İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK DOĞRULUĞA SAHİP
100 kV YÜKSEK DOĞRU GERİLİM BÖLÜCÜSÜ

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Ahmet MEREV

Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

AĞUSTOS 2005

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK DOĞRULUĞA SAHİP

100 kV YÜKSEK DOĞRU GERİLİM BÖLÜCÜSÜ

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Ahmet MEREV
(504992437)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Ağustos 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 17 Kasım 2005

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ**
Diğer Jüri Üyeleri **Prof. Dr. Kevork MARDİKYAN (İ.T.Ü.)**
Prof. Dr. Celal KOCATEPE (Y.T.Ü.)
Y. Doç. Dr. Serhat İKİZOĞLU (İ.T.Ü.)
Y. Doç. Dr. Hasbi İSMAİLOĞLU (Kocaeli Üniv.)

AĞUSTOS 2005

ÖNSÖZ

Yüksek gerilim ölçmelerindeki ölçüm belirsizliğine etki eden birçok bileşen bulunmaktadır. Bunlar; gerilim bölücülerinin belirsizliği, güç kaynağının neden olduğu belirsizlik, ölçüm kablosundan gelen hatalar, alçak gerilim ölçüm cihazlarından ve kaydedicilerinden kaynaklanan belirsizlik bileşenleridir. Ancak bu bileşenlerden en önemlisi, gerilim bölücülerden gelen belirsizliklerdir ve bazı ölçüm bölgelerinde diğer bileşenlerin belirsizlik etkisi ihmal edilebilmektedir. Bu nedenle, yüksek gerilim bölücülerinin en düşük belirsizlikte ölçüm yeteneğine sahip olarak tasarlanmaları ve üretilmeleri yüksek gerilim metrolojisi için çok önemlidir.

Yüksek doğru gerilimler geçmişte sadece bilimsel çalışmalar ve araştırmalar için kullanılmakta iken, günümüzde tıp ve enerji iletim teknolojilerinde, yüksek kapasiteli yalıtım ve iletim malzemelerinin deneylerinde, uygulamalı fizikte (elektron mikroskobu, parçacık hızlandırıcı vb.), endüstriyel uygulamalarda (elektrostatik boyama, baca filtrelemesi vb.) ve haberleşme elektroniği (televizyon teknolojisi, uydu haberleşmesi vb.) gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Yüksek doğru gerilimlere olan gereksinim beraberinde ölçüm tekniklerinin geliştirilmesini ve kullanılmasını da zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmayla; Türkiye'de yüksek doğru gerilim tekniğinde kullanılan tüm ölçme ve cihaz ve sistemlerinin, 100 ppm'den küçük ölçüm belirsizliğinde kalibrasyonuna olanak tanıyacak 100 kV'luk dirençsel bir yüksek doğru gerilim bölücüsünün tasarımı ve yapımı gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışması sırasında bana her zaman, her konuda destek veren, yardımlarını esirgemeyen, tezin oluşumu sırasında beni yönlendiren tez danışmanım değerli hocam Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye, çalışmakta olduğum TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'ndeki tüm çalışma arkadaşlarıma, desteklerini ve iyi niyetlerini her zaman sunan doktora tez izleme jüri üyelerim ve hocalarım Prof. Dr. Kevork MARDİKYAN ve Prof. Dr. Celal KOCATEPE'ye yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim.

Son olarak, bana sabır, ilgi ve sevgisiyle destek veren sevgili eşim Birsen MEREV'e ve doktora eğitimime başladığım günlerde dünyaya gelerek varlığıyla bana büyük moral kaynağı olan sevgili kızım Nisa Nur MEREV'e çok teşekkür ederim.

Ağustos 2005 Ahmet MEREV

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **vii**

TABLO LİSTESİ **viii**

ŞEKİL LİSTESİ **x**

SEMBOL LİSTESİ **xiv**

ÖZET **xv**

SUMMARY **xvi**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Yüksek Doğru Gerilimlerin Ölçülmesi 2

1.1.1. Küresel Elektrotlarla Ölçme Yöntemi 2

1.1.2. Seri Dirençle Ölçme Yöntemi 4

1.1.3. Dirençsel Gerilim Bölücü ile Ölçme Yöntemi 4

1.1.4. Elektrostatik Voltmetrelerle Ölçme Yöntemi 6

1.1.5. Generatör İlkeli Ölçme Yöntemi 7

1.1.6. Çubuk Elektrotlarla Ölçme Yöntemi 8

1.2. Yüksek Doğru Gerilim Bölücülerinin Geçmişi 9

1.3. Park Tipi Gerilim Bölücüler ve Tasarımı 10

2. GENEL METROLOJİ VE İZLENEBİLİRLİK **13**

2.1. Metroloji Nedir? 13

2.2. Metre Uzlaşması 13

2.3. SI Temel Birimleri 14

2.3.1. Kilogram (kg) 14

2.3.2. Metre (m) 14

2.3.3. Saniye (s) 14

2.3.4. Amper (A) 15

2.3.5. Kandela (cd) 15

2.3.6. Kelvin (K) 15

2.3.7. Mol (mol) 15

2.4. Türetilmiş Birimler 15

2.5. Metrolojinin Sınıflandırılması 17

2.5.1. Bilimsel Metroloji 17

2.5.2. Endüstriyel Metroloji 17

2.5.3. Yasal Metroloji 17

2.6. Türkiye'de Metroloji 19

2.7. İzlenebilirlik 19

2.8. Standartlar Hiyerarşisi 20

2.8.1. Ulusal Standart 21

2.8.2. Referans Standart 21

2.8.3. Transfer Standardı 21
2.8.4. Çalışma Standardı 21
2.9. Karşılaştırmalar 21
2.10. Belirsizlik ve Doğruluk Kavramları 22
2.11. Belirsizlik Hesaplamaları 23
2.11.1. A-tipi Belirsizlik 24
2.11.1.1. Student Dağılımı ($1 < n \leq 10$) 24
2.11.1.2. Normal Dağılım ($n > 10$) 25
2.11.2. B-tipi Belirsizlik 25
2.11.3. Bileşik Belirsizlik 27
2.11.4. Genişletilmiş Belirsizlik 28
2.12. Yüksek Gerilim Metrolojisi 29
2.12.1. Yüksek Doğru Gerilimde İzlenebilirlik 29
2.12.2. Yüksek Alternatif Gerilimde İzlenebilirlik 31
2.12.3. Yüksek Darbe Geriliminde İzlenebilirlik 33
2.13. Akreditasyon Nedir? 35
2.14. Laboratuvar Akreditasyonu 35

3. UME YÜKSEK DOĞRU GERİLİM BÖLÜCÜSÜ 37
3.1. Gerilim Bölücünün Yüksek Gerilim Kolunda Kullanılan Dirençler 37
3.2. Gerilim Bölücünün Yüksek Gerilim Kolunda Kullanılan Dirençlerin Yüzey Sıcaklıklarının Belirlenmesi 38
3.3. Gerilim Bölücünün Yüksek Gerilim Kolunda Kullanılan Dirençlerin Sıcaklık Katsayılarının Belirlenmesi 42
3.4. Gerilim Bölücünün Yüksek Gerilim Kolunda Kullanılan Dirençlerin Gerilim Katsayılarının Belirlenmesi 44
3.5. Gerilim Bölücünün Yüksek Gerilim Kolunda Kullanılan Dirençlerin Seçilmesi 50
3.6. Gerilim Bölücünün Alçak Gerilim Kolunda Kullanılan Direncin Seçilmesi 53
3.7. Gerilim Bölücünün Montajı 56
3.8. Gerilim Bölücünün Çevirme Oranı 59

4. YÜKSEK DOĞRU GERİLİM BÖLÜCÜSÜNDEKİ DİRENÇLERİN DİZİLİŞİ VE ELEKTROT TASARIMI 60
4.1. Giriş 60
4.2. Dirençlerin Dizilişi 61
4.3. Korona Boşalmaları ve Korona Halkası Eğrilik Yarıçapı 64
4.4. Elektrostatik Alan Dağılımı ve Bölücüye Etkisi 67
4.4.1. Direnç Ekranının Topraklanması Durumu 71
4.4.2. Direnç Ekranının Gerilim Altında Olması Durumu 73
4.5. Elektrodun Elektrik Alan Analizi 74

5. YÜKSEK DOĞRU GERİLİM BÖLÜCÜSÜ PERFORMANS DENEYLERİ **80**
5.1. Giriş 80
5.2. Kararlılık Deneyi 81
5.3. Sıcaklık Dağılım Deneyi 83
5.4. Doğrusallık Deneyi 87
5.5. Farklı Yüksek Alternatif Gerilimler Altında Bölücünün Çevirme Oranının Belirlenmesi Deneyi 89
5.6. Kısmi Boşalma (PD) Deneyi 90
5.7. Korona Deneyi ve Korona Başlangıç Geriliminin Belirlenmesi 93
5.8. Kaçak Akım Deneyi 95
5.9. Gerilim Bölücü Birim Basamak Yanıtının Belirlenmesi 96
5.9.1. Gerilim Bölücünün Geçici Rejim Yanıtının Özellikleri 96
5.9.2. Deney 99

6. YÜKSEK DOĞRU GERİLİM BÖLÜCÜSÜNÜN ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ **102**
6.1. Giriş 102
6.2. Bölünmüş Gerilim Değerinin Ölçüm Belirsizliği 102
6.3. Alçak Gerilimde Çevirme Oranının Belirlenmesindeki Belirsizlik 103
6.4. Sıcaklık Etkisinden Kaynaklanan Belirsizlik 106
6.5. Gerilim Etkisinden Kaynaklanan Belirsizlik 107
6.6. Kaçak Akımların Neden Olduğu Belirsizlik 108
6.7. Korona Akımlarının Neden Olduğu Belirsizlik 108
6.8. Kısa Dönem Kararlılığı 109
6.9. Belirsizlik Bütçesi 109

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER **111**

KAYNAKLAR **116**

EK A R97 VE R169 DİRENÇLERİNİN YÜZEY SICAKLIKLARI VE ZAMAN İLİŞKİSİ **123**

EK B R97 VE R169 DİRENÇLERİNİN YÜZEY SICAKLIKLARININ BELİRLENMESİ **127**

EK C SICAKLIK KATSAYILARI BELİRLENEN DİRENÇ ELEMANLARININ 13-43^{o}C SICAKLIK ARASINDAKİ DEĞERLERİ VE 23-33^{o}C SICAKLIK ARASINDAKİ SICAKLIK KATSAYILARI **135**

EK D SICAKLIK KATSAYILARI BELİRLENEN DİRENÇ ELEMANLARININ 13-43^{o}C SICAKLIK ARASINDAKİ DEĞİŞİMLERİ **141**

EK E SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE EKSENEL SİMETRİLİ ALAN PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ **206**

EK F YÜKSEK GERİLİM BÖLÜCÜSÜNÜN ANMA GERİLİMİNDE VE FARKLI ZAMANLARDAKİ SICAKLIK DAĞILIMLARI **216**

ÖZGEÇMİŞ **225**

KISALTMALAR

AA	**:** Alternatif Akım
AQAP	**:** Allied Quality Assurance Publications
BIPM	**:** Bureau International des Poids et Mesures
BS	**:** British Standard (İngiliz Standardı)
CIPM	**:** Comite International des Poids et Mesures
CPEM	**:** Conference on Precision Electromagnetic Measurements
DA	**:** Doğru Akım
EMI	**:** Electromagnetic Interference (Elektromanyetik Girişim)
EN	**:** European Norm (Avrupa Normu)
FEMM	**:** Finite Element Method Magnetics
HVDC	**:** High Voltage Direct Current (Yüksek Gerilim Doğru Akım)
IEC	**:** International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komitesi)
IEEE	**:** Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
ISH	**:** International Symposium of High-Voltage (Uluslararası Yüksek Gerilim Sempozyumu)
ISO	**:** International Organization for Standardization (Uluslararası Standart Oluşturma Kuruluşu)
İ.T.Ü.	**:** İstanbul Teknik Üniversitesi
LI	**:** Lightning Impulse (Yıldırım Darbesi)
NTC	**:** Negative Temperature Coefficient-(Negatif Sıcaklık Katsayısı)
OIML	**:** Organisation Internationale de Métrologie Légale
ÖS	**:** Ölçüm Sistemi
PD	**:** Partial Discharge (Kısmi Boşalma)
PTB	**:** Physikalisch-Technische Bundesanstalt
RÖS	**:** Referans Ölçüm Sistemi
SEY	**:** Sonlu Elemanlar Yöntemi
SI	**:** Switching Impulse (Anahtarlama Darbesi)
TS	**:** Türk Standardı
TÜRKAK	**:** Türk Akreditasyon Kurumu
TÜBİTAK	**:** Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu
UME	**:** Ulusal Metroloji Enstitüsü
YG	**:** Yüksek Gerilim
ZP	**:** Zaman Parametresi

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 1.1	Küreler arası açıklık ve küre çapının ölçüm belirsizliğine etkisi	4
Tablo 2.1	Yedi temel SI biriminden türetilmiş bazı büyüklükler.....	16
Tablo 2.2	Student ve normal dağılım katsayıları.....	25
Tablo 2.3	Güvenilirlik düzeyleri ve kapsam faktörleri.....	28
Tablo 2.4	Yüksek doğru gerilim ölçme sisteminin belirsizlik bileşenleri.	31
Tablo 2.5	Yüksek alternatif gerilim ölçme sisteminin belirsizlik bileşenleri.....	33
Tablo 2.6	Darbe ölçme sisteminin genlik büyüklüğündeki belirsizlik bileşenleri.....	34
Tablo 2.7	Darbe ölçme sisteminin zaman büyüklüklerindeki belirsizlik bileşenleri.....	34
Tablo 3.1	R_S standart direncin değerleri.....	47
Tablo 3.2	Dirençlerin gerilim katsayıları.....	50
Tablo 3.3	Bölücünün yüksek gerilim kolu için seçilen dirençler.....	52
Tablo 3.4	100 kΩ'luk dirençler.....	55
Tablo 3.5	Pleksiglas malzemenin bazı temel özellikleri.....	57
Tablo 3.6	Derlin malzemenin bazı temel özellikleri.....	58
Tablo 4.1	Bölücüye bağlanan dirençlerin sırası (yukarıdan-aşağıya).....	65
Tablo 5.1	Kararlılık deneyinde kullanılan aletler ve donanımlar.....	82
Tablo 5.2	Kararlılık deneyi sonuçları.....	83
Tablo 5.3	Sıcaklık dağılımı deneyinde kullanılan aletler ve donanımlar..	84
Tablo 5.4	Anma geriliminde bölücünün sıcaklık dağılım deneyi sonuçları……...…	86
Tablo 5.5	Doğrusallık deneyinde kullanılan aletler ve donanımlar.....	88
Tablo 5.6	Doğrusallık deney sonuçları.....	88
Tablo 5.7	Yüksek alternatif gerilimde bölücünün çevirme oranının belirlenmesi deneyinde kullanılan aletler ve donanımlar …..	89
Tablo 5.8	Yüksek alternatif gerilimde bölücünün çevirme oranının belirlenmesi deney sonuçları…….	90
Tablo 5.9	Kısmi boşalma ölçmelerinde kullanılan aletler ve donanımlar.	92
Tablo 5.10	Kısmi boşalma ölçme sonuçları...……	93

Tablo 5.11	Korona deneyinde kullanılan aletler ve donanımlar…..…...	95
Tablo 5.12	Birim basamak yanıtı deneyinde kullanılan aletler ve donanımlar...…..…	100
Tablo 6.1	Paralel kollardan seçilen dirençler.....	106
Tablo 6.2	Belirsizlik bütçesi……..	110
Tablo A.1	R97 direncinin farklı gerilimlerdeki yüzey sıcaklıkları ve zaman ilişkisi.....	123
Tablo A.2	R97 direncinin farklı gerilimlerdeki yüzey sıcaklıkları ve zaman ilişkisi (devamı)…..….....	124
Tablo A.3	R169 direncinin farklı gerilimlerdeki yüzey sıcaklıkları ve zaman ilişkisi.....	125
Tablo A.4	R169 direncinin farklı gerilimlerdeki yüzey sıcaklıkları ve zaman ilişkisi (devamı)	126
Tablo C.1	R1-R28 numaralı dirençlerin farklı sıcaklıklardaki direnç değerleri ve 23 ^{o}C-33 ^{o}C aralığındaki sıcaklık katsayıları…….	135
Tablo C.2	R29-R64 numaralı dirençlerin farklı sıcaklıklardaki direnç değerleri ve 23 ^{o}C-33 ^{o}C aralığındaki sıcaklık katsayıları……	136
Tablo C.3	R65-R100 numaralı dirençlerin farklı sıcaklıklardaki direnç değerleri ve 23 ^{o}C-33 ^{o}C aralığındaki sıcaklık katsayıları.....	137
Tablo C.4	R101-R136 numaralı dirençlerin farklı sıcaklıklardaki direnç değerleri ve 23 ^{o}C-33 ^{o}C aralığındaki sıcaklık katsayıları.....	138
Tablo C.5	R137-R172 numaralı dirençlerin farklı sıcaklıklardaki direnç değerleri ve 23 ^{o}C-33 ^{o}C aralığındaki sıcaklık katsayıları.....	139
Tablo C.6	R173-R194 numaralı dirençlerin farklı sıcaklıklardaki direnç değerleri ve 23 ^{o}C-33 ^{o}C aralığındaki sıcaklık katsayıları.....	140

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1	**:** Yatay düzende 250 mm çaplı küresel elektrotlar.....	3
Şekil 1.2	**:** Seri dirençle yüksek doğru gerilim ölçme	5
Şekil 1.3	**:** Dirençsel gerilim bölücü devre şeması.....	5
Şekil 1.4	**:** 400 kV'luk dirençsel yüksek doğru gerilim bölücüsü.....	6
Şekil 1.5	**:** Generatör ilkeli gerilim ve alan ölçme cihazının basitleştirilmiş yapısı.....	7
Şekil 1.6	**:** Park tipi gerilim bölücüsü.....	10
Şekil 2.1	**:** Yedi temel SI birimleri.....	16
Şekil 2.2	**:** İzlenebilirlik zinciri…….	20
Şekil 2.3	**:** Uluslararası karşılaştırma tipleri.....	22
Şekil 2.4	**:** Dikdörtgen dağılım.....	26
Şekil 2.5	**:** Üçgen dağılım.....	27
Şekil 2.6	**:** Josephson gerilim standardı.....	30
Şekil 3.1	**:** Gerilim bölücüde kullanılan dirençler ve iç yapıları.....	38
Şekil 3.2	**:** Ölçülen yüzey sıcaklık noktaları ve deney devresi.....	39
Şekil 3.3	**:** R97 direncinin farklı gerilimlerdeki ortalama yüzey sıcaklığı…….....	41
Şekil 3.4	**:** R169 direncinin farklı gerilimlerdeki ortalama yüzey sıcaklığı…….....	41
Şekil 3.5	**:** Bakır blok.....	42
Şekil 3.6	**:** Dirençlerin sıcaklık katsayılarının belirlendiği düzenek.....	43
Şekil 3.7	**:** Ölçümü yapılacak bir direnç ve ekranlama kutusu.....	44
Şekil 3.8	**:** Wheatstone köprüsü…….....	45
Şekil 3.9	**:** Wheatstone köprüsünde kullanılan cihazlar.....	46
Şekil 3.10	**:** Standart direnç ve gerilim katsayısı belirlenecek direncin konulduğu ekranlı özel kutunun sıcaklık kabini içerisindeki görüntüsü.....	47
Şekil 3.11	**:** R145 direncinin gerilim-direnç değişimi.....	49
Şekil 3.12	**:** Dirençlerin sıcaklık katsayıları ve sayıları.....	51
Şekil 3.13	**:** Alçak gerilim kolundaki 100 kΩ direncin yapısı.....	54
Şekil 3.14	**:** 100 kΩ'luk dirençlerin sıcaklıkla değişimleri.....	55
Şekil 3.15	**:** Direnç montajı ve pleksiglas taşıyıcılar.....	56
Şekil 3.16	**:** Dirençlerin birbirleri ile bağlantısı.....	58
Şekil 3.17	**:** Bölücünün yerleştirildiği Derlin malzemesinden yapılmış kaide.....	59
Şekil 4.1	**:** Küresel elektrot sisteminde alan dağılımı.....	62
Şekil 4.2	**:** Bölücü boyunca alan dağılımı.....	63
Şekil 4.3	**:** Gerilim bölücünün elektrotları.....	66

Şekil 4.4 : Basit bir gerilim bölücü eşdeğer devresi..... 68
Şekil 4.5 : Ekranlı direncin basit gösterilimi……..... 69
Şekil 4.6 : Yüksek gerilim bölücüsünün ya da direncinin ekranlanması için uygun yöntemler (a) Kademeli elektrot sistemi (b) Tek elektrot sistemi..... 74
Şekil 4.7 : Birinci elektrot sisteminin sonlu elemanlar yöntemi modeli.. 75
Şekil 4.8 : İkinci elektrot sisteminin sonlu elemanlar yöntemi modeli… 76
Şekil 4.9 : Üçüncü elektrot sisteminin sonlu elemanlar yöntemi modeli. 77
Şekil 4.10 : Birinci elektrot sisteminin alan dağılımı……..…… 77
Şekil 4.11 : İkinci elektrot sisteminin alan dağılımı..……..…… 78
Şekil 4.12 : Üçüncü elektrot sisteminin alan dağılımı……... 78
Şekil 4.13 : Üçüncü elektrot sisteminin potansiyel dağılımı…….. 79
Şekil 5.1 : Doğrusallık deney düzeneği……...… 81
Şekil 5.2 : Çevirme oranının zamanla değişimi……..... 82
Şekil 5.3 : Isıl kamera ve gerilim bölücü……. 85
Şekil 5.4 : Gerilim bölücünün 240. (a) ve 360. (b) dakikalardaki sıcaklık dağılımı……..... 87
Şekil 5.5 : Kısmi boşalma ölçme düzeneği…….……. 92
Şekil 5.6 : Anma gerilimindeki kısmi boşalmalar..... 93
Şekil 5.7 : Korona deney düzeneği……...… 94
Şekil 5.8 : Ölçme sistemlerinin birim basamak yanıtları a)RC davranışı b) RLC davranışı…….……..... 97
Şekil 5.9 : Dirençsel gerilim bölücünün a) Devre şeması b) Toprak kaçak kapasiteli eşdeğer devresi……..... 99
Şekil 5.10 : Birim basamak yanıtı deneyinde kullanılan darbe kalibratörü ve kaydedicisi……..…..... 101
Şekil 5.11 : Bölücünün birim basamak yanıt eğrisi …….……..... 101
Şekil 6.1 : Gerilim bölücüsünün üst, orta ve alt bölgelerindeki sıcaklık dağılımın zamanla değişimi……..……..… 107
Şekil B.1 : R169 direncinin anma gerilimdeki yüzey sıcaklığı…..... 127
Şekil B.2 : R169 direncinin anma geriliminin %75'indeki gerilimde yüzey sıcaklığı…..... 128
Şekil B.3 : R169 direncinin anma geriliminin %50'sindeki gerilimde yüzey sıcaklığı..... 129
Şekil B.4 : R169 direncinin anma geriliminin %25'indeki gerilimde yüzey sıcaklığı..... 130
Şekil B.5 : R97 direncinin anma gerilimdeki yüzey sıcaklığı..... 131
Şekil B.6 : R97 direncinin anma geriliminin %75'indeki gerilimde yüzey sıcaklığı..... 132
Şekil B.7 : R97 direncinin anma geriliminin %50'sindeki gerilimde yüzey sıcaklığı.....….. 133
Şekil B.8 : R097 direncinin anma geriliminin %25'indeki gerilimde yüzey sıcaklığı.....….. 134
Şekil D.1 : R1 ve R2 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….....… 141
Şekil D.2 : R3, R4 ve R5 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…….. 142
Şekil D.3 : R6, R7 ve R8 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…..……... 143
Şekil D.4 : R9, R10 ve R11 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri……..... 144
Şekil D.5 : R12, R13 ve R14 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…..... 145

Şekil D.6 : R15, R16 ve R17 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…..... 146
Şekil D.7 : R18, R19 ve R20 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri……..... 147
Şekil D.8 : R21, R22 ve R23 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…….. 148
Şekil D.9 : R24, R25 ve R26 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…… 149
Şekil D.10 : R27, R28 ve R29 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…… 150
Şekil D.11 : R30, R31 ve R32 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri……..... 151
Şekil D.12 : R33, R34 ve R35 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…… 152
Şekil D.13 : R36, R37 ve R38 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…… 153
Şekil D.14 : R39, R40 ve R41 dirençlerinin değişimleri……..... 154
Şekil D.15 : R42, R43 ve R44 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…….. 155
Şekil D.16 : R45, R46 ve R47 dirençlerinin değişimleri……..... 156
Şekil D.17 : R48, R49 ve R50 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…… 157
Şekil D.18 : R51, R52 ve R53 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…… 158
Şekil D.19 : R54, R55 ve R56 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…… 159
Şekil D.20 : R57, R58 ve R59 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri……..... 160
Şekil D.21 : R60, R61 ve R62 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…… 161
Şekil D.22 : R63, R64 ve R65 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri……..... 162
Şekil D.23 : R66, R67 ve R68 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…… 163
Şekil D.24 : R69, R70 ve R71 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…… 164
Şekil D.25 : R72, R73 ve R74 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…… 165
Şekil D.26 : R75, R76 ve R77 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…… 166
Şekil D.27 : R78, R79 ve R80 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…… 167
Şekil D.28 : R81, R82 ve R83 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…… 168
Şekil D.29 : R84, R85 ve R86 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…… 169
Şekil D.30 : R87, R88 ve R89 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri……..... 170
Şekil D.31 : R90, R91 ve R92 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…… 171
Şekil D.32 : R93, R94 ve R95 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…… 172
Şekil D.33 : R96, R97 ve R98 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…… 173
Şekil D.34 : R99, R100 ve R101 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri…… 174
Şekil D.35 : R102, R103 ve R104 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 175
Şekil D.36 : R105, R106 ve R107 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 176
Şekil D.37 : R108, R109 ve R110 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 177
Şekil D.38 : R111, R112 ve R113 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 178
Şekil D.39 : R114, R115 ve R116 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 179
Şekil D.40 : R117, R118 ve R119 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 180
Şekil D.41 : R120, R121 ve R122 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 181
Şekil D.42 : R123, R124 ve R125 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 182
Şekil D.43 : R126, R127 ve R128 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 183
Şekil D.44 : R129, R130 ve R131 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 184
Şekil D.45 : R132, R133 ve R134 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 185
Şekil D.46 : R135, R136 ve R137 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 186
Şekil D.47 : R138, R139 ve R140 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 187
Şekil D.48 : R141, R142 ve R143 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 188
Şekil D.49 : R144, R145 ve R146 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 189
Şekil D.50 : R147, R148 ve R149 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 190
Şekil D.51 : R150, R151 ve R152 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 191
Şekil D.52 : R153, R154 ve R155 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 192
Şekil D.53 : R156, R157 ve R158 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 193

Şekil D.54 : R159, R160 ve R161 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 194
Şekil D.55 : R162, R163 ve R164 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 195
Şekil D.56 : R165, R166 ve R167 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 196
Şekil D.57 : R168, R169 ve R170 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 197
Şekil D.58 : R171, R172 ve R173 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 198
Şekil D.59 : R174, R175 ve R176 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 199
Şekil D.60 : R177, R178 ve R179 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 200
Şekil D.61 : R180, R181 ve R182 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 201
Şekil D.62 : R183, R184 ve R185 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 202
Şekil D.63 : R186, R187 ve R188 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 203
Şekil D.64 : R189, R190 ve R191 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 204
Şekil D.65 : R192, R193 ve R194 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri….. 205
Şekil E.1 : İki boyutlu bölge…….…...…. 206
Şekil E.2 : Silindirsel koordinat sistemi……...……...…..... 208
Şekil E.3 : Radyal-eksenel koordinatlarda bir üçgen eleman……... 209
Şekil E.4 : Radyal-eksenel koordinatlarda bir üçgen kesitli halka eleman……. 211
Şekil F.1 : UME yüksek gerilim bölücüsü..……...….. 216
Şekil F.2 : Başlangıçtaki sıcaklık dağılım görüntüsü……... 216
Şekil F.3 : Deneyin 15. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…….. 217
Şekil F.4 : Deneyin 30. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…….. 217
Şekil F.5 : Deneyin 45. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…..…. 217
Şekil F.6 : Deneyin 60. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…….. 218
Şekil F.7 : Deneyin 75. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…….. 218
Şekil F.8 : Deneyin 90. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…….. 218
Şekil F.9 : Deneyin 105. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…… 219
Şekil F.10 : Deneyin 120. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…..... 219
Şekil F.11 : Deneyin 135. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…… 219
Şekil F.12 : Deneyin 150. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…..... 220
Şekil F.13 : Deneyin 165. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…..... 220
Şekil F.14 : Deneyin 180. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…… 220
Şekil F.15 : Deneyin 195. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…… 221
Şekil F.16 : Deneyin 210. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…… 221
Şekil F.17 : Deneyin 225. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…..... 221
Şekil F.18 : Deneyin 240. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…..... 222
Şekil F.19 : Deneyin 255. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…… 222
Şekil F.20 : Deneyin 270. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…..... 222
Şekil F.21 : Deneyin 285. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…..... 223
Şekil F.22 : Deneyin 300. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…… 223
Şekil F.23 : Deneyin 315. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…..... 223
Şekil F.24 : Deneyin 330. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…..... 224
Şekil F.25 : Deneyin 345. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…..... 224
Şekil F.26 : Deneyin 360. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü…..... 224

