitans etkisi (pF)  
 $C_1$  : Direnç telleri arasında oluşan kapasitans etkisi (pF)  
 $\omega$  : Açısal frekans (rad/sn)

şeklindedir. Gerçel empedansa etki eden hata ise;

$$\Delta G = \frac{1}{6} R (G_0 - 2G_1) \frac{\omega^2 (L - 2M)}{R^2} + \frac{1}{720} R^2 \omega^2 (5C_0^2 - C_0 - 4C_1) \quad (5.13)$$

şeklindedir. Bu üç terimden gelen ifadenin en az olacak şekilde elde edilmesi ile kapasitans, indüktans ve kayıp iletkenlik değerlerinden gelen etkilerin empedansın gerçel kısımda oluşturduğu hata değerini verir.

### 5.3. Hesaplanabilir AC Direnç Değerine Etki Eden Diğer Faktörler

#### 5.3.1. Deri etkisi (Skin-Effect)

Tele uygulanan akımın frekansı arttıkça telin dış yüzeylerine doğru akımın akmak istemesi nedeniyle akan akımın telin daha düşük bir kesitinden geçmesi sonucu kayıp etkisi oluşur. Bu durum deri etkisi olarak adlandırılmakta olup (5.14)'de verildiği şekilde ifade edilir [6].

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = \frac{1}{12} \left( \frac{r_w}{4} \sqrt{\omega \mu \chi} \right)^4 \quad (5.14)$$

Deri etkisi (5.14) eşitliği kullanılarak hesaplanır ve toplam hata etkisine eklenir.

$R_{AC}$  : Direncin AC değeri ( $\Omega$ )

$R_{DC}$  : Direncin DC değeri ( $\Omega$ )

$r_w$  : Direnç telinin yarıçapı (cm)

$\omega$  : Açısal frekans (rad/sn)

: Elektriksel öz direnç ( $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ )

$\mu$  : Boşluğun manyetik geçirgenliği ( $\text{VsA}^{-1} \text{cm}^{-1}$ )

#### 5.3.2. Girdap akım kayıpları (Eddy-Current)

Elektriksel ekran içerisinde oluşan girdap akımları etkin bir dirence neden olur. Bu etki [6,9], (5.15) ve (5.16) eşitlikleri kullanılarak hesaplanır.

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = 1 + \frac{8 \cdot m \cdot \omega \cdot \Lambda}{R} \cdot \frac{1}{1+k^2} \cdot \frac{a^2}{D^2} \quad (5.15)$$

$$k = \frac{\pi \cdot D \cdot \omega \cdot d}{\rho} \quad (5.16)$$

- R : Nominal direnç değeri ( $\Omega$ )
- $R_{AC}$  : Direncin AC değeri ( $\Omega$ )
- $R_{DC}$  : Direncin DC değeri ( $\Omega$ )
- D : Ekranın iç çapı (cm)
- $\rho$  : Ekran malzemesinin özgül direnci ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
- d : Ekran kalınlığı (cm)
- $\omega$  : Açısal frekans (rad/sn)
- $\Lambda$  : Çift hattın uzunluğu (cm)

#### 5.4. Toplam Bağlı Direnç Değişimi ve Sanal Empedans

Toplam bağlı direnç değişimi; yukarıda elde edilen tüm hataların toplamı olarak (5.17) eşitliği ile ifade edilir [9].

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} \text{Toplam\_direnç\_degisimi} &= \frac{\Delta R}{R} \Delta G + \frac{\Delta R}{R} \text{Deri\_Etkisi} \\ &+ \frac{\Delta R}{R} \text{Girdap\_Akimlari\_Etkisi} \end{aligned} \quad (5.17)$$

Toplam bağlı direnç değişiminin en az olacak şekilde elde edilmesi sonucunda direncin geometrik boyutları, fiziksel ve elektriksel özelliklerine ait parametrelerin değerleri belirlenmiş olur. Bu parametreler,

- Direnç telinin yarıçapı
- Direnç telinin boyu
- Direnç telleri arasındaki mesafe
- Elektriksel ekran kalınlığı
- Elektriksel ekranın iç çapı
- Elektriksel ekran malzemesinin özgül direnci
- Dielektrik katsayısı
- Direnç telinin özgül iletkenliğidir.

Elde edilen geometrik boyutlar kullanılarak hesaplanabilir AC direncin üretilmesi aşamasına başlanmadan önce sanal kısmın gerçek kısma etkisinin belirlenmesi gerekir. Bunun için sanal kısmın değeri hesaplanarak zaman sabiti elde edilir. Zaman sabitinin literatürdeki çalışmalar değerlendirildiğinde nano saniye (ns) mertebesinde elde edilmesi beklenmektedir. Sanal empedans Eşitlik (5.18)'e göre hesaplanır [6,9].

$$\text{Im} = \frac{\omega R^2 \left( \frac{L-2M}{R^2 + \omega^2 (L-2M)^2} + \frac{C_0}{4} - \frac{1}{12} (C_0 - 4C_1) \right)}{1 - \frac{1}{6} R (G_0 - 2G_1) - \frac{\omega^2 (L-2M)^2}{R^2} - \frac{1}{720} R^2 \omega^2 (5C_0^2 - C_0 - 4C_1)} \quad (5.18)$$

Empedans büyüklüğü gerçel ve sanal empedans değerinin sonucu olup (5.19) eşitliğinde belirtildiği şekildedir.

$$Z = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2} \quad (5.19)$$

$\tan\varphi$  sanal empedansın gerçel empedans değerine oranı olarak Eşitlik (5.20)'de gösterildiği şekilde ifade edilir.

$$\tan \varphi = \omega \tau \quad (5.20)$$

Zaman sabiti ise (5.21)'deki ifade kullanılarak belirlenir [9].

$$\tau = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{\text{Im}}{\text{Re}} \quad (5.21)$$

Üretimi yapılan hesaplanabilir AC direncin zaman sabiti hassas LCR metre kullanılarak belirlenebilir. Bunun için gerçel ve sanal kısmın empedans değerlerinin belirlenmesi amacıyla hesaplanabilir AC direnç hassas LCR metreye dört uçlu + ekran bağlantı tekniği kullanılarak bağlanır. Daha sonra LCR metreden R ve X değerleri ölçülür. Ölçülen değerler,

$$\tau = \frac{\chi}{R\omega} \quad (5.22)$$

(5.22) ifadesinde yerine konursa zaman sabitinin değeri elde edilir.

## 6. HESAPLANABİLİR AC DİRENCİN MATEMATİKSEL MODELLEME ÇALIŞMALARI

1000  $\Omega$  Nominal değerli bifilar tip hesaplanabilir AC direncin matematiksel modellemesi için öngörülen teknik veriler Matlab<sup>®</sup>'de hazırlanan programa girilir. Bu değerlere göre tüm etkiler frekansla değişen eğri şeklinde görüntülenir.

### 6.1. Birinci Tasarım

Birinci tasarım için Matlab<sup>®</sup>'de yapılan sayısal çalışmalar sonucu elde edilen parametre değerleri Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1: U.M.E 1 k $\Omega$  bifilar tip AC direncin geometrik boyutları (Birinci tasarım)

Parametreler	Sembolu	Değeri
Direnç telinin boyu (cm)	$\Lambda$	11,2
Nominal direnç değeri ( $\Omega$ )	R	1000
Direnç telleri arasındaki mesafe (cm)	a	0,6
Direnç telinin yarıçapı (cm)	$r_w$	0.0011
Ekranın iç çapı (cm)	D	8
Ekran kalınlığı (cm)	d	0,2
Ekran malzemesinin özgül direnci ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	$\rho$	$2,3 \cdot 10^{-6}$
Dielektrik katsayısı (F/cm)	$\epsilon_0$	$8,854 \cdot 10^{-10}$
Boşluğun manyetik geçirgenliği ( $\text{VsA}^{-1} \text{cm}^{-1}$ )	$\mu$	$4\pi \cdot 10^{-9}$
Direnç malzemesinin özgül iletkenliği ( $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ )		$(1/132) \cdot 10^6$

Tablo 6.1'de verilen değerlerin Eşitlik (5.2), (5.2), (5.3), (5.4) ve (5.5) 'de yerine konulması sonucu birinci tasarım için elde edilen kapasitans ve indüktans değerleri Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2: U.M.E-1 k $\Omega$  bifilar tip AC direncin değerleri (Birinci tasarım)

$C_0$ (pF)	$C_1$ (pF)	L (nH)	M (nH)
1,4	0,2	281	46

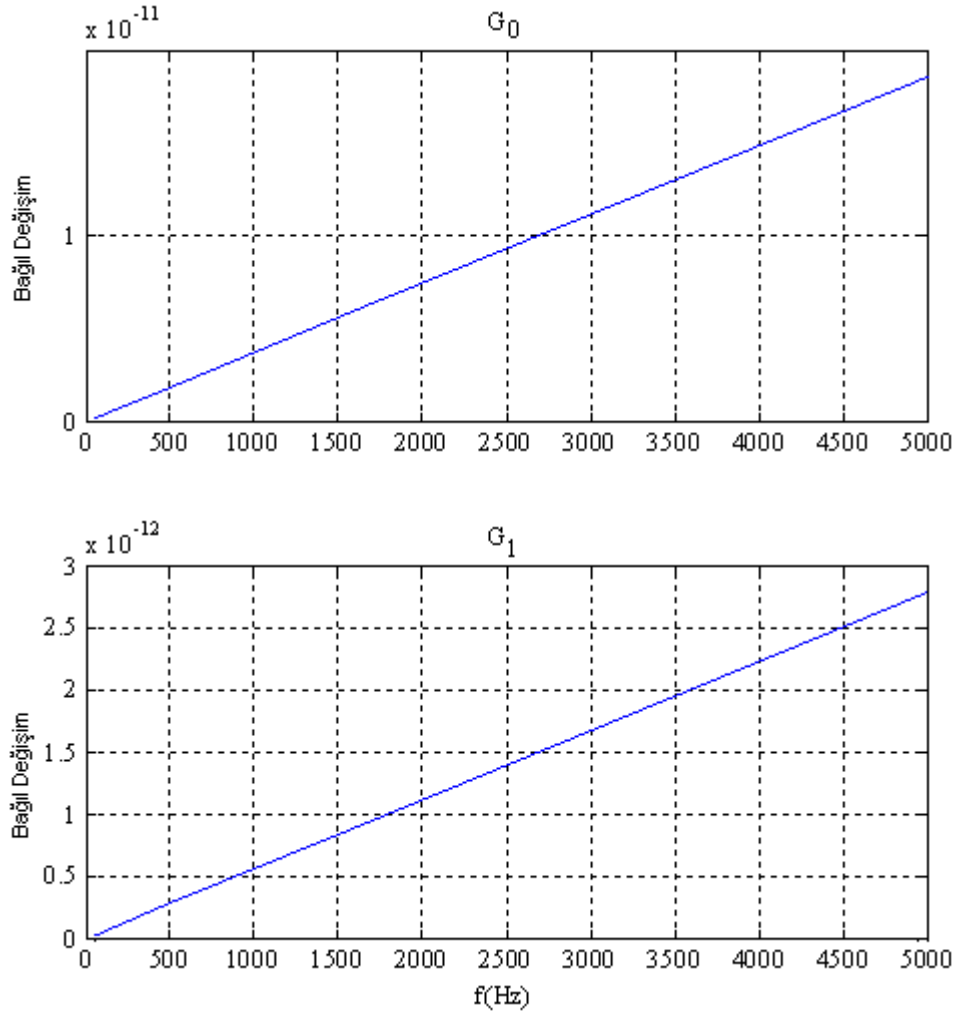


Tablo 6.3: Koller (1975), 1 k $\Omega$  bifilar tip AC direncin değerleri

C <sub>0</sub> (pF)	C <sub>1</sub> (pF)	L (nH)	M (nH)
3,2	0,6	301	47

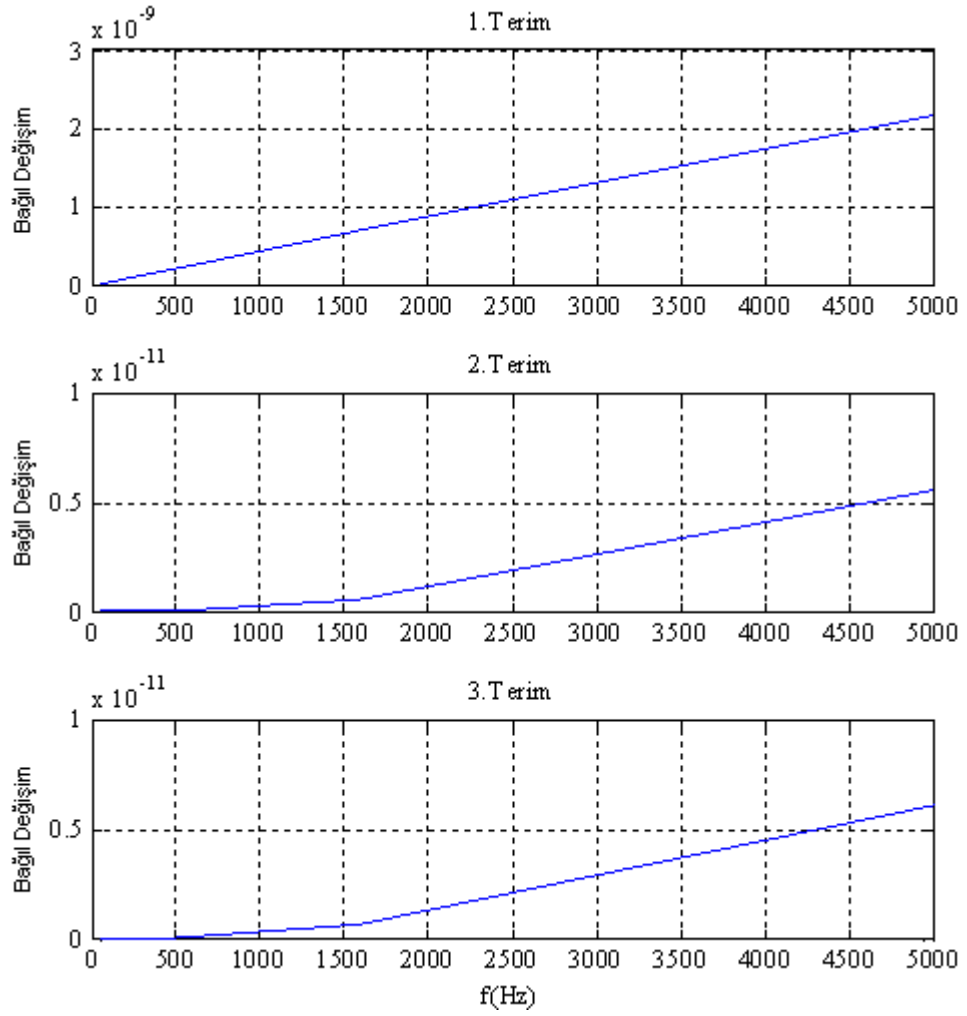
Tablo 6.3’de ise Koller’in (1975), bifilar tip hesaplanabilir AC direncin modellemesi sonucu elde ettiği kapasitans ve induktans değerleri verilmiştir. Tablo 6.2 ve Tablo 6.3’deki değerler karşılaştırıldığında sonuçların birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu durum öngörülen geometrik boyutların Koller’in (1975), çalışmaları sonucunda elde ettiği sonuçlara yakın olduğunun bir ifadesidir.