SEMBOL LİSTESİ

δ_1 : Bağıl hava yoğunluğu
δ_2 : Nem düzeltme katsayısı
δ_t : Ortam düzeltme katsayısı
ε_o : Boşluğun dielektrik sabiti
$u_{\delta TN}$: Referans sistemin ZP için verilen sertifika belirsizliği
$u_{\delta Tnemi}$: Referans sistemdeki ZP için EMI etkinin neden olduğu belirsizlik bileşeni
$u_{\delta TXçöz}$: Kalibre edilen sisteme ait ZP için çözünürlük belirsizlik bileşeni
$u_{\delta TXe}$: Kalibre edilen sistemin ZP için nominal sapmasından gelen belirsizlik bileşeni
$u_{\delta TXemi}$: Kalibre edilen sistemdeki ZP için EMI etkinin neden olduğu belirsizlik
$u_{\delta UN}$: Referans sistemin genlik sertifika belirsizliği
$u_{\delta UNemi}$: Referans sistemdeki EMI etkisinin neden olduğu belirsizlik bileşeni
$u_{\delta UNfre}$: Referans sistemin frekans etkisinin neden olduğu belirsizlik bileşeni
$u_{\delta UXçöz}$: Kalibre edilen sisteme ait ölçüm cihazının çözünürlük belirsizlik bileşeni
$u_{\delta UXkar}$: Kalibre edilen sistemin kısa dönem kararlılığı belirsizlik bileşeni
$u_{\delta UXkay}$: Kalibre edilen sisteme ait ölçüm cihazının kayması belirsizlik bileşeni
$u_{\delta UXkut}$: Kutbiyet etkisi belirsizlik bileşeni
$u_{\delta UXlin}$: Kalibre edilen sistemin doğrusallık belirsizlik bileşeni
$u_{\delta UXsıc}$: Kalibre edilen sistemin sıcaklık etkisinin neden olduğu belirsizlik bileşeni
$u_{\delta UXyak}$: Yakınlık etkisi belirsizlik bileşeni
b : Basınç
$C_e^{/}$: Bölücüdeki her potansiyel noktasından toprağa olan kaçak kapasite
$C_h^{/}$: Bölücüdeki her potansiyel noktasından YG elektroduna olan kaçak kapasite
$C_p^{/}$: Bölücüdeki her bir dirence paralel kaçak kapasite
E : Elektrik alan şiddeti
E_r : Radyal elektrik alan şiddeti bileşeni
E_z : Eksenel elektrik alan şiddeti bileşeni
k : Güvenilirlik düzeyi
K : Çevirme oranı
T : Sıcaklık
T_{neg} : Negatif sıcaklık katsayısı
T_{poz} : Pozitif sıcaklık katsayısı
u : Bileşik belirsizlik
U : Genişletilmiş belirsizlik
u_A : A tipi belirsizlik bileşeni
u_B : B tipi belirsizlik bileşeni
U_k : Korona gerilimi
U_o : Çarpma ile iyonizasyonun başladığı gerilim

YÜKSEK DOĞRULUĞA SAHİP 100 kV YÜKSEK DOĞRU GERİLİM BÖLÜCÜSÜ

ÖZET

Yüksek gerilim ölçmeleri genliğin yüksek olması nedeniyle zordur ve bilinen ölçme sistemleri ile doğrudan ölçülemezler. Bir yüksek gerilim ölçme sistemi, gerilim bölücü veya ölçü transformatörleri gibi dönüştürücü elemanlardan, ölçü kabloları gibi iletim elemanlarından ve dijital kaydediciler ve tepe değer ölçü aletleri gibi kaydedici cihazlardan oluşur. Dönüştürücü cihazlar yüksek genlik değerini iletim elemanları ve kaydedici cihazlar için uygun düzeye indirmektedirler. Yüksek gerilim tekniğinde kullanılan dönüştürücü cihazların çıkış gerilimi, orijinal giriş geriliminin tepe değeri ile doğru orantılı, dalga biçimi ve zaman parametreleri ile aynı olmalıdır. Bu cihazlar, sözü edilen koşullar göz önünde bulundurularak tasarlanmalıdır.

Yüksek doğru gerilim ölçmelerinde kullanılan bölücünün çevirme oranı, doğru olarak bilinmeli ve gerilime bağlı olmamalıdır. Bölücüdeki toplam direnç değerinin değişimi üç temel faktöre dayandırılabilir. Bunlardan birincisi, sıcaklığa bağlı olarak direnç değerlerinin değişimidir. İkincisi, kullanılan yalıtım malzemelerinin neden olduğu kaçak akımlar ve üçüncüsü ise korona boşalmalarıdır.

Bu tezin amacı yukarıda sözü edilen faktörleri göz önünde bulundurarak, ulusal bir kalibrasyon standardı oluşturmak amacıyla yüksek doğru gerilim bölücüsü yapmaktır. Oluşturulan standart gerilim bölücü ile diğer gerilim bölücüler, 100 ppm'den küçük ölçüm belirsizliğinde kalibre edilebileceklerdir. Bölücüde 100 adet 1 MΩ'luk, sıcaklık katsayıları 23^{o}C ile 33^{o}C arasında belirlenmiş 5 ppm/^{o}C'den küçük dirençler kullanılmıştır. Bölücüde kullanılan dirençler kaçak akımları en aza indirecek yapıda, yüksek gerilim elektrodu ile toprak elektrodu arasına seri olarak yerleştirilmiştir. Yüksek gerilim elektrodu, yüksek gerilim altında elektrik alan dağılımını ve korona oluşumunu önleyecek şekilde tasarlanmıştır. Elektrotların tasarımı aşamasında sonlu elemanlar yöntemi tabanlı FEMM 4.0 yazılımı kullanılmıştır.

Bölücünün tasarım ve montajının tamamlanmasından sonra, teorik hesaplamalarla pratik sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla performans deneyleri yapılmıştır. Bölücünün anma geriliminde, zamanla çevirme oranı ve sıcaklık dağılımı değişimleri, 6 saat boyunca ölçmeler yapılarak belirlenmiştir. 100 kV tepe değerli doğru gerilime karşılık gelen yaklaşık 71 kV etkin değerli alternatif gerilimde bölücünün kısmi boşalma ölçmeleri yapılmış ve herhangi bir kısmi boşalmaya rastlanmamıştır. Bölücünün direnç dizilimini ve elektrot tasarımını karakterize etmek amacıyla; birim basamak yanıtı, kaçak akım ve korona ölçmeleri yapılmıştır. Ayrıca, bölücünün kısa dönem kararlılığının belirlenmesi için 3 ay boyunca anma geriliminde çevirme oranı değişimi izlenmiştir. Son olarak bölücünün oluşturulan ölçüm belirsizliği bütçesinden 66 ppm ölçüm belirsizliği elde edilmiştir. Bu belirsizlik içinde, sıcaklıktan gelen belirsizlik bileşeninin en baskın bileşen olduğu ve sıcaklığın kontrol edilebildiği ölçüde belirsizliğin azalacağı saptanmıştır.

100 kV HIGH DIRECT VOLTAGE DIVIDER HAVING HIGH ACCURACY

SUMMARY

The measurements of high voltage are difficult because the amplitudes are high and they cannot be measured directly with conventional measurement systems. A high voltage measuring system consists of a high voltage divider or measuring transformer which are called converting device, a measuring cable which is called transmission device and a digital recorder or peak voltmeter which are called recording device. The converting devices reduce the high amplitude to be measured to a value which is suitable for the transmission and recording device. The output signal of the converting device should be well-proportioned with the peak value of input signal and same with wave shape and time parameter of input signal. These devices should be constructed as to these requirements.

The ratio of divider used for DC high voltages should have been known accurately and independent of voltage. The change in total resistance of divider with voltage may be due to combination of three factors. The first of them is the changing of the resistance values due to heating. The second is current leakage related to the insulation material and the last is corona discharges.

The aim of this thesis is to construct the DC high voltage divider which will be used for the called national standard considering the factors mentioned above. Using this reference divider, it can be calibrated the other DC high voltage divider with less than 100 ppm uncertainty. In this divider, it is used to 100 precision resistors, 1 MΩ, of each, and they have temperature coefficient less than 5 ppm/^{o}C between 23^{o}C and 33^{o}C. Resistors used in the divider have been connected in series between a ground and high voltage electrode to minimize the leakage currents. The high voltage electrodes are designed to prevent the concentration of electric field and corona formation at the high voltage. For this process it is used to FEMM 4.0 packet program based Finite Element Method.

After designing and constructing of the divider, some performance tests have been performed in order to compare the theoretical calculations and practical test results. The ratio change and the temperature distribution of the divider at rated voltage have been determined during the test for 6 hours. PD measurements of the divider have been carried out at effective AC high voltage up to 71 kV equivalent to 100 kV DC high voltage and no partial discharges could be detected. For characterizing the electrode and resistors configuration of the divider; step response, leakage current and corona measurements have been performed. In additional, the ratio has been checked during 3 months period to determine the short-term stability. Finally the uncertainty of the divider is determined as 66 ppm from the uncertainty budget. This value contains of the temperature uncertainty which is the most effective component. It is determined that the uncertainty will be reduced if the temperature is controlled.

BÖLÜM 1 GİRİŞ

Yüksek gerilim tekniğinde gerilim ve akımın alçak gerilim tekniğindeki bilinen yöntemlerle doğrudan ölçülmesi ve kaydedilmesi, gerilim ve akımın genliğinin büyük olmasından dolayı güçtür. Bu güçlük bilinen elektriksel ölçüm yöntemlerinin dışında farklı yöntemler kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Ayrıca sadece işaretin tepe, etkin ve ortalama değerlerinin belirlenmesi değil, özellikle değişken gerilim ve akımlarda, işaretin şeklinin, zaman ve frekans büyüklüklerinin de bilinmesi önemlidir [1].

Yüksek doğru (DA), alternatif (AA) ve darbe gerilimlerinin ölçülmesinde karşılaşılan temel zorluk sadece gerilimin genliğinin büyük olması değildir. Örneğin elektrik alanının kontrolünün gerektirdiği büyük yapılar, elektrik alanının etkilediği ölçü birimleri, delinme veya boşalmalarla oluşabilecek aşırı gerilim ve akımlar ve sıcaklık dağılımının yarattığı ölçüm sapmaları diğer başlıca zorluklardır [2].

Bir yüksek gerilim sisteminde üç temel eleman bulunmaktadır. Bunlar:

- Dönüştürücü elemanlar (converting device)
- İletici elemanlar (transmission device)
- Kayıt elemanları (recording device)

Bu üç elemanın birbiriyle uyumlu çalışması ve sistemin çalışmasına bozucu etki getirmemesi arzu edilmektedir. Ölçümün doğruluğuna en fazla etkiyi yapan eleman, yüksek gerilimi ölçülebilir düzeye indirerek basit ölçüm aletleri ile bilinen yöntemlerle ölçülmesine olanak sağlayan transformatör veya gerilim bölücülerden oluşan dönüştürücü elemanlardır. Yüksek gerilimdeki gerilim bölücüler, yüksek gerilimleri ölçülebilir değere düşüren cihazlardır. Bu cihazlar işlevlerini gerilimi belirli bir oranda bölerek yerine getirirler ve bunu yaparken iç ve dış etkenlerden etkilenmeden sabit gerilim çevirme oranına sahip olmaları istenmektedir [2-4].

Yüksek doğru gerilimlerinin ölçülmesinde birçok yöntem kullanılmaktadır. Bunlar; küresel elektrotlarla, yüksek değerli bir empedansa seri olarak bağlı bir

ampermetreyle, dirençsel gerilim bölücüsüyle, elektrostatik voltmetreyle, çubuk elektrotlarla ve alan üretecine dayalı ölçme yöntemleridir [5-7]. Bu bölümde, bu sözü edilen ölçüm yöntemleri kısaca anlatılacaktır.

1.1 Yüksek Doğru Gerilimlerin Ölçülmesi

Yüksek doğru gerilimler (HVDC) günümüzde iletim hatlarında, büyük kapasiteli yalıtım malzemelerinin deneylerinde, tıpta, elektrostatik boyama ve toz teknolojisinde vb. birçok teknik alanda kullanılmaktadır. Yüksek doğru gerilimlere olan gereksinim beraberinde ölçüm tekniklerinin geliştirilmesini ve kullanılmasını da zorunlu kılmaktadır. Yüksek doğru gerilimleri ölçmek için farklı ölçüm yöntemleri bulunmaktadır. Yüksek doğru gerilimlerinin ölçüldüğü ve içerisinde dönüştürücü, iletici ve kaydedici elemanların bulunduğu ölçüm sisteminin ölçüm belirsizliği ± %3 olmalıdır. Bunun yanında yüksek doğru gerilim sistemlerinin kalibre edildiği referans ölçüm sisteminin belirsizliğinin ise bu değerden daha düşük olma zorunluluğu vardır. Standartlarda bu değer ± %1 olarak belirlenmiştir [8-11].

1.1.1 Küresel Elektrotlarla Ölçme Yöntemi

Küresel elektrotlarla yüksek doğru gerilimlerin dışında yüksek alternatif ve darbe gerilimleri de ölçülebilmektedir. Hava ya da bir başka gaz içerisinde bulunan iki küresel elektrot arasında delinme, gerilimin tepe değerinin sabit kabul edilebileceği birkaç μs'lik bir zaman aralığı içerisinde statik delinme gerilimine erişildikten sonra meydana gelir. Bu yüzden gazlarda delinme olayı daima tepe değerde gerçekleşmektedir [12].

Küresel elektrotlarla yapılan hassas ölçümler, küreler arası açıklığa, kürelerin çapına ve elektrot yüzey pürüzlülüğüne ve daha birçok etkene göre değişiklikler göstermektedir. Farklı küre çapları ve küre açıklıkları için pozitif ve negatif doğru, alternatif, pozitif ve negatif darbe gerilimleri için küreler arasında atlama gerilimi değerleri özel tablolarda verilmiştir. Tablolardaki değerler, b = 1013 mbar atmosfer basıncına ve T = 20 ^{o}C sıcaklığa sahip ortam koşulları için verilmiştir. Bu koşulların dışındaki basınç ve sıcaklıklardaki ölçümler için bir düzeltme katsayısı hesaplanarak

gerçek gerilim değeri hesap yoluyla bulunmaktadır. Sözü edilen düzeltme katsayısı, δ bağıl hava yoğunluğu olarak adlandırılır ve

$$\delta = \frac{b}{1013} \cdot \frac{273 + 20}{273 + T} \tag{1.1}$$

$$\delta = 0.289 \frac{b}{273 + T} \tag{1.2}$$

bağıntıları ile bulunur. Burada b milibar cinsinde hava basıncını, T ise ^{o}C cinsinden hava sıcaklığını belirtmektedir [13].

Ölçme amaçları için kullanılan küresel elektrotlar yatay ve düşey konumlarda olabilmektedir. D < 500 mm küre çaplarına kadar daha çok yatay düzen, daha büyük küre çaplarında ise düşey düzen tercih edilmektedir. Şekil 1.1'de örnek olarak yatay düzende 250 mm çaplı küresel elektrotlar gösterilmiştir.



Şekil 1.1: Yatay düzende 250 mm çaplı küresel elektrotlar

Küreler arası açıklığın artması, küreler arasındaki düzgün alanın bozulmasına ve ölçüm belirsizliğinin büyümesine yol açmaktadır. Küreler arası açıklık a ve küre çapı D ile gösterilirse, ölçüm belirsizliğinin küre düzenleri ile olan ilişkisi Tablo 1.1'de verilmiştir. Ölçü kürelerine seri olarak, akımı sınırlamak için 1 Ω/V oranı göz önüne

alarak değeri belirlenmiş öndirençler kullanılmaktadır. Bu öndirençler küreler arasında atlama olduğunda akımı ortalama 1 A düzeyinde sınırlamaktadır [14-16].

Tablo 1.1: Küreler arası açıklık ve küre çapının ölçüm belirsizliğine etkisi

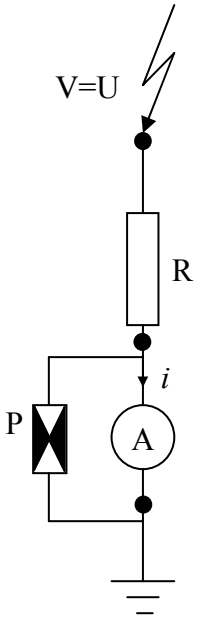
Küre Açıklığı (a) - Küre Çapı (D)	Belirsizlik
a < 0.5 D	± % 3
0.75 D > a > 0.5 D	± % 5

1.1.2 Seri Dirençle Ölçme Yöntemi

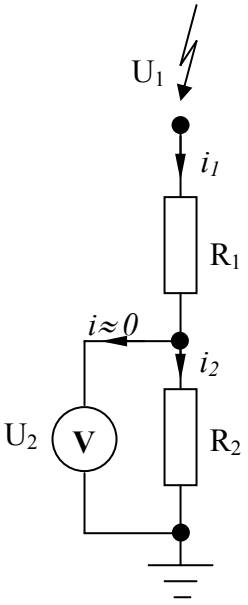
Bu yöntemde, yüksek gerilimin ölçüleceği yer ile toprak arasına bağlı yüksek gerilime dayanıklı ve büyük direnç değerine sahip bir direnç ile bu dirence seri olarak bağlı bir ampermetre kullanılır. Ölçme sisteminin devre şeması Şekil 1.2'de gösterilmiştir. Ohm yasasına göre devreden akan akımla ve akımın üzerinden geçtiği direncin değerinin çarpılması sonucu sistemdeki yüksek gerilim belirlenmektedir. Ölçüm direncinin yüksek gerilimde kısa devre olasılığına karşı ölçü aletinin korunması amacıyla ampermetreye paralel olarak bağlı koruma elemanı da kullanılmaktadır. Ölçüm direnci, akımı sınırlamakta ve tasarımını 20 kΩ/V bağıntısı göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmektedir. Bu ölçüm sistemi, hem DA hem de AA yüksek gerilimlerin ölçülmesinde kullanılan bir sistem olması nedeniyle tercih edilen bir yöntemdir. Ancak devreden akan akımın mikroamper düzeyinde olmasından dolayı, direncin ısınmasından kaynaklanan sapmalar, kaçak akımların varlığı ve korona boşalmaları ölçüm sonucunu etkilemektedir. Kullanılacak düzenlerin bu etkileri en aza indirecek biçimde ekranlanmış yapıda olmasına dikkat edilmesi gerekmektedir [2, 7, 17].

1.1.3 Dirençsel Gerilim Bölücü ile Ölçme Yöntemi

Şekil 1.2'deki ampermetrenin yerine, değeri yüksek gerilim kolundaki direncin değerinden daha küçük olan bir direnç bağlanarak, gerilimin belirli bir oranda bölünmesi ilkesine dayalı bir ölçme sistemidir. Bir dirençsel yüksek doğru gerilim bölücüsünün temel eşdeğer devresi Şekil 1.3'te gösterilmiştir.



Şekil 1.2: Seri dirençle yüksek doğru gerilim ölçme
P: Koruma elemanı (Parafudr)



Şekil 1.3: Dirençsel gerilim bölücü devre şeması

Burada U_1 yüksek gerilimi, U_2 bölünmüş alçak gerilimi, R_1 yüksek gerilim kolundaki direnci, R_2 alçak gerilim kolundaki direnci ve k ise

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \tag{1.3}$$

olarak tanımlanan çevirme (bölüm) oranını göstermektedir. Yüksek doğru gerilimlerin bölücülerle duyarlı olarak ölçülebilmesi için bazı önemli ayrıntılar bulunmaktadır. Bu tezin konusu olması nedeniyle bu ayrıntılara, ilerleyen bölümlerde yer verilecektir. Şekil 1.4'te 400 kV'luk ve % 0.8 ölçüm belirsizliğine sahip referans ölçüm sisteminin bir parçası olan yüksek doğru gerilim bölücüsü gösterilmektedir.



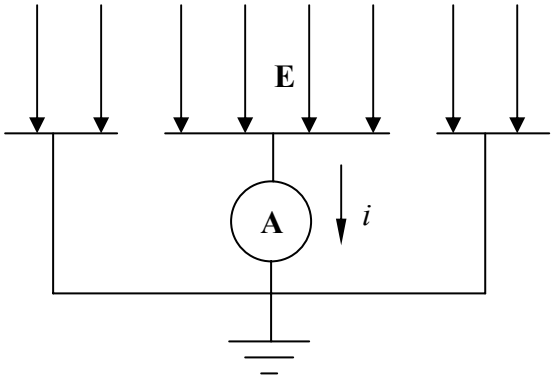
Şekil 1.4: 400 kV'luk dirençsel yüksek doğru gerilim bölücüsü

1.1.4 Elektrostatik Voltmetrelerle Ölçme Yöntemi

Elektrostatik voltmetrelerin çalışma ilkesi, gerilimle kapasite veya elektrik yükü değişimine dayanır. Elektrostatik voltmetreler yüksek doğru gerilimlerin ölçülmesinde kullanılan kaybı çok az olan ölçü aletleridir. Giriş empedansları çok büyük olduğundan, kaynaktan çok düşük akım çekilmesine neden olmaktadır. Ölçü aletinde hareketli ölçüm elektrodu bulunmaktadır. Bu cihazın temel çalışma prensibi, hareketli elektrodun elektrik alan şiddetine göre hareket etmesine dayanmaktadır [5, 18].

1.1.5 Generatör İlkeli Ölçme Yöntemi

Ölçü aletinde elektrik alanını meydana getiren yüksek gerilim elektrotundan başka ikinci bir ölçü elektrodu daha bulunmaktadır. Ölçü elektrodu bir miliampermetre üzerinden topraklanmıştır. Ölçü aletinin temel prensip şeması Şekil 1.5'te verilmiştir.



Şekil 1.5: Generatör ilkeli gerilim ve alan ölçme cihazının basitleştirilmiş yapısı

Ölçü elektrodu toprak potansiyelindedir. Elektrodun yüzey alanı A olduğu varsayılırsa, E elektrik alanının yaratmış olduğu yük yoğunluğu $\varepsilon_o E$ dir. Buna göre ölçü elektrodundaki toplam yük miktarı

$$q = \int_A \varepsilon_o \cdot E \cdot dA = \varepsilon_o \cdot E \cdot A \tag{1.4}$$

bağıntısından hesaplanabilir. Devredeki yükün q_{max} ve q_{min} arasında değişim gösterdiği varsayılırsa devreden akan akım $i(t) = \frac{dq}{dt}$ bağıntısıyla hesaplanır. Devreden akan akımın ortalama değeri;

$$\bar{I} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} i(t)\, dt \tag{1.5}$$

$$\bar{I} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} \frac{dq}{dt}\, dt \tag{1.6}$$

$$\bar{I} = \frac{2}{T} q_{max} \tag{1.7}$$

$$\bar{I} = \frac{2}{T}\varepsilon_o AE \tag{1.8}$$

bağıntıları ile ifade edilmektedir. Görüldüğü gibi akım, uygulanan elektrik alan şiddeti ile doğru orantılıdır. Ölçümün istenilen doğrulukta gerçekleştirilebilmesi için ölçüm sisteminin yabancı elektrik alan etkisinde kalmamasına dikkat edilmesi ve cihaz tasarımının buna göre gerçekleştirilmesi gerekmektedir [5, 19].

1.1.6 Çubuk Elektrotlarla Ölçme Yöntemi

Küresel elektrotlarla ölçmede atlama geriliminin çok geniş bir spektruma yayılması sebebiyle çubuk elektrotlarla ölçme yöntemi tercih edilmektedir. Ayrıca küresel elektrotlarla özellikle düşük gerilimlerde, havadaki tozların küreler arasında dengesiz boşalmalara neden olması da çubuk elektrotlarla ölçmeyi tercih edilir hale getirmiştir. Çubuk elektrotlar yatay ve düşey düzende kullanılabilirler. Yatay elektrotlarda gerilim;

$$U_o = 2 + 0.534 \cdot d \tag{1.9}$$

bağıntısıyla ifade edilir. Burada d mm cinsinden elektrotlar arası açıklığı, U_o ise kV cinsinden gerilimini ifade etmektedir. (1.9)'daki gerilim bağıntısı;

$$250\,\text{mm} \le d \le 2500\,\text{mm} \tag{1.10}$$

$$1\,\text{g/m}^3 \le \frac{h}{\delta} \le 13\,\text{g/m}^3 \tag{1.11}$$

koşulları için geçerlidir. Bu koşullar altında çubuk elektrotlarla yapılan ölçümlerin belirsizliği %3'tür. Çubuk elektrotlarla pozitif ve negatif yüksek doğru gerilimlerin ölçülmesinde (1.9) bağıntısı kullanılmakta ve gerilim, elektrot açıklığı ile doğrusal olarak değişmektedir. Çubuk elektrotların çapının 15 mm ile 25 mm arasında olması ve paslanmaz çelik veya pirinç malzemeden yapılmış olması gerekmektedir. Çubuk elektrotların eğrilik yarıçapları ölçmede önemli bir rol oynamaktadır ve ilgili standartlarda bununla ilgili ayrıntılara yer verilmiştir [9, 13, 20].

1.2 Yüksek Doğru Gerilim Bölücülerinin Geçmişi

Yüksek doğru gerilimi düşük belirsizlikte ölçen gerilim bölücülerin yapımı, 1930 yılında L. S. Taylor'ın yapmış olduğu yüksek doğru gerilim bölücüsüyle başlamıştır. Taylor'ın bölücüsü, nikel-krom (Ni-Cr) telden yapılmış 1 MΩ ve 1 W'lık yüz adet birimden, herbiri beş birimden oluşan yirmi takım halinde düzenlenmiştir. Her birim örgülü alüminyum korona ekranı içine yerleştirilmiş ve 20 birim seri olarak bağlanmıştır. Gerilim bölücünün sıcaklık katsayısı 152×10^{-6} $1/^{o}C$'dir [21].

1933 yılında G. W. Bowdler'in yapmış olduğu gerilim bölücü, yüksek alternatif ve doğru gerilimlerin ölçülmesine olanak sağlamaktaydı. Gerilim bölücü, 4 MΩ ve 1 W'lık yirmibeş adet ince film dirençten oluşmaktaydı. Gerilim bölücünün 100 kV'taki güç kaybı her direnç için yaklaşık 4 W olduğu için, Bowdler yapıda transformatör yağı kullanarak etkili bir soğutma sağlamıştır [21].

1950'li yıllarda J. H. Park'ın yapmış olduğu ve yapısı Park tipi gerilim bölücü olarak bilinen gerilim bölücü düşük ölçüm belirsizliğine sahip yapılar için öncü olmuştur. Park bu çalışmasında; kaçak akım etkisi, korona oluşumu ve alan dağılımı düzgünsüzlüklerinin önüne geçebilmek için farklı yapıda ekranlama ve elektrot tasarımı kullanmıştır. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında Park tipi gerilim bölücüden söz edilecektir [22].

1970 yılında N. F. Ziegler, Freon 12 (CCl_2F_2) gazını kullanarak gaz yalıtımlı Park tipi bir gerilim bölücü yapmıştır. Helezon yapıda sıralanmış 1 MΩ'luk dirençlerden oluşan 150 kV'luk gerilim bölücünün kısa dönem kararlılığının 0.01 $ppm/^{o}C$ olduğunu belirlemiştir [23].

1979 yılında D. Peier ve V. Graetsch tarafından yapılmış 300 kV'luk yağ yalıtımlı Park tipi gerilim bölücü, o zamana kadar yapılmış en düşük ölçüm belirsizliğine sahip gerilim bölücüdür. Bu bölücüde 2 MΩ'luk 300 adet endüktanssız sarım dirençler kullanılmış ve dirençler için herhangi bir ekranlama yoluna gidilmemiştir. Bunun yerine uygun alt ve üst elektrot tasarımı tercih edilmiştir. Bu gerilim bölücünün ölçüm belirsizliği 28 ppm'dir [24].

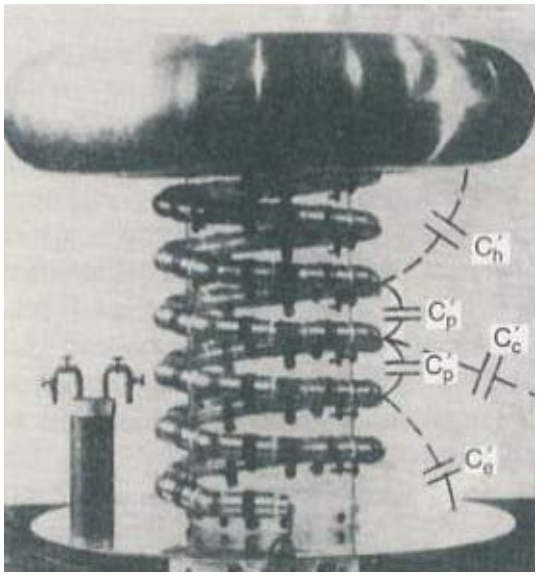
2001 yılında R. Marx, yüksek doğru gerilim bölücüleri için yeni bir tasarım geliştirmiş ve 2 ppm ölçüm belirsizliğine sahip gerilim bölücünün yapımını

gerçekleştirmiştir. Marx'ın bölücüsü 100 kV'luk olup içinde 101 adet sarım direnç bulunmaktadır. Toplamda 1 GΩ değere sahip dirençler, SF6 gazı yalıtımlı metal bir tüpün içine yerleştirilmiştir. Bölücü, peltier elemanlarla sıcaklık kontrollü hale getirilmiş ve ayrıca 100:1 ve 10000:1 gibi iki farklı çevirme oranına sahiptir [25, 26].

1.3 Park Tipi Gerilim Bölücüler ve Tasarımı

Park tipi yüksek gerilim bölücüsünde, yüzeylerinde oluşabilecek koronayı ve kaçak akımları en aza indirmek amacıyla ekranlanmış ve sıcaklık katsayıları düşük dirençler kullanılmaktadır. Sarım dirençler yüksek gerilim bölücüsüne yüksek gerilim elektrodu ile toprak potansiyeli arasına helezon bir yapı oluşturacak şekilde seri olarak yerleştirilmiştir. Bu şekilde bölücü boyunca oluşacak alan dağılım düzgünsüzlüğünün önüne geçilmiştir. Şekil 1.6'da Park'ın yapmış olduğu gerilim bölücüsü görülmektedir.

Gerilim bölücünün yüksek gerilim ucunda bulunan toroid elektrot ile, yüksek gerilim ucunda ve bağlantılarda oluşabilecek korona etkisi azaltılmış ve bölücü boyunca alan dağılımı düzenlenerek kaçak akımların oluşumu engellenmiştir. Gerilim bölücünün yüksek gerilim kolunu oluşturan toplam direncin sıcaklık katsayısı minimum olacak şekilde, birim dirençler birbiri ile eşleştirilmiştir.



Şekil 1.6: Park tipi gerilim bölücü [2]

Yüksek gerilim bölücüsünde yer alan dirençlerin gerilim artışına bağlı olarak göstermiş oldukları değişim, bölücünün ölçüm karakteristiğine doğrudan etki etmektedir. Bu etkiler üç ana grupta toplanır. Bunlar:

- Dirençlerin sıcaklık katsayısından kaynaklanan kayıplar ($P = I^2 R$)
- Direnç birimlerinin sıralandığı taşıyıcı elemanın yüzeyinde oluşan kaçak akımlar
- Gerilim yükselmesiyle ortaya çıkan korona kayıpları

Sıcaklık etkisi yüksek gerilim bölücüsündeki toplam direncin sıcaklık katsayısıyla ilişkilidir. Yüksek gerilim kolundaki sıcaklık katsayısının minimum olabilmesi için seçilen birim dirençlerinin birbirleriyle eşleştirilmesiyle ısıl etki en aza indirgenebilmektedir. Direnç eşleştirilmesi mutlak olarak eşit sıcaklık katsayılarına sahip pozitif ve negatif direnç seçimiyle gerçekleştirilir [27].

Kaçak akımların ve koronanın yaratmış olduğu problemler, doğrudan belirlenemez veya ölçülemezler. Tasarım sonrasında gerilim yükselmesiyle ortaya çıkan bu tür problemlerden kurtulmak için deneysel tecrübelere gereksinim duyulmaktadır.

Yüksek gerilim bölücüsünde kullanılacak dirençlerin seçilmesi, gerilim bölücüsünün ve dolayısıyla birim dirençler üzerine düşecek gerilimin bilinmesiyle başlamaktadır. Her bir direnç üzerine düşecek gerilim belirlendikten sonra bu gerilim altındaki direncin yüzeysel sıcaklığının da belirli olması gerekmektedir. Bu bilgi doğrultusunda dirençlerin sıcaklık katsayılarının belirleneceği sıcaklık aralığı da tespit edilmiş olur. Birim dirençlerin bulunduğu ortamın sıcaklığı ile maksimum gerilim altındaki yüzeysel sıcaklığı arasındaki bölgede, dirençlerin sıcaklık katsayılarının belirlenmesi gerekmektedir. Elde edilen bilgiler ile uygun bir direnç eşleştirme yapılmasıyla sıfıra yakın sıcaklık katsayısına sahip direnç eşleri oluşturulur ve gerilim bölücünün ısıl etkisi minimuma indirilmiş olur.

Direnç birimlerinin sargılarında oluşacak korona ve kaçak akımların etkisini en aza indirmek için, direnç birimlerinin ekranlanması yada uygun tepe elektrot yapısı kullanılarak bölücü boyunca alan dağılımını düzeltmek gerekmektedir. Ayrıca

kullanılacak dirençlerin dış yüzeyinin, karbon miktarı yüksek yalıtım malzemesinden oluşmasına dikkat edilmesi bir diğer tercih olmalıdır.

Park'ın ilk yapmış olduğu gerilim bölücünün temel prensipleri kullanılarak benzer yada farklı yapıda birçok gerilim bölücüler yapılmıştır. Yüksek doğru gerilim ölçmelerinde sağlamış olduğu düşük belirsizlik avantajıyla, günümüzde birçok ulusal metroloji enstitüsü yüksek doğru gerilim izlenebilirliğini bu tip gerilim bölücüler ile sağlamaktadır [28-34].

Bu tez çalışmasıyla 100 kV'luk Park tipi bir gerilim bölücünün tasarımı ve yapımı gerçekleştirilerek, Türkiye'de ilk defa yüksek doğru gerilimde ulusal bir ölçme standardı elde edilecektir. Bu şekilde ülkemizde yüksek gerilim metrolojisi adına dışarıya olan bağımlılığın ortadan kaldırılması amaçlanmıştır.

BÖLÜM 2 GENEL METROLOJİ VE İZLENEBİLİRLİK

2.1 Metroloji Nedir?

Metroloji sözcük olarak metreden türetilmiş bir sözcük olup, anlamı ölçme bilimidir. Metroloji, doğruluk düzeyine bakılmaksızın ölçmeye dayanan uygulamalı ve kuramsal tüm konuları kapsamaktadır.

Metrolojinin amacı, bütün ölçme sistemlerinin temeli olan birimleri (SI ve türevleri) tanımlayarak bilim ve teknolojinin kullanımına sunmak ve yapılan ölçümlerin güvenilirliğini ve doğruluğunu sağlamaktır. Metroloji üç temel işlevi içermektedir.

- Uluslararası ölçüm birimlerinin gerçekleştirilmesi,
- CIPM tarafından kabul edilen yöntemlerin ulusal enstitülerde gerçekleştirilerek "Ulusal Standartların" oluşturulması,
- Her ülkede faaliyet gösteren laboratuvarların kullandıkları ölçü aletlerinin ve üretimde kullanılan cihazların izlenebilirliğinin sağlanması metroloji kapsamı içindedir [35, 36].

2.2 Metre Uzlaşması

Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu (BIPM) 25 Mayıs 1875'te imzalanan "Metre Uzlaşması" tarafından kurulmuştur. BIPM'in genel merkezi Paris yakınlarında Sevr kasabasındadır. BIPM'in amacı tüm fiziksel ölçümlerin denkliğini dünya çapında garanti altına almaktır. Bu amaçla görevi, temel fiziksel büyüklükler için, standartları ve ölçekleri kurmak, uluslararası prototipleri saklayıp sürdürmek, ulusal ve uluslararası karşılaştırmaları yürütmek, gereken ölçüm tekniklerinin birliğini sağlamak ve bu etkinlikleri ilgilendiren fiziksel sabitlerin belirlenmesiyle ilgili ölçümleri yapmak veya yapılmasını sağlamaktır.

2.3 SI Temel Birimleri

2.3.1 Kilogram (kg)

25 Mayıs 1875 yılında Paris'te aralarında Türkiye'yi temsilen Miralay Hüsnü Bey'in de bulunduğu 17 ülke tarafından imzalanan Metre Konvansiyonu'na dek, standart kilogram prototipi hazırlanmış ve kullanılmıştır. Ancak Metre Konvansiyonunun imzalanmasıyla harekete geçilmiş ve 1889 yılı Ekim ayında 1. Genel Ölçüler ve Ağırlıklar Konferansında kütle birimi Kilogram, yoğunluğu 21.5 g/cm^3 olan %90 Pt-%10 Ir alaşımından yapılmış, 39 mm yüksekliğinde ve 39 mm çapında silindir biçimindeki kütle, ağırlık standardı olarak kabul edilmiş ve Metre Konvansiyonu'nu imzalayan ülkelere birer prototip verilmiştir.

Türkiye Metre Konvansiyonu'ndan 1889 yılında ayrıldığından ilk aşamada kütle prototipini alamamış, 1938 yılında Metre Konvansiyonu'na yeniden girdikten sonra 54 numaralı standart (kütle protipi) Türkiye'ye verilmiştir. Prototip günümüzde özel koşullar altında TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde (UME) saklanmaktadır.

2.3.2 Metre (m)

Metre konvansiyonunun imzalanmasından sonra, 1889 yılında 20×20 mm boyutlarında X-kesitinde, %90 Pt-%10 Ir alaşımlı bir çubuk yeni metre prototipi olarak kabul edilmiştir. En son olarak Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konferansının 1983 yılında yaptığı 17. toplantısında, ışığın vakum ortamda 1/299792458 saniyede aldığı mesafe olarak yeniden tanımlanmıştır.

2.3.3 Saniye (s)

Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konferansının 1967 yılında yaptığı 13. toplantısında tanımlanan ve radyo, ölçü cihazları ve elektronik alanda çok yaygın olarak kullanılan zaman tanımı; Sezyum-133 atomunun denge halinde iki ince yapı arasındaki geçişe ait ışıma periyodunun 9192931776 katına eşit olan zaman 1 saniye olarak tanımlanmıştır.

2.3.4 Amper (A)

1891 yılında Paris'te toplanan ilk Uluslararası Elektrik Kongresi sonucunda, İngiliz Birliği'nin Amper, Ohm ve Volt birimleri resmi olarak onaylanmış ve uluslararası tanımlar içinde yer almıştır. 1892 yılında, ilk olarak Dr. Edward Weston tarafından üretilen kimyasal doymuş piller, gerilim biriminin elde edilmesinde kullanılmıştır. Bugün ise temel elektriksel birim Amper olup, 1939 yılında kabul edilmiştir.

2.3.5 Kandela (cd)

Çeşitli yapay ışık kaynakları edinen insanoğlunun, ışığın niceliğinin tanımlanması olanaklarını merak etmesiyle başlayan araştırmaları özel fotometrik büyüklükler ve birimler sisteminin oluşturulmasına neden olmuştur. 1909 yılında İngiltere, Fransa ve ABD metroloji merkezleri tarafından desteklenen ışık şiddetinin yeni birimi, "Uluslararası Mum" 1948'e kadar geçerli olmuştur. Işık şiddeti Kandela 1954 yılında kabul edilmiştir. Kandela'nın tanımı ise, Steradyan başına 1/683 watt radyan şiddeti olan 540×10^{12} Hz frekanslı monokromatik ışınım yayan bir kaynağın verilen bir yöndeki ışık şiddetidir.

2.3.6 Kelvin (K)

1848-1854 yıllarında Lord Kelvin tarafından Termodinamik Sıcaklık Ölçeği geliştirilmiştir. Bugün anladığımız anlamda madde ile radyasyon arasındaki ilişki ise 1859'da Kirchhoff tarafından ispatlanmıştır. Sıcaklık birimi Kelvin 1954 yılında kabul edilmiş ve suyun üçlü noktasındaki termodinamik sıcaklığının 1/273.16 katı olarak tanımlanmıştır.

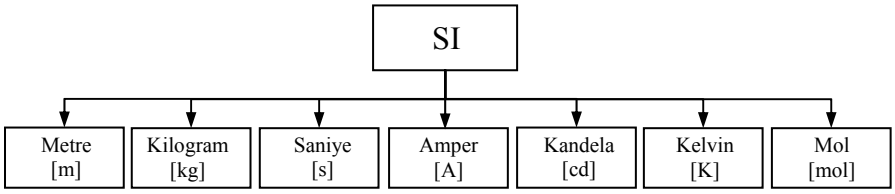
2.3.7 Mol (mol)

Madde miktarı Mol, 1969 yılında, Karbon 12'nin 0.012 kilogramındaki atom sayısını içeren madde miktarı olarak tanımlanmıştır.

2.4 Türetilmiş Birimler

Bugün kullanılan tüm ölçü birimleri yedi temel SI biriminden fiziksel bağlar kurularak türetilmiştir. Türetilmiş birimler temel birimlerin çarpımı veya bölümleri şeklinde ifade

edilmektedir. Şekil 2.1 yedi temel SI birimini ve Tablo 2.1 ise bu temel birimlerden türetilmiş diğer örnek büyükleri göstermektedir [35-37].



Şekil 2.1: Yedi temel SI birimleri

Tablo 2.1: Yedi temel SI biriminden türetilmiş bazı büyüklükler [37]

Türetilmiş Büyüklük	Birimi	Sembol	Temel SI Birimleri Karşılığı
Frekans	Hertz	Hz	s^{-1}
Güç	Watt	W	$m^2.kg.s^{-3}$
Yük	Coulomb	C	s.A
Gerilim	Volt	V	$m^2.kg.s^{-3}.A^{-1}$
Kapasite	Farad	F	$m^{-2}.kg^{-1}.s^4.A^2$
Direnç	Ohm	Ω	$m^2.kg.s^{-3}.A^{-2}$
Endüktans	Henry	H	$m^2.kg.s^{-3}.A^{-2}$
Manyetik Akı	Weber	Wb	$m^2.kg.s^{-2}.A^{-2}$
Elektrik Alan	V/m	E	$m.kg.s^{-3}.A^{-1}$
Kuvvet	Newton	N	$m.kg.s^{-2}$
Basınç	Pascal	Pa	$m^{-1}.kg.s^{-2}$
Enerji	Joule	J	$m^2.kg.s^{-2}$

2.5 Metrolojinin Sınıflandırılması

Dünyadaki metroloji sisteminin yapılaşması, organizasyon yapıları bakımından farklar göstermesine rağmen genel olarak metrolojinin faaliyet alanları; bilimsel, endüstriyel ve yasal metroloji olarak üç gruba ayrılmaktadır.

2.5.1 Bilimsel Metroloji

Bilimsel metroloji, uluslarası birimler sistemini (SI ve türevleri) oluşturan standartların bilim ve teknolojinin kullanımına sunulması, ölçme birimleri ve bunlara ait standartların oluşturulması, muhafaza edilmesi ve ülke çapında dağıtılması, uluslararası ölçme standartlarına izlenebilirliğinin sağlanması, yeni ölçüm yöntemlerinin geliştirilmesi gibi konuları içeren tüm araştırma faaliyetlerini kapsamaktadır. Bilimsel metroloji kapsamındaki çalışmalar Ulusal Metroloji Enstitüleri tarafından yürütülmektedir. Bu enstitüler, uluslararası alanda bulundukları seviyeyi karşılaştırmalı ölçümlerle belirlemektedirler.

2.5.2 Endüstriyel Metroloji

Endüstriyel metroloji, endüstride ürün kalitesinin teminat altına alınması için üretim esnasında ve sonrasında yapılan ölçümleri kapsamaktadır. Yapılan ölçümlerin ulusal ölçme standartlarına izlenebilir olması, ölçümlerin uluslararası kurullarca belirlenen kurallara göre yapılması, endüstride kullanılan ölçü aletlerinin kalibrasyonu, piyasaya sürülen ürünlerin çeşitli standart, direktif veya kurala uygun olarak üretilip pazarlandığının tescil edilmesi, üretim veya hizmet sektöründe faaliyet gösteren bir kuruluşun ISO 9000 gibi belli bir kalite güvence modeline uygun faaliyet gösterdiğinin tescili vb. endüstriyel metroloji kapsamı içindedir. Metroloji ve kalibrasyon laboratuvarları bu alanda gerekli izlenebilirlik ve sertifikasyon işlemlerini gerçekleştirmektedirler. Ulusal akreditasyon kurumları tarafından bu laboratuvarların akredite edilmesiyle yapılan işlemlerin hem uluslararası ortamlarda kabul görmesi hem de ülke çapında gerçekleştirilen faaliyetlerin eşdeğerliği sağlanmaktadır.

2.5.3 Yasal Metroloji

Kamuyu doğrudan ilgilendiren ve ticarete konu olan ölçümlerin denkliğinin ve güvenilirliğinin temini ile ilgili metrolojik faaliyetler yasal metroloji kapsamındadır.

Yasal metroloji, ulusal, bölgesel ve uluslararası düzeyde etkili ticareti sağlayan ölçüm güvenilirliği için temel teşkil etmektedir. Bu nedenle devletler yasal metroloji düzenlemelerine ihtiyaç duymaktadır.

Yasal metroloji, adil ticareti sağlama ihtiyacından doğmuştur. Topluma olan katkılarının en önemlisi, ölçümlerin güvenilirliğini sağlayarak ve işlem maliyetlerini düşürerek ticaret verimliliğinin artışında oynadığı roldür. Devletin, kişileri iş ilişkilerinde koruma sorumluluğu, yasal metroloji uygulamalarının, tarih boyunca ticarete konu olan işlemler üzerinde odaklanmasına sebep olmuştur. Ölçme cihazlarının ve tekniklerinin gelişmesiyle yasal metroloji düzenlemeleri, kişileri doğruluktan yoksun ölçümlerin yaratacağı etkilerden koruma ihtiyacının doğduğu sağlık, güvenlik ve çevre gibi diğer alanlara da genişlemiştir. Çevreyi, toplumun sağlığını ve güvenliğini sağlama ihtiyacı bu alanlarda yasal metrolojinin önemli gelişmeler kaydetmesine yol açmıştır. Yasal metroloji bütün bu ihtiyaçları karşılamaya yönelik faaliyetlerini yasal düzenlemeler ve kanunlar yoluyla yürütmektedir. Yasal metroloji faaliyet alanı çeşitli ülkelerde "Zorunlu Alan" olarak adlandırılır.

Yasal metrolojinin bütün uygulamaları, ölçüm birimleri, ölçme cihazları ve bunlar gibi ilgili diğer konuları içerir. Ölçme cihazları açısından bakıldığında yasal metroloji, performans gereksinimleri, gerçekleştirme prosedürleri, yasal olarak tanımlanmış ölçüm birimlerinin izlenebilirliğinin sağlanması ve gerekli el kitapları ve kılavuzların hazırlanmasını ele almaktadır.

Yasal metroloji düzenlemeleri, ulusal metroloji sisteminin içinde yer alan ve bu sistem ile sıkı ilişki içinde olan bir birim tarafından yürütülür. Bazı ülkelerde, yasal metroloji biriminin sorumlulukları ticaret ile ilgili işlemlerle sınırlı olup çevrenin korunması veya güvenliğin sağlanması gibi belirli metrolojik düzenlemelerin diğer kurumlarca yürütülmesinden ibaretttir. Ancak, metrolojik kontrol, izlenebilirlik ve ölçüm birimleri için metrolojik koşulların temini tek tip uygulama gereksinimini doğurmaktadır. Çoğu zaman tek çatı altında toplanmış bir yapı, diğer ulusal düzeydeki yasal metroloji kuruluşlarının faaliyetlerinin koordinasyonunda etkili olabilmektedir. Yasal metroloji alanında uluslararası işbirliği konuları, Uluslararası Yasal Metroloji Kurumu (OIML) tarafından yürütülmektedir.

2.6 Türkiye'de Metroloji

Türkiye'de uluslararası ölçme sistemi ile ilgili ilk çalışmalar, 25 Mayıs 1875 yılında Fransa'da Miralay Hüsnü Bey'in Osmanlı İmparatorluğu adına imzaladığı Metre Uzlaşması'na dayanmaktadır. Osmanlı İmparatorluğu'nun da içinde bulunduğu 17 ülkenin imzalamış olduğu Metre Konvansiyonu'na rağmen ülkemizde bu alanda 26 Mart 1931 tarihli Ölçüler ve Ayar Kanunu'na (Kanun No: 1781) kadar hiçbir gelişme olmamıştır. Bu kanunla ülkemizin metrik sisteminin kurulması zorunlu hale gelmiştir.

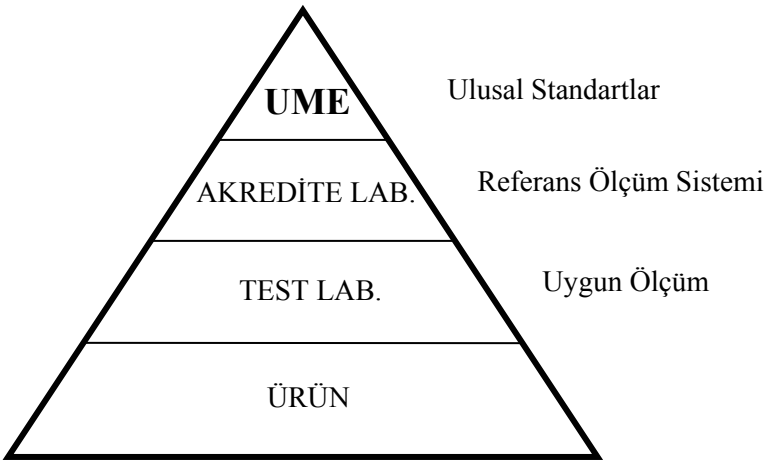
İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra, Türkiye'de metroloji sisteminin önemi anlaşılarak, 21 Mayıs 1955 tarihinde bu kanun güncelleştirildi. Ölçüler ve Ağırlıklar kanunu daha çok kullanılması zorunlu ölçü birimlerini ve bunların yasal düzenlemelerini tanımlamaktadır. İşin teknik yönünü kapsayan metroloji ile ilgili en önemli gelişme 1960'larda silahlı kuvvetler bünyesinde başlatılmış ama 1980 yılına kadar bu konuda sivil endüstri için gerekli yatırımlar yapılmamıştır.

Türkiye'de, Başbakanlık, 80'li yılların başında kamu ve özel sektörün gereksinimlerine topluca cevap verecek birinci seviyede ve ulusal ölçekte bir metroloji merkezinin kurulmasına karar vermiş ve fizibilite çalışmalarını yürütmek üzere TÜBİTAK'ı görevlendirmiştir. İlk çalışmalar 1982 yılında başlamış, konu ile ilgili kişilerin, kurumların fizibilite çalışmalarına onay vermesi ile "ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ" (UME) 1 Ocak 1992 yılında TÜBİTAK bünyesinde kurulmuş ve 14 Ekim 1999 tarihinde imzaladığı karşılıklı tanınma anlaşmasıyla da uluslararası sisteme dahil olmuştur.

2.7 İzlenebilirlik

İzlenebilirlik, bir ölçüm sonucunun veya bir ölçüm standardının değerinin belirli referanslarla, genellikle ulusal veya uluslararası standartlarla, tamamının ölçüm belirsizliği belirlenmiş olan kesintisiz bir karşılaştırmalı ölçüm zinciri ile ilişkilendirilebilmesi özelliğidir. Ölçme cihazının gösterdiği ölçüm değeri ile ilgili ölçme büyüklüğünün ulusal standartla mukayesesi kademeler halinde sağlanır. Kademelerin her birinde, ölçme cihazı; ölçüm sapması daha önceden bir üst seviye standartla kalibre edilerek belirlenmiş bir standart ile karşılaştırılır.

Üretimin ve kalite kontrolünün en önemli unsurlarından birisi olan ölçüm güvenilirliğinin sağlanabilmesi için kullanılan cihazların kalibre edilmesi, yani cihazın yaptığı ölçümlerdeki hatanın kendisinden daha yüksek doğruluğa sahip bir başka cihaz ile belirlenmesi gerekir. Kalibrasyon işleminin gerçekleştirildiği cihazların yaptığı ölçümlerin de güvenilirliğinin sağlanması için bu cihazların kendileri de kalibre edilmelidir. Bu şekilde, BIPM (Uluslararası Ölçü ve Ağırlıklar Bürosu) ile ilişkide bulunan, ulusal standartları oluşturmak, muhafaza etmek ve bu standartlar ile bir alt seviye laboratuvarlarda kullanılan ölçme standart ve cihazlarını kalibre etmekle görevli ulusal merkezlerden, üretim, kalite kontrol, bilimsel, askeri ve ticari amaçla kullanılan çeşitli ölçme cihazlarına kadar kademeli olarak devam eden bir zincir oluşur. Her alt seviye laboratuvar kendi çalışma standartlarını bir üst seviye laboratuvara kalibre ettirir ve doğruluğunun en hassas laboratuvarlara izlenebilir olması sağlanır. Bu şekilde oluşan, karşılaştırmalı ölçümlerin kesintisiz zincirine "İzlenebilirlik Zinciri" adı verilir. Bu zincir vasıtası ile yapılan her ölçüm, BIPM tarafından tanımları yapılmış yedi temel ölçüm birimine bağlanır.



Şekil 2.2: İzlenebilirlik zinciri

Laboratuvar bazında izlenebilirliğin sağlanamadığı durumlarda, ölçme alet ve cihazları veya çalışma standartları kalibre edilerek, cihaz bazında izlenebilirlik sağlanır. Ülkemizdeki izlenebilirlik zinciri Şekil 2.2'deki gibidir.

2.8 Standartlar Hiyerarşisi

Metroloji dünyasında kalibrasyon ve ölçümlerde kullanılan standartlar kullanım amacına göre hiyerarşik düzene sahiptir. Bu standartlar; ulusal referans, transfer ve

çalışma standardı olarak adlandırılır ve ülke içerisindeki ölçümlerin izlenebilirliğinin oluşturulması ve korunması için önem taşımaktadırlar.

2.8.1 Ulusal Standart

Bir ülkede resmi olarak tanınmış ve ülkedeki diğer tüm standartlar için değeri referans teşkil eden yüksek doğruluklu standarttır. Ulusal standartlar ülkelerin ulusal metroloji enstitüleri tarafından oluşturulur ve devamlılığı sağlanır. Ulusal standartların doğruluğu ve diğer ülkelerin standartlarına denkliği, gerçekleştirilen uluslararası karşılaştırmalarla sağlanmaktadır. Bu şekilde ülke içinde yapılan bir ölçüm ulusal standartlar üzerinden dünyanın başka bir yerinde yapılan ölçümlerin izlenebilirlik zincirine bağlanır.

2.8.2 Referans Standart

Bir laboratuvarda bulunabilen en yüksek metrolojik niteliğe sahip, uluslararası standartlara izlenebilir ve diğer kalibrasyonlara referans teşkil eden standarttır.

2.8.3 Transfer Standardı

Referans standartların birbirleri ile karşılaştırılabilmesi için kullanılan standarttır ve genellikle taşınabilir özelliklere sahiptir.

2.8.4 Çalışma Standardı

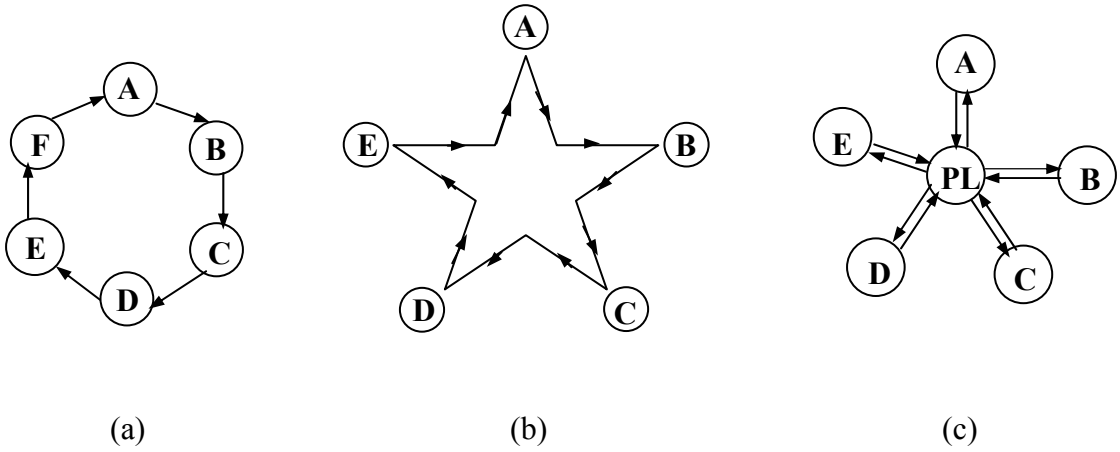
Referans standartları ve uygun ölçme cihazları ile kalibrasyonu yapılmış, günlük kalibrasyon ve kontrol işlemlerinde kullanılan, nispeten daha küçük doğruluğa sahip standarttır.

2.9 Karşılaştırmalar

Karşılaştırma, uzun dönem kararlılığı önceden saptanmış cihaz veya standardın yine önceden kabul edilmiş bir protokol çerçevesinde birden fazla laboratuvarda ölçülerek, sonuçların değerlendirilmesi ve raporlanmasıdır. Standardın karakterizasyonunu belirleyecek ve protokolü hazırlayacak bir pilot laboratuvar belirlenmektedir. Metroloji enstitülerinde bulunan ulusal standartların karşılaştırmaları sonucunda o ölçüm

büyüklüğünde ülkeler arasındaki denklik belirlenir. Uluslararası karşılaştırmalar 3 farklı tipte olabilir. Bunlar:

- Tek bir transfer standart ile gerçekleştirilen "Round-Robin" tip karşılaştırması (Şekil 2.3.a),
- Pilot laboratuvarın transfer standardı kullanılarak "Yıldız" tip karşılaştırma (Şekil 2.3.b),
- Her bir ülkenin kendi transfer standardı kullanılarak gerçekleştirilen "Pilot Yıldız" tip karşılaştırmadır (Şekil 2.3.c).