Birinci tasarım için (5.7) ve (5.8) denklemleri ile verilen 5 kHz’e kadar olan iletkenlik değerleri  $G_0$  ve  $G_1$ , Matlab<sup>®</sup>’de hesaplanmış ve elde edilen sayısal analiz eğrileri Şekil 6.1’de verilmiştir.



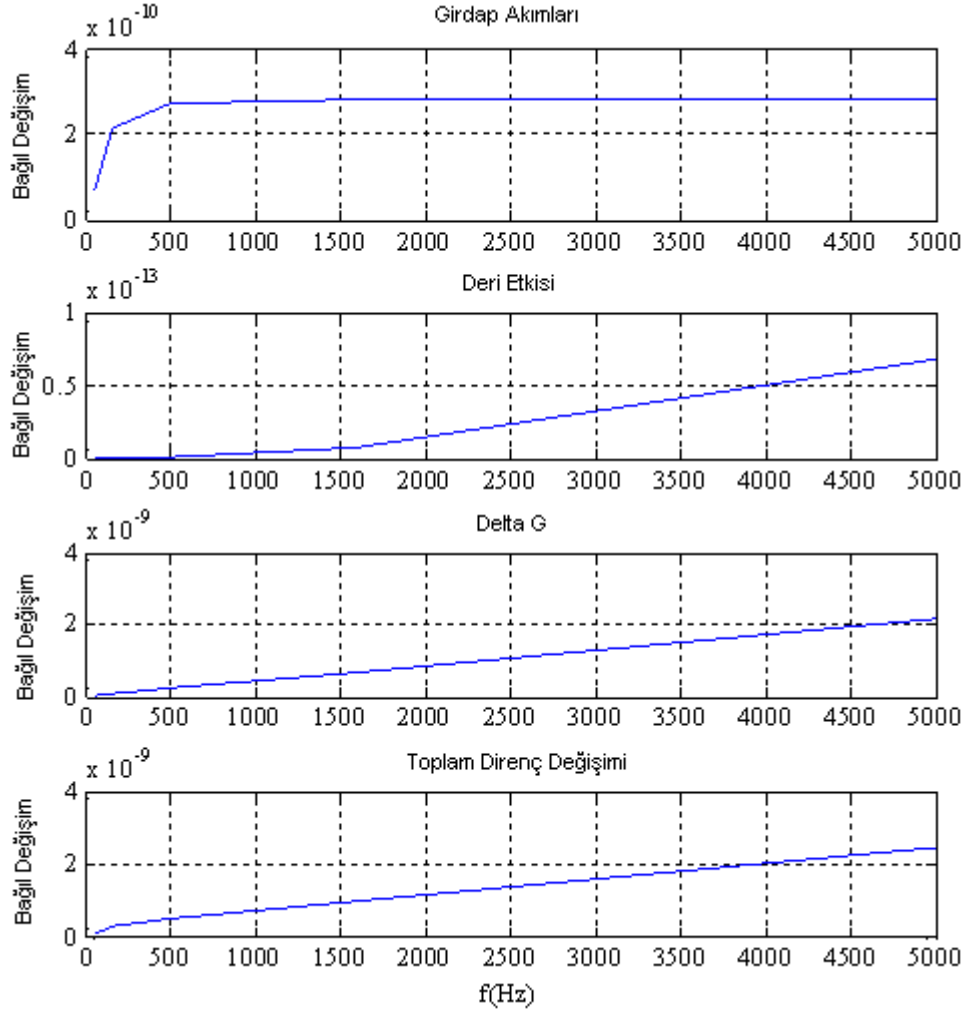
Şekil 6.1: Ekranla ve teller arasında oluşan kayıp iletkenliklerin frekansla değişimine ilişkin eğriler (5kHz'e kadar)

Birinci tasarım için 5 kHz'e kadar empedansın gerçel kısmına etki eden (5.10), (5.11), (5.12) ifadelerinde verilen üç terimin, Matlab<sup>®</sup>'de hesaplanmış ve elde edilen sayısal analiz eğrileri Şekil 6.2'de verilmiştir.



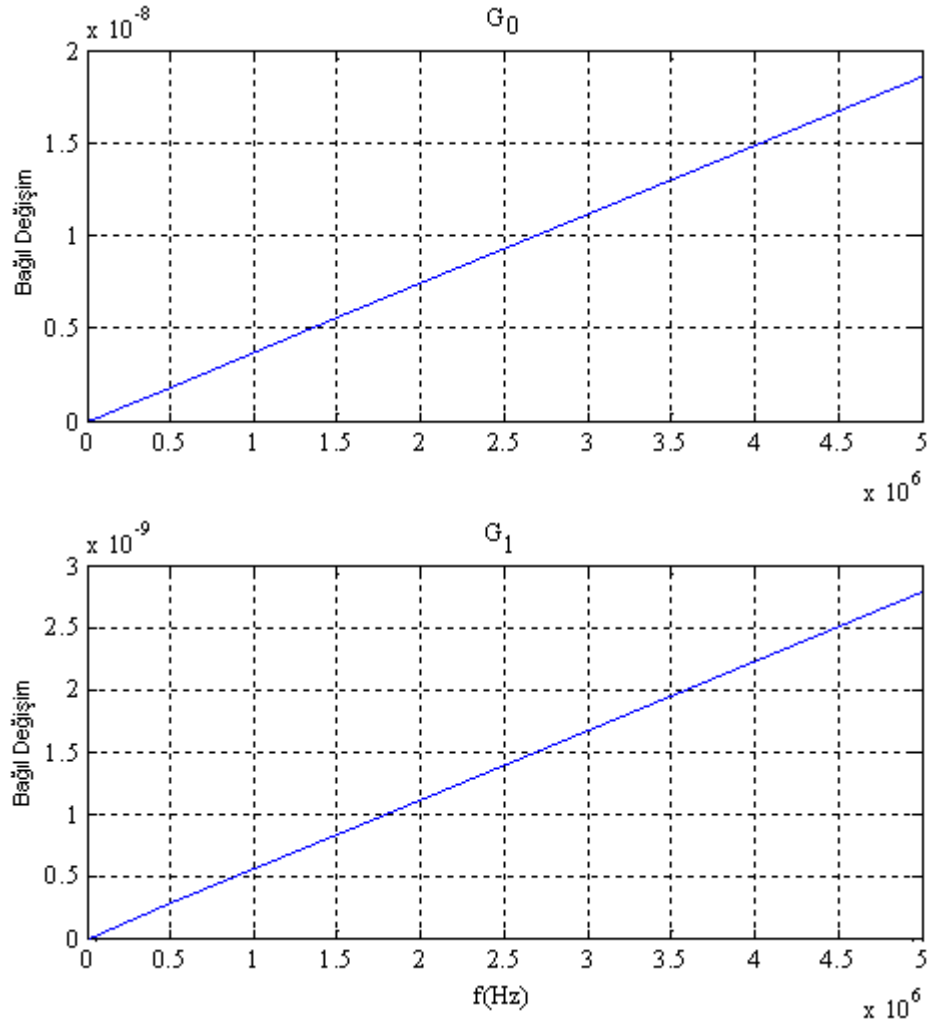
Şekil 6.2:  $\Delta G$ 'nin 1.,2., ve 3. terimleri frekansla değişim eğrileri (5kHz'e kadar)

Birinci tasarım için 5 kHz'e kadar girdap akımları (5.14) ifadesi, deri etkisi (5.15) ifadesi, empedansın gerçel kısmının hatasını veren  $\Delta G$  (5.13) ifadesi ve toplam bağıl direnç değişimi (5.17) ifadesi kullanılarak Matlab®'de hesaplanmış ve elde edilen sayısal analiz eğrileri sırasıyla Şekil 6.3'de verilmiştir.



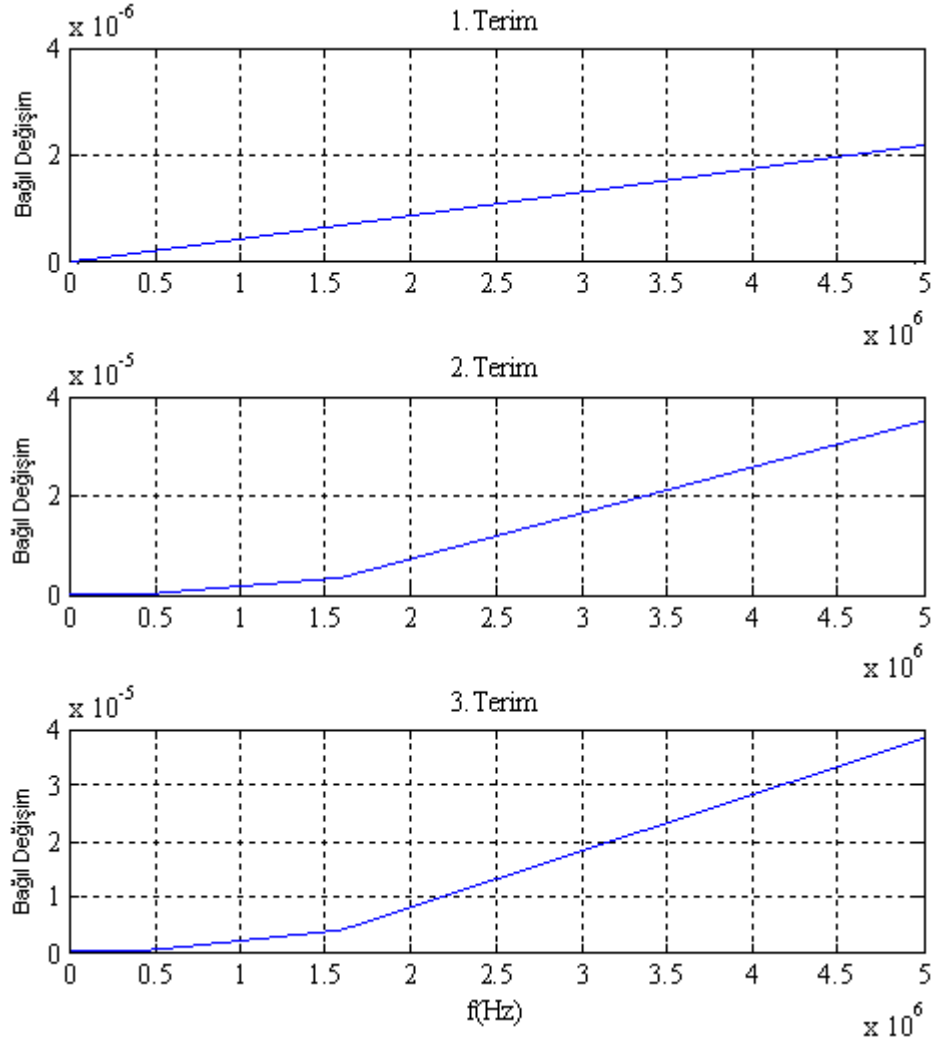
Şekil 6.3: Girdap akımları, deri etkisi,  $\Delta G$  ve toplam bağıl direnç değişiminin frekansa bağlı değişim eğrileri (5 kHz'e kadar)

Birinci tasarım için 5 MHz'e kadar iletkenlik değerleri (5.7) ve (5.8), Matlab<sup>®</sup>'de hesaplanmış ve elde edilen sayısal analiz eğrileri Şekil 6.4'de verilmiştir.