(a) (b) (c)

Şekil 2.3: Uluslararası karşılaştırma tipleri

Ortalama bir metroloji enstitüsünde karşılaştırmaya girmesi gereken onlarca (bazı enstitülerde yüzlerce) standart bulunmaktadır. Yine ortalama her ülke yaklaşık 40 ülke ile ticari ilişki içindedir. Bu nedenle ortalama her metroloji enstitüsü diğer 40 metroloji enstitüsü ile yaklaşık 100 ölçüm alanında karşılaştırma yapmak zorundadır. Bu ölçümlerin her on yılda bir tekrarlanması gerekeceğinden her ulusal enstitü yılda ortalama 400 (40 ülke X 100 ayrı ölçüm / 10 yılda bir) uluslararası karşılaştırma yapmak zorundadır.

2.10 Belirsizlik ve Doğruluk Kavramları

Ölçüm sırasında tüm koşulları kontrol altında tutmak ve bir ölçümü kusursuz bir şekilde gerçekleştirmek imkansızdır. Aynı ölçüm görünürde aynı koşullarda

tekrarlandığında bile farklı sonuçlar elde edilir. Bu nedenle, ölçüm sonuçlarını raporlarken, ölçülen değer ile birlikte tüm şüpheleri ortadan kaldıracak ve ölçüm sonuçlarını, ölçümün yapıldığı ortam koşulları ve cihazın çalışma aralığı gibi tüm koşulları kapsayacak değerler aralığı verilmelidir. Bu aralık belirsizlik olarak adlandırılmaktadır. Belirsizliğin olası nedenleri aşağıda sıralanmıştır.

- Ölçülen değerin tanımındaki eksiklik,
- Ölçülen değerin tanımının gerçekleşmesindeki eksiklik,
- Ölçüm ve çevre koşullarındaki değişiklikler,
- Analog cihazların okunmasında personeldeki belli yönde eğilim,
- Ölçüm cihazlarının sonlu çözünürlüğü,
- Ölçüm standartlarının ve referans malzemelerin değerlerinin tam olarak bilinmemesi,
- Dış kaynaklardan elde edilen sabit parametrelerin değerlerinin tam olarak bilinmemesi,
- Hesaplamalarda yapılan yaklaşımlar.

Ölçüm sonucu, belirsizlik değeri ile birlikte belirli aralığı tanımlamaktadır. Sonuç ve belirsizliğin güvenilirlik düzeyi %95 olarak verilmişse, aynı ölçüm 100 kez tekrarlandığında %95'inin sonucu tanımlanan aralık içinde olacaktır. %95 güvenilirlik, istatistik terminolojide k = 2'ye karşılık gelmektedir. Burada "k" kapsam faktörüdür.

Ölçüm belirsizliği, ölçülen büyüklüğün gerçek değerini kapsayan değerler aralığını karakterize eden nicel bir büyüklüktür. Doğruluk ise ölçülen büyüklüğün gerçek değeri ile ölçüm sonucu arasındaki uyuşma yakınlığını ifade eden niteleyici bir kavramdır. Doğruluk, belirsizlik gibi sayı ile ifade edilebilir bir kavram değildir.

2.11 Belirsizlik Hesaplamaları

Bütün ölçümlerde; rasgele hataların dışında, her zaman kabul edilen gerçek değerden daha az veya fazla bir değer elde edilmektedir. Bu hatalar, sabit hatalar veya sistematik

hatalar olarak adlandırılır. Bu hata kaynaklarından dolayı ölçümler bir belirsizlik içerir. Ölçüm sonucunun belirsizliği, ölçülen değerin kesin değerinin bilinmesindeki eksikliği yansıtır. Fark edilen sistematik hataların düzeltilmesinden sonraki ölçüm sonucu, sistematik hataların içerdiği belirsizlik ve rasgele hatalardan ortaya çıkan belirsizlikten dolayı, hala sadece bir tahmindir.

2.11.1 A-tipi Belirsizlik

A-tipi değerlendirmelerde ortaya çıkan belirsizlik bileşenleri, istatistiksel standart sapmayı bulmaya yarayan bir dizi tekrar edilen gözlemden hesaplanır ve standart sapma belirsizliği veya A tipi belirsizlik olarak adlandırılır. Standart sapma belirsizliğini hesaplamak için, uygun bir zaman aralığı içerisinde pek çok ölçüm yapmak gerekmektedir. Standart sapma,

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{2.1}$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada n ölçüm sayısını, x_i i. ölçüm değerini ve $\bar{x}$ ise aritmetik ortalamayı ifade etmektedir. A tipi belirsizlik hesaplanırken iki tip dağılım kullanılmaktadır. Bunlar student ve normal dağılımlardır.

2.11.1.1 Student Dağılımı ($1 < n \leq 10$)

Ölçüm sayısı 10'a eşit veya 10'dan küçük ise A tipi belirsizlik, student dağılımı kullanılarak hesaplanmaktadır. A tipi belirsizlik

$$u_A = k \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{2.2}$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Burada s standart sapma, n ölçüm sayısı ve k ise Tablo 2.2'de verilen katsayıdır.

2.11.1.2 Normal Dağılım (n > 10)

Ölçüm sayısı 10'dan büyük olan ölçümlerin A tipi belirsizliği normal dağılım kullanılarak

$$u_A = k \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{2.3}$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanmaktadır.Burada s standart sapma, n ölçüm sayısı ve k ise Tablo 2.2'de verilen normal dağılım katsayısıdır.

Tablo 2.2: Student ve normal dağılım katsayıları

Ölçüm Sayısı	Güvenilirlik düzeyi (%)			
n	68.3	90.0	95.0	99.7
2	1.84	6.31	12.7	-
3	1.32	2.92	4.30	-
4	1.20	2.35	3.18	9.22
5	1.14	2.13	2.78	6.62
6	1.11	2.02	2.57	5.51
7	1.09	1.94	2.45	4.90
8	1.08	1.89	2.36	4.53
9	1.07	1.83	2.31	4.28
10	1.06	1.73	2.26	4.09
> 10	k = 1.00	k = 1.65	k = 1.96*	k = 3.00
* %95 güvenilirlik düzeyi için k yaklaşık olarak 2 kabul edilmektedir.				

2.11.2 B-tipi Belirsizlik

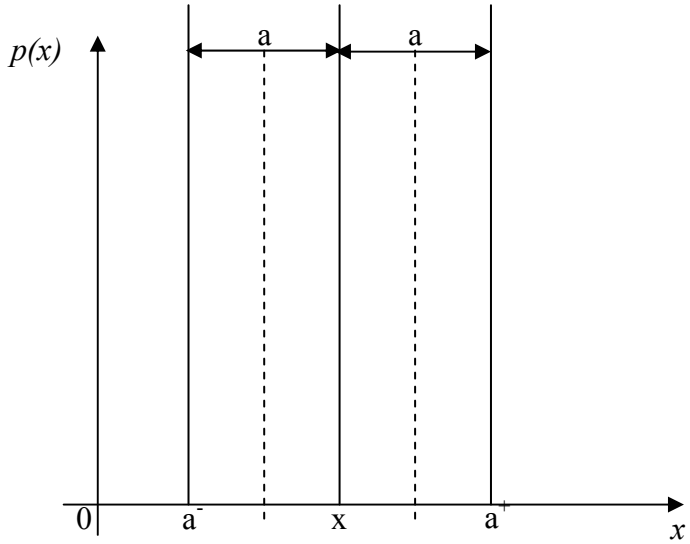
Gözlem serilerinin istatistiksel olmayan diğer yöntemler kullanılarak yapılan belirsizlik değerlendirmesidir. B-tipi belirsizlik hesaplanırken; daha önce yapılan ölçümlerde elde edilen veriler, ilgili malzemeler ve kullanılan cihazlar konusundaki deneyim ve daha önce edinmiş bilgiler, üretici firmanın belirttiği özellikler, kalibrasyon sertifikalarında bulunan veriler, cihaz veya sistem el kitaplarında belirtilen referans verilere ilişkin belirsizlikler kullanılabilmektedir. Hata hesaplamasında kullanılan doğruluk ifadeleri cihazın karakteristiklerini meydana getirir. Bu ifadeler kullanılarak, ölçülen değerlerin

hatası hesaplanır. Hesaplanan hata belirsizlikle ilişkili olabilir. Çünkü tanıma göre belirsizlik, ölçümdeki olası hatanın bir tahminidir.

B tipi belirsizlik hesaplanırken genellikle iki tip dağılım kullanılmaktadır.

1. Dikdörtgen Dağılım
2. Üçgen Dağılım

Dikdörtgen dağılım, bir büyüklüğün sadece değişim gösterebilecek değişim aralığı bilindiği takdirde kullanılmaktadır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4: Dikdörtgen dağılım

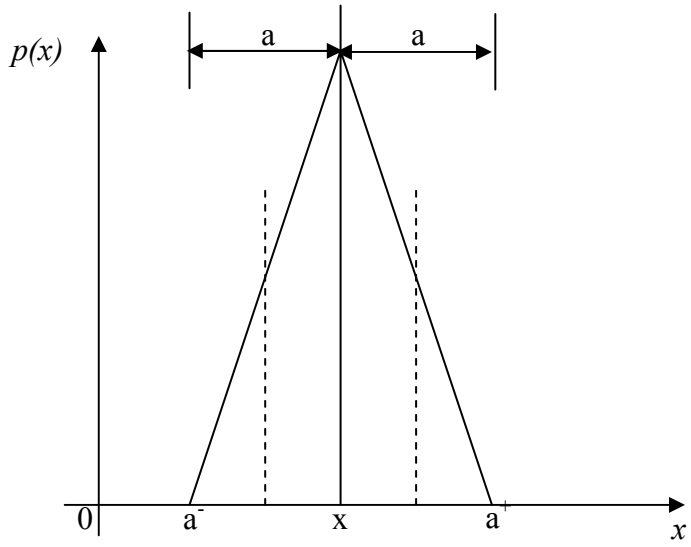
Dikdörtgen dağılım kullanılarak elde edilen belirsizlik bağıntısı,

$$u(x) = \frac{a^{+} - a^{-}}{2\sqrt{3}} \tag{2.4}$$

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{3}} \tag{2.5}$$

bağıntıları ile ifade edilmektedir.

Burada a^+ ve a^- nominal değerden ± sapma değeridir. Üçgen dağılım, bir büyüklüğün sadece değişim gösterebileceği aralık ve eğilim bilindiği durumda kullanılmaktadır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5: Üçgen dağılım

Üçgen dağılım kullanılarak elde edilen belirsizlik bağıntısı,

$$u(x) = \frac{a^+ - a^-}{2\sqrt{6}} \tag{2.6}$$

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{6}} \tag{2.7}$$

bağıntıları ile ifade edilmektedir. Burada a+ ve a- nominal değerden ± sapma değeridir.

2.11.3 Bileşik Belirsizlik

Bileşik belirsizlik, A-tipi ve B-tipi değerlendirme sonucunda uygun bir birleşimden elde edilen belirsizlik değeridir. Bu birleşim, hesaplanan varyans ifadeleri toplamının pozitif karekökü ile elde edilmektedir. Buna göre birbirinden bağımsız girdi büyüklükleri için bileşik belirsizlik,

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)} \tag{2.8}$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada f, belirsizliği hesaplanacak bağıntıyı, x_i ise bu bağıntının farklı değişkenlerini ifade etmektedir.

2.11.4 Genişletilmiş Belirsizlik

Genişletilmiş belirsizlik, ölçülen bir niceliğin beklentiye göre ölçüm sonucu değerlerinin büyük bir kısmını içeren aralık olarak tanımlanmaktadır. Bileşik belirsizlik $u_c(y)$ evrensel olarak ölçümlerdeki belirsizliği tanımlamasına rağmen, bu değer ölçülen büyüklüğün dağılımı gösterdiğinden güvenilirlik düzeyi sadece % 68.27'dir. Bunun anlamı, aynı büyüklük herhangi bir koşul altında ölçülürse sonuç % 68.27'lik olasılıkla $u_c(y)$ ile belirlenen aralıkta olacak demektir. Endüstriyel uygulamalarda ise daha yüksek güvenilirlik düzeylerine gereksinim vardır. Bu durumlarda ölçümlerdeki belirsizliği tanımlamak için genişletilmiş belirsizlik olarak adlandırılan

$$U = k.u_c(y) \tag{2.9}$$

ifadesi kullanılır. Burada, genişletilmiş belirsizlik U, bileşik standart belirsizlik $u_c(y)$ ile kapsam faktörü k'nın çarpımıdır. Farklı güvenilirlik düzeyleri için kapsam faktörleri Tablo 2.3'de verilmiştir.

Tablo 2.3: Güvenilirlik düzeyleri ve kapsam faktörleri

Güvenilirlik Düzeyi p(%)	Kapsam Faktörü k
68.27	1
90	1.645
95	$1.960 \approx 2$
99	2.576
100	3

2.12 Yüksek Gerilim Metrolojisi

Yüksek gerilim ölçmelerinin kesintisiz izlenebilirlik zinciri içerisinde kalabilmesi, diğer tüm elektriksel büyüklüklerde olduğu gibi düşük doğru gerilim, kapasite ve direnç ulusal standartlarıyla ilişkilendirilmesiyle mümkündür. Düşük doğru gerilim ve direnç ölçümleri 1 ppm'den düşük belirsizliklerle Josephson Gerilim Standardı ve Quantum Hall Etkisi Standardı ile gerçekleştirilebilmektedir.

Yüksek gerilimler, düşük gerilimlerde olduğu gibi, bilinen direk yöntemlerle ölçülemezler. Gerilim bölücüler ve transformatörler olarak bilinen dönüştürücü elemanlarla, yüksek gerilimler ölçülebilir düzeye indirgenmekte ve Josephson Gerilim Standardına kadar uzanan transfer elemanları kullanılarak düşük belirsizliklerle ölçülebilmektedir.

Karşılaştırmalı kalibrasyon ile, çevirme oranı belli olan bir Referans Ölçme Sistemi (RÖS) ile paralel olarak bağlanarak karşılaştırılan Ölçme Sisteminin (ÖS) çevirme oranı belirlenmektedir. Uzun bir süre öncesine kadar yüksek gerilimde %3 ölçme belirsizliği kabul edilebilir bir değerdi ve çok özel belirsizlik değeri gerekli görülmezdi. Ancak yüksek gerilimdeki kontrol edilemez bozucu etkilerin fazlalığı ölçüm belirsizliğini %1'den daha az değere düşürülmesinin gerekliliğini ortaya koymuştur. Günümüzde üretilen elektromekanik ürünler, ticari beklentiler nedeniyle sınırları zorlamakta ve minimum boyutlarda üretilmektedir. Bu anlamda yalıtım deneylerinin yapılmasında çok hassas ölçü ve deney cihazlarının kullanılması bir diğer zorunluluk olarak görülebilir [21, 38].

2.12.1 Yüksek Doğru Gerilimde İzlenebilirlik

10 V'a kadar DA gerilimler için mevcut uluslararası standartlar Josephson etkisine dayanmaktadır. Günümüzde referans gerilim referansı olarak Josephson Dizisi gerilim standardı kullanılmaktadır. Bu standardın çalışma prensibi, 1962 yılında Brain Josephson tarafından ortaya atılmıştır.

Josephson gerilim standardı, frekans doğruluğunu DC gerilime aktaran bir sistemdir. Metrolojide en yüksek doğrulukta ölçülebilen birim, frekans birimi olup, sezyum atomik saati ile 10-14 doğruluk derecesinde elde edilebilmektedir. Buna bağlı olarak,

gerilimi doğrudan frekans ile ilişkilendiren Josephson eklemi ile çok kararlı ve tekrarlanabilir doğru gerilim 10^{-9} doğruluk derecesinde elde edilebilmektedir.

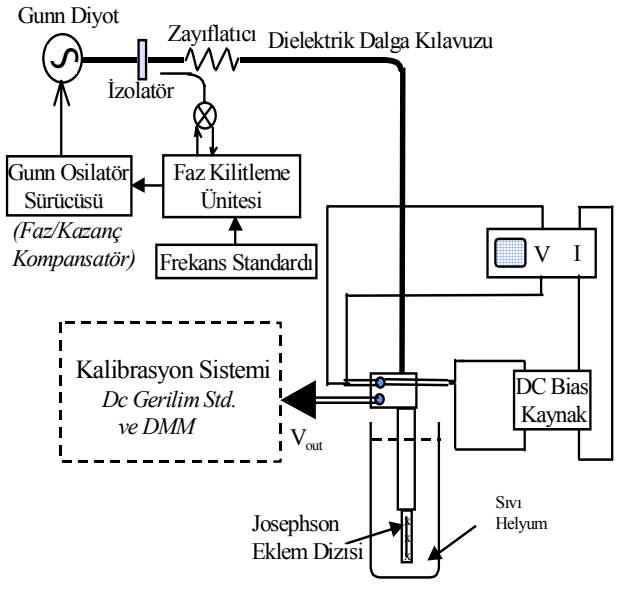
Josephson eklemi, ince yalıtkan bir oksit tabakasıyla ayrılmış iki süperiletken malzemenin zayıfça biraraya getirilmesiyle oluşmaktadır.

İnce film tekniği ile yapılmış bu yarıiletken ekleme mutlak sıfır sıcaklığa yakın bir ortamda, DA kutuplama akımı ile birlikte bir mikrodalga işaret uygulandığında oluşacak eklem gerilimi

$$U = N\frac{h.f}{2e} \tag{2.10}$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada; $h = 6.63\times10^{-34}$ J-s Plank sabiti, f mikrodalga frekansı, e elektron yükü ve N ise DA kutuplama akımına bağlı bir sabittir.

Tek bir Josephson eklemi üzerinden elde edilebilecek gerilim değeri mV'lar mertebesindedir. Daha yüksek gerilim değerleri, çok sayıda Josephson ekleminin seri olarak biraraya getirilmesiyle elde edilmektedir. Bu standart metroloji dünyasında gerilim ölçmeleri için primer standart olarak adlandırılmaktadır ve 0.01 ppm seviyesinde bir belirsizliğe sahiptir. Şekil 2.6'da Josephson gerilim standardı temel yapısı görülmektedir [39].



Şekil 2.6: Josephson gerilim standardı [39]

Yüksek doğru gerilim ölçme sistemi; gerilim bölücüsünden, ölçü aletinden ve kablosundan oluşmaktadır. Yüksek gerilim ölçmelerindeki belirsizliğe en baskın etkiyi, yüksek gerilim bölücüleri yapmaktadır. Yüksek gerilim bölücülerin ölçüm belirsizliği, uluslararası karşılaştırma sonuçları doğrultusunda 100 kV'a kadar doğru gerilimler için 10 ppm düzeylerindedir [40-47].

Yüksek doğru gerilim ölçme sisteminin belirsizliğinde kullanılan belirsizlik bileşenleri Tablo 2.4'de verilmiştir.

Tablo 2.4: Yüksek doğru gerilim ölçme sisteminin belirsizlik bileşenleri

Belirsizlik Sembolü	Tanım
δU_N	Referans sistemin sertifikasındaki gerilim ölçme belirsizliği
$\delta U_{Xçöz}$	Kalibre edilen sisteme ait ölçü aletinin çözünürlüğü
δU_{Xkay}	Kalibre edilen sisteme ait ölçü aletinin kayması
$\delta U_{Xsıc}$	Kalibre edilen sistemde sıcaklık etkisinin neden olduğu sapma
δU_{Xlin}	Kalibre edilen sistemin gerilim artışına olan tepkisi (doğrusallık)
δU_{Xkar}	Kalibre edilen sistemin kısa dönem kararsızlığının neden olduğu sapma
δU_{Xyak}	Yakınlık etkisi
δU_{Xkut}	Kutbiyet etkisi

2.12.2 Yüksek Alternatif Gerilimde İzlenebilirlik

Düşük düzeylerde ve 10 Hz-1 kHz frekans bölgesi arasındaki alternatif gerilimler AA/DA transfer cihazları kullanılarak ve DA primer standartlarıyla karşılaştırılarak 100 ppm'den küçük ölçüm belirsizliği düzeylerinde ölçülebilmektedir.

AA gerilimdeki izlenebilirlik yine DA gerilim üzerinden sağlanmakta, bunun için ısıl dönüştürücü elemanlar kullanılmaktadır. AA/DA ısıl çeviricilerin temel çalışma ilkesi, doğru gerilim ve etkin değer olarak alternatif gerilimin ideal bir direnç üzerine uygulanması durumunda direnç üzerinde oluşacak gücün dolayısıyla açığa çıkacak ısının bir algılayıcı (sensör) aracılığıyla algılanması ve karşılaştırılmasına dayanmaktadır.

Bir direnç üzerinde oluşan sıcaklığı algılamakta en yaygın kullanılan algılayıcılar, ısılçift, elektronik algılayıcılar ve termistörlerdir. Joule yasasına göre, ideal bir direnç üzerine doğru gerilim ve buna eşit etkin değerli alternatif gerilim uygulandığında, direnç üzerinde harcanan gücün ve bununla orantılı olarak ortaya çıkacak olan ısının birbirine eşit olması beklenmektedir. Dolayısıyla ısılçift çıkışında görülen doğru gerilim değerlerinin de bu koşullar altında eşit olması gerekir. Alternatif gerilim ölçme sisteminde yardımcı eleman olarak anahtar kullanılmaktadır. Bu anahtar, ölçülmek istenen alternatif gerilim konumuna getirilerek, alternatif deney gerilimi ısıl çeviriciye uygulanır. Isıl çevirici çıkışı duyarlı bir voltmetre ile ölçüldükten sonra anahtarın konumu değiştirilerek alternatif deney geriliminin etkin değerine eşit doğru gerilim uygulanır. Deney gerilimi olarak alternatif gerilim uygulandığında, ısıl çevirici çıkışına eşit bir değere kadar doğru gerilim kaynağı ayarlanmaktadır. Bu durumda, alternatif deney geriliminin etkin değeri, ayarlanmış doğru gerilim değerine eşit olmuş olur.

Yukarıda sözü edildiği gibi Joule yasasına göre ideal bir direnç üzerine doğru gerilim ya da bu değere eşit etkin değerli alternatif gerilim uygulandığında direnç üzerinde harcanan gücün ve bununla orantılı ısının eşit olması beklenmektedir. Ancak bazı etkilerden dolayı bu eşitlik sağlanamamakta ve bir fark oluşmaktadır. Bu fark, transfer farkı olarak adlandırılmakta ve matematiksel olarak

$$\delta = \frac{U_{AA} - U_{DA}}{U_{DA}} \tag{2.11}$$

biçimindeki gibi ifade edilmektedir. Burada;

U_{AA} : Isıl çevirici girişine uygulanan AA gerilimin RMS değeri

U_{DA} : Isıl çevirici çıkışında aa ile aynı değeri verecek biçimde ayarlanmış (+) ve (-) kutbiyetteki doğru gerilim giriş değerlerinin ortalamasıdır.

Transfer farkı, ısıl çevirici girişine doğru gerilim ve alternatif gerilim uygulanarak, ısıl çevirici çıkışı her iki durum için eşit tutulduğunda, girişe uygulanan bu değerler arasında oluşan bağıl farkı ifade eder.

Gerilim transformatörleri ve gerilim bölücüleri, uluslararası karşılaştırmalar sonucunda 100 kV'a kadar 50 Hz alternatif gerilimler için 10 ppm belirsizlik düzeylerinde ölçme

yeteneğine sahiptirler. Gerilim transformatörleri; % 0.1 belirsizlikle kalibre edilebilmektedirler. Kolayca taşınabilmekte, çevresel koşullardan az etkilenmekte ve bir kaç yüz kV'a kadar ölçme olanağı mümkün kılmaktadırlar. SF_6 gazı yalıtımlı kapasitif gerilim bölücüler 1 MV gerilim düzeyine kadar yüksek alternatif gerilimleri %0.1'den küçük ölçüm belirsizliğinde bölebilmektedir. Bu tür gerilim bölücüler de transformatörler gibi çevresel koşullardan etkilenmezler [34, 45, 48].

Yüksek alternatif gerilim ölçme sisteminin belirsizliğinde kullanılan belirsizlik bileşenleri Tablo 2.5'de verilmiştir.

Tablo 2.5: Yüksek alternatif gerilim ölçme sisteminin belirsizlik bileşenleri

Belirsizlik Sembolü	Tanım
δU_N	Referans sistemin sertifikasındaki gerilim ölçme belirsizliği
$\delta U_{Nsıc}$	Referans sistemin sıcaklık etkisinin neden olduğu sapma
δU_{Nyak}	Referans sistemin yakınlık etkisinden kaynaklanan sapma
δU_{Nfre}	Referans sistemin frekans etkisinin neden olduğu sapma
$\delta U_{Xçöz}$	Kalibre edilen sisteme ait ölçü aletinin çözünürlüğü
δU_{Xkay}	Kalibre edilen sisteme ait ölçü aletinin kayması
$\delta U_{Xsıc}$	Kalibre edilen sistemin sıcaklık etkisinin neden olduğu sapma
δU_{Xlin}	Kalibre edilen sistemin gerilim artışına olan tepkisi (doğrusallık)
δU_{Xkar}	Kalibre edilen sistemin kısa dönem kararsızlığının neden olduğu sapma
δU_{Xyak}	Kalibre edilen sistemin yakınlık etkisi
δU_{Xfre}	Kalibre edilen sistemin frekans etkisinin neden olduğu sapma

2.12.3 Yüksek Darbe Geriliminde İzlenebilirlik

Darbe ölçümlerinin primer standartlarca izlenebilirliği oldukça karmaşık ve zordur. Dünyada sayılı ulusal standart, yüksek darbe gerilimleri için oluşturulmuştur. Yüksek darbe gerilim ölçme sisteminin ölçüm belirsizlikleri, genlik için % 0.2 ve cephe ve sırt yarı değer süreleri için ise %1'dir. Bu değerler 100-200 kV ölçüm bölgesi için uluslararası karşılaştırma sonucunda 1991 yılında elde edilmiştir [2, 40, 49-51].

Tablo 2.6: Darbe ölçme sisteminin genlik büyüklüğündeki belirsizlik bileşenleri

Belirsizlik Sembolü	Tanım
δU_N	Referans sistemin sertifikasındaki gerilim ölçme belirsizliği
$\delta U_{Nsıc}$	Referans sistemin sıcaklık etkisinin neden olduğu sapma
δU_{Nlin}	Referans gerilim artışına olan tepkisi (doğrusallık)
δU_{Nkar}	Referans sistemdeki kısa dönem kararsızlığının neden olduğu sapma
δU_{Nemi}	Referans sistemdeki EMI etkisinin neden olduğu sapma
$\delta U_{Xçöz}$	Kalibre edilen sisteme ait ölçü aletinin çözünürlüğü
δU_{Xkay}	Kalibre edilen sisteme ait ölçü aletinin kayması
$\delta U_{Xsıc}$	Kalibre edilen sistemin sıcaklık etkisinin neden olduğu sapma
δU_{Xlin}	Kalibre edilen sistemin gerilim artışına olan tepkisi (doğrusallık)
δU_{Xkar}	Kalibre edilen sistemin kısa dönem kararsızlığının neden olduğu sapma
δU_{Xyak}	Kalibre edilen sistemin yakınlık etkisi
δU_{Nemi}	Kalibre edilen sistemdeki EMI etkisinin neden olduğu sapma

Tablo 2.7: Darbe ölçme sisteminin zaman büyüklüklerindeki belirsizlik bileşenleri

Belirsizlik Sembolü	Tanım
δT_N	Referans sistemin zaman büyüklüğü için verilen sertifika belirsizliği
δT_{Ne}	Referans sistemin anma sapması
δU_{Temi}	Referans sistemdeki EMI etkinin neden olduğu sapma
δT_{Xe}	Kalibre edilen sistemin anma sapması
$\delta T_{Xçöz}$	Kalibre edilen sisteme ait ölçü aletinin çözünürlüğü
δT_{Xemi}	Kalibre edilen sistemdeki EMI etkinin neden olduğu sapma

Darbe gerilim bölücüsünün çevirme oranı, yıldırım darbe (LI) ve anahtarlama darbe (SI) gerilimleri gibi farklı gerilim türleri için belirlenmektedir. Ölçme sisteminin belirsizlik hesaplamaları oldukça karmaşık yapıdadır ve genlik ve zaman parametreleri gibi iki ayrı tip büyüklük için tanımlanmıştır. Darbe ölçme sisteminin genlik büyüklüğü belirsizliğinde kullanılan bileşenler Tablo 2.6'da ve zaman büyüklükleri belirsizliğinde kullanılan bileşenler ise Tablo 2.7'de verilmiştir.

2.13 Akreditasyon Nedir?

Akreditasyon, laboratuvarların ve belgelendirme kuruluşlarının uluslararası kabul görmüş teknik ölçütlere göre değerlendirilmesi, yeterliliklerinin onaylanması ve düzenli aralıklarla denetlenmesi suretiyle bu kuruluşların işlevsel olarak birbirlerine denk olmasının sağlanmasıdır.

Akreditasyon, laboratuvar akreditasyonu, sistem akreditasyonu, ürün akreditasyonu ve personel akreditasyonu olmak üzere dört ana başlığı içermektedir. Kalibrasyon, deney, analiz, ölçme ve tip onay laboratuvarlarının akreditasyonu, laboratuvar akreditasyonu olarak gruplandırılırken, ISO 9000 ve AQAP kalite güvence modellerine uygunluk belgesi veren kuruluşların akreditasyonu da sistem akreditasyonu olarak sınıflandırılmıştır. Ürün akreditasyonu, tüketiciye sunulan ürünlerin ve hizmetlerin çeşitli standart, yönetmelik ve kurallara uygun olarak üretilip pazarlandığının onaylanması için, ürün sertifikalandırılmasını yapan kuruluşların akreditasyonudur. Personel akreditasyonu ise laboratuvar, sistem ve ürün belgelendirmesi yapan kuruluşlarda çalışan teknik personeli eğiterek gerekli bilgi, beceri ve yeteneğe sahip olduğunu belgelendiren ve diğer alanlarda da personel eğitimi veren kurumların çalışmalarını kurallara uygun şekilde gerçekleştirdiğinin onaylanmasıdır [52].

2.14 Laboratuvar Akreditasyonu

Üretimin ve kalite kontrolünün en önemli unsurlarından birisi olan ölçüm güvenilirliği, ölçümlerde kullanılan cihaz/standartların kalibre edilmeleri ile sağlanabilmektedir. Cihaz/standardın ölçümlerdeki hatası ancak kendisinden daha yüksek doğruluğa sahip referans bir cihaz/standart ile belirlenebilir. Kalibrasyonda kullanılan referans cihaz/standartların da güvenilirliğinin sağlanması amacıyla kalibre edilmeleri veya denk cihaz/standartlarla doğruluğunun karşılaştırılması gerekmektedir. Bu şekilde, BIPM (Uluslararası Ölçü ve Ağırlıklar Bürosu) ile ilişkide bulunan, ulusal standartları oluşturmak, muhafaza etmek ve bu standartlar ile bir alt seviye laboratuvarlarda kullanılan ölçme standart ve cihazlarını kalibre etmekle görevli ulusal metroloji enstitülerinden, üretim, kalite kontrol, bilimsel, askeri ve ticari amaçla kullanılan çeşitli ölçme cihazlarına kadar kademeli olarak devam eden bir zincir oluşur. Her alt seviye

laboratuvar, kendi referans standartlarını bir üst seviyede izlenebilir bir laboratuvara kalibre ettirmek suretiyle, gerçekleştirilen ölçüm/kalibrasyonların izlenebilirliğini sağlar. Bu şekilde oluşan, kesintisiz zincire "İzlenebilirlik Zinciri" adı verilir. Bu zincir vasıtası ile gerçekleştirilen her ölçüm/kalibrasyon, BIPM tarafından tanımları yapılmış yedi temel ölçme birimine bağlanır.

Laboratuvar akreditasyonu, ülkemizin Avrupa Topluluğu ile uyum çalışmaları çerçevesinde, EN ISO/IEC 17025 standardında belirtilen kriterler temel alınarak gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle akredite olmak isteyen bir laboratuvarın bu standart içinde belirtilen şartları yerine getirmesi gerekmektedir. Bu şartlar kısaca şu şekilde gruplandırılabilir;

- Laboratuvar altyapısı (teknik donanım, ortam şartları, personel vb.) yeterli olmalıdır,
- Laboratuvarın izlenebilirlik aldığı referans standartları, TS EN ISO/IEC 17025 standardını sağlayan herhangi bir laboratuvar tarafından kalibre edilmelidir,
- Kalibrasyonlar uygun ölçüm metotları ile gerçekleştirilmelidir.
- Başvuruyu yapan laboratuvar, yeterli tecrübe, bilgi ve beceriye (teorik-pratik) sahip personele sahip olmalıdır.
- Kalibrasyon laboratuvarını kendi bünyesinde bulunduran sorumlu kuruluş, laboratuvarın kurallara uygun olarak işletilmesi ve bakımı için gerekli mali kaynakları temin edecek durumda ve buna hazır olmalıdır; kalibrasyon çalışmaları dolayısıyla sorumlu olduğu harcamaları karşılayacak durumda olduğunu garanti edebiliyor olmalıdır [53].

BÖLÜM 3 UME YÜKSEK DOĞRU GERİLİM BÖLÜCÜSÜ

3.1 Gerilim Bölücünün Yüksek Gerilim Kolunda Kullanılan Dirençler

Bu çalışmada yapılan UME Yüksek Doğru Gerilim Bölücüsü, 100 adet dirençten oluşmaktadır. Bu dirençler 194 adet MEGATRON® marka özdeş sarım direnç arasından seçilmiştir. 1 ile 194 arasında numaralandırılmış dirençler için üretici firmanın belirlediği teknik özellikler şunlardır [54]:

- Marka : MEGATRON®
- Model : 9070
- Tip : Sarım Direnç
- Direnç Değeri : 1 MΩ
- Tolerans : % 0.01
- Maksimum Gerilim : 1000 V (DA)
- Güç : 2 W
- Sıcaklık Katsayısı : ± 10 ppm/^{o}K
- Uzunluk : 50.8 ± 0.7 mm
- Çap : 12.7 ± 0.2 mm

Gerilim bölücüde kullanılan sarım dirençlerin endüktif etkisini yok etmek için bifilar sarım tekniği kullanılmıştır. Her bir direnç 8 ayrı bölüme ayrılmış ve seri bölümlerdeki tellerin sarımı birbirinin tersi yönünde yapılmıştır. Her sarım bölümü silikon bazlı yalıtkan malzeme ile kaplanmış ve direnç telleri üzerinde oluşacak yüksek elektrik alanı azaltmak için dirençlerin yüzeyi karbon miktarı yüksek yalıtkan

malzeme ile kaplanmıştır. Şekil 3.1'de dirençlerin iç yapısı görülmektedir. Kullanılan dirençlerin, Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Empedans Standartları Laboratuvarında, 5 ppm ölçüm belirsizliğinde, kapasite ve endüktans ölçümleri yapılmıştır. 50 Hz-10 MHz frekans aralığında dirençlerin kapasitesinin 1.1 ile 1.2 pF arasında değiştiği ve yine aynı frekans aralığında endüktansın 100 nH'den küçük olduğu belirlenmiştir. Bu tür dirençlerin, hassas ölçümler için gerekli yüksek doğru gerilim bölücülerde kullanılması son derece elverişlidir [55, 56].



Şekil 3.1: Gerilim bölücüde kullanılan dirençler ve iç yapıları

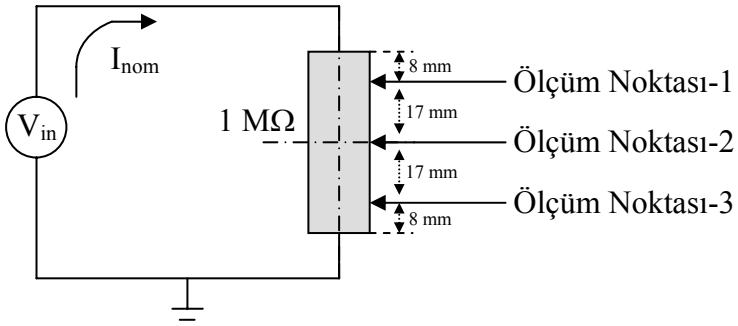
3.2 Gerilim Bölücünün Yüksek Gerilim Kolunda Kullanılan Dirençlerin Yüzey Sıcaklıklarının Belirlenmesi

Üretici firmanın her direnç için belirlemiş olduğu sıcaklık katsayısı ± 10 ppm/^{o}C olmasına rağmen bölücü yapımında kullanılabilecek 194 direncin sıcaklık katsayıları, yüksek doğruluğa sahip bir ölçüm düzeneği kullanılarak teker teker belirlenmiştir. Dirençlerin sıcaklık katsayılarının belirleneceği sıcaklık aralığının bilinmesi için farklı gerilimler altında direnç yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür.

Bir direncin yüzeyindeki sıcaklık her noktada aynı olmamaktadır. Bu, direncin iç yapısının homojenliği ve kayıp güçle açıklanabilir. Eğer dirençler gerilim altında belirli bir süre bekletildikten sonra, ölçme düzeneğine bağlanırsa, sıcaklık dağılımının tüm bölücüde düzgün bir dağılıma yakın bir dağılımda olacağı düşünülmüştür.

Dirençlerin sıcaklıkla değişimleri, ikinci ve hatta üçüncü dereceden polinomsal işlev biçimindedir. 100 kV'luk gerilim bölücüde 100 adet direnç kullanıldığında her bir direnç üzerinde anma gerilim altında gerilimin doğrusal dağıldığı varsayımıyla 1000V gerilim düşecektir. Bu sınır gerilim değeri göz önüne alınarak bu gerilimin %25, %50, %75 ve %100'üne karşılık gelen 250 V, 500 V, 750 V ve 1000 V gerilimlerde dirençlerin yüzey sıcaklıkları belirlenmiştir.

Yüzey sıcaklıkları belirlenecek dirençler olarak R97 ve R169 dirençleri rasgele seçilmişlerdir. Dirençlere uygulanan gerilimler altında, 3 farklı noktadaki yüzey sıcaklıkları, sıcaklık algılayıcı kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 3.2'deki basitleştirilmiş yapıda direncin yüzeyindeki sıcaklık ölçüm noktaları görülmektedir. Ölçme sonuçlarına göre sırasıyla Nokta-2, Nokta-1 ve Nokta-3 en çok ısınan noktalardır. Nokta-2 direncin orta noktası olması sebebiyle sıcaklık dağıtımı zor olmaktadır. Bu nedenle Nokta-2 en çok ısınan ölçüm noktasıdır. Güç tüketimi nedeniyle de Nokta-1'in Nokta-2 den daha fazla ısındığı gözlemlenmiştir. 3 farklı ölçüm noktasındaki sıcaklıkların ortalaması göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 3.2: Ölçülen yüzey sıcaklık noktaları ve deney devresi

Direnç yüzeyindeki sıcaklıkların belirlenmesinde kullanılan cihaz ve ekipmanlar şunlardır:

1-)	Cihaz Adı	:	Kalibratör
	Kullanım Amacı	:	Gerilim kaynağı
	Marka/Model	:	Fluke/5720
	Maksimum DA Gerilim	:	1100 V
	Kararlılık	:	0.7 ppm

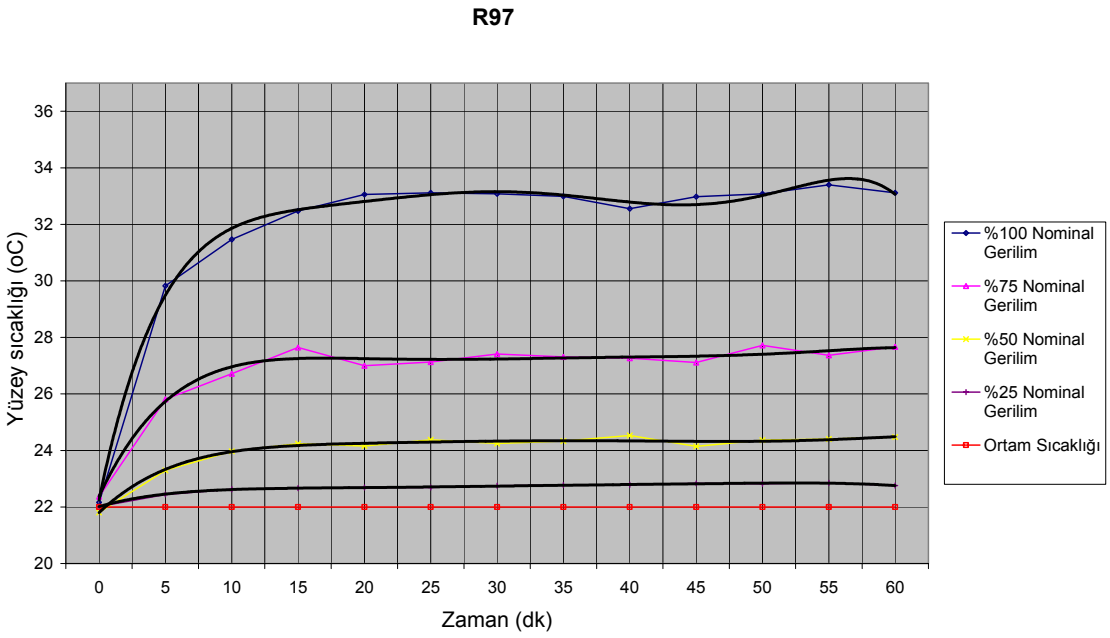
	Sertifika No	:	2002.ELV.038
	Sertifika Belirsizliği	:	2 ppm
2-)	Cihaz Adı	:	NTC
	Kullanım Amacı	:	Sıcaklık ölçümü
	Marka/Model	:	Digitek Electronics/TE
	Sıcaklık Aralığı	:	0-40 ^{o}C
	Direnç	:	10 kΩ
	Sertifika No	:	2002.FSI.070
	Sertifika Belirsizliği	:	0.038 ^{o}C
3-)	Cihaz Adı	:	8.5 dijit multimetre
	Kullanım Amacı	:	NTC çıkışı direnç ölçümü
	Marka/Model	:	HP/3458A
	Ölçüm Bölgesi	:	5-30 kΩ
	Sertifika No	:	2002.ELV.061
	Sertifika Belirsizliği	:	10 ppm

Yapılan ölçmelerde elde edilen tüm sonuçlar, Ek-A'da verilmiştir. Bu tablolarda R97 ve R169 dirençlerinin anma gerilimin %100, %75, %50 ve %25'inde 3 ayrı yüzey noktasındaki sıcaklıkların zamanla değişimleri bulunmaktadır. Bu değişimlerin grafikleri EK-B'de verilmiştir. Ölçmeler sonucunda dirençlerin yüzey sıcaklıklarının;

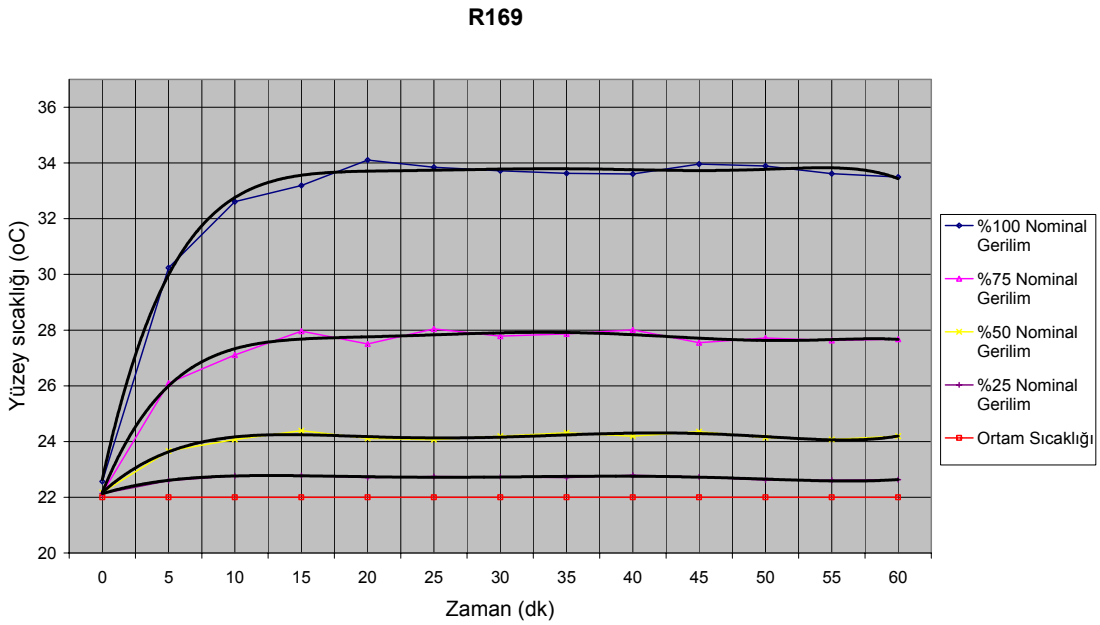
- %100 anma geriliminde dirençlerin yüzeyindeki ortalama sıcaklık 33 ^{o}C,
- %75 anma geriliminde dirençlerin yüzeyindeki ortalama sıcaklık 28 ^{o}C,
- %50 anma geriliminde dirençlerin yüzeyindeki ortalama sıcaklık 24 ^{o}C,
- %25 anma geriliminde dirençlerin yüzeyindeki ortalama sıcaklık 23 ^{o}C olduğu belirlenmiştir.

Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de pozitif (R97) ve negatif (R169) sıcaklık katsayısına sahip iki direncin farklı akımlardaki ortalama yüzey sıcaklıklarının zamana göre değişimi

verilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere farklı işaretli sıcaklık katsayılarına sahip dirençlerde yüzey sıcaklığı aynı kalmaktadır. Ayrıca direnç yüzeylerindeki sıcaklık artışının 25 dakikadan sonra daha kararlı hale geldiği görülmüştür.



Şekil 3.3: R97 direncinin farklı gerilimlerdeki ortalama yüzey sıcaklığı

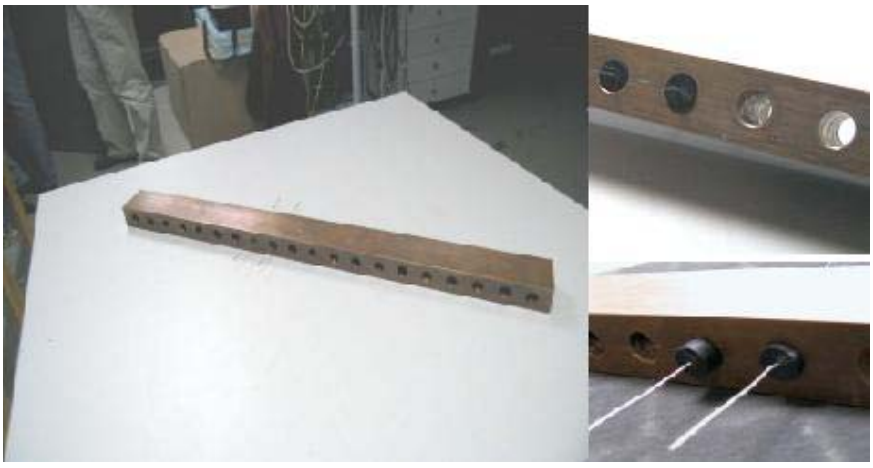


Şekil 3.4: R169 direncinin farklı gerilimlerdeki ortalama yüzey sıcaklığı

3.3 Gerilim Bölücünün Yüksek Gerilim Kolunda Kullanılan Dirençlerin Sıcaklık Katsayılarının Belirlenmesi

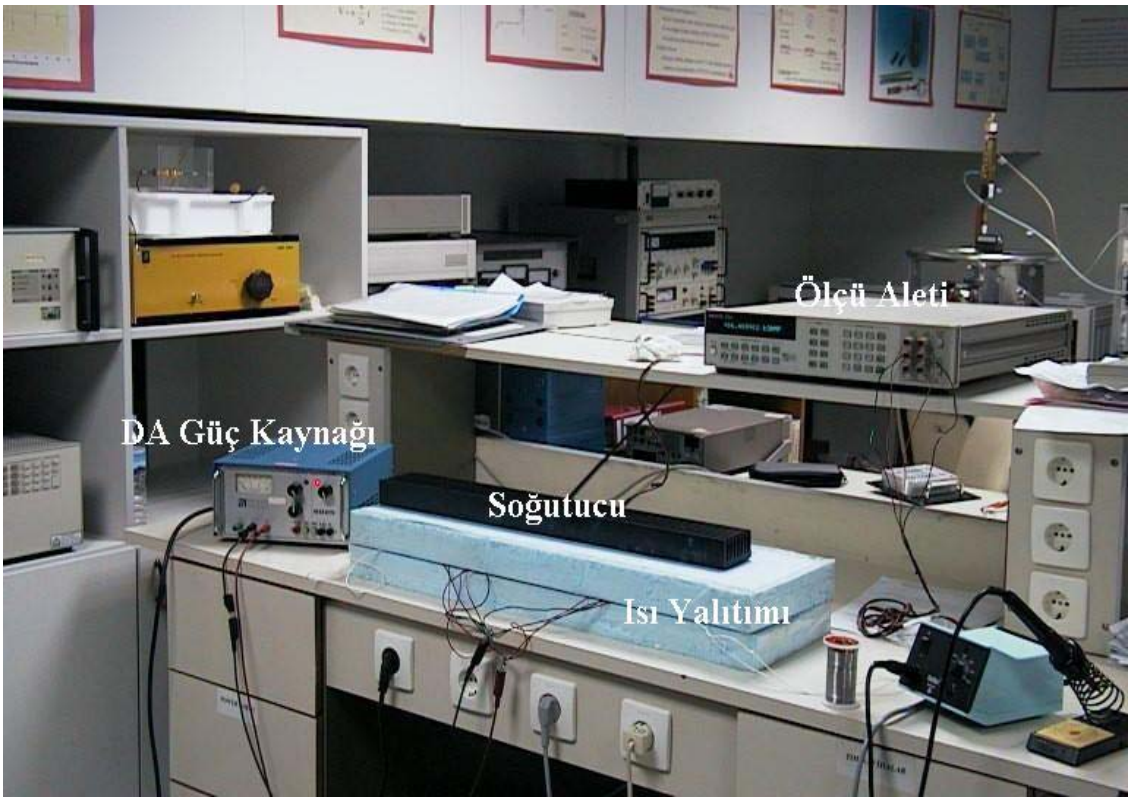
Bilindiği gibi dirençlerin değerlerinin sıcaklığa göre değişimi yüksek dereceli bir fonksiyon şeklindedir. Örneğin bir sarım direnç -10^{o}C ile +60^{o}C arasında 3. dereceden bir polinom şeklinde değişen bir sıcaklık katsayısına sahip olabilmektedir [53]. Bu nedenden dolayı aynı direncin farklı sıcaklık bölgelerinde, sıcaklık-direnç değişimlerinin negatif ve pozitif eğime sahip olabileceği göstermektedir. Yüksek gerilim bölücüsünün yapımında kullanılmak üzere temin edilen 194 adet direncin 13, 23, 33 ve 43^{o}C sıcaklıklardaki değerleri oluşturulan bir düzenek yardımıyla belirlenmiş ve 13-43^{o}C sıcaklık aralığındaki sıcaklık katsayısı değişimleri eğrileri halinde elde edilmiştir. Ancak dirençlerin yüzey sıcaklıkları %100 Un geriliminde maksimum 33^{o}C, %75 Un geriliminde ortalama 28^{o}C, %50 Un geriliminde ortalama 24^{o}C, %25 Un geriliminde ortalama 23^{o}C olması nedeniyle sıcaklık katsayılarının, sadece 23^{o}C ve 33^{o}C sıcaklıkları arasındaki değerleri belirlenmiş ve gerilim bölücüsünde kullanılacak dirençlerin seçiminde bu sıcaklık aralığı göz önünde bulundurulmuştur. Dirençlerin sıcaklık katsayılarını belirlemek için oluşturulan bir ölçme düzeneğinde;

- Bakır bir blok ve yalıtım malzemeleri,
- Peltierler,
- Negatif sıcaklık katsayılı (NTC) sıcaklık algılayıcılar (sensörler),
- Güç kaynağı, ölçü aletleri ve soğutucular bulunmaktadır.



Şekil 3.5: Bakır blok

Dirençlerin yerleştirildiği bakır blok 600 mm boyunda, 30 mm yüksekliğinde ve 50 mm genişliğinde olup içerisine aynı anda 20 adet direncin yerleştirebileceği deliklere sahiptir (Şekil 3.5). Bunun yanında sıcaklık kontrolünü sağlayan 2 adet sıcaklık algılayıcının (NTC) bloğa teması için blok içinde uygun yuvalar bulunmaktadır. Dirençlerin sıcaklık katsayılarının belirlenmesinde kullanılan bakır bloğun yerleştirildiği ısı yalıtım malzemeleri, güç kaynağı, soğutucu elemanlar ve ölçü aletleri Şekil 3.6.'da gösterilmektedir.



Şekil 3.6: Dirençlerin sıcaklık katsayılarının belirlendiği düzenek

194 adet direncin değeri, 13, 23, 33 ve 43 ^{o}C sıcaklıklarda belirlenerek anma çalışma sıcaklığı için sıcaklık katsayıları 23-33 ^{o}C arasındaki sıcaklık bölgesi için belirlenmiştir. Bu dirençlerden 108 tanesinin pozitif, 86 tanesinin ise negatif sıcaklık katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir. Ek-C'deki tablolarda, tüm dirençlerin farklı sıcaklıklardaki değerleri ve 23^{o}C ile 33^{o}C sıcaklıkları arasındaki sıcaklık katsayıları verilmiştir. Bu değişimlerin grafikleri ise EK-D'de verilmiştir.

3.4 Gerilim Bölücünün Yüksek Gerilim Kolunda Kullanılan Dirençlerin Gerilim Katsayılarının Belirlenmesi

Gerilim bölücüde kullanılacak dirençlerin sıcaklık katsayılarının belirlenmesi, bölücünün çevirme (bölüm) oranının tam olarak belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bundan dolayı varolan tüm dirençlerin sıcaklık katsayıları çalışma sıcaklıkları olan 23^{o}C-33^{o}C arasında belirlenmiştir. Bunun dışında, yapılmış çalışmalar göstermiştir ki sıcaklık katsayılarının yapmış olduğu etki kadar olmasa da, dirençlerin gerilim katsayıları da bölücünün çevirme oranına etki etmektedir. Dirençlerin üreticisi MEGATRON firması, dirençlerin sahip oldukları gerilim katsayısının ± 0.05 ppm/V'dan daha küçük olduğunu belirtmesine rağmen bu çalışmada bir düzenek oluşturularak ve 194 direnç arasında da örnekleme yapılarak 10 adet direncin gerilim katsayısı belirlenmiş ve üreticinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır [54]. Gerilim katsayısının belirlendiği 10 direnç, en düşük sıcaklık katsayılarına sahip, muhtemelen gerilim bölücüde kullanılacak 5'i pozitif 5'i negatif sıcaklık katsayılarına sahip dirençlerdir. Ölçümü yapılacak dirençler, Şekil 3.7'de gösterilen ekranlı bir kutunun içine monte edilmiştir.

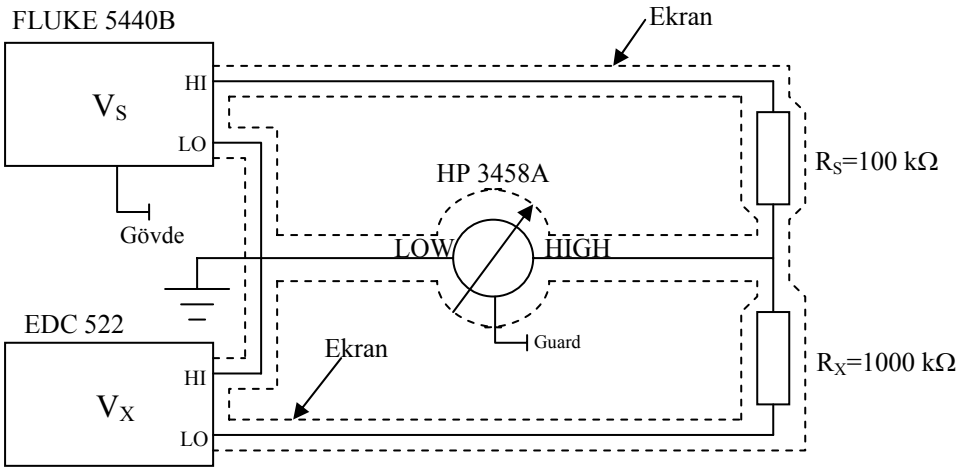


Şekil 3.7: Ölçümü yapılacak bir direnç ve ekranlama kutusu

İlk aşamada gerilim katsayılarının belirlenmesinde izlenecek ölçüm yönteminin belirlenmesi yoluna gidilmiştir. Bununla ilgili birçok yöntem bulunmaktadır [57]. Bu

amaçla bölücüde kullanılacak R145 ve R86 dirençlerinin gerilim katsayılarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Buradaki amaç, sıcaklık katsayısının gerilim katsayısına olan etkisini gözlemlemektir. Bu dirençlerden R145 ve R86'nın 23^{o}C ile 33^{o}C arasındaki sıcaklık katsayıları sırasıyla +4.3 ppm/^{o}C ve R86'nın -3.3 ppm/^{o}C'dir.