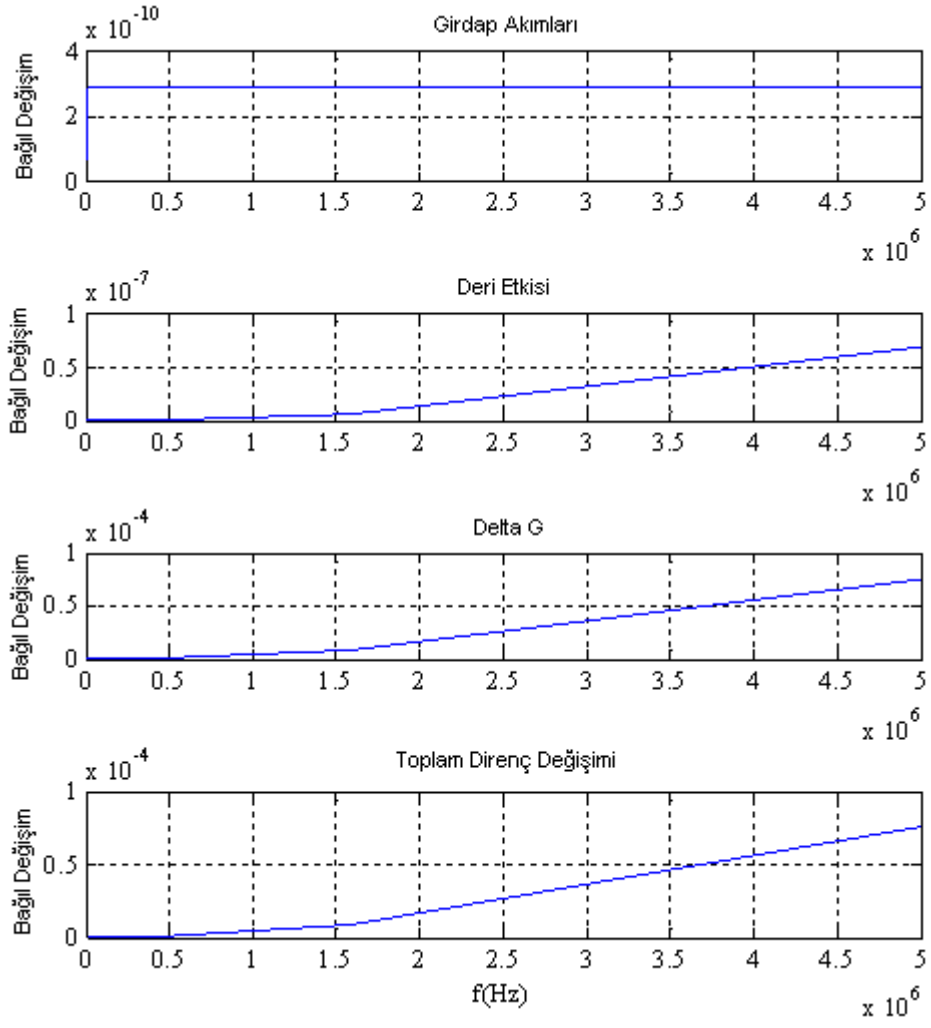
Şekil 6.4: Ekranla ve teller arasında oluşan kayıp iletkenliklerin frekansla değişimine ilişkin eğriler (5MHz'e kadar)

Birinci tasarım için 5 MHz'e kadar empedansın gerçel kısmına etki eden (5.10), (5.11), (5.12) ifadelerinde verilen üç terimin, Matlab<sup>®</sup>'de hesaplanmış ve elde edilen sayısal analiz eğrileri Şekil 6.5'de verilmiştir.



Şekil 6.5:  $\Delta G$ 'nin 1.,2., ve 3. terimleri frekansla değişim eğrileri (5MHz'e kadar)

Birinci tasarım için 5 MHz'e kadar girdap akımları (5.14) ifadesi, deri etkisi (5.15) ifadesi, empedansın gerçel kısmının hatasını veren  $\Delta G$  (5.13) ifadesi ve toplam bağıl direnç değişimi (5.17) ifadesi kullanılarak Matlab<sup>®</sup>'de hesaplanmış ve elde edilen sayısal analiz eğrileri sırasıyla Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.6: Girdap akımları, deri etkisi,  $\Delta G$  ve toplam bağıl direnç değişiminin frekansa bağlı değişim eğrileri (5 MHz'e kadar)

Birinci tasarım için Tablo 6.4 ve Tablo 6.5'de empedansın gerçel ve sanal kısımlar Matlab®'de elde edilen sayısal analiz değerleri verilmiştir.

Tablo 6.4: U.M.E - 1 kΩ bifilar AC direncin gerçel kısım, sanal kısım ve zaman sabiti değerleri

Frekans	Gerçel kısmının değeri (Ω)	Sanal kısmının değeri (Ω)	Zaman sabiti (s)
50 Hz	1000,00	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$0,49 \cdot 10^{-9}$
159 Hz		$0,5 \cdot 10^{-3}$	
500 Hz		$1,5 \cdot 10^{-3}$	
1592 Hz		$4,9 \cdot 10^{-3}$	
5 kHz		$15,2 \cdot 10^{-3}$	
15,9 kHz		$48,7 \cdot 10^{-3}$	
50 kHz		$153 \cdot 10^{-3}$	
159 kHz		$306 \cdot 10^{-3}$	
500 kHz		1,5	
1592 kHz	1000,01	4,9	
5 MHz	1000,08	15,3	

Tablo 6.5: Koller (1975), 1 kΩ bifilar tip hesaplanabilir AC direncin gerçel kısım, sanal kısım ve zaman sabiti değerleri

Frekans	Gerçel kısmının değeri (Ω)	Sanal kısmının değeri (Ω)	Zaman sabiti (s)
50 Hz	1000,00	$0,3 \cdot 10^{-3}$	$0,95 \cdot 10^{-9}$
159 Hz		$0,9 \cdot 10^{-3}$	
500 Hz		$3,0 \cdot 10^{-3}$	
1592 Hz		$9,5 \cdot 10^{-3}$	
5 kHz		$29,8 \cdot 10^{-3}$	
15,9 kHz		$94,9 \cdot 10^{-3}$	
50 kHz		$298 \cdot 10^{-3}$	
159 kHz		$949 \cdot 10^{-3}$	
500 kHz		2,9	
1592 kHz	1000,03	9,5	
5 MHz	1000,26	29,8	

Hesaplanabilir AC direnç üretim teknikleri göz önüne alınarak sınır şartlarında gerçekleştirildi. Matematiksel modelleme sonucunda elde edilen grafikler incelendiğinde girdap akımlarından gelen etkilerin toplam bağıl direnç değişimine etkisinin düşük seviyede kaldığı bu sebeple ekran kalınlığının artırılmasına gerek



olmadığı, aynı şekilde deri etkisinden gelen hatanın düşük seviyede kalması nedeniyle ilgili parametrelerde bir iyileştirmeye gerek olmadığı görülmektedir.

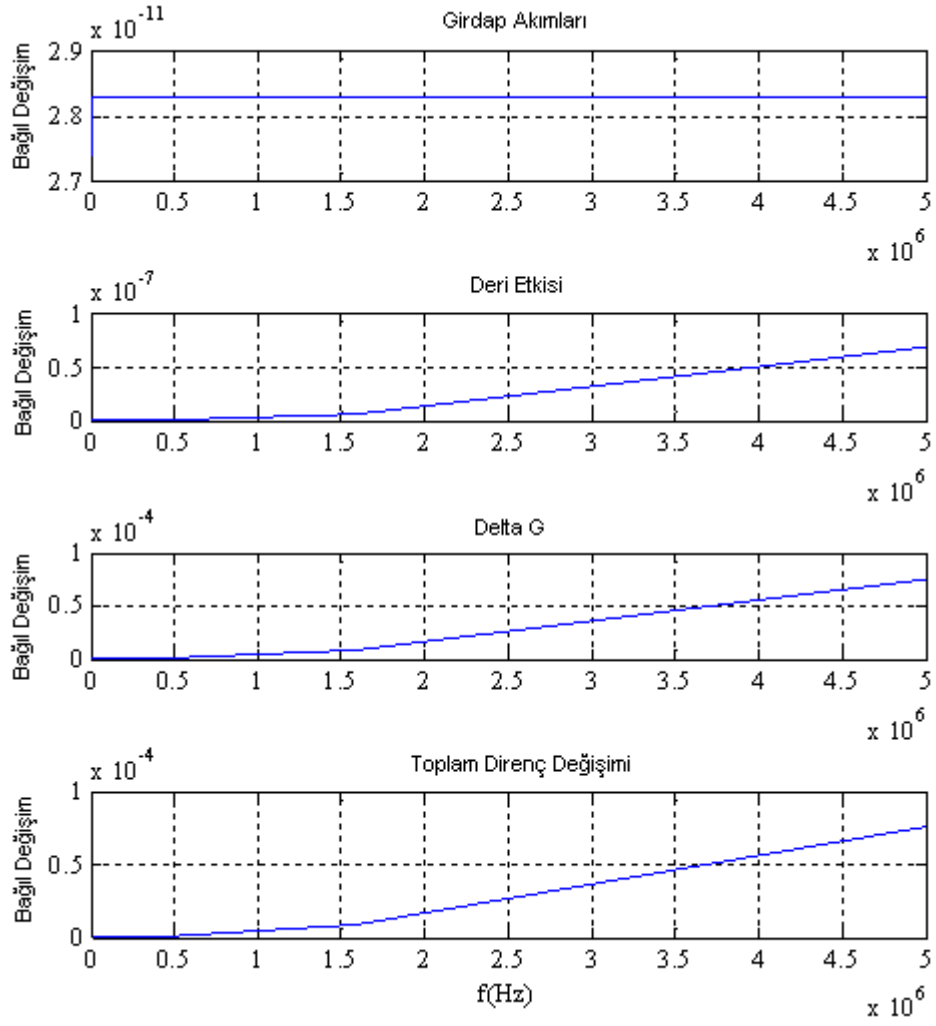
Şekil 6.3 ve Şekil 6.6’da kapasitans, indüktans ve iletkenlik etkilerinin toplam bağlı direnç değişimine etkilerinin önemli olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu etkilerde iyileştirme yapılmasının gerektiği görülmektedir. Ancak birinci tasarımda direnç telinin çapında azaltma veya boyunda herhangi bir değişiklik yapılarak direncin frekans bağımlılığı azaltılması mümkün değildir. Bu durumda birkaç parametre ile iyileştirmeler yapılabileceği bunlarında ekranın çapının artırılması, teller arasındaki mesafenin değiştirilmesinin iyileştirmelere katkı sağlayabileceği öngörülmüştür. Bu sebeple ilk olarak ekran kalınlığı daha sonra teller arasındaki mesafe değiştirilerek sonuçlar tekrar gözlemlenmiştir.

## 6.2. İkinci Tasarım

İkinci tasarımda, elde edilen parametre değerlerinde değişiklikler yapılarak direncin frekans bağımlılığının azaltılması amaçlanmıştır. Bu sebeple ikinci tasarımda, birinci tasarımdan farklı olarak sadece elektriksel ekran kalınlığı azaltılarak sonuçlar değerlendirildi. İkinci tasarımda elektriksel ekran kalınlığı değeri Tablo 6.6’da verildi.

Tablo 6.6: U.M.E-1 k $\Omega$  bifilar tip AC direncin değişen elektriksel ekran kalınlığı değeri (İkinci tasarım)

Parametreler	Sembol	Değer
Elektriksel ekran kalınlığı (cm)	d	2



Şekil 6.7: Girdap akımları, deri etkisi,  $\Delta G$  ve toplam bağıl direnç değişiminin frekansa bağlı değişim eğrileri (Elektriksel ekran Kalınlığı= 2 cm ve 5 MHz'e kadar)

Elektriksel ekran kalınlığının değiştirilmesinin toplam bağıl değişime önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Aslında bu beklenen bir durumdur. Çünkü ekran kalınlığı girdap akımlarının değerinin değişmesine sebep olmaktadır. Girdap akımlarının, toplam bağıl direnç değişimine etkisi ise oldukça azdır. Bu sebeple ekran kalınlığının üretim teknikleri ve standardın kullanımı ile ilgili durumları gözönüne alınarak uygun bir değerde seçilmesi yeterlidir. Elektriksel ekran kalınlığının değiştirilmesi, Birinci tasarımda elde edilen frekans bağımlılığı değerlerinde iyileştirme sağlamamaktadır.

### 6.3. Üçüncü Tasarım

Üçüncü tasarımda, elde edilen parametre değerlerinde değişiklikler yapılarak direncin frekans bağımlılığının azaltılması amaçlanmıştır. Bu sebeple üçüncü tasarımda direnç telleri arasındaki mesafe azaltılarak, Matlab® 'de direncin frekans bağımlılığı sonuçları tekrar hesaplandı. Birinci tasarımdaki diğer parametre değerlerinde herhangi bir değişiklik yapılmadı. Bu tasarım için direnç telleri arasındaki mesafe Tablo 6.7'de verilmiştir.

Tablo 6.7: U.M.E-1 k $\Omega$  bifilar tip AC direncin değişen direnç telleri arasındaki mesafe değeri (Üçüncü tasarım)

Parametreler	Sembol	Değer
Direnç telleri arasındaki mesafe (mm)	a	2

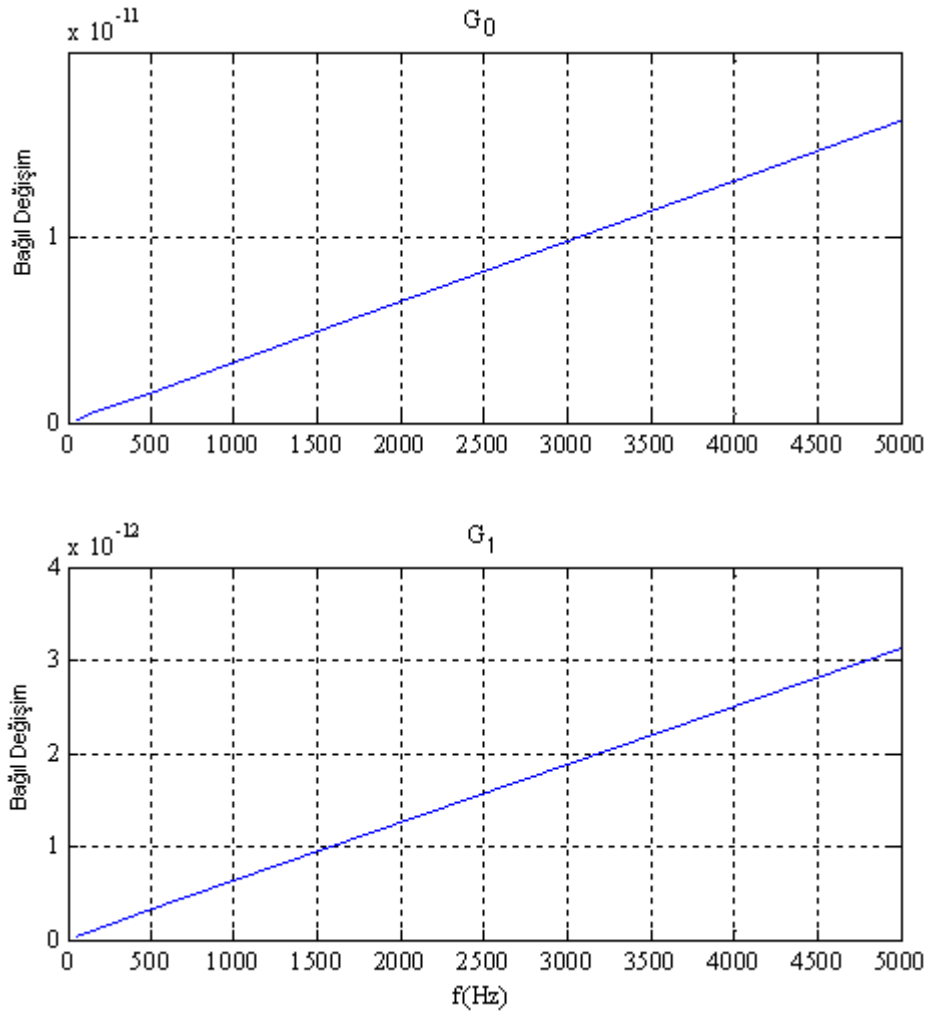
Üçüncü tasarım için Eşitlik (5.2), (5.3), (5.4) ve (5.5)'in Matlab®'de hesaplanması sonucu elde edilen kapasitans ve indüktans değerleri Tablo 6.8'de verilmiştir.