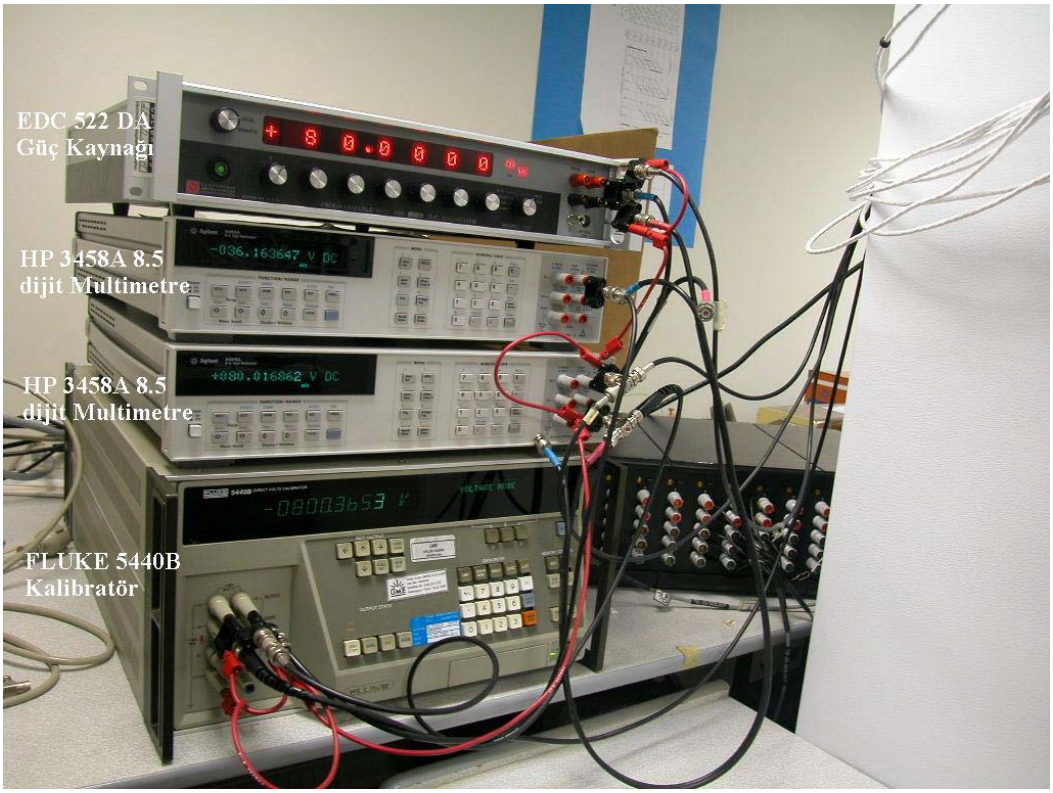
Dirençlerin gerilim katsayılarının belirlenmesi için, UME Empedans Laboratuvarı'nın olanaklarından yararlanılarak Şekil 3.8'deki temel Wheatstone köprü devresi kurulmuştur. Burada V_x EDC 522 marka/model güç kaynağı, V_s FLUKE 5440B marka/model kalibratör, R_s değeri bilinen referans direnç ve R_x gerilim katsayısı belirlenecek olan dirençtir. V_s ve V_x kaynaklarından uygulanan gerilim, UME Gerilim Standartları Laboratuvarı'nda kalibre edilmiş HP 3458A marka/model 8.5 dijit multimetre ile dengeye getirilene kadar ayar yapılarak uygulanmıştır. Bağlantı kabloları ekranlanmış ve güç kaynakları ile multimetrelerin koruma ekranları kablo ekranını ile birleştirilmiştir. R_s ve R_x değerleriyle orantılı olarak EDC 522 güç kaynağından 100-800 V ve FLUKE 5440B güç kaynağından ise 10-80 V arasında gerilim uygulamıştır. Şekil 3.9'de Wheatstone köprüsünde kullanılan 8.5 dijit multimetreler ve kalibratörler ölçme sırasında görülmektedir.



Şekil 3.8: Wheatstone köprüsü

R_s, UME Empedans Laboratuvarı'nın 58588 seri numaralı, 0.1 W gücünde 100 kΩ'luk standart direncidir ve bu standardın farklı gerilim değerleri altında direnç değerleri 0.5 ppm belirsizlikle Tablo 3.1'de UME Empedans Standartları Laboratuvarı tarafından tanımlanmıştır. Şekil 10'da 100 kΩ'luk standart direnç ile

ekranlı kutu içine konulmuş gerilim katsayısı belirlenecek 1 MΩ'luk dirençlerden bir tanesi sıcaklık kabininin içerisinde görülmektedir.



Şekil 3.9: Wheatstone köprüsünde kullanılan cihazlar

Ölçme sistemindeki EDC 522 ve FLUKE 5440B güç kaynaklarının çıkışına HP 3458A multimetre bağlanarak uygulanan gerilim ölçülmüştür. Bu yöntemin kullanılmasındaki amaç, multimetrenin gerilim ölçüm belirsizliğinin güç kaynağının ekranında gösterdiği değerden daha doğru olmasıdır. Direnç değeri, denge durumunda devreden akan akımların eşitliği ilkesinden yola çıkılarak (3.3) ifadesinden bulunur.

$$i_s = i_x \tag{3.1}$$

$$\frac{V_s}{R_s} = \frac{V_x}{R_x} \tag{3.2}$$

$$R_x = \frac{V_x}{R_s} \cdot V_s \tag{3.3}$$



Şekil 3.10: Standart direnç ve gerilim katsayısı belirlenecek direncin konulduğu ekranlı özel kutunun sıcaklık kabini içerisindeki görüntüsü

Tablo 3.1: R_S standart direncin değerleri

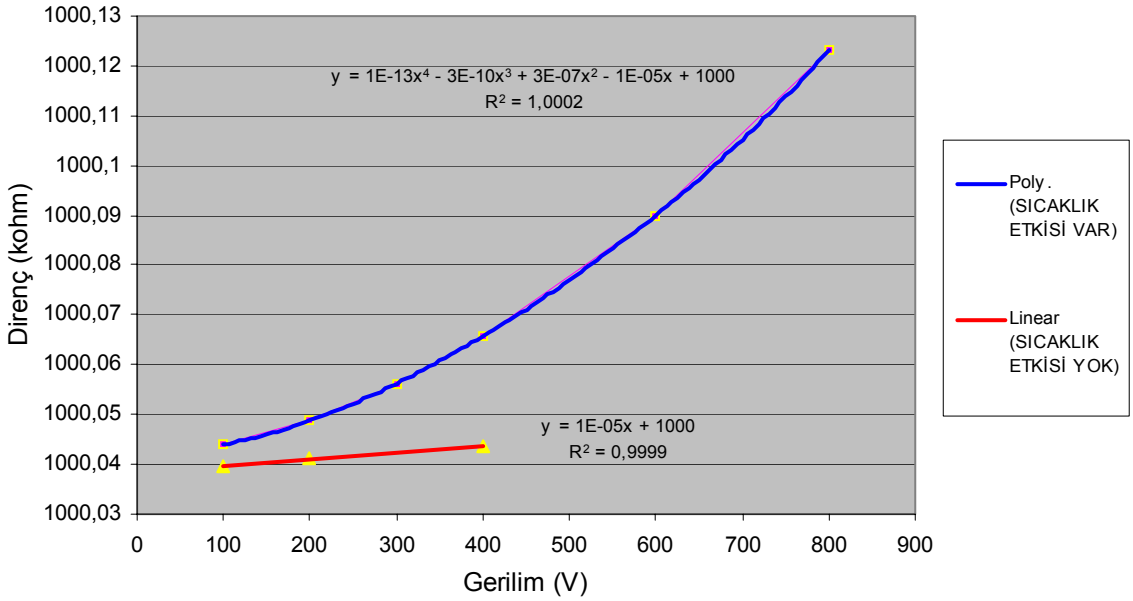
Gerilim (V)	Direnç (kΩ)	Gerilim (V)	Direnç (kΩ)
10	100.00325	-10	100.00317
20	100.00330	-20	100.00312
30	100.00334	-30	100.00308
40	100.00339	-40	100.00303
50	100.00343	-50	100.00299
60	100.00348	-60	100.00295
70	100.00352	-70	100.00290
80	100.00356	-80	100.00286
90	100.00361	-90	100.00281
100	100.00365	-100	100.00277

R_x direnç değerinin belirlenmesi için, V_x ve V_s gerilim değerlerinin ve R_s direnç değerinin bilinmesi gerekmektedir. V_x ve V_s gerilim değerleri kalibreli iki adet 8.5 dijit HP 3458A multimetre ile ölçülmüştür ve ölçüm sisteminin belirsizliğine etki etmektedir. Aynı şekilde kalibreli standart R_s direncinin de belirsizliği gerilim katsayısının belirlenmesindeki ölçme sisteminin belirsizliğine direk etki etmektedir.

Bölücüde kullanılacak dirençlerde maksimum 1000 V gerilim endükleneceği için dirençlerin gerilim katsayıları maksimum 1000 V gerilime kadar belirlenmesi gerekmektedir. Ancak bu işlemin gerçekleştirilebilmesi için, senkron çalışması gereken 2 güç kaynağının da özdeş güç kaynakları olması gerekmektedir. UME'de özdeş iki güç kaynağının olmaması ve bu iş için hassas kalibratörlerin kullanılması tercih edilmemesi nedeniyle farklı tipte güç kaynakları kullanılmıştır (EDC 522 ve FLUKE 5440B). Bu zorunluluktan dolayı köprüdeki güç kaynakları ile maksimum 800 V gerilim değerine çıkılabilmiştir. 900 ve 1000 V değerindeki ölçümlerde güç kaynakları arıza moduna geçmiştir.

Köprü sistemi ve ölçüm cihazları 23±2 ^{o}C sabit sıcaklıktaki bir kabin içerisine yerleştirilmiş ve ölçümler bu ortamda alınmıştır. Her gerilim kademesi için, emf etkisini en aza indirgemek amacıyla pozitif ve negatif değerler alınmış ve bu değerlerin ortalaması göz önünde bulundurulmuştur. İlk aşamada R145 direnci 100, 200, 300, 400, 600, 800 V değerlerinde denenmiştir. Her ölçüm 20 dakika aralayla alınmıştır. Ancak bu bekleme süresinin, direncin ısınmasına ve değerinin sıcaklık katsayısına bağlı olarak değişmesine yol açtığı anlaşılmıştır. Elde edilen eğrinin tam olarak gerilim katsayısı eğrisi olamayacağı kanısına varılmıştır. Bu nedenle direnç değerini, 100, 200 ve 400 V değerleri için hiç bekleme yapmaksızın seri ölçümler yapılarak belirleme yoluna gidilmiştir.

Bu ölçümler sonucunda lineer bir eğri elde edilmiştir. Şekil 3.11'de R145 direncinin gerilim-direnç grafiği görülmektedir. Buradaki polinom eğri, ısınmanın direnç üzerindeki etkisini göstermektedir. Lineer eğri ise seri ölçüm alınarak, gerilim-direnç karakteristiğinin daha doğru bir yaklaşımla belirlendiğini açıkça göstermektedir. R145 direncine uygulanan işlem R86 direncine de uygulanmış ve benzer sonuçlara ulaşılmıştır.



Şekil 3.11: R145 direncinin gerilim-direnç değişimi

Dirençlerin gerilim katsayıları belirlenirken, elde edilen değerin içerisinde sıcaklık etkisinin girmemesi için direncin ısınmasına izin verilmeden anma gerilimin %10'u ve %100'ü uygulanarak ve bu iki noktada seri ölçümler yapılarak sonuçların elde edilmesi yolu tercih edilmiştir. Ancak deneyler, anma gerilimin %100'ü yerine güç kaynaklarının arıza moduna geçmesi üzerine %80'i olan 800 V maksimum gerilim değerinde gerçekleştirilmiştir. Bu tercihin bir anlamda yerinde bir seçim olduğu düşünülmektedir. Nitekim dirençlerin gerilim katsayılarının düşük gerilimlerde belirlenmesi bir başka deyişle güç faktöründen dolayı lineer bir davranış sergileyen bölgenin seçilmesi daha doğru sonuç vermektedir. Gerilim katsayıları belirlenecek 10 adet direnç; gerilim bölücüsünde kullanılacak sıcaklık katsayıları düşük muhtemel dirençlerdir. Bunlar, R145, R086, R192, R153, R159, R079, R110, R170, R118 ve R049 olarak belirlenmiştir. Gerilim katsayısı bağıntısı (3.4) ifadesinde verilmiştir.

$$VC = \frac{R_1 - R_2}{R_2} \cdot \frac{1}{V_1 - V_2} \tag{3.4}$$

Burada; VC gerilim katsayısını, R_1 anma gerilimin %80'indeki direnç değerini, R_2 anma gerilimin %10'undaki direnç değerini, V_1 anma gerilimin %80'ini ve V_2 ise

anma gerilimin %10'unu ifade etmektedir. Her doğru gerilim değerinde pozitif ve negatif değerler uygulanmış ve her iki noktada hesaplanan direnç değerinin aritmetik ortalaması göz önünde bulundurulmuştur. Sonuçlar Tablo 3.2'de verilmiştir. Seçilen dirençlerin gerilim katsayıları, üretici firmanın belirtmiş olduğu gibi ± 0.05 ppm/V'dan küçüktür. Gerilim katsayısının dirençlerin değişimine etkisi, sıcaklık katsayısının vermiş olduğu etkinin %1'inden daha az olduğu görülmektedir.

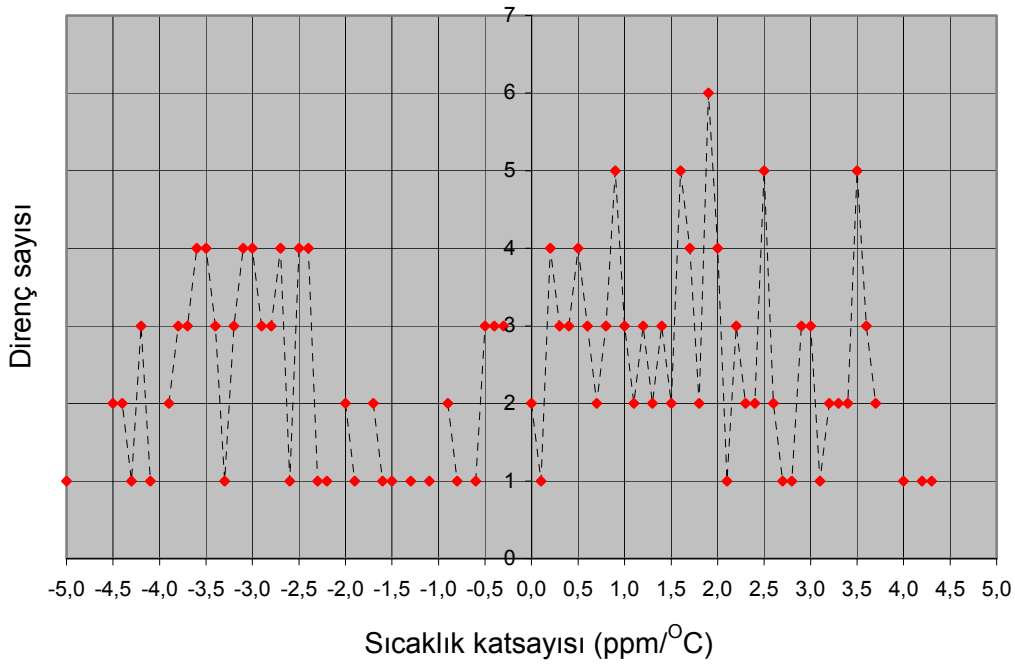
Tablo 3.2: Dirençlerin gerilim katsayıları

Dirençler	Direnç Değeri [kΩ] (U_n=800 V)	Direnç Değeri [kΩ] (U_n=100 V)	Gerilim Katsayısı [ppm/V]
R145	(1000.079144	1000.055057	0.034
R086	999.951928	999.969185	-0.025
R192	1000.032646	1000.007043	0.037
R153	999.869447	999.878774	-0.013
R159	1000.299129	1000.278912	0.029
R079	999.750162	999.751116	-0.001
R110	1000.283107	1000.266068	0.024
R170	999.930230	999.948460	-0.030
R118	999.808832	999.781198	0.039
R049	1000.294003	1000.328300	-0.049

3.5 Gerilim Bölücünün Yüksek Gerilim Kolunda Kullanılan Dirençlerin Seçilmesi

Yüksek gerilim bölücüsünde iki direnç kolu bulunmaktadır. Bunlardan birincisi yüksek gerilim direnç kolu diğeri ise alçak gerilim direnç koludur. Gerilim bölücünün yüksek gerilim direnci, 100 adet 1 MΩ'luk seri dirençten oluşan toplam 100 MΩ'luk bir dirençtir. Gerilim bölücüsünün ısıl davranışı yüksek gerilim direnç kolunun toplam sıcaklık katsayısıyla ilişkilidir. Buna göre seçilen 100 adet direncin yarısı pozitif ve diğer yarısı negatif dirençlerden oluşturulmuştur. Her pozitif sıcaklık katsayısına sahip olan direnç aynı değerde ancak negatif sıcaklık katsayısına sahip bir başka dirençle eşleştirilmesi suretiyle yüksek gerilim koluna ait toplam direnç

sıcaklık katsayısı minimuma indirilmiştir. Buna göre toplamda yüksek gerilim direnç kolunun sıcaklık katsayısı yaklaşık sıfıra yakın elde edilmiştir. Direnç seçimine en küçük sıcaklık katsayısına sahip dirençlerden ve bu dirençlerin ters işaretli sıcaklık katsayısına sahip eşlerinden başlanmıştır. Toplam 100 adet dirence ulaşıldığında direnç seçimi ve eşlemesinin, ± 4.2 ppm/^{o}C'den küçük sıcaklık katsayısına sahip dirençler arasından yapıldığı görülmüştür. Şekil 3.12'de 194 direnç arasında farklı sıcaklık katsayılarına sahip dirençlerin sayıları verilmiştir.



Şekil 3.12: Dirençlerin sıcaklık katsayıları ve sayıları

Tablo 3.3'de yüksek gerilim bölücüsünde kullanılmak üzere seçilen dirençler ve eşleri bulunmaktadır. Herbir çift direnç negatif ve pozitif sıcaklık katsayılarına sahiptir. Örneğin sıcaklık katsayısı –4.200798 ppm/^{o}C olan R139 direnci, sıcaklık katsayısı +4.200151 ppm/^{o}C olan R175 direnci ile eşleştirilmiş ve bu çiftin toplam sıcaklık katsayısı yaklaşık olarak -0.00065 ppm/^{o}C olarak elde edilmiştir. Bazı dirençlerin eşlemeleri, istenilen minimum toplam sıcaklık katsayılarına ulaşılamaması ve bazı dirençlerin montaj aşamasında zarar görmesi nedeniyle 3'lü eşleme yolu tercih edilmiştir. Tüm seçilen dirençlerin seri olarak bağlanmasıyla elde edilen yüksek gerilim direnç kolunun toplam sıcaklık katsayısı -4.4×10^{-10} 1/^{o}C olarak hesaplanmıştır [23, 26].

Tablo 3.3: Bölücünün yüksek gerilim kolu için seçilen dirençler

Çift No	Direnç No	23 °C'deki Direnç Değeri (kΩ)	33 °C'deki Direnç Değeri (kΩ)	Sıcaklık Katsayısı 1/°C (T_{poz})	Direnç No	23 °C'deki Direnç Değeri (kΩ)	33 °C'deki Direnç Değeri (kΩ)	Sıcaklık Katsayısı 1/°C (T_{neg})	Sıcaklık Katsayıları Farkı 1/°C (T_{neg} -T_{poz})
1	R006	1000.317	1000.335	1.8E-06	R100	1000.399	1000.369	-3.0E-06	6.2E-10
	R106	1000.007	1000.019	1.2E-06					
2	R175	999.964	1000.006	4.2E-06	R139	999.810	999.768	-4.2E-06	-6.5E-10
3	R048	999.980	1000.020	4.0E-06	R018	999.927	999.896	-3.1E-06	-2.0E-10
					R125	999.939	999.930	-9.0E-07	
4	R073	1000.034	1000.071	3.7E-06	R044	1000.174	1000.137	-3.7E-06	5.2E-10
5	R156	1000.037	1000.074	3.7E-06	R135	1000.155	1000.118	-3.7E-06	4.4E-10
6	R094	1000.162	1000.198	3.6E-06	R158	1000.089	1000.053	-3.6E-06	-2.6E-10
7	R132	1000.051	1000.087	3.6E-06	R185	999.679	999.643	-3.6E-06	-1.3E-09
8	R134	1000.067	1000.103	3.6E-06	R193	1000.152	1000.116	-3.6E-06	3.1E-10
9	R021	1000.028	1000.063	3.5E-06	R049	1000.366	1000.331	-3.5E-06	1.2E-09
10	R084	1000.045	1000.080	3.5E-06	R068	1000.241	1000.206	-3.5E-06	6.9E-10
11	R119	1000.035	1000.070	3.5E-06	R114	999.928	999.893	-3.5E-06	-3.7E-10
12	R152	999.926	999.961	3.5E-06	R120	1000.197	1000.162	-3.5E-06	9.5E-10
13	R058	1000.005	1000.039	3.4E-06	R083	999.891	999.857	-3.4E-06	-3.9E-10
14	R147	1000.165	1000.199	3.4E-06	R089	1000.025	999.991	-3.4E-06	-4.8E-10
15	R096	999.918	999.951	3.3E-06	R086	999.988	999.955	-3.3E-06	2.3E-10
16	R035	999.690	999.722	3.2E-06	R071	999.765	999.733	-3.2E-06	2.4E-10
17	R172	1000.001	1000.033	3.2E-06	R157	999.835	999.803	-3.2E-06	-5.3E-10
18	R099	1000.108	1000.138	3.0E-06	R051	999.895	999.865	-3.0E-06	-6.4E-10
19	R188	999.028	999.058	3.0E-06	R055	1000.042	1000.012	-3.0E-06	3.0E-09
20	R192	1000.008	1000.038	3.0E-06	R117	999.833	999.803	-3.0E-06	-5.3E-10
21	R118	999.760	999.789	2.9E-06	R042	999.632	999.603	-2.9E-06	-3.7E-10
22	R130	1000.023	1000.051	2.8E-06	R043	999.747	999.719	-2.8E-06	-7.7E-10
23	R126	999.944	999.971	2.7E-06	R174	999.307	999.280	-2.7E-06	-1.7E-09
24	R002	999.639	999.664	2.5E-06	R088	1000.268	1000.243	-2.5E-06	1.6E-09
25	R016	999.916	999.941	2.5E-06	R101	999.727	999.702	-2.5E-06	-4.7E-10
26	R062	1000.026	1000.051	2.5E-06	R105	1000.032	1000.007	-2.5E-06	1.5E-11
27	R097	999.993	1000.018	2.5E-06	R164	1000.178	1000.153	-2.5E-06	4.6E-10
28	R063	999.990	1000.014	2.4E-06	R140	999.810	999.786	-2.4E-06	-4.3E-10
29	R177	999.998	1000.022	2.4E-06	R170	999.968	999.944	-2.4E-06	-7.2E-11
30	R091	1000.026	1000.049	2.3E-06	R010	1000.278	1000.255	-2.3E-06	5.8E-10
31	R078	1000.014	1000.036	2.2E-06	R165	999.882	999.860	-2.2E-06	-2.9E-10
32	R146	1000.025	1000.045	2.0E-06	R052	1000.251	1000.231	-2.0E-06	4.5E-10
33	R178	1000.056	1000.076	2.0E-06	R153	999.908	999.888	-2.0E-06	-3.0E-10
34	R176	1000.022	1000.041	1.9E-06	R113	1000.048	1000.029	-1.9E-06	4.9E-11
35	R065	1000.008	1000.025	1.7E-06	R032	1000.115	1000.098	-1.7E-06	1.8E-10
36	R085	1000.224	1000.240	1.6E-06	R151	1000.133	1000.117	-1.6E-06	-1.5E-10
37	R155	999.932	999.947	1.5E-06	R057	999.999	999.984	-1.5E-06	1.0E-10
38	R159	1000.276	1000.289	1.3E-06	R111	999.877	999.864	-1.3E-06	-5.2E-10
39	R110	1000.262	1000.273	1.1E-06	R128	1000.078	1000.067	-1.1E-06	-2.0E-10
40	R167	1000.145	1000.154	9.0E-07	R003	1000.146	1000.137	-9.0E-07	9.0E-13
41	R108	1000.229	1000.237	8.0E-07	R079	999.757	999.749	-8.0E-07	-3.8E-10
42	R131	1000.231	1000.237	6.0E-07	R103	1000.071	1000.065	-6.0E-07	-9.6E-11
43	R025	1000.432	1000.437	5.0E-07	R005	1000.212	1000.207	-5.0E-07	-1.1E-10
44	R080	1000.301	1000.306	5.0E-07	R028	1000.020	1000.015	-5.0E-07	-1.4E-10
45	R011	999.772	999.776	4.0E-07	R076	1000.087	1000.083	-4.0E-07	1.3E-10
46	R087	999.682	999.686	4.0E-07	R090	999.962	999.958	-4.0E-07	1.1E-10
47	R098	999.937	999.940	3.0E-07	R136	1000.051	1000.048	-3.0E-07	3.4E-11
48	R112	999.801	999.804	3.0E-07	R142	999.845	999.842	-3.0E-07	1.3E-11
49	R072	1000.105	1000.131	2.6E-06	R163	999.742	999.716	-2.6E-06	-9.4E-10
			TOPLAM	≈ 1.2E-4			TOPLAM	≈ -1.2E-4	**≈ -4.4E-10**

3.6 Gerilim Bölücünün Alçak Gerilim Kolunda Kullanılan Direncin Seçilmesi

Yüksek gerilim bölücüsünün çevirme oranının belirlenmesindeki bir başka önemli unsur, alçak gerilim koluna konulacak dirençtir. Bölücünün alçak gerilim koluna bağlanan, 0-1000 V arası doğru gerilimlerin ölçüldüğü ölçü aletlerinin giriş empedansı, bölücünün çevirme oranını etkilemektedir. Alçak doğru gerilim ölçü aletlerinin giriş empedansının çoğunlukla 10 MΩ olduğu düşünülecek olursa, alete paralel bağlanacak alçak gerilim direncinin değeri, giriş empedansı değerine göre seçilmelidir. Yüksek gerilim bölücüsünün yüksek gerilim kolundaki R_Y=100 MΩ toplam direnç değeri ve R_{A1}= 1 MΩ ve R_{A2}= 100 kΩ gibi iki farklı alçak gerilim dirençleri için teorik bölücü çevirme oranı sırasıyla B_1= 100 ve B_2= 1000'dir. Ancak alçak gerilim koluna bağlanacak $R_Ö$ = 10 MΩ giriş empedansına sahip ölçü aleti göz önünde bulundurulursa pratikteki alçak gerilim direncinin değeri

$$R'_A = R_A // R_Ö \tag{3.5}$$

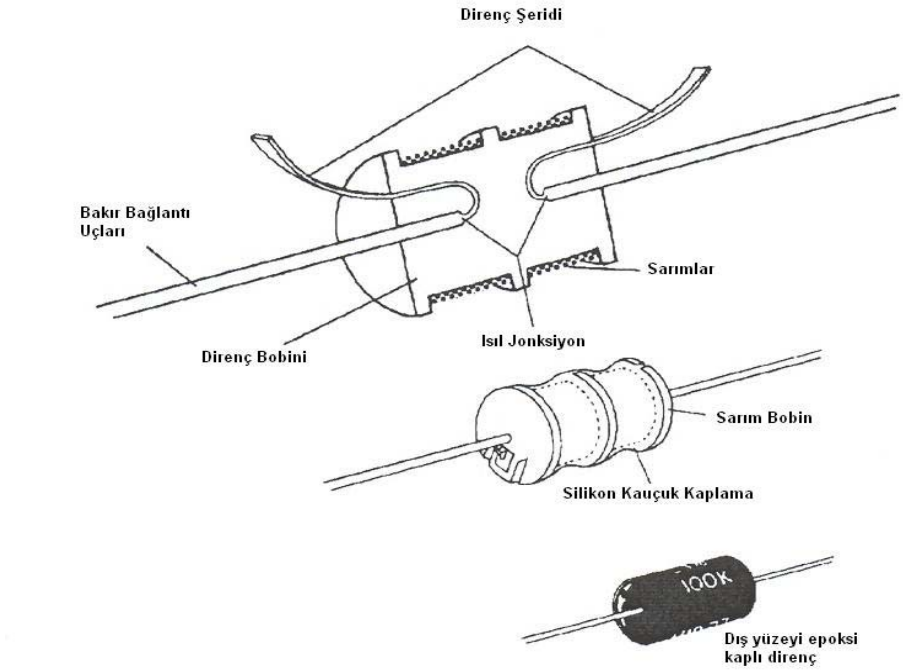
$$R_A = \frac{R_A . R_Ö}{R_A + R_Ö} \tag{3.6}$$

ifadelerinden $R'_{A1} = 0.90909\ \text{M}\Omega$ ve $R'_{A2} = 99.0099\ \text{k}\Omega$ olarak bulunur. Bu direnç değerleri için bulunan çevirme oranları sırasıyla 110 ve 1010'dur. Buna göre çevirme oranlarındaki hata 1 MΩ'luk alçak gerilim direnci için %10 ve 100 kΩ'luk alçak gerilim direnci için %1'dir. UME yüksek gerilim bölücüsünde 100 kΩ'luk alçak gerilim direnci kullanılmıştır. Bu şekilde ölçü aletinden akacak akım 10 kat daha küçük olacak ve cihazın giriş empedansının akıma bağlı değişimi azaltılmış olacaktır.