Tablo 6.8: U.M.E-1 k $\Omega$  bifilar tip AC direncin değişen değerleri (Üçüncü tasarım)

C <sub>0</sub> (pF)	C <sub>1</sub> (pF)	L (nH)	M (nH)
1,2	0,2	233	70

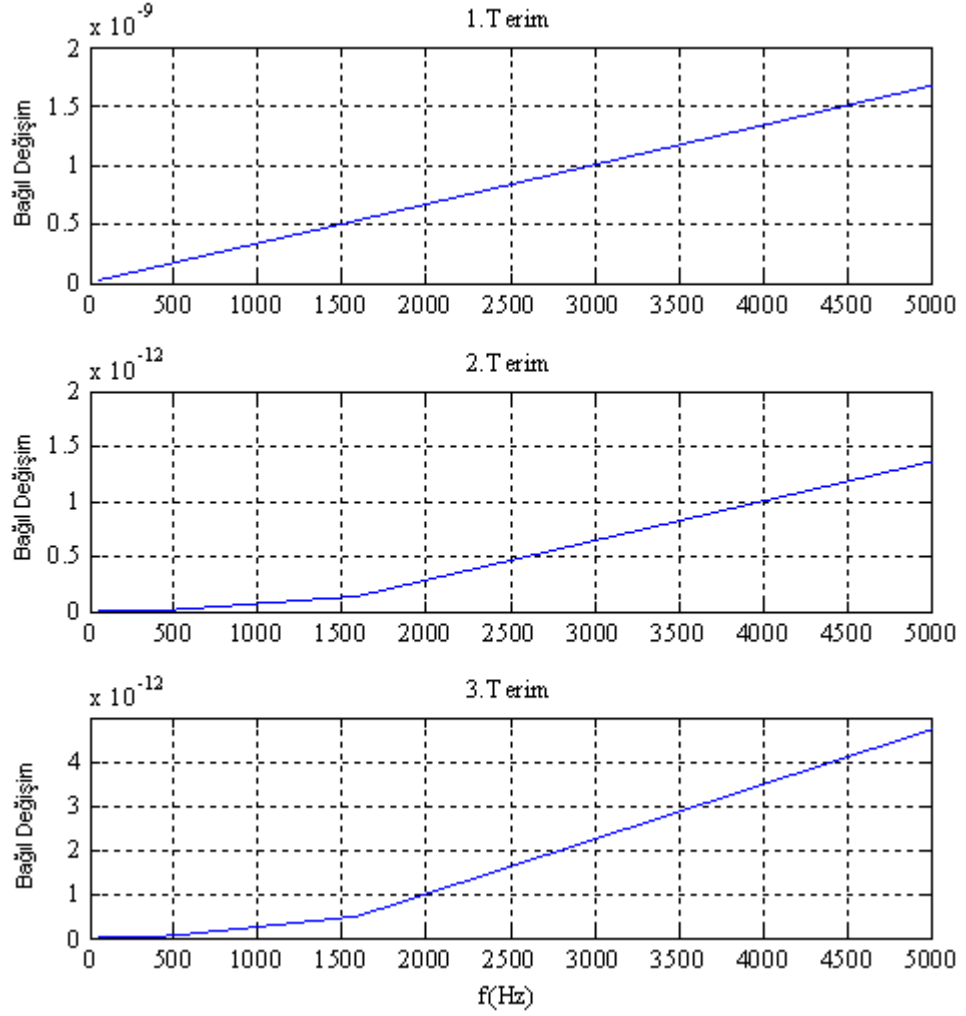
5 kHz'e kadar sayısal analiz sonuçları Şekil 6.8, Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da verilmiştir.

Üçüncü tasarım için 5 kHz'e kadar iletkenlik değerleri (5.7) ve (5.8), Matlab®'de hesaplanmış ve elde edilen sayısal analiz eğrileri Şekil 6.8'de verilmiştir.



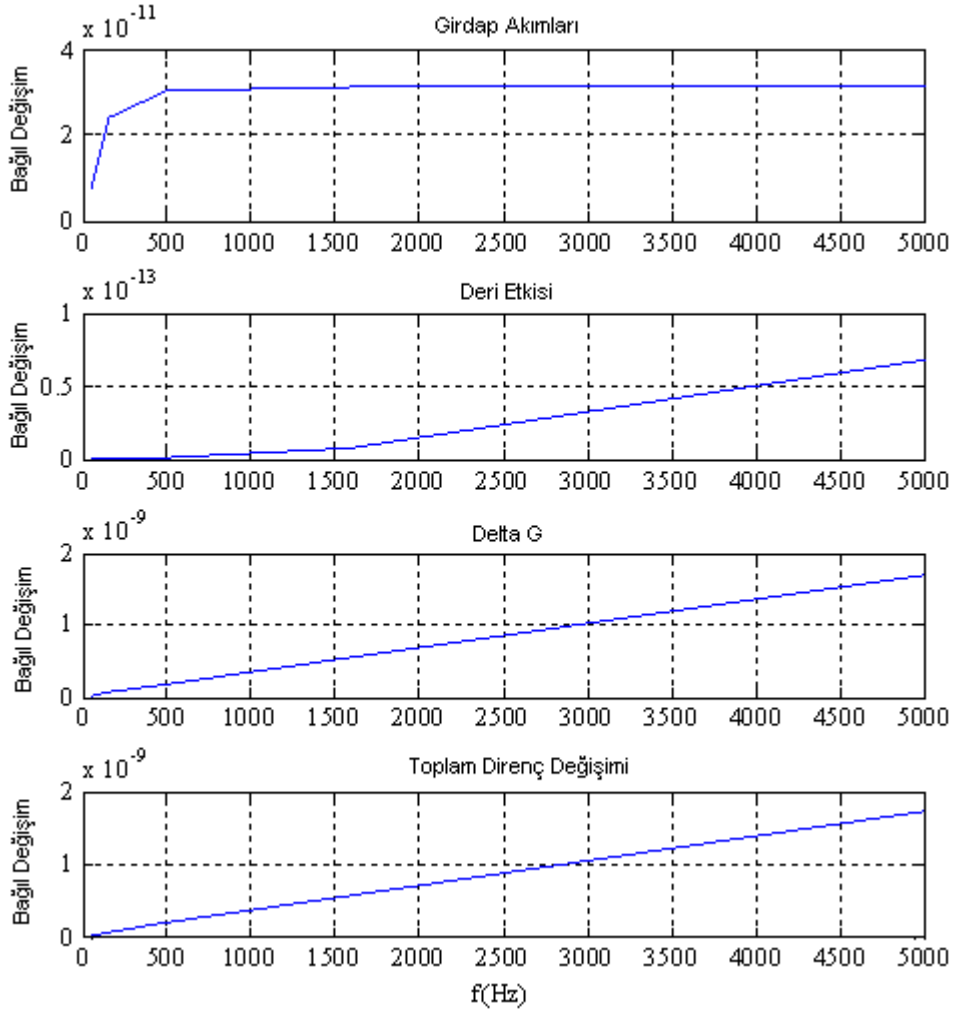
Şekil 6.8: Ekranla ve teller arasında oluşan kayıp iletkenliklerin frekansla değişimine ilişkin eğriler (Direnç telleri arasındaki mesafe = 2 mm ve 5 kHz'e kadar)

Üçüncü tasarım için 5 MHz'e kadar empedansın gerçel kısmına etki eden (5.10), (5.11), (5.12) ifadelerinde verilen üç terimin, Matlab®'de hesaplanmış ve elde edilen sayısal analiz eğrileri Şekil 6.9'da verilmiştir.



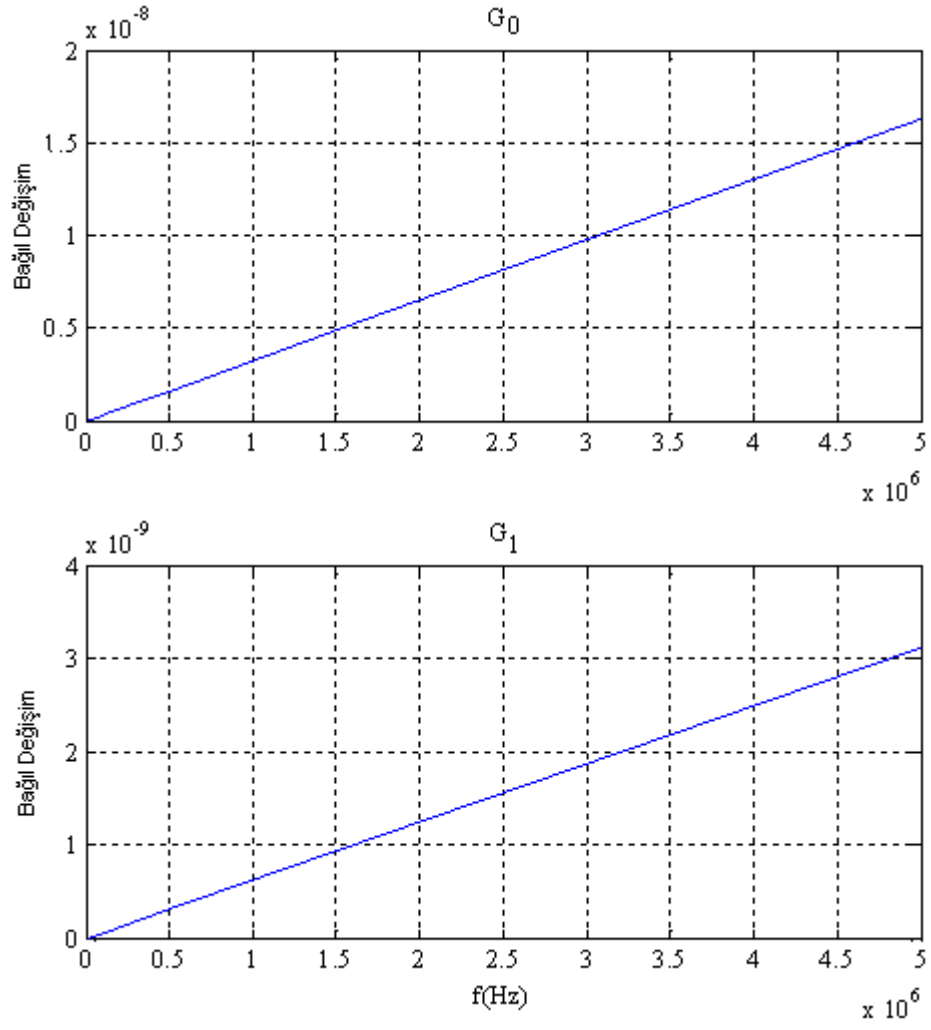
Şekil 6.9:  $\Delta G$ 'nin 1.,2., ve 3. terimleri frekansla değişim eğrileri  
(Direnç telleri arasındaki mesafe = 2 mm ve 5 kHz'e kadar)

Üçüncü tasarım için 5 kHz'e kadar girdap akımları (5.14) ifadesi, deri etkisi (5.15) ifadesi, empedansın gerçel kısmının hatasını veren  $\Delta G$  (5.13) ifadesi ve toplam bağıl direnç değişimi (5.17) ifadesi kullanılarak Matlab®'de hesaplanmış ve elde edilen sayısal analiz eğrileri sırasıyla Şekil 6.10'da verilmiştir.



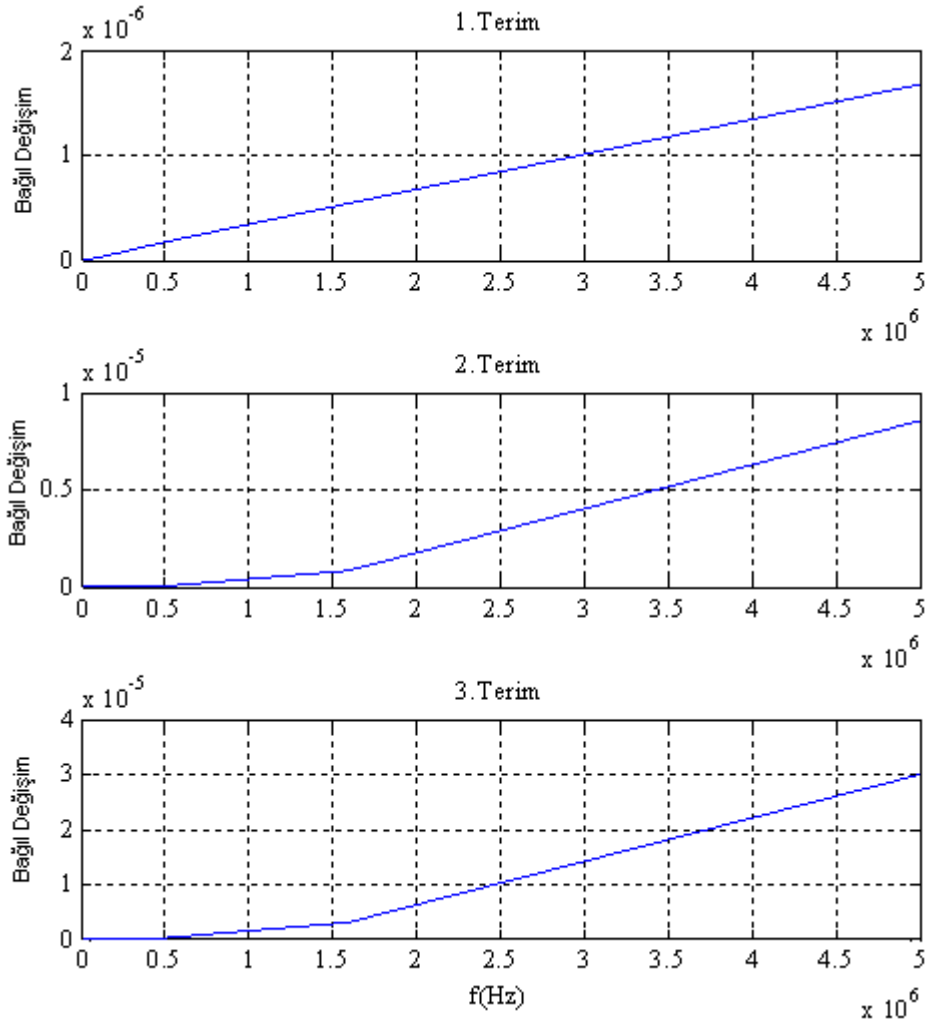
Şekil 6.10: Girdap akımları, deri etkisi,  $\Delta G$  ve toplam bağıl direnç değişiminin frekansa bağlı değişim eğrileri  
(Direnç telleri arasındaki mesafe = 2 mm ve 5 kHz'e kadar)

Üçüncü tasarım için 5 MHz'e kadar iletkenlik değerleri (5.7) ve (5.8), Matlab®'de hesaplanmış ve elde edilen sayısal analiz eğrileri Şekil 6.11'de verilmiştir.