Alçak gerilim koluna bağlanacak 100 kΩ'luk direnç 5 adet direnç arasından seçilmiştir. Dirençlerin üretici firma tarafından belirlenmiş teknik özellikleri şunlardır:

- Marka : RHOPOINT COMPONENTS®
- Model : 5E10C100K
- Tip : Sarım Direnç

- Direnç Değeri : 100 kΩ
- Tolerans : % 0.1
- Maksimum Gerilim : 175 VDA
- Güç : 0.2 W
- Sıcaklık Katsayısı : ± 5 ppm/K
- Uzunluk : 8.88 ± 0.5 mm
- Çap : 4.00 ± 0.1 mm



Şekil 3.13: Alçak gerilim kolundaki 100 kΩ direncin yapısı [58]

İç yapısı Şekil 3.13'te verilen, alçak gerilim kolunda kullanılacak dirençlerin sıcaklık katsayıları, UME Empedans Laboratuvarı'nın referans ölçüm sistemi kullanılarak, farklı sıcaklık değerlerindeki direnç değerlerinin bulunması suretiyle belirlenmiştir. Direnç değerleri 23, 27, 29 ve 33 ^{o}C sıcaklıklarda, sıcaklık katsayıları ise 23^{o}C - 33 ^{o}C aralığında belirlenmiştir. Tablo 3.4'te bölücünün alçak gerilim kolunda kullanılacak dirençlerin farklı sıcaklıklardaki direnç değerleri ve sıcaklık katsayıları verilmiştir. Dirençlerin sıcaklıkla değişimleri Şekil 3.14'de verilmiştir. Gerilim bölücünün alçak gerilim kolunda kullanılacak direnç olarak R_{L03} direnci seçilmiştir.

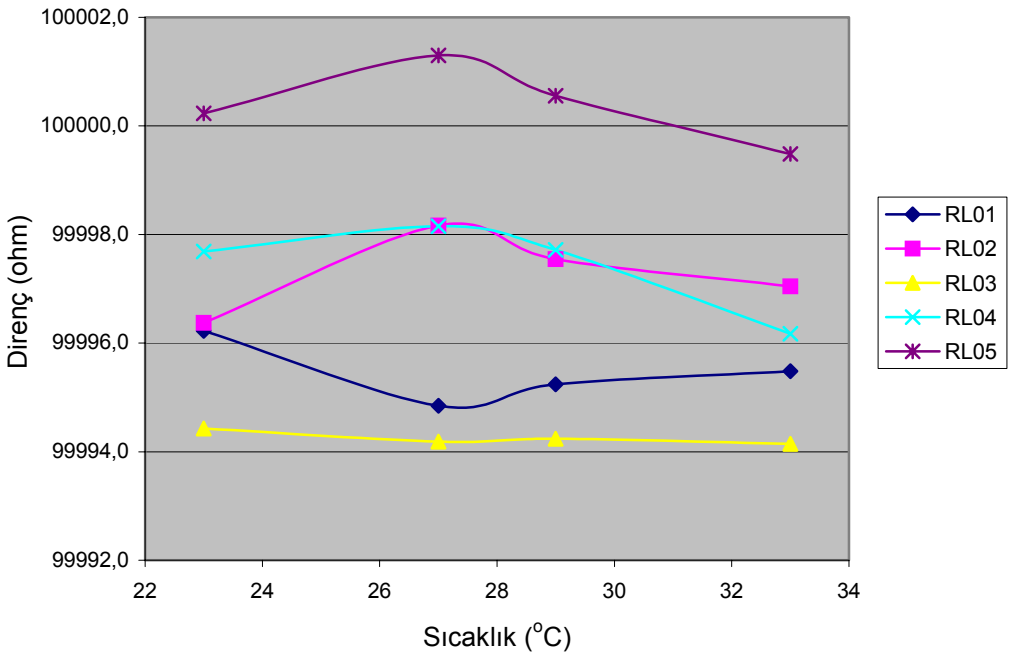
5 adet direnç arasında seçimi yapılan direnç için üç ölçüt göz önünde bulundurulmuştur. Bunlar:

- Minimum sıcaklık katsayısına sahip olması,
- Yüksek gerilim koluna ait dirençlerin toplam sıcaklık katsayısının negatif olması nedeniyle, alçak gerilim kolundaki direncin de negatif sıcaklık katsayısına sahip olması,
- Belirlenen sıcaklık aralığında en az değişimi göstermesidir.

Tablo 3.4: 100 kΩ'luk dirençler

Direnç No	23 °C'deki Direnç Değeri (Ω)	27 °C'deki Direnç Değeri (Ω)	29 °C'deki Direnç Değeri (Ω)	33 °C'deki Direnç Değeri (Ω)	Sıcaklık Katsayısı (1/°C)
R_{L01}	99996.228	99994.849	99995.239	99995.483	-7.4E-07
R_{L02}	99996.371	99998.162	99997.545	99997.046	6.7E-07
R_{L03}*	99994.426	99994.185	99994.242	99994.144	-2.8E-07
R_{L04}	99997.685	99998.152	99997.714	99996.174	-1.5E-06
R_{L05}	100000.230	100001.302	100000.555	99999.485	-7.5E-07

* Alçak gerilim kolunda kullanılacak olan direnç.



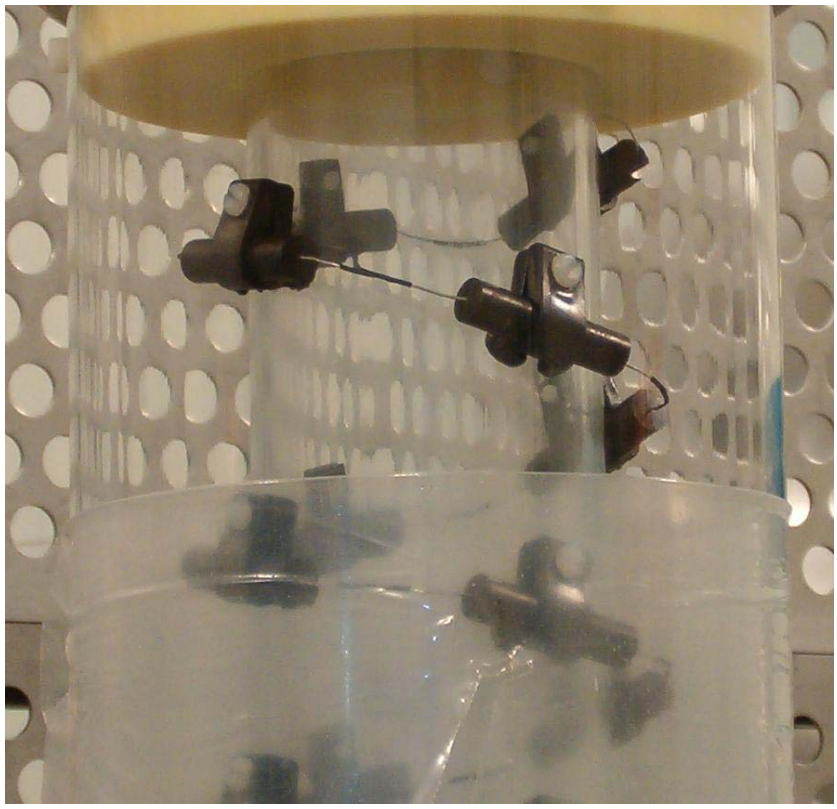
Şekil 3.14: 100 kΩ'luk dirençlerin sıcaklıkla değişimleri

3.7 Gerilim Bölücünün Montajı

Gerilim bölücüsünde kullanılacak 100 adet yüksek gerilim koluna ait dirençlerin yerleştirileceği taşıyıcı ve bu elemanları dış ortamdan yalıtmak için kullanılacak olan ayırıcı malzeme olarak pleksiglas seçilmiştir. PMMA (Polymethyl Methacrylate PMMA) olarak bilinen, saydam malzemenin seçilmesindeki en önemli nedenler:

- Tablo 3.5'de verilen elektriksel ve ısıl özelliklerin elverişli olması,
- Malzemenin kolayca işlenebilir, kesilebilir ve rahatlıkla diş açılabilir olması,
- Oluşabilecek korona, atlama gibi boşalmalarda boşalma yerinin, malzemenin saydam olması nedeniyle kolaylıkla belirlenebilme olanağının olmasıdır.

Bölücünün yüksek gerilim kolunu oluşturan dirençlerin sıralandığı iç pleksiglas borunun boyu 1350 mm ve dıştan dışa çapı 100 mm'dir. Dirençleri pleksiglas malzeme üzerinde tutan plastik kroşeler vidalarla sabitlendiğinden, borunun et kalınlığı 5 mm seçilmiştir. Şekil 3.15'de pleksiglas borular görülmektedir.



Şekil 3.15: Direnç montajı ve pleksiglas taşıyıcılar

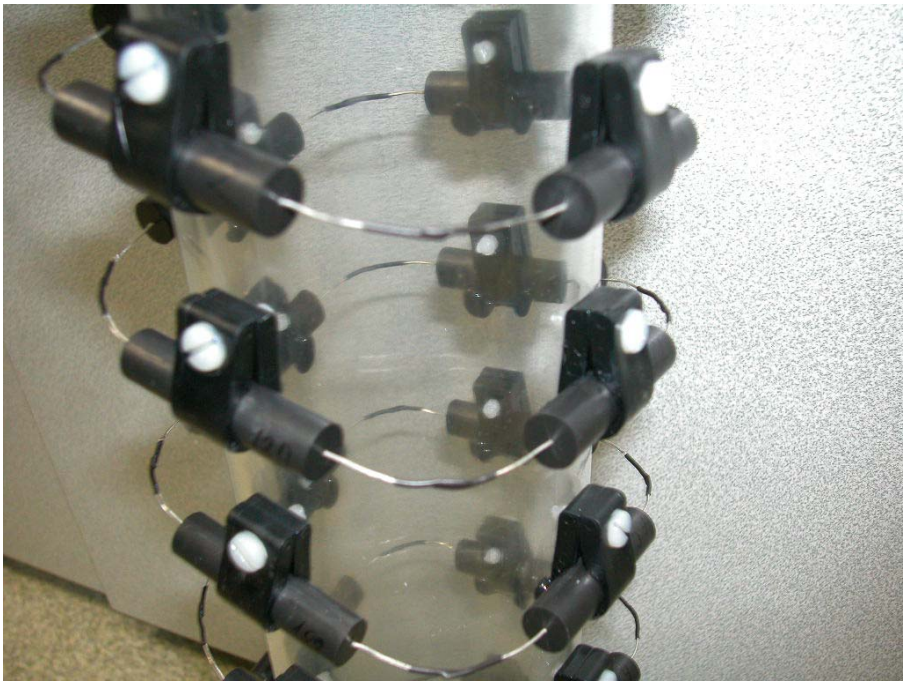
Dış pleksiglas borunun boyu 1450 mm ve dıştan dışa çapı 200 mm olup, sadece yalıtım amaçlı kullanıldığından ve üzerinde herhangi bir diş açma zorunluluğu olmadığından 3 mm et kalınlığında seçilmiştir.

Tablo 3.5: Pleksiglas malzemenin bazı temel özellikleri

Özellik	Değeri	Birimi
Hacimsel Direnç	$> 10^{15}$	Ω×cm
Yüzeysel Direnç	$> 10^{15}$	Ω
Dielektrik Sabiti (1 MHz)	2.9	-
Kayıp faktörü-tan δ (1 MHz)	0.03	-
Dielektrik Dayanımı	30	kV/mm
Isıl İletkenlik (20 ^{o}C)	0.19	W/(m×K)
Lineer Isıl Genleşme Katsayısı	0.7×10^{-4}	1/K
Çalışma Sıcaklığı	-40/+75	^{o}C
Yoğunluk	1.18	g/cm^3

Dirençlerin taşıyıcı pleksiglas üzerine yerleştirilmesinde karbon katkılı kroşeler kullanılmıştır. Bu kroşeler her bir direnci içine alacak şekilde ve pleksiglas boruya plastik vida ile sıkılaştırılarak yerleştirilmiştir. M4 plastik vidaların pleksiglas üzerine yerleştirilmesi, pleksiglas boru üzerine yerleri belirlenmiş 100 adet M4 kılavuz açılması suretiyle gerçekleştirilmiştir. Gerilim bölücünün hareketli oluşu nedeniyle ve meydana gelebilecek elektriksel zorlanmanın yaratacağı kuvvetlerden dolayı kroşe, direnç ve pleksiglas yüzeyi üçlüsü sıcak silikon ile sabitlenmiştir. Şekil 3.15'te, iç ve dış pleksiglas malzemeler, dirençleri pleksiglas boruya bağlayan kroşe ve plastik vidalar görülmektedir. Dirençlerin taşıyıcı pleksiglas boruya dizilişi ve diziliş sırası ile ilgili bilgilere bir sonraki bölümde yer verilecektir.

Dirençlerin birbirleri ile olan bağlantıları lehimle yapılmış ve bu lehim yerleri karbon oranı yüksek makaron ile örtülmüştür (Şekil 3.16). Lehim teli olarak; kontak direncini düşük tutmak amacıyla gümüş katkılı özel bir lehim malzemesi kullanılmıştır. Yapıda karbon oranı yüksek makaron kullanılmasının nedeni, iki direnç telinin lehimlenmesi sırasında oluşabilecek sivri uçlar ve bu uçların neden olacağı yüksek elektrik alan şiddetinin azaltılmasıdır.



Şekil 3.16: Dirençlerin birbirleri ile bağlantısı

Yüksek gerilim bölücüsündeki dirençlerin dizildiği iç pleksiglas ile bu yapıyı çevreleyen dış pleksiglas hareketli taban üzerine yerleştirilmiştir. Bölücünün hareketi sırasında oluşabilecek mekanik kuvvetler karşısında, yapının dayanıklı kalabilmesi için üst bölüme bir flanş (Şekil 3.15) ve alt kısıma da bir kaide yapılmıştır (Şekil 3.17). Montajda kullanılan flanş ve kaide için, torna ve frezede işlenmesi kolay olan ayrıca elektriksel özellikleri çok iyi olan Derlin malzemesi kullanılmıştır. Yapı olarak Teflon'a benzeyen bu malzemenin teknik özellikleri Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6: Derlin malzemenin bazı temel özellikleri

Özellik	Değeri	Birimi
Yüzeysel Direnç	$> 10^{15}$	Ω
Dielektrik Sabiti (1 MHz)	3.6	-
Kayıp faktörü-tan δ (1 MHz)	0.008	-
Dielektrik Dayanımı	20	kV/mm
Ergime Noktası	175	^{o}C
Çalışma Sıcaklığı	-40/+75	^{o}C
Yoğunluk	1.43	g/cm^3



Şekil 3.17: Bölücünün yerleştirildiği Derlin malzemesinden yapılmış kaide

3.8 Gerilim Bölücünün Çevirme Oranı

Gerilim bölücüsünde kullanılacak, Tablo 3.3'de verilen yüksek gerilim koluna ait tüm dirençlerin toplam değeri $R_{YG} = 99999.806\,k\Omega$'dur. Bu değer, seçilen dirençlerin anma gerilimde yüzeylerinde oluşacak sıcaklık olan 33 ^{o}C'deki değerlerinin toplamıdır. Alçak gerilim kolunda kullanılacak R_{L03} direncinin 33 ^{o}C'deki değeri ise $R_{AG} = R_{L03} = 99.99414\,k\Omega$'dur. Bu değerler kullanılarak bölücünün teorik çevirme oranını 33^{o}C için

$$K_{33^{o}C} = \frac{R_{YG} + R_{AG}}{R_{AG}}$$

bağıntısı kullanılarak 1001.057 olarak bulunur. Benzer biçimde 23^{o}C'de çevirme oranı $R_{YG} = 99999.806\,k\Omega$ ve $R_{AG} = R_{L03} = 99.99447\,k\Omega$ ile 1001.051'dir.

BÖLÜM 4 YÜKSEK DOĞRU GERİLİM BÖLÜCÜSÜNDEKİ DİRENÇLERİN DİZİLİŞİ VE ELEKTROT TASARIMI

4.1 Giriş

Yüksek doğru gerilim bölücüsü tasarımı ve yapımının en önemli aşamalardan biri bölücüye ait yüksek gerilim kolundaki dirençlerin dizilişi ve bölücüde kullanılacak elektrotların boyut. biçim ve konum bakımından tasarlanmasıdır. Dirençlerin dizilişi ve elektrotların tasarımında göz önünde bulundurulması gereken çok önemli iki ortak nokta bulunmaktadır. Bunlar:

- Ölçme duyarlılığını etkilememesi için dirençlerde ve yüksek gerilim elektrodunda korona olmaması,
- Bölücü boyunca oluşacak elektrik alan dağılımının düzgün olarak sağlanmasıdır.

Korona, eğrilik yarıçapı küçük olan elektrotta meydana gelen, tam olmayan ancak kendi kendini besleyebilen kısmi boşalmadır. Korona sırasında oluşabilecek akım darbecikleri sistemde anma akımların değişimine bir başka deyişle kayıplara neden olmakta, duyarlı ölçümlerde önemli sapmalara yol açmaktadır [2, 59]. Bu nedenle gerilim bölücüsündeki olası korona kaynaklarını azaltmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır. Yüzeyi karbon oranı yüksek dirençlerin seçilmesi ve kullanılması. dirençlerin birleşme noktalarında lehimleme sonrasında oluşabilecek pürüzlülük ve sivriliğin yine karbon oranı yüksek makaronlarla kaplanması bu önlemlerden bazılarıdır ve bir önceki bölümde anlatılmıştır. Bu önlemlerle korona oluşumunun azaltılması hedeflenmiştir. Bölücü elektrotlarının da korona oluşumuna neden olmayacak eğrilik yarıçapında tasarlanması da ayrıca önem içerir.

Yüksek gerilim bölücüsü boyunca elektrostatik alan dağılımının düzgün olmaması, kaçak kapasitenin ve dolayısıyla kaçak akımlarının oluşmasına neden olmaktadır.

Kaçak akımları fazla olan bir yüksek gerilim bölücüsünde, yüksek gerilim kolunda bulunan direnç birimleri üzerindeki gerilim düşümü eşit olmamakta bunun yanında dirençlerin akım karşısındaki sıcaklık davranışları teorik hesaplamaların dışında farklı sonuçlar vermektedir. Kaçak kapasitelerin, ölçüm sistemine bir başka önemli etkisi de gerilim bölücünün birim basamak işlevine yanıtında (unit step response) yarattığı gecikme etkisidir. Kaçak akımların sınırlandırılması için, dirençlerin belirli bir sistematiğe göre dizilmesi ve elektrotların düzgün elektrik alan yaratacak şekilde tasarlanması ve konumlandırılması gerekmektedir [60, 61].

Bu bölümde, korona hesaplamalarından yola çıkılarak elektrot eğrilik yarıçapının belirlenmesi, yüksek gerilim bölücüsünde oluşacak kaçak akımların ölçme sistemine olan etkisinin teorik hesaplamaları ve çözüm önerileri, bölücü boyunca elektrik alan dağılımını düzgün kılacak direnç dizilişi komularına yer verilmiştir: Bunun yanında, bölücü boyunca oluşacak alan dağılımları, farklı üç tip elektrot için sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Method) tabanlı bir bilgisayar programı olan FEMM 4.0 kullanılarak belirlenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır [62].

4.2 Dirençlerin Dizilişi

Yüksek gerilim bölücüsüne yerleştirilecek dirençler, düzgün gerilim ve elektrik alan dağılımı sağlamak için helisel bir düzende yerleştirilmeleri gerekmektedir. Yüksek gerilim bölücüsünün alan dağılımındaki düzgünlük, kaçak akımları en aza indirmekte ve dolayısıyla gerilim bölücüsünün bölme oranına minimum etki yapmaktadır. Kaçak akımların azaltılması yani gerilim bölücü boyunca elektrik alanın düzgün olması, gerilim bölücüde uygun elektrot yapısı kullanılarak ve dirençleri gerilim bölücüye helisel bir yapıda yerleştirerek sağlanmaktadır. Helisel yapı gerilim bölücünün üst ve alt kısımlardan orta bölgeye doğru, dirençler arası açıklığın giderek azaldığı ve dirençlerin silindirik gövdeye helezon oluşturacak şekilde seri olarak bağlanmasıyla gerçekleştirilmektedir.

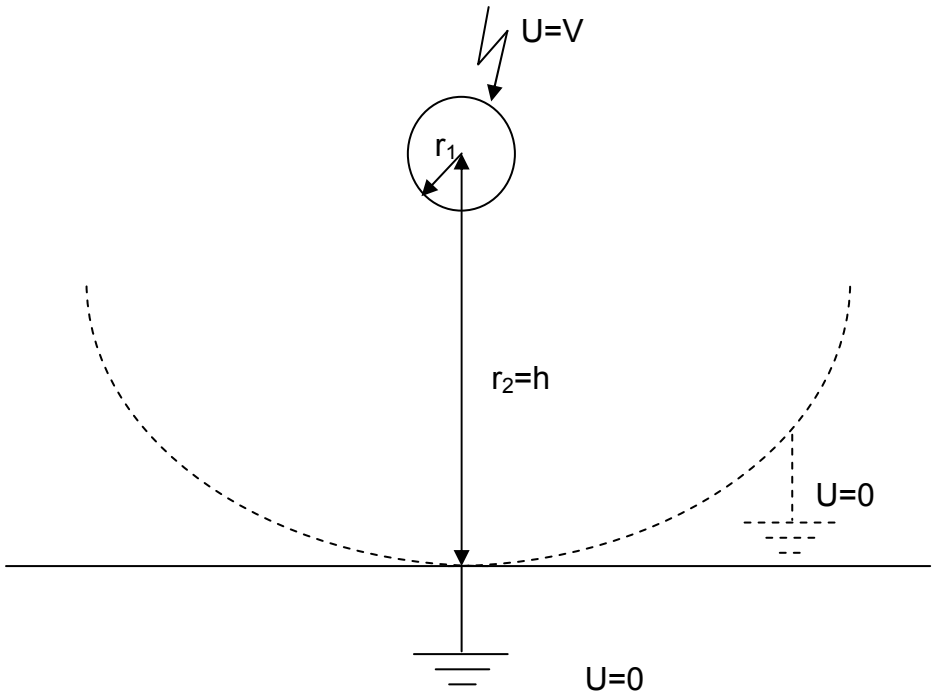
Yüksek gerilim elektrot sistemlerinde, alan şiddetinin yüksek olduğu yerler yüksek gerilim ve eğrilik yarıçapının küçük olduğu yerlerdedir. Alan şiddetinin en düşük olduğu bölge ise gerilimin düşük ve eğrilik yarıçapının büyük olduğu bölgelerdir [2, 12].

Bir gerilim bölücünün alan dağılımını incelemek için, bölücünün elektrot yapısını küre-küre elektrot sistemine benzetebiliriz. Örneğin gerilim bölücünün h yüksekliği r_2 yarıçaplı ve toprak potansiyelinde bir küre, r_1 ise r_2'den küçük ve bölücünün yüksek gerilim uygulandığı üst elektrot olarak varsayılırsa Şekil 4.1'deki yapı elde edilir. Küre-küre elektrot sisteminde maksimum elektrik alan şiddeti,

$$E_{\max} = U \cdot \frac{r_2}{r_1} \cdot \frac{1}{r_2 - r_1} \tag{4.1}$$

bağıntısıyla elde edilir.Bu bağıntıdaki E_{max} ifadesini minimum yapan r_1 yarıçapı (4.2) ifadesi kullanılarak,

$$\frac{dE_{max}}{dr_1} = 0 \tag{4.2}$$



Şekil 4.1: Küresel elektrot sisteminde alan dağılımı

$$V \cdot \frac{(r_2 - 2r_1) \cdot r_2}{r_1} \cdot \frac{1}{r_2 - r_1} = 0 \tag{4.3}$$

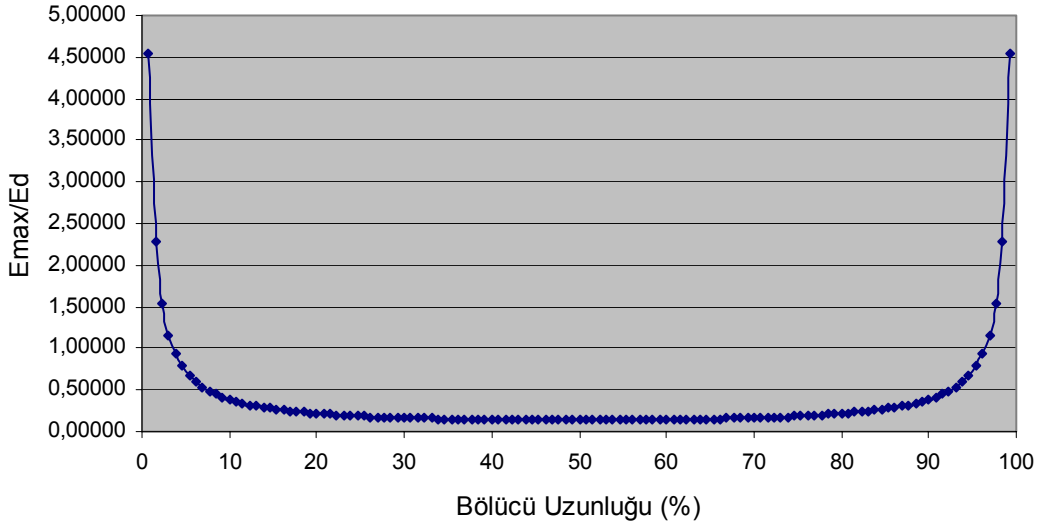
$$r_1 = \frac{r_2}{2} \tag{4.4}$$

biçiminde elde edilir. Buradan maksimum elektrik alanını minimum yapan koşul,

$$(E_{max})_{min} = V \cdot \frac{r_2}{\frac{r_2}{2}} \cdot \frac{1}{r_2 - \frac{r_2}{2}} \tag{4.5}$$

$$(E_{max})_{min} = \frac{4V}{r_2} = \frac{2V}{r_1} = \frac{2V}{a} = 2 \cdot E_{ort} \tag{4.6}$$

olur [12]. Burada a küreler arası açıklığı ifade etmektedir. Elde edilen bağıntılar gerilim bölücüye uygulandığında Şekil 4.2'deki gibi, gerilim bölücü boyunca alan dağılımı grafiği ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.2: Bölücü boyunca alan dağılımı

Şekil 4.2'de de görüleceği gibi gerilim bölücü, üst ve alt bölgelerde çok fazla zorlanmakta ve orta bölgede zorlanma minimum olmaktadır. Özellikle bölücünün alt ve üst b %20'lik bölümünde alan zorlanması çok yüksektir. Bu sonuçlara göre dirençlerin bölücü üzerine yerleşimi sırasında üst ve alt bölgelerdeki dirençler arasındaki açıklık orta bölgeye göre daha fazla yapılmıştır.

Seçilen dirençler gerilim bölücüye rasgele yerleştirilmemiştir. Gerilim altında dirençlerin ısınacağı ve ısınan havanın bölücünün üst taraflarına yükseleceği düşünülmüş ve bu amaçla bölücünün orta bölgesine minimum sıcaklık sabitine sahip dirençler konulmuştur. Gerilim bölücüye en üstten başlamak üzere seri olarak bağlanan dirençlerin bağlantı sıraları, 23 ve 33 ^{o}C'deki direnç değerleri ve sıcaklık aralığındaki sıcaklık katsayıları Tablo 4.1'de verilmiştir.

4.3 Korona Boşalmaları ve Korona Halkası Eğrilik Yarıçapı

Korona boşalmaları, belirli bir eşik gerilimi aşıldığında küçük yarıçaplı elektrotlarda ya da düzgün olmayan alanlarda oluşan tam olmayan fakat kendi kendini besleyen boşalmalardır. Koronaya; elektrotların yarıçapı, birbirleri arasındaki mesafe, pürüzlülük ve ortam koşulları etki etmektedir. Koronanın oluşumu farklı fiziksel özellikler taşımakla birlikte deneysel verilerle oluşturulmuştur ve (4.7) bağıntısında verilen korona başlangıç gerilimi bağıntısı iki kutbiyet için yaklaşık ifadeyle aynıdır.

$$U_k = U_o \cdot m \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{r \cdot \delta}}\right) \tag{4.7}$$

Burada U_k korona gerilimini, U_o çarpma suretiyle iyonizasyonun başladığı gerilimi, m elektrodun pürüzlülük derecesini hesaba katan ve parlatılmış yüzeylerde 1 olarak alınan bir katsayıyı, r iletkenin cm cinsinden yarıçapı ve δ ise bağıl hava yoğunluğunu göstermektedir. Bağıl hava yoğunluğu,

$$\delta = 0.392 \cdot \frac{p}{T} \tag{4.8}$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Burada p atmosfer basıncı [mmHg] ve T sıcaklık (^{o}K) ifadeleridir. Tasarımı yapılan yüksek gerilim bölücüsünün kullanılacağı UME Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nın ortam koşulları basınç için ortalama 750 mmHg ve sıcaklık 23 ^{o}C, pürüzlülük katsayısı m=1 ve korona oluşumunun önlenmesi açısından korona geriliminin iyonizasyon geriliminden %25 daha büyük olduğu varsayılırsa, bölücünün elektrot yarıçapı minimum r = 1.36 cm dir. Buna göre tasarım yapılırken minimum 1.36 cm eğrilik yarıçapına sahip elektrotlar kullanılmıştır.