Şekil 6.11: Ekranla ve teller arasında oluşan kayıp iletkenliklerin frekansla değişimine ilişkin eğriler  
 (Direnç telleri arasındaki mesafe = 2 mm ve 5 MHz'e kadar)

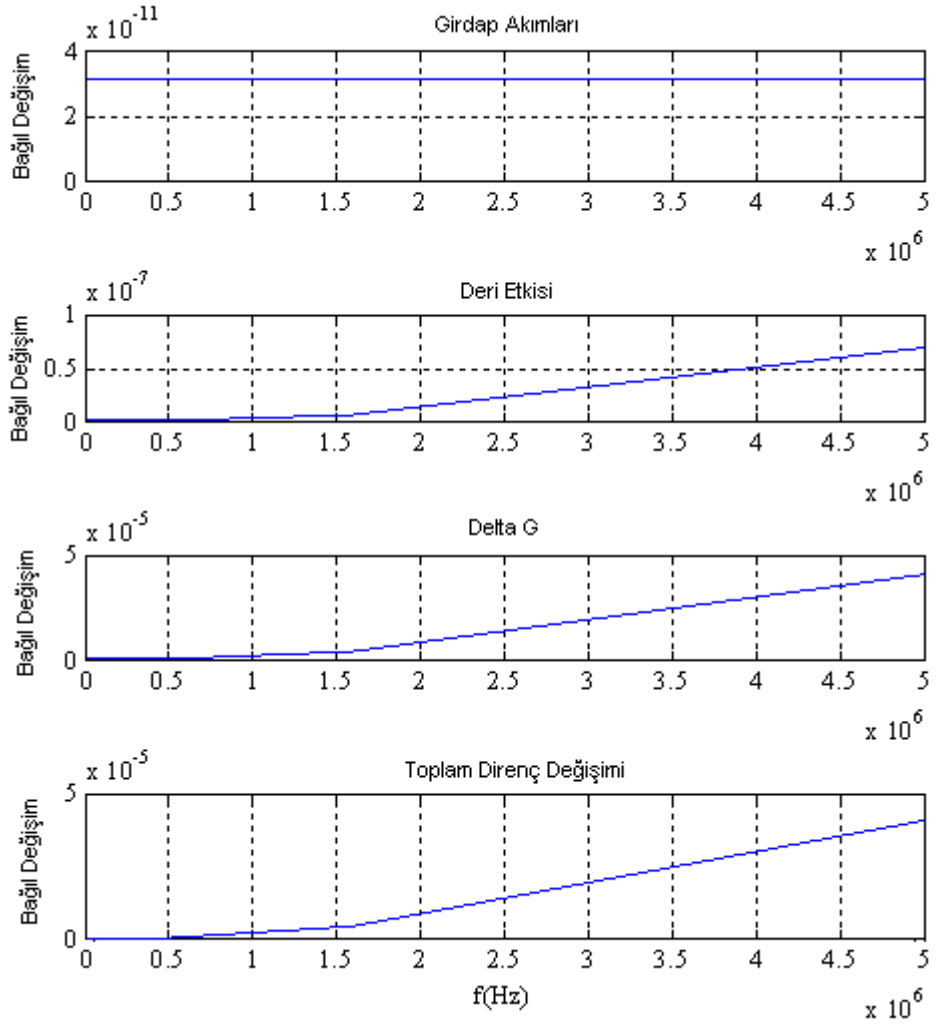
Üçüncü tasarım için 5 MHz'e kadar empedansın gerçel kısmına etki eden (5.10), (5.11), (5.12) ifadelerinde verilen üç terimin, Matlab<sup>®</sup>'de hesaplanmış ve elde edilen sayısal analiz eğrileri Şekil 6.12'de verilmiştir.



Şekil 6.12:  $\Delta G$ 'nin 1.,2., ve 3. terimleri frekansla değişim eğrileri  
(Direnç telleri arasındaki mesafe = 2 mm ve 5 MHz'e kadar)

Üçüncü tasarım için 5 MHz'e kadar girdap akımları (5.14) ifadesi, deri etkisi (5.15) ifadesi, empedansın gerçel kısmının hatasını veren  $\Delta G$  (5.13) ifadesi ve toplam bağıl direnç değişimi (5.17) ifadesi kullanılarak Matlab<sup>®</sup>'de hesaplanmış ve elde edilen sayısal analiz eğrileri Şekil 6.13'de verilmiştir.





Şekil 6.13: Girdap akımları, deri etkisi,  $\Delta G$  ve toplam bağıl direnç değişiminin frekansa bağlı değişim eğrileri  
(Direnç telleri arasındaki mesafe = 2 mm ve 5 MHz'e kadar)

Toplam bağıl direnç değişiminin teller arasındaki mesafe 0,6 cm iken 5 MHz'de 80 ppm civarında iken 0,2 cm'ye düşürüldüğünde 5 MHz'de 40 ppm civarına düştüğü görülmektedir. Teller arasındaki mesafenin 0,6 cm'den 0,2 cm'ye düşürülmesi ile toplam bağıl direnç değişiminde iyileşmeye sebep olduğu görülmektedir. Direnç yüksek frekanslarda kullanılacak ise teller arasındaki mesafenin olabildiğince azaltılması doğru olacaktır.

Literatürde, direnç telinin katlanması için uç kısmında P.T.F.E malzeme kullanılmaktadır. P.T.F.E malzemenin izolasyon direnci  $>10^{15} \Omega$  olmasından dolayı tercih edilmektedir. Ancak P.T.F.E malzemenin mukavemeti zayıftır. Bu sebeple

üretilebilirliği düşünülerek teller arasındaki mesafenin belirlenmesi doğru olacaktır. Literatürde yapılan bir çalışmada bu kısım 0,67 cm olarak uygulandığı görülmüştür. Bu değer hangi sebepler gözönüne alınarak belirlendiği belirtilmemiştir. Bunun iki sebebi olabilir. Birincisi, direncin yüksek frekanslarda kullanılmayacağı düşünülmüş olması, ikincisi, P.T.F.E malzemenin mukavemeti yeterli olmayışıdır. Tüm bu ihtimaller değerlendirildiğinde direncin yüksek frekanslarda kullanılabilmesi için P.T.F.E malzemenin olabildiğince düşük çaplı elde edilmesi gerektiği görülmektedir.

Teller arasındaki mesafenin 0,2 cm'ye düşürülmesi sonucu gerçel kısım, sanal kısım ve zaman sabiti değerlerinde iyileşme sağlandığı Tablo 6.9'da gösterilmiştir.

Tablo 6.9: U.M.E - 1 kΩ bifilar tip hesaplanabilir AC direncin gerçel kısım, sanal kısım ve zaman sabiti değerleri

Frekans	Gerçel kısmının değeri (Ω)	Sanal kısmının değeri (Ω)	Zaman sabiti (s)
50 Hz	1000,00	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$0,37 \cdot 10^{-9}$
159 Hz		$0,3 \cdot 10^{-3}$	
500 Hz		$1,1 \cdot 10^{-3}$	
1592 Hz		$3,7 \cdot 10^{-3}$	
5 kHz		$11,7 \cdot 10^{-3}$	
15,9 kHz		$37,2 \cdot 10^{-3}$	
50 kHz		$117 \cdot 10^{-3}$	
159 kHz		$234 \cdot 10^{-3}$	
500 kHz		1,2	
1592 kHz		3,7	
5 MHz	1000,04	11,7	

Bu değerlerin azalması direncin yüksek frekanslarda daha düşük belirsizlikte elde edilebileceğinin de bir göstergesidir.

## 7. HESAPLANABİLİR AC DİRENÇ STANDARDINDA ÜRETİM VE ÖLÇÜM

Bir önceki bölümde hesaplanabilir AC direnç standardının matematiksel modellemesinin gerçekleştirilmesi sonucu direncin geometrik boyutları elde edildi. Bu bölümde elde edilen geometrik boyutlara uygun olarak direncin üretimi aşamasına geçilmiştir. Bu bölümde direncin üretim aşamasında yapılan çalışmalar anlatılmaktadır.

### 7.1. Hesaplanabilir AC Direnç Standardının Üretilmesi

Matematiksel modellemede direnç telinin çapı 20  $\mu\text{m}$  olarak belirlendi. 20  $\mu\text{m}$  çaplı isaohm direnç teli Şekil 7.1 yaklaşık 1  $\text{k}\Omega$  olacak şekilde kesildi. Yaklaşık 1  $\text{k}\Omega$  olacak şekilde kesilen direnç telinin manganin direnç teli birleştirilmesi için her iki direnç telinin kimyasal olarak temizlenmesi gerekir [12,13].



Şekil 7.1: İsaohm direnç telleri

Kesilen direnç teli öncelikle izopropil alkol banyosunda ilk temizlik amacıyla 20 dakika bekletildi. Alkol banyosundan çıkartılan direnç teli üzerindeki yağ tabakalarının temizlenmesi amacıyla, yağ temizleyici spreyci kullanıldı. Bu aşamadan sonra direnç teli üzerindeki oksit tabakalarının temizlenmesi amacıyla üretici firmanın önerdiği yöntem (pickling işlemi) uygulandı. Bu yöntemde ilk olarak

direnç teli çinko klorür (agressive flux) banyosunda 10 dakika bekletildi. İkinci olarak direnç teli kromik asit içerisinde 10 dakika bekletildi. Son olarak direnç teli kromik asit içerisinde çıkartıldıktan sonra tekrar izopropil alkol banyosuna bırakıldı. Bu şekilde isaohm direnç teli birleştirme işlemine hazır duruma getirilmiş oldu. Bu çalışma isaohm ve manganin direnç tellerinin sağlıklı bir şekilde birleştirilmesi için gerekmektedir. Direnç tellerinin sağlıklı bir şekilde birleştirilmesi ile direncin kararlılığının artırılması amaçlanmaktadır.

Şekil 7.2’de kimyasal temizleme işleminde kullanılan yağ temizleyici sprej, aggressive flux, kromik asit ve sülfirik asit gösterilmiştir.



Şekil 7.2: Kimyasal işlemlerde kullanılan yağ temizleyici sprej, aggressive flux, kromik asit ve sülfirik asit

İsaohm direnç telinin birleştirileceği manganin direnç teli (0,5 mm çaplı) için de aynı prosedür uygulanır. Ancak isaohm direnç teli için kullanılan kromik asit yerine manganin direnç telinde sülfirik asit kullanılmıştır.

Hazırlanan isaohm ve manganin direnç telleri önceden hazırlanmış olan nokta kaynağı sistemi ile birleştirildi. Ancak bunun için nokta kaynağı sisteminin kontak temizleyici ile temizlenmesi daha sonrada denemeler yapılarak uygulanacak kaynak süresinin zamanının cihaz üzerinde ayarlanması gerekir. Tüm bu işlemler tamamlandıktan sonra hazırlanmış direnç tellerinin birleştirilmesi işlemine geçilir. Birleştirme işlemine başlanmadan önce nokta kaynağı sistemi yine kontak temizleyici ile temizlenir. 20 µm çaplı isaohm direnç teli altta, 0,5 mm çaplı manganin direnç teli üstte olacak şekilde nokta kaynağı sistemine (Şekil 7.3) yerleştirildi.



Şekil 7.3: Nokta kaynağı sistemi

Daha sonra teller üstten sıkıştırılarak kaynak işlemi için nokta kaynağı sisteminden 3 saniyeyi aşmayacak şekilde bir kez elektriksel darbe uygulandı. Bunun sebebi uzun süre elektriksel darbe uygulandığında isaohm direnç telinin erimesi, kısa süreli elektriksel darbe uygulandığında ise kaynak işleminin gerçekleşmediği görüldü.

Kaynak işlemi yapıldıktan sonra birleştirilmiş teller sistemden yavaş bir şekilde ayrıldı. Diğer uç içinde aynı birleştirme işlemleri yapıldıktan sonra artık direnç teli hazır duruma getirildi.

Bu direnç tellerinden öncelikle 4 adet üretildi. Daha sonra üretilen bu direnç telleri uzun dönem kararlılığı sağlamak amacıyla farklı ısıl işlem prosedürlerine tabi tutuldu (Tablo 7.1). Direnç teli üreticisi bilgilerine göre 250 °C üzerinde bir sıcaklıkta isaohm direnç telinin elektriksel özelliğinin bozulduğu belirtilmiştir [12]. Bu sebeple ısıl işlem çalışmaları nedeniyle ısıl işlem çalışmaları 175 °C'de fırın (Şekil 7.4) içerisinde gerçekleştirildi.



Şekil 7.4: Fırın

Tablo 7.1: İsaohm+manganin direnç teline uygulanan işlemler

Numarası	Uygulanan işlem
1	Hiçbir işlem yapılmamıştır.
2	175 °C sıcaklıkta fırın içerisinde 2 saat ısıtılıp 1 saat soğuk suda şoklanmıştır. Bu işlem 20 kez tekrarlanmıştır.
3	175 °C sıcaklıkta fırın içerisinde 25 saat süreyle tutulmuştur.
4	175 °C sıcaklıkta fırın içerisinde 72 saat süreyle tutulmuştur.

Tabloda belirtilen işlemler tamamlandıktan sonra ahşap malzemeden bir düzenek hazırlanmış ve direnç telleri düz bir şekilde ahşap malzeme üzerinde (Şekil 7.5) gergin hale getirildi.



Şekil 7.5: Ahşap düzenek

Daha sonra ahşap malzemeden hazırlanan düzenek ısıls izolasyonlu bir dolap içersine (Şekil 7.6) yerleştirildi.



Şekil 7.6: Ahşap düzeneğin izolasyonlu dolap içersine yerleştirilmesi

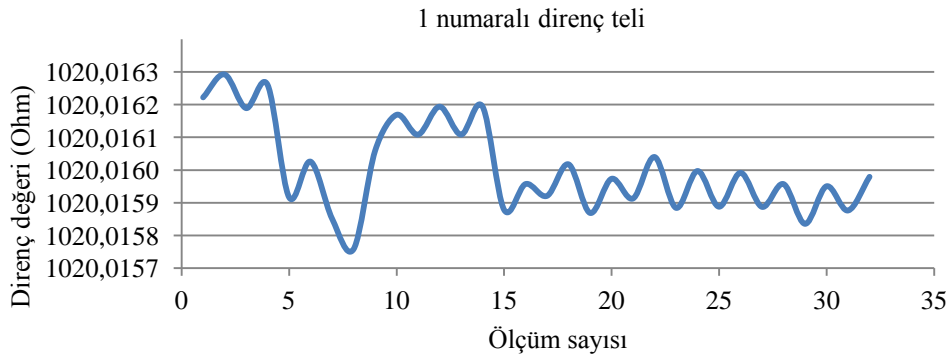
Dolap içersine konulan 4 adet direnç, otomatik DC direnç ölçüm köprüsünün kanallarına 4 uçlu olarak bağlandı. Bu 4 direnç telleri 15 gün süre ile farklı zaman aralıklarında MI6010B otomatik direnç ölçüm köprüsü ile ölçüldü.

Şekil 2.6’da MI6010B otomatik direnç ölçüm köprüsü ve Şekil 7.7’de bu ölçüm köprüsü ile gerçekleştirilen ölçümlerden bir örnek görülmektedir.

4 direnç teli için 15 gün süreyle günde 1 saat yapılan ölçümlerde elde edilen eğriler sırasıyla Şekil 7.8, Şekil 7.9, Şekil 7.10 ve Şekil 7.11’de verildi. Elde edilen eğrilerde direncin yeni üretilmiş olması, bu nedenle yüksek değerlerde kaymalar göstermesi nedeniyle ilk 3 günlük veriler standart sapma hesabında dikkate alınmadı. Metrolojik çalışmalarda ilk günlerde yapılan veriler direncin değeri oturmadığı için bu şekilde bir yöntem izlenerek yapılmaktadır.

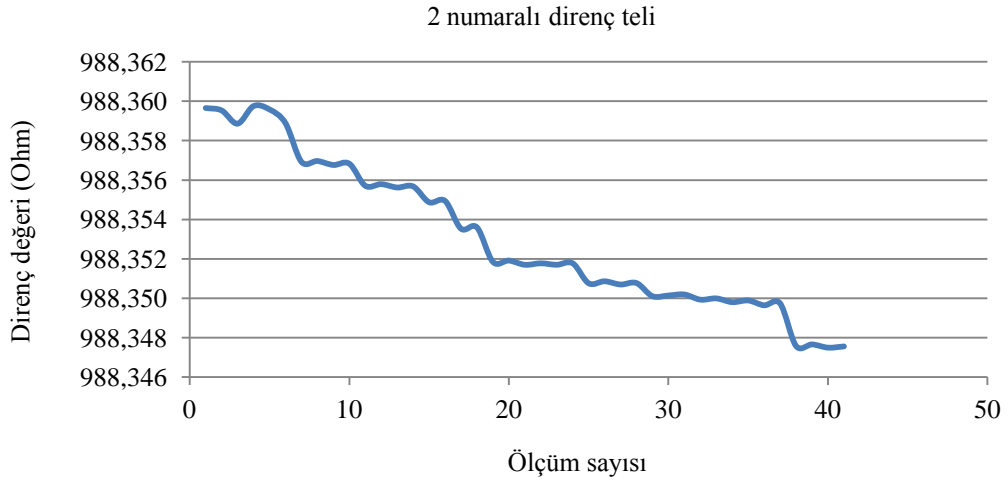


Şekil 7.7: Otomatik direnç ölçüm köprüsünde ölçülen direnç değeri verileri

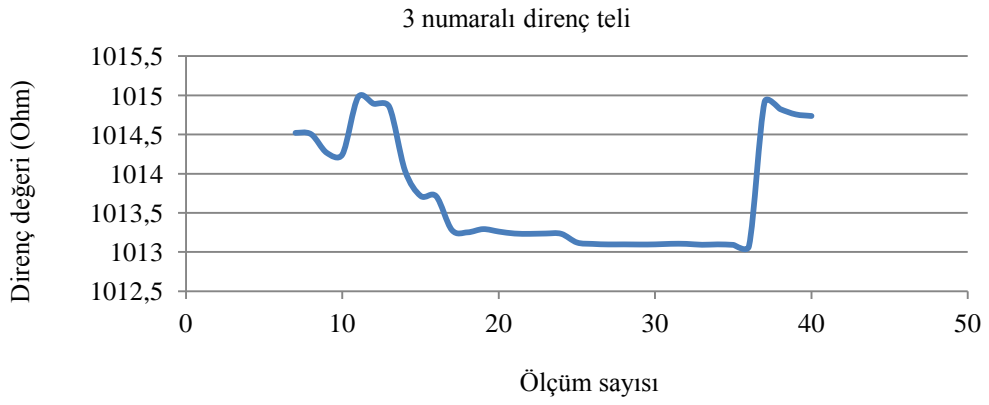


Şekil 7.8: 1 numaralı direnç telinin 15 günlük kararlılığı (standart sapma 0,14 ppm)

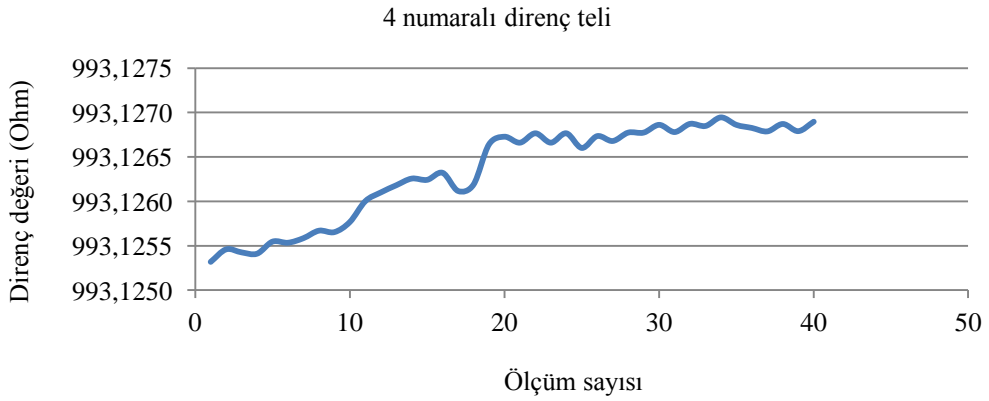




Şekil 7.9: 2 numaralı direnç telinin 15 günlük kararlılığı (standart sapma 2,5 ppm)



Şekil 7.10: 3 numaralı direnç telinin 15 günlük kararlılığı (standart sapma 700 ppm)



Şekil 7.11: 4 numaralı direnç telinin 15 günlük kararlılığı (standart sapma 0,27 ppm)

Şekiller incelendiğinde 1 numaralı direnç telinin ilk 7 günlük değerlerinde kararlılığın daha düşük olduğu ancak 7. günden sonra alınan ölçümlerde kararlılığın arttığı, direnç değerinde herhangi bir kayma olmadığı (Şekil 7.8), 2 numaralı direnç telinde ise kararlılığın kısa dönemde sağlandığı ancak direncin uzun dönemde kaydığı gözlemlendi (Şekil 7.9). 3 numaralı direnç telinde kararlılık ve uzun dönem kayması konusunda herhangi bir sonuç elde edilemediği ani bir şekilde doğruluğunun değişmesi nedeniyle hatalı bir numune yapıldığı anlaşıldı. (Şekil 7.10). Son olarak 4 numaralı telde ise ilk 5-6 günlük ölçümlerde direnç değerinin sürekli kaydığı ancak sonraki ölçümlerde ise kaymanın azaldığı ve kararlılığın arttığı görüldü (Şekil 7.11).

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda 1 numaralı direnç telinde istenilen düzeyde kararlılık ve yıllık kayma değerlerinin elde edilebileceği, 2 numaralı direnç telinde sürekli bir kaymanın gözlemlendiği bu sebeple ısıtma işlem periyodunun ve şeklinin uygun olmadığı, 3 numaralı telinde sonuçların iyi olmadığı bunun sebebinin ise yüksek ihtimalle tellerin birleştirilmesi işlemi sırasında kontaklardaki kirlilik veya nokta kaynağı işleminin sağlıklı bir şekilde yapılmadığı, son olarak 4 numaralı direnç telinde ise kararlılığın arttığı ve kaymanın eğiminin azalması nedeniyle kullanılmasının uygun olacağı değerlendirildi.

Bu aşamada direncin kararlılığının artırılması ile ilgili deneysel çalışmalar tamamlanmış olup bu aşamadan sonra direncin doğruluğunun iyileştirilmesi gerekmektedir. Çünkü AC direnç ölçüm köprülerinde doğruluğu %0,1'den iyi olmayan dirençler kullanılamamaktadır. Bu sebeple 72 saat süre ile ısıtma işlem görmüş ve doğruluğu %0,1'den daha iyi bir direnç teli hazırlamak gerekir.

Aynı kimyasal süreçler ve birleştirme yöntemi uygulanarak değeri 999,3  $\Omega$  olan bir direnç teli hazırlanmıştır. Isıtma işlem görmüş direnç telinin montajlanmasının zor olması nedeniyle ısıtma işlem yapılmadan önce direnç telinin montajlanması gerekmektedir.

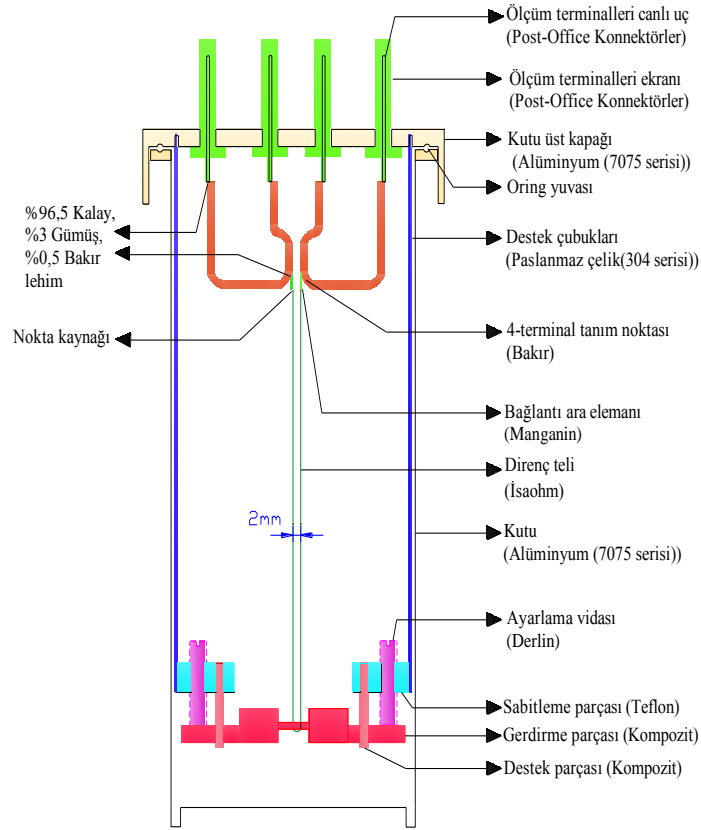
Direnç telinin montajlanacağı direnç kutusu ve diğer parçaları Autocad® çizim programında çizilmiş (Matematiksel modellemede elde edilen geometrik boyutlara uygun olarak) ve daha sonra üretimi özel bir firma tarafından gerçekleştirilmiştir.

Üretilen mekanik kutu ve diğer parçalar izopropil alkol banyosunda (Şekil 7.12) “ultrasonik cleaner” yöntemi ile temizlendi.



Şekil 7.12: İzopropil alkol banyosu

Şekil 7.13’de üretimi yapılan hesaplanabilir AC direnç standardının mekanik parçalarını gösteren teknik çizimi gösterilmektedir.



Şekil 7.13: Hesaplanabilir AC direnç standardının teknik çizimi

Direnç telinin montaj işlemleri gerçekleştirilirken matematiksel modelde elde edilen geometrik boyutlar göz önüne alındı. Özellikle direnç telleri arasındaki mesafenin 2 mm. olması ve merkezde olmasına dikkat edildi. Montaj işlemi tamamlandıktan sonra ısı işlem sırasında konektörlerin okside olmasını engellemek amacıyla P.T.F.E bant ile konektörlerin iç ve dış kısmı hava girmeyecek şekilde kapatıldı. Montajlanan direnç kutusu, alt kısmı olmadan fırın içerisine yerleştirildi. Bu şekilde 72 saat süre ile 175°C sıcaklıkta bekletildi. Daha sonra laboratuvar ortamında 23°C'de soğumaya bırakıldı.

Hesaplanabilir AC direnç standardı 4-uçlu + ekran bağlantı tipine göre tasarlandı (Şekil 7.14). Ölçüm uçları noktasında kontak direncini azaltmak için post-office tip konektör tercih edildi. 4-uçlu bağlantı noktasında 2,5 mm<sup>2</sup> bakır tel, elektriksel direncinin yüksek olması sebebiyle ekran ile direnç teli arasında P.T.F.E malzeme, direnç telinin gerginliğinin ayarlanmasında kompozit malzeme tercih edildi. Kompozit malzemenin tercih edilmesinin iki nedeni vardır. İlk nedeni elektriksel direncinin P.T.F.E kadar iyi olması diğer nedeni ise mekanik olarak işlenebilirliğinin olmasıdır. Kompozit malzeme ile iki tel arasındaki 2 mm mesafe sağlandı. Standardın kutusu ise uçak parçalarında da kullanılan 7075 serisi alüminyum malzemeden yapıldı. 7075 serisi alüminyum malzeme tercih edilmesinin nedeni ise elektriksel ekran kalitesinin artırılması ve ağırlığın azaltılmasıdır.



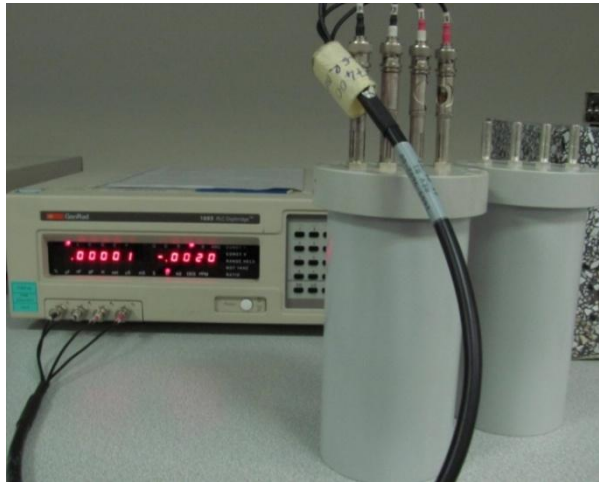
Şekil 7.14: Geliştirilmiş hesaplanabilir AC direnç standardı

Hesaplanabilir AC direnç standartlarının kalibrasyonları öncelikle zaman sabiti değerinin daha sonra DC direnç değerinin sertifikalandırılması ile yapılmaktadır. Zaman sabiti değerinin olabildiğince düşük elde edilmesi hesaplanabilir direnç standardının frekans bağımlılığının düşük olması anlamına gelmektedir [14].

## 7.2. Zaman Sabitinin Belirlenmesi

Hesaplanabilir AC dirençlerin kalibrasyonları zaman sabiti değerleri ölçülerek yapılmaktadır [15,16]. Zaman sabiti değerini doğrudan ölçebilen hassas köprülerin U.M.E’de bulunmaması nedeniyle alternatif bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen bu alternatif yöntem ikincil seviye ölçümlerde kullanılabilir. Ancak 1 k $\Omega$  bifilar tip hesaplanabilir AC direncin zaman sabiti değerleri ile ilgili fikir vermesi amacıyla belirtilen yöntem uygulandı. Bu yöntemde 1 k $\Omega$  bifilar tip hesaplanabilir AC direncin DC direnç değeri (R) ve reaktans değeri (X) 1 kHz frekans değerinde LCR metre ile ölçüldü.

LCR metre ile yapılan ölçümlerde öncelikle cihazın sıfır hatası belirlendi (Şekil 7.15). Daha sonra üretimi yapılan hesaplanabilir AC direnç standardı ölçüldü (Ölçümler P.T.F.E izolasyonlu BNC-Post-Office 1 metre uzunluklu kablo kullanıldı). Ölçülen değere sıfır hatası düzeltilmesi yapılarak doğru sonuçlar elde edildi. Ölçüm sonuçları ve hesaplanan zaman sabitinin değeri Tablo 7.2’de verildi.



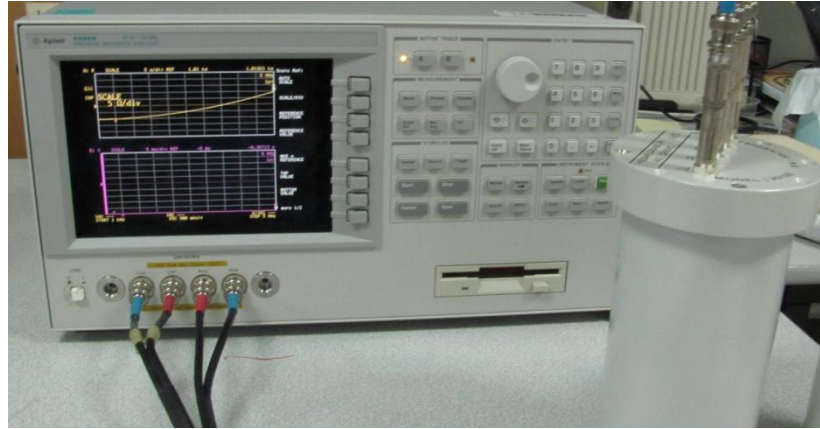
Şekil 7.15: LCR Metre ile R ve X’in sıfır hatası ölçümleri

Tablo 7.2: Zaman sabitinin belirlenmesi

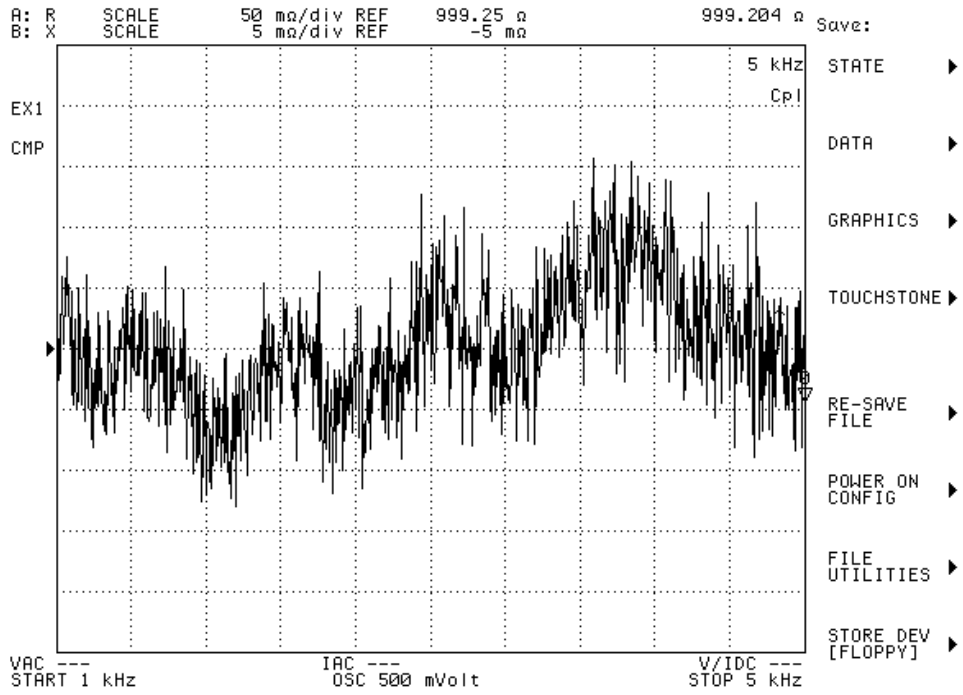
Sembol	Ölçülen değer	Zaman sabitinin hesaplanması
R	999,24 $\Omega$	$t = X / (R \cdot \omega) = 4,6 \cdot 10^{-10} \text{ s}$
X	0,0029 $\Omega$	
f	1 kHz	

### 7.3. Frekans Bağımlılığı Ölçümleri

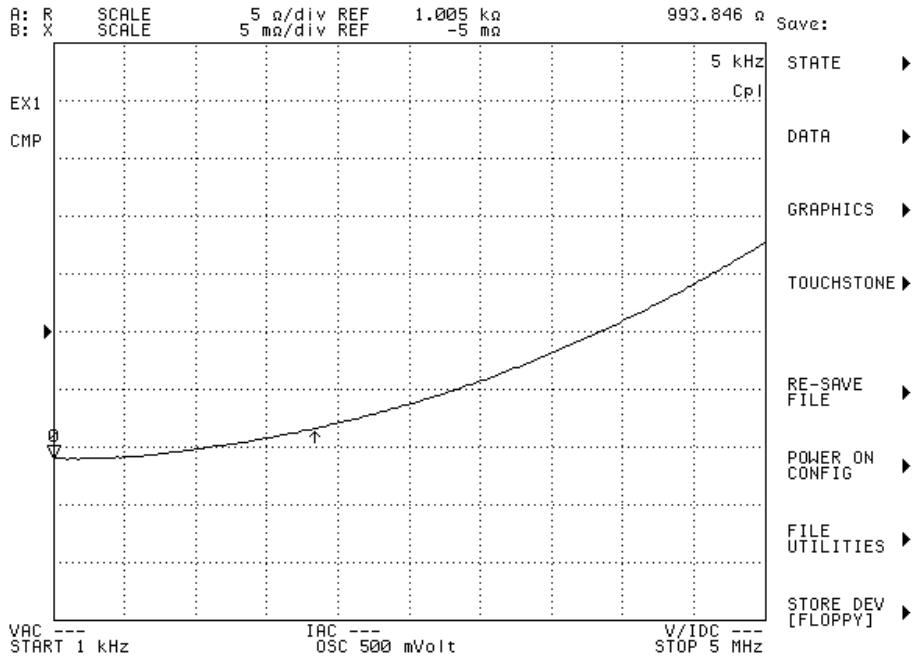
Hesaplanabilir AC direnç standartları birincil seviye standartlar olması nedeniyle frekans bağımlılığı değerleri birincil seviye hassas AC direnç köprüleri ile yapılmaktadır. U.M.E'de bu seviyelerde ölçüm yapabilecek sistemler kurulum aşamasındadır. Bu sebeple üretimi yapılan hesaplanabilir AC direncin gerçek karakteristiğini belirlemek mümkün değildir. Yine de empedans ölçümlerinde 800 ppm doğrulukla HP4294A ile üretimi yapılan hesaplanabilir AC direncin frekans bağımlılığı ile ilgili ölçümler yapıldı (Şekil 7.16). Alınan ölçüm sonuçları eğrisel olarak, Şekil 7.17, Şekil 7.18, Şekil 7.19, ve Şekil 7.20'de verilmiştir.,



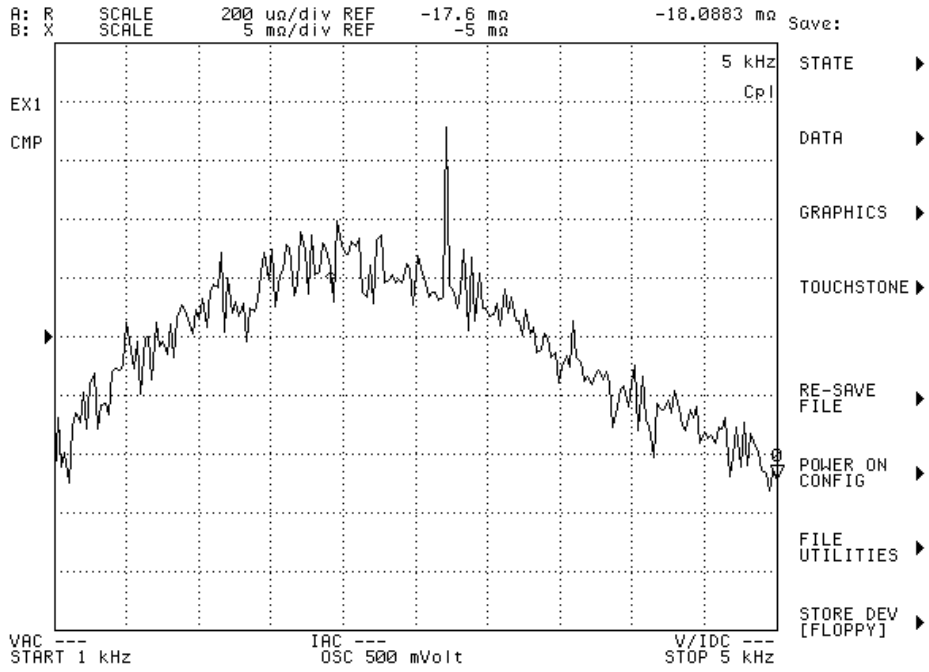
Şekil 7.16: Empedans analizör ile AC direnç ölçümlerinin yapılması



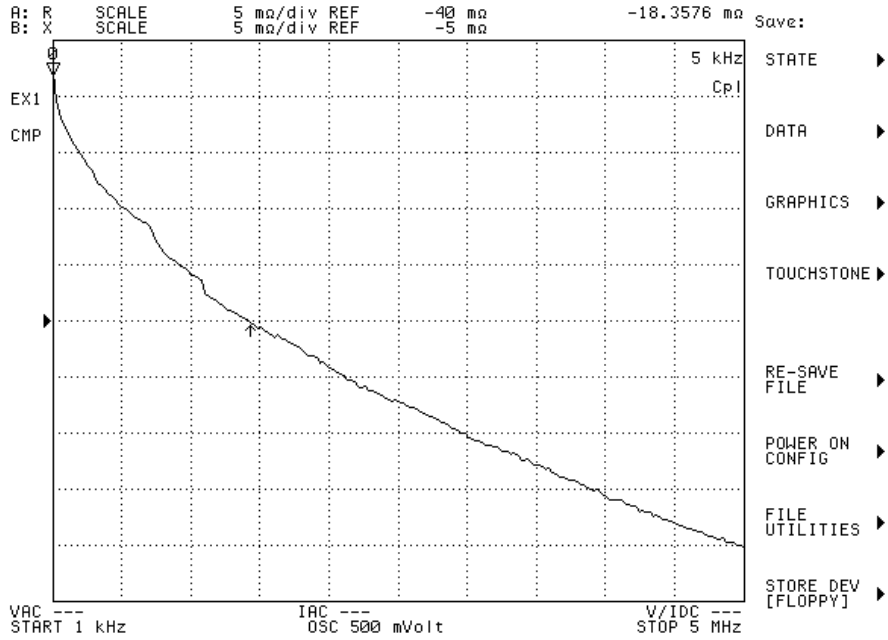
Şekil 7.17: 1 kHz-5 kHz frekans aralığında Agilent 4294A ile hesaplanabilir AC direnç standardının değeri ölçüm grafiği



Şekil 7.18: 1 kHz-5 MHz frekans aralığında Agilent 4294A ile hesaplanabilir AC direnç standardının değeri ölçüm grafiği



Şekil 7.19: 1 kHz-5 kHz frekans aralığında Agilent 4294A ile sıfır hatası değerinin ölçüm grafiği



Şekil 7.20: 1 kHz-5 MHz frekans aralığında Agilent 4294A ile sıfır hatası değerinin ölçüm grafiği



## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada tasarımı gerçekleştirilen 1000  $\Omega$  bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standardı, DC - 5 kHz frekans aralığında literatürde yapılan çalışmalarda elde edilen verilere uygun olarak metrolojik seviyede yapılan ölçümlerde standart olarak kullanılabilmesi gösterilmiştir [17,18]. Tasarımın literatürdeki çalışmalardan farkı ise DC – 5 MHz frekans aralığında direnç değeri farkı en az değişecek şekilde tasarlanmış olmasıdır [15,16]. Literatürde yapılan çalışmalarla ürettiğimiz standart dirençlerin değerine ait veriler (DC-AC direnç farkı ve zaman sabiti) karşılaştırıldığında 1 MHz frekans değerinde en az 5 kat daha iyi bir tasarımın elde edildiği görülmüştür. Bu durumda 5 MHz’de elde edilen verilerin literatürde yapılan hesaplanabilir AC direnç standartlarından daha düşük DC-AC direnç değeri farkına sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Matematiksel modellemede 1000  $\Omega$  bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standardının 5 MHz frekans değerinde DC-AC direnç değeri farkı 40 ppm olarak elde edilmiştir. Direnç telinin MI6010B model otomatik DC direnç ölçüm köprüsü ile yapılan deneysel ölçümlerinde ise 0,1 ppm kararlılık değeri elde edilmiştir. 1000  $\Omega$  Bifilar tip hesaplanabilir AC direncin üretimi yapıldıktan sonra MI6010B model otomatik DC direnç ölçüm köprüsü ile yapılan ölçümlerde ise 1 ppm/gün kararlılık değeri elde edilmiştir. Ancak direncin değerinde kayma gözlemlenmiştir. Bu nedenle tekrarlanabilir ölçümler alınamamıştır.

Deneysel çalışmalar sonucunda 1000  $\Omega$  bifilar tip hesaplanabilir AC direncin değerindeki kaymanın isaohm veya manganin direnç telinden gelmediği, manganin direnç telinin, 4 uçlu ölçüm noktası olup lehim yolu ile bakırla birleştirilmiş kontak noktasından veya bakır tellerin post-office tip konektörlere lehimlendikleri noktadan geldiği anlaşılmıştır.

Üretilen 1000  $\Omega$  bifilar tip hesaplanabilir AC dirençte tek yüzeyli konektör tasarımı uygulanmıştır. Bu sayede ölçümlerde kullanılacak ekranlı kablolar arasındaki mesafe azaltılmış ve yüksek frekans uygulamalarında düşük belirsizlikte [19] ölçümler alınabilmesi sağlanmıştır. Ölçüm noktalarında post-office tipi konektör kullanılarak, kontak direnci azaltılmıştır. Ayrıca kullanılan yöntemde uygulanan kimyasal prosedür ile kontak noktalarındaki kirlilikler giderilerek direnç tellerinin birleştirilmesi sırasında daha iyi kontak elde edilmiş ve kirliliklerden gelen etkinin direncin kararlılığına etkileri ortadan kaldırılmıştır.

Üretimi yapılan bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standardı, otomatik DC direnç köprüsü ve 1 mK kararlılıklı yağ banyosu kullanılarak daha sonraki bir zamanda sıcaklık katsayısı değerleri 18-28 °C sıcaklık aralığı için formülize edilecektir.

Uluslararası alanda yapılan ölçümleri garantiye altına alabilmek ve ölçüm yöntemi konusunda birlikteliği sağlayabilmek amacıyla uluslararası karşılaştırmalar düzenlenmektedir. Ancak AC direnç ölçümlerinin güvenilirliği konusunda uluslararası karşılaştırma yapılamamaktadır. Bunun sebebi ise bu standartların taşınmaya uygun olmamaları (titreşimlere duyarlı olmaları) ve uluslararası karşılaştırmaların 1-2 yıl sürmesi nedeniyle kararlılık problemlerinin olmalarıdır.

Standartların titreşimlere duyarlılığını azaltılmak için direnç telinin malzemelerin dielektrik değeri göz önüne alınması sonucu değerlendirildiğinde alümina veya cam bir malzeme içerisine gömülmesi önerilmektedir. Ayrıca hesaplanabilir direncin kararlılığının artırılması ve uzun dönem kaymasının azaltılması için moleküler düzeyde çalışmalar gerçekleştirilebilir. Moleküler düzeyde çalışmalarda SEM (Scanning Electron Microscope) kullanılabilir [8]. Bu çalışma yöntemi ile direnç telindeki gerilmelerin azaltılması için daha hassas düzeyde çalışmalar gerçekleştirilebilir

## KAYNAKLAR

- [1]. Y. S. Ku., C. M. Hsu., H. L. Pang., J. Hsiao and Nakanishi “DC & AC resistance measurements center for measurements standarts”, *XVII. IMEKO World Congress.*, Dubrovnik, Croatia, 54 533-7, (2005).
- [2]. Yu. P. Semyenov, “Bifilar AC-DC Resistor Using a Microwire” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol.46, no.2, (1997).
- [3]. F. Delahaye., “DC and AC Techniques for Resistance and Impedance Measurements”, *Metrologia*, 29 81, (1992).
- [4]. Çınar M., Dolma A., Gülmez Y., “Bifilar Tip Hesaplanabilir AC Direncin Modellenmesi ve Geliştirilmesi”, *International Union of Radio Science*, KKTC, (2010).
- [5]. D. L. Gibbins, “A design for resistors of calculable AC/DC resistance ratio”, *IEEE Trans. Instrum.Meas.*, Vol.110, no.2, s.335-347, (1963).
- [6]. Koller H., “Prazisionswiderstaende mit berechenbarem Frequenzeinfluss” *Elektrie 29*, s.612-615, (1975).
- [7]. Haddad, R. J., “A Resistor Calculable from DC to  $10^5$  rad/s.”, *Msc. Thesis, School of Engineering and Applied Science, George Washington University*, (1969).
- [8]. Kucera J, Vollmer E, Schurr J and Bohacek J, “Calculable resistors of coaxial design” *Meas.Sc.Technol.*, 095104, (2009).
- [9]. *PTB-Report*, “Widerstaende mit berechenbarem Frequenzeinfluss”, (1974).
- [10]. Graetsh V., “Prazisionswiderstaende für Gelich- und Wechselstrom”, *PTB-Mitteilungen*, 90 26-30, (1980).
- [11]. Y. Gülmez, G. Gülmez, E. Turhan, T. Özkan, M. Çınar, L. Sözen., “New Design of Calculable Resistor”, *Precision Electromagnetic Measurements Conference.*, Page 348-349, (2002).
- [12]. Isabellenhütte company, “Isaohm Technical information”.
- [13]. A. H. M. Arnold, D. Eng. Associate Member, “Nickel-Chromium-Aluminium-Copper Resistance Wire” *National Physical Laboratory.*, Paper No.2084M,(1956).

- [14]. Yasuhiro N., Hiroyuki F., “An analysis on the uncertainty of calculating the time constant of the quadrifilar reversed resistor”, *AIST Bulletin of Metrology*, Vol.3, No.3, (2004).
- [15]. Kim H. J., Lee R. D., Semenov Y. P., “Resistor with calculable dependencies up to 1 MHz”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol.56, No.2, (2007).
- [16]. Bohacek J., “Reference resistors for calibration of wireband LCR meters”, *XVIII Imeko World Congress*, Brazil, (2006).
- [17]. Schurr J, Wood B. M. and Overney F, “Linear frequency dependence in AC resistance measurement”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 54 512-5, (2005).
- [18]. Elmquist R. E., “Calculable coaxial resistors for precision measurements”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 49 210-5, (2000).
- [19]. Baytaroglu, Ş., Kesikoğlu, H., “*Metrolojide Kullanılan Temel ve Genel Terimler Sözlüğü*”, Ulusal Metroloji Enstitüsü, (1994).

## KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1]. Sözen L., Sakarya H., Ateşalp D., **Çınar M.**, “Ortamdaki sıcaklık değişimlerinin direnç değeri üzerindeki etkisi”, *III. Ulusal Ölçüm Bilim Kongresi*, Eskişehir, 7-8 Ekim (1999).
- [2]. Sözen L., Ateşalp D., Sakarya H., **Çınar M.**, “U.M.E Direnç Laboratuvarında Kullanılmakta Olan Ölçüm Sistemleri”, *Elektrik-Elektronik Bilgisayar Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi*, Gaziantep, 6-12 Eylül (1999).
- [3]. Y. Gülmez, G. Gülmez, E. Turhan, T. Özkan, **M. Çınar**, L. Sözen., “New Design of Calculable Resistor”, *Precision Electromagnetic Measurements Conference*,. Page 348-349, (2002).
- [4]. **Çınar M.**, Gülmez Y., “Empedans Ölçümleri”, *I.Ulusal Yüksek Gerilim Çalıştayı*, Kocaeli, 24-26 Ekim 2007.
- [5]. **Çınar M.**, Gülmez G., Gülmez Y., “LCR Metre kalibrasyonu”, *VII. Ulusal Ölçüm Bilim Kongresi*, İzmir, 30 Ekim-1 Kasım (2008).
- [6]. Ayhan B., Erol Barkana D., **Çınar M.**, “Comparison of the Performance of a Fuzzy Controller with a PI Controller for Real Time Temperature Control in the Oil Bath “,*International Symposium on Innovations in Intelligent Systems*, Kayseri, Haziran (2010).
- [7]. **Çınar M.**, Dolma A., Gülmez Y.,”Bifilar Tip Hesaplanabilir AC Direncin Modellenmesi ve Geliştirilmesi”, *International Union of Radio Science*, KKTC, Ağustos (2010).
- [8]. **Çınar M.**, Bağcı A., Gülmez Y., “Elektromekanik ve Elektromanyetik Kornaların Manyetik ve Elektriksel Özelliklerinin Araştırılması”, *TÜBİTAK UME Proje Raporu*, Gebze (2008).
- [9]. **Çınar M.**, Özkan T., Gülmez Y., “Doğru akım Karşılaştırmalı Direnç Ölçüm Köprüsü Tasarımı ve Yapımı”, *TÜBİTAK UME Proje Raporu*, Gebze (2008).
- [10]. Erkan Ö., **Çınar M.**, “Fotodedektör Kuvvetlendirici Tasarımı ve Yapımı”, *TÜBİTAK UME Proje Raporu*, Gebze (2008).

## ÖZGEÇMİŞ

1974 yılında Afyonkarahisar’da doğmuştur. İlkokulu Afyonkarahisar’da Kasımpaşa İlkokulu’nda, Ortaokulu Afyonkarahisar’da Merkez Ortaokulu’nda ve liseyi Afyon Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi’nde tamamlamıştır. 1993 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünü 1998 yılında tamamlamıştır. 1998 yılı haziran ayında girdiği Shaya PLC (Programmable Logic Control) firmasında çalıştıktan sonra 1998 yılı Ekim ayında TÜBİTAK U.M.E DC direnç laboratuvarında araştırmacı olarak çalışmaya başlamıştır. 1999 yılının temmuz ayında başladığı askerlik hizmetini 2000 yılının ekim ayında tamamlamıştır. 2000 yılının kasım ayında TÜBİTAK U.M.E Empedans Grubu Laboratuvarlarında araştırmacı olarak çalışmaya başlamıştır. 2011 yılında mevcut görevine ek olarak TÜBİTAK U.M.E, E.M.C laboratuvarında çalışmaya başlamıştır.

U.M.E’de “1mK Kararlılıkta Sıcaklık Kontrollü Silikon Yağ Banyosunun Geliştirilmesi” (2003), “RLC Metre ile AC Direnç Ölçüm Sisteminin Geliştirilmesi” (2005), “Yağ Tipi 100  $\Omega$  DC Direnç Standardının Geliştirilmesi” (2002), “Sıvı Helyum (-269  $^{\circ}$ C) Tankının (Dewar) Geliştirilmesi” (2004), “Ulusal DC İletkenlik Ölçüm Sisteminin” Geliştirilmesi” (1999) ve “Ambalaj İmalinde Kullanılan Plastik Malzemelerin Elektriksel Yük Özelliklerinin Belirlenmesi için Ölçüm Sistemi Tasarlanıp Geliştirilmesi” (2005) konularında proje yürütücülüğü yapmıştır. Ayrıca düşük sıcaklık (cryogenic) direnç ölçümleri, “Otomatik DC Akım Karşılaştırmalı Direnç Ölçüm Köprüsünün Geliştirilmesi” (2004), “Akım Şöntü Tasarımı ve Geliştirilmesi” (2009), Akustik ölçümler için “Farklı Frekanslarda Elektronik Filtre Seviyelerine Sahip Fotodedektör Kuvvetlendiricinin Tasarlanması ve Geliştirilmesi” (2007), “Malzemelerin Elektrostatik Yük Boşalım Ölçüm Sisteminin Geliştirilmesi” (2004), basınç ölçümleri için “Lazer Mesafe Ölçüm Cihazının Tasarlanması ve Geliştirilmesi” (2010), “Elektromekanik ve Elektromanyetik Kornaların Manyetik ve Elektriksel Özelliklerinin Araştırılması” projesi (TÜBİTAK projesi) (2008) ve mikrodalga ölçüm yöntemi ile hareketli (dinamik) araçların yük ölçüm sistemlerinin araştırılması çalışmalarında bulunmuştur.

Bu çalışmaların dışında indüktans ve DC direnç konularında düzenlenen uluslararası karşılaştırmalardaki çalışmalarda yer almıştır.

Şu an “Çok Düşük Manyetik Alan Büyüklüklerinin Ölçümünde Süperiletkenlik Teknolojisi ile Yeni Bir Yaklaşım” konulu TÜBİTAK-1001 araştırma projesinde ve ulusal AC direnç izlenebilirliğinin sürdürülmesi amacıyla ulusal hesaplanabilir AC direnç standardının geliştirilmesi konularında çalışmaktadır.