Tablo 4.1: Bölücüye bağlanan dirençlerin sırası (yukarıdan-aşağıya)

Sıra No	Direnç No	Direnç Değeri (kΩ)		Sıcaklık Katsayısı (1/°C)	Sıra No	Direnç No	Direnç Değeri (kΩ)		Sıcaklık Katsayısı (1/°C)
		23 °C	33 °C				23 °C	33 °C	
1	R048	999.980	1000.020	4.0E-06	51	R136	1000.0510	1000.0480	-3.0E-07
2	R139	999.810	999.768	-4.2E-06	52	R112	999.8010	999.8040	3.0E-07
3	R175	999.964	1000.006	4.2E-06	53	R142	999.8450	999.8420	-3.0E-07
4	R135	1000.155	1000.118	-3.7E-06	54	R098	999.9370	999.9400	3.0E-07
5	R156	1000.037	1000.074	3.7E-06	55	R090	999.9620	999.9580	-4.0E-07
6	R193	1000.152	1000.116	-3.6E-06	56	R087	999.6820	999.6860	4.0E-07
7	R094	1000.162	1000.198	3.6E-06	57	R005	1000.2120	1000.2070	-5.0E-07
8	R185	999.679	999.643	-3.6E-06	58	R080	1000.3010	1000.3060	5.0E-07
9	R132	1000.051	1000.087	3.6E-06	59	R079	999.7570	999.7490	-8.0E-07
10	R068	1000.241	1000.206	-3.5E-06	60	R108	1000.2290	1000.2370	8.0E-07
11	R084	1000.045	1000.080	3.5E-06	61	R128	1000.0780	1000.0670	-1.1E-06
12	R120	1000.197	1000.162	-3.5E-06	62	R110	1000.2620	1000.2730	1.1E-06
13	R119	1000.035	1000.070	3.5E-06	63	R057	999.9990	999.9840	-1.5E-06
14	R083	999.891	999.857	-3.4E-06	64	R155	999.9320	999.9470	1.5E-06
15	R147	1000.165	1000.199	3.4E-06	65	R032	1000.1150	1000.0980	-1.7E-06
16	R086	999.988	999.955	-3.3E-06	66	R125	999.9390	999.9300	-9.0E-07
17	R096	999.918	999.951	3.3E-06	67	R052	1000.2510	1000.2310	-2.0E-06
18	R018	999.927	999.896	-3.1E-06	68	R146	1000.0250	1000.0450	2.0E-06
19	R006	1000.317	1000.335	1.8E-06	69	R165	999.8820	999.8600	-2.2E-06
20	R106	1000.007	1000.019	1.2E-06	70	R078	1000.0140	1000.0360	2.2E-06
21	R163	999.742	999.716	-2.6E-06	71	R170	999.9680	999.9440	-2.4E-06
22	R051	999.895	999.865	-3.0E-06	72	R063	999.9900	1000.0140	2.4E-06
23	R192	1000.008	1000.038	3.0E-06	73	R164	1000.1780	1000.1530	-2.5E-06
24	R055	1000.042	1000.012	-3.0E-06	74	R062	1000.0260	1000.0510	2.5E-06
25	R099	1000.108	1000.138	3.0E-06	75	R101	999.7270	999.7020	-2.5E-06
26	R174	999.307	999.280	-2.7E-06	76	R002	999.6390	999.6640	2.5E-06
27	R126	999.944	999.971	2.7E-06	77	R105	1000.0320	1000.0070	-2.5E-06
28	R088	1000.268	1000.243	-2.5E-06	78	R097	999.9930	1000.0180	2.5E-06
29	R016	999.916	999.941	2.5E-06	79	R043	999.7470	999.7190	-2.8E-06
30	R140	999.810	999.786	-2.4E-06	80	R130	1000.0230	1000.0510	2.8E-06
31	R177	999.998	1000.022	2.4E-06	81	R042	999.6320	999.6030	-2.9E-06
32	R010	1000.278	1000.255	-2.3E-06	82	R118	999.7600	999.7890	2.9E-06
33	R091	1000.026	1000.049	2.3E-06	83	R117	999.8330	999.8030	-3.0E-06
34	R153	999.908	999.888	-2.0E-06	84	R188	999.0280	999.0580	3.0E-06
35	R178	1000.056	1000.076	2.0E-06	85	R157	999.8350	999.8030	-3.2E-06
36	R113	1000.048	1000.029	-1.9E-06	86	R172	1000.0010	1000.0330	3.2E-06
37	R176	1000.022	1000.041	1.9E-06	87	R071	999.7650	999.7330	-3.2E-06
38	R151	1000.133	1000.117	-1.6E-06	88	R035	999.6900	999.7220	3.2E-06
39	R085	1000.224	1000.240	1.6E-06	89	R089	1000.0250	999.9910	-3.4E-06
40	R111	999.877	999.864	-1.3E-06	90	R058	1000.0050	1000.0390	3.4E-06
41	R159	1000.276	1000.289	1.3E-06	91	R114	999.9280	999.8930	-3.5E-06
42	R003	1000.146	1000.137	-9.0E-07	92	R152	999.9260	999.9610	3.5E-06
43	R167	1000.145	1000.154	9.0E-07	93	R049	1000.3660	1000.3310	-3.5E-06
44	R103	1000.071	1000.065	-6.0E-07	94	R021	1000.0280	1000.0630	3.5E-06
45	R131	1000.231	1000.237	6.0E-07	95	R158	1000.0890	1000.0530	-3.6E-06
46	R028	1000.020	1000.015	-5.0E-07	96	R134	1000.0670	1000.1030	3.6E-06
47	R025	1000.432	1000.437	5.0E-07	97	R044	1000.1740	1000.1370	-3.7E-06
48	R076	1000.087	1000.083	-4.0E-07	98	R073	1000.0340	1000.0710	3.7E-06
49	R011	999.772	999.776	4.0E-07	99	R100	1000.3990	1000.3690	-3.0E-06
50	R065	1000.008	1000.025	1.7E-06	100	R072	1000.1050	1000.1310	2.6E-06

Bölücüde dört ayrı tip elektrot kullanılmıştır. Bunlar:

1. Bölücünün yüksek gerilim bağlantısının yapıldığı 40 mm çapındaki küre elektrot

2. Bölücünün üst kısmının kapatıldığı 350 mm çapında, 4 mm kalınlıktaki disk elektrot

3. Yüksek gerilim ana elektrodu (Bu toroid elektrodun dıştan dışa çapı 750 mm ve silindir çapı 70 mm'dir)

4. Dıştan dışa 400 mm çapı ve 250 mm yüksekliğe sahip iki parçadan oluşan toprak elektrodu



Şekil 4.3: Gerilim bölücünün elektrotları

4.4 Elektrostatik Alan Dağılımı ve Bölücüye Etkisi

Yüksek gerilim bölücüsünün frekansa bağımlılık problemi, yüksek gerilim bölücüsü boyunca ortaya çıkan düzgün olmayan alan dağılımı ile ilişkilidir. Bölücünün girişindeki (yüksek gerilim kolu) ve çıkışındaki (alçak gerilim kolu) akımların farklılıkları kaçak kapasitelerden kaynaklandığı bilinmektedir. Bu nedenle bölücünün kaçak kapasitesinin varlığı, direnç boyunca akacak akımın genliğinin ve fazının değişimine yol açmaktadır. Bir yüksek gerilim bölücüsünde kaçak kapasiteler üç temel yapıda bulunmaktadır. Bunlar;

$C_p^{/}$: bölücüdeki her bir dirence paralel kaçak kapasite,

$C_h^{/}$: her bir potansiyel noktasından yüksek gerilim elektroduna kaçak kapasite,

$C_e^{/}$: her bir potansiyel noktasından toprağa kaçak kapasitelerdir.

Bu kaçak kapasitelerle birlikte ortaya çıkan devre oldukça karmaşık bir yapıdadır. Şekil 4.4'de sadece 5 adet dirençten oluşan bir gerilim bölücüsünün kaçak kapasiteleriyle birlikte eşdeğer devresi bulunmaktadır. Bölücüde kullanılan her bir direnç değeri birbirine eşit olsa da kaçak kapasiteler birbirine eşit değildir [2, 63, 64].

Kaçak kapasiteler nedeniyle ortaya çıkan hatalar, yüksek gerilim bölücüsünün ve bölücüyü oluşturan herbir direncin ekranlanmasıyla ve ekranın belirli bir potansiyelde tutulmasıyla azaltılabilir.

Şekil 4.5'de görüldüğü gibi yüksek gerilim direncinin ekranlanmasıyla Cp paralel kapasitesi ihmal edilebilir bir düzeye düşer ve devrede sadece potansiyel noktalar ile ekran arasındaki kapasite kalır.

Burada R toplam direnç, C dirençten ekrana olan dağılmış kaçak kapasite, V_1 dirence uygulanan gerilim ve P ise ekrana uygulanan gerilim olsun. Topraklanmış direncin ucundan x uzaklığındaki bir nokta alınırsa topraklı uç ile x noktası arasındaki direnç R_x olur. Oran ise

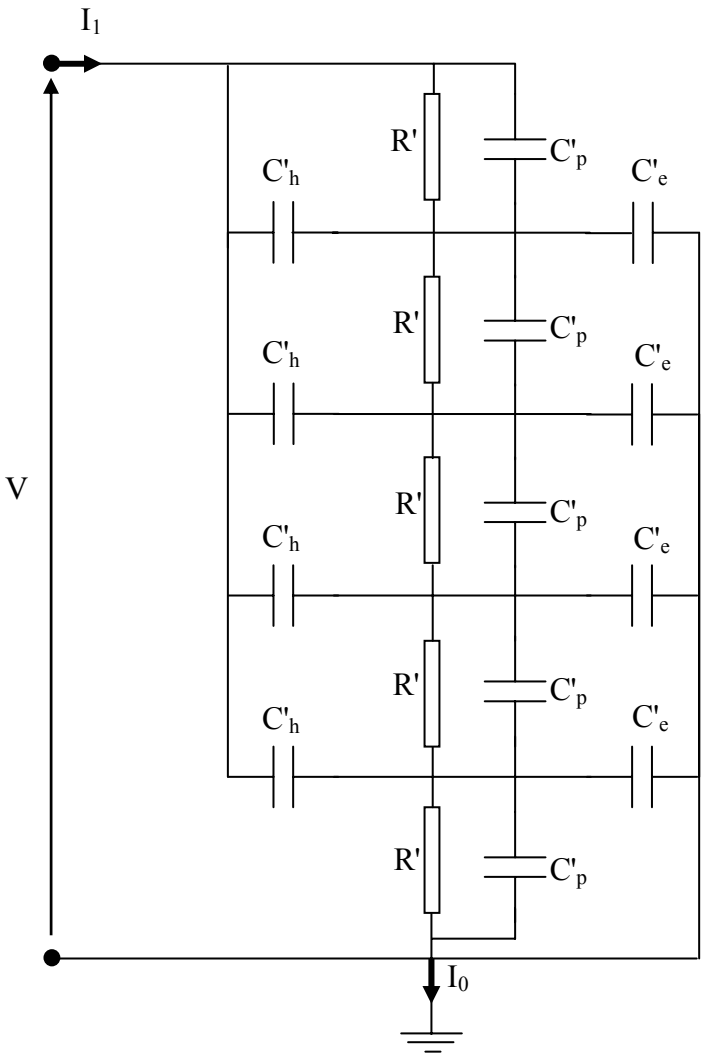
$$K = \frac{R_X}{R} \tag{4.9}$$

olur. Buradan,

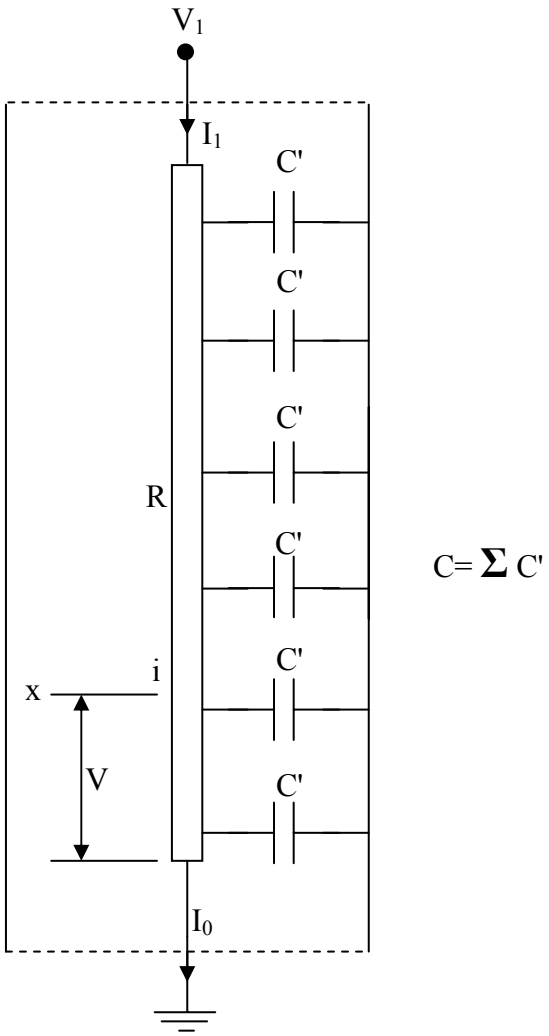
$$R_X = K.R \tag{4.10}$$

$$dR_X = R.dK \tag{4.11}$$

bulunur.



Şekil 4.4: Basit bir gerilim bölücü eşdeğer devresi



Şekil 4.5: Ekranlı direncin basit gösterilimi

dRx ile ilişkili kapasite ise

$$C^{/} = C.dK \tag{4.12}$$

bağıntısı ile elde edilir. Eğer x noktasındaki akım i ve gerilim V ise ilgili akım ve gerilim bağıntıları:

$$di = j\omega C(V - P).dK \tag{4.13}$$

$$\frac{dV}{dK} = i.R \tag{4.14}$$

$$\frac{d^2V}{dK^2} = R.\frac{di}{dK} = R.j\,\omega C\,(V - P) \tag{4.15}$$

bağıntısının tam çözümü (4.16) ifadesi şeklindedir.

$$V = A.e^{aK} + B.e^{-aK} + P \tag{4.16}$$

(4.16) bağıntısında A ve B sabitlerdir. Diğer sabit,

$$a = \sqrt{j\omega CR} \tag{4.17}$$

biçimindedir. Sabitler $V = V_1$ ve $V = 0$ sınır değerleri için bulunabilir. $V = V_1$ için $K = 1$ ve $V = 0$ için $K = 0$ ifadeleri kullanılarak gerilim bağıntısı,

$$V = \frac{e^{aK}\left[V_1 - P\left(1 - e^{-a}\right)\right] - e^{-aK}\left[V_1 - P\left(1 - e^{a}\right)\right]}{e^{a} - e^{-a}} \tag{4.18}$$

biçiminde bulunur. Herhangi bir noktadaki i akımı ise,

$$i = \frac{1}{R} \cdot \frac{dV}{dR} \tag{4.19}$$

$$i = \frac{1}{R} \cdot \frac{a}{e^{a} - e^{-a}}\left[e^{aK}\{V_1 - P(1 - e^{-a})\} + e^{-aK}\{V_1 - P(1 - e^{a})\}\right] \tag{4.20}$$

ifadesi elde edilir. $K = 0$ için çıkış akımı i_o ve $K = 1$ için direncin ucundaki akım değeri i_1 dir. $K = 0$ için çıkış akımı (4.21) bağıntısının hiperbolik fonksiyonların seriye açılımı yapılırsa,

$$i_o = \frac{1}{R} \cdot \frac{a}{e^{a} - e^{-a}}\left[V_1 - P(1 - e^{-a}) + V_1 - P(1 - e^{a})\right] \tag{4.21}$$

$$i_o = \frac{a}{R \sinh a}\left[V_1 - P + P.\cosh a\right] \tag{4.22}$$

$$i_o = \frac{a\left[V_1 - P + P\left\{1 + \frac{a^2}{2} + \frac{a^4}{24} + \cdots\right\}\right]}{R\left\{a + \frac{a^3}{6} + \frac{a^5}{120} + \cdots\right\}} \tag{4.23}$$

$$i_o = \frac{V_1 + P\frac{a^2}{2} + P\frac{a^4}{24} + \cdots}{R\left\{1 + \frac{a^2}{6} + \frac{a^4}{120} + \cdots\right\}} \tag{4.24}$$

bağıntısındaki gibi elde edilir. K = 1 için giriş akımı i_1 benzer açılımlarla,

$$i_1 = \frac{V_1 + (V_1 - P)\frac{a^2}{2} + (V_1 - P)\frac{a^4}{24} + \cdots}{R\left\{1 + \frac{a^2}{6} + \frac{a^4}{120} + \cdots\right\}} \tag{4.25}$$

olur. Görüleceği üzere direnç üzerinden akan akım ekran potansiyeli P'nin bir fonksiyonudur. İki farklı durum için akımları belirlemek, ekran performansı ve kaçak kapasitelerin etkisi açısından ilginç bir durum ortaya çıkarmaktadır.

4.4.1 Direnç Ekranının Topraklanması Durumu

Ekran potansiyeli P = 0 olursa sadece toprağa göre düzgün dağılmış C_e kapasitelerinden söz edilebilir. Buna göre,

$$i_o = \frac{V_1}{R\left\{1 + \frac{a^2}{6} + \frac{a^4}{120} + \cdots\right\}} \tag{4.26}$$

bağıntısı elde edilir. a'nın yüksek dereceli kuvvetleri ihmal edilirse, (4.27) bağıntısı içerisine $a^2 = j\omega RC_e$ ifadesi yerleştirilirse,

$$i_o = \frac{V_1}{R\left\{1 + \frac{a^2}{6}\right\}} \tag{4.27}$$

$$i_o = \frac{V_1}{R} \cdot \frac{1}{1 + j\frac{\omega RC_e}{6}} \tag{4.28}$$

$$i_o = \frac{V_1}{R \cdot \left(1 + \left(j \cdot \frac{\omega RC_e}{6}\right)^2\right)} \cdot \left(1 - j \cdot \frac{\omega RC_e}{6}\right) \tag{4.29}$$

$$i_o = \frac{V_1}{R} \cdot \left(1 - j \cdot \frac{\omega RC_e}{6}\right) \tag{4.30}$$

akım ifadesi elde edilir. Toprak ucundaki akımın faz açısı $-\frac{\omega RC_e}{6}$ olduğu görülmektedir. Benzer yaklaşımla yüksek gerilim ucundaki akım,

$$i_1 = \frac{V_1}{R \cdot \left(1 + \left(\frac{j\omega RC_e}{6}\right)^2\right)} \cdot \left(1 + \frac{\omega RC_e}{12} + j \cdot \frac{\omega RC_e}{3}\right) \tag{4.31}$$

$$i_1 = \frac{V_1}{R \cdot \left(1 + \left(\frac{j\omega RC_e}{6}\right)^2\right)} \cdot \left(1 + j \cdot \frac{\omega RC_e}{3}\right) \tag{4.32}$$

$$i_1 = \frac{V_1}{R} \cdot \left(1 + j \cdot \frac{\omega RC_e}{3}\right) \tag{4.33}$$

olur. Ekran potansiyelinin sıfır (toprakta) olması durumundaki yüksek gerilim ucundaki akımın faz açısının $+\frac{\omega RC_e}{3}$ olduğu görülmektedir.

4.4.2 Direnç Ekranının Gerilim Altında Olması Durumu

Ekran potansiyeli $P = \frac{V_1}{2}$ olursa 1. durumdaki benzer yaklaşımlarla yüksek gerilim ve toprak ucundaki akımlar,

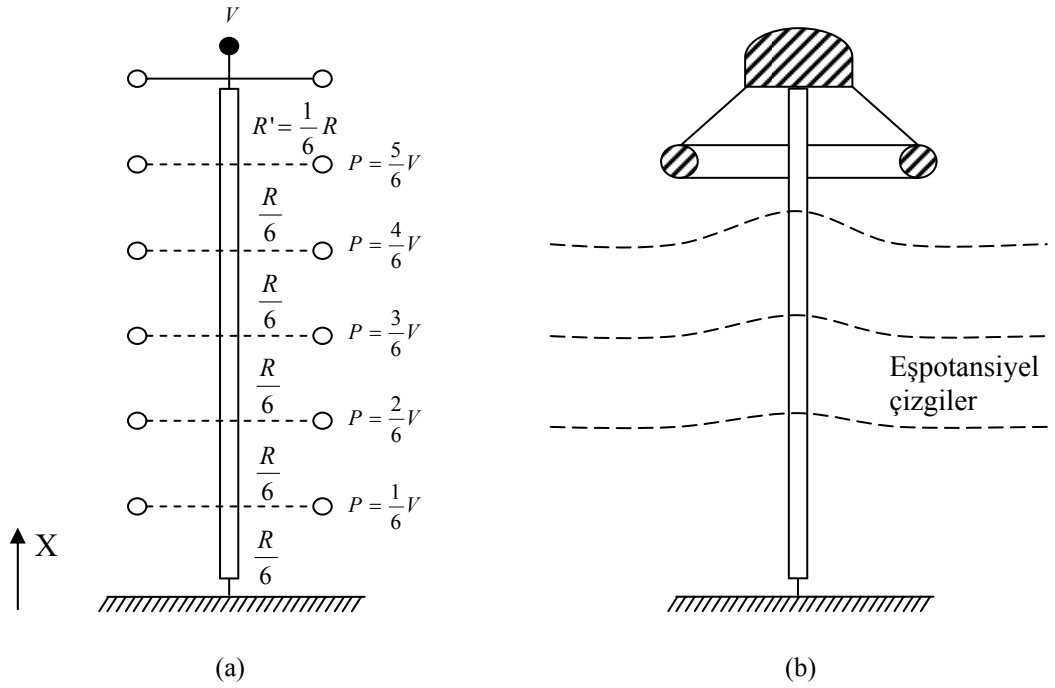
$$i_o = \frac{V_1}{R} \cdot \left(1 + j \cdot \frac{\omega RC}{12}\right) \tag{4.34}$$

$$i_1 = \frac{V_1}{R} \cdot \left(1 + j \cdot \frac{\omega RC}{12}\right) \tag{4.35}$$

bağıntıları biçiminde bulunur. Buna göre her iki akım ifadesinin de aynı olduğu görülmektedir. (4.30) bağıntısındaki akımın faz açısının negatif olması, çıkış akımının frekansla birlikte genliğinin arttığını göstermektedir. Bu olay daima yüksek gerilime olan kaçak kapasite ile ilişkilidir. 2. durumda söz edilen ekran potansiyelinin $V_1/2$ olması, bölücünün atlama gerilimini azaltacağından pratik olarak yapımı oldukça zordur. Bunun yerine Şekil 4.6'da gösterilen iki yöntem kullanılmaktadır. Bölücü boyunca kullanılan kademeli elektrot adı verilen alan düzenleme elektrodu yapısı ve tek bir ana elektrot yapısı yukarıda anlatılan ve yapılması gereken ekran potansiyeline uygun düşmektedir [2]. Kademeli elektrotların gerilim altında olması, maliyetler ve her kademedeki elektrodun sabit potansiyelde tutulmasının zorluğundan dolayı pek tercih edilmemektedir. Ekranlamanın alternatif yolu olan tek yüksek gerilim elektrodu kullanmak daha yaygındır. (4.30) ve (4.33) bağıntıları toprağa ve yüksek gerilim elektroduna göre kaçak kapasitelerin etkisinin ters olduğunu göstermektedir. Bu yüzden uygun tek elektrot sisteminin Şekil 4.6(b) de gösterildiği gibi dereceli elektrot sisteminin sağladığı eşpotansiyel dağılımı sağlayabilmektedir. Direncin x yönünde lineer bir dağılım sağlamak pratikte oldukça güçtür. UME yüksek gerilim bölücüsünde de düzgün elektrik alan dağılımının sağlanması amacıyla toroid elektrot sistemi kullanılmıştır.

4.5 Elektrodun Elektrik Alan Analizi

Yüksek gerilim bölücüsü boyunca elektrik alan dağılımının düzgün olma zorunluluğu, yüksek gerilimlerin belirli bir hassasiyette ölçülebilme gerekliliğini zorunlu kılmaktadır. Alan dağılımının hesabı oldukça karmaşıktır ve bu tür elektrostatik problemlerin çözümü için birçok sayısal yöntemden yararlanılmaktadır

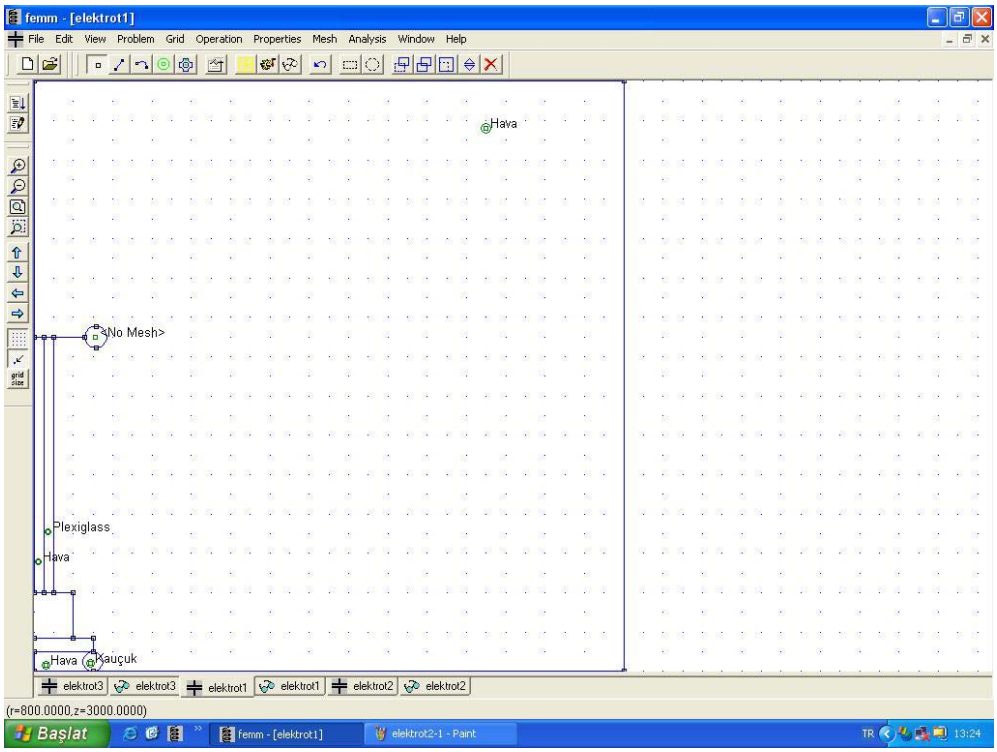


Şekil 4.6: Yüksek gerilim bölücüsünün ya da direncinin ekranlanması için uygun yöntemler (a) Kademeli elektrot sistemi (b) Tek elektrot sistemi [2].

. Sonlu Farklar Yöntemi, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Yük Benzetim Yöntemi, Monte-Carlo Yöntemi ve Sınır Elemanları Yöntemi bu sayısal yöntemlerden bazılarıdır [65]. Ancak sistemlerin ve problemlerin karmaşıklığı ve düzgün olmamaları nedeniyle, bu yöntemleri kullanarak çözüme ulaşmak için bilgisayar destekli analiz yapmak çözümün kolaylaştırılması açısından oldukça önemlidir.

Tasarımı yapılan gerilim bölücünün alan dağılımının incelenmesi sırasında temeli Sonlu Elemanlar Yöntemi'ne (SEY) dayanan FEMM (Finite Element Method Magnetics) Version 4.0 serbest kullanım bilgisayar programından yararlanılmıştır. EK-C'de belirtildiği gibi, farklı tipte elektrot düzenekleri ve sistemlerin oluşturduğu bölgenin sonlu elemanlara bölünmesi, boyutları, konumları ve biçimleri isteğe bağlı olarak seçilen elemanlarla yapılabilmektedir. Bu elemanlar, bir boyutlu problemlerde

doğru parçaları şeklinde, iki boyutlu problemlerde üçgen, kare, dikdörtgen veya çokgen gibi şekillerde, üç boyutlu problemlerde ise küp, prizma, dörtyüzlü vb. şekillerde olabilir. Bölge içindeki eleman sayısı ve dağılımı (yoğunluğu) çözümün doğruluğuna etki eden etkenlerdir. Üçgen elemanların tanımlanması, elemanların ve köşe (düğüm) noktalarının numaralandırılması ve koordinatlarının belirlenmesi demektir. Elemanların tanımlanması ve bunların bölgenin sınırlarına uydurulması işlemi, sonlu elemanlar programında genelde bilgisayarla otomatik olarak yapılır (automatic mesh generation). Elle ayrıklaştırma az sayıda elemanla çözülecek problemler için uygun olabilir [62, 66]. Yüksek gerilim bölücüsünün elektrot tasarımı ile ilgili olarak, FEMM programında üç farklı tipte elektrot yapısı analiz edilmiş ve sonuçlar, alan dağılımı, potansiyel dağılımı ve kaçak kapasite cinsinden değerlendirilmiştir.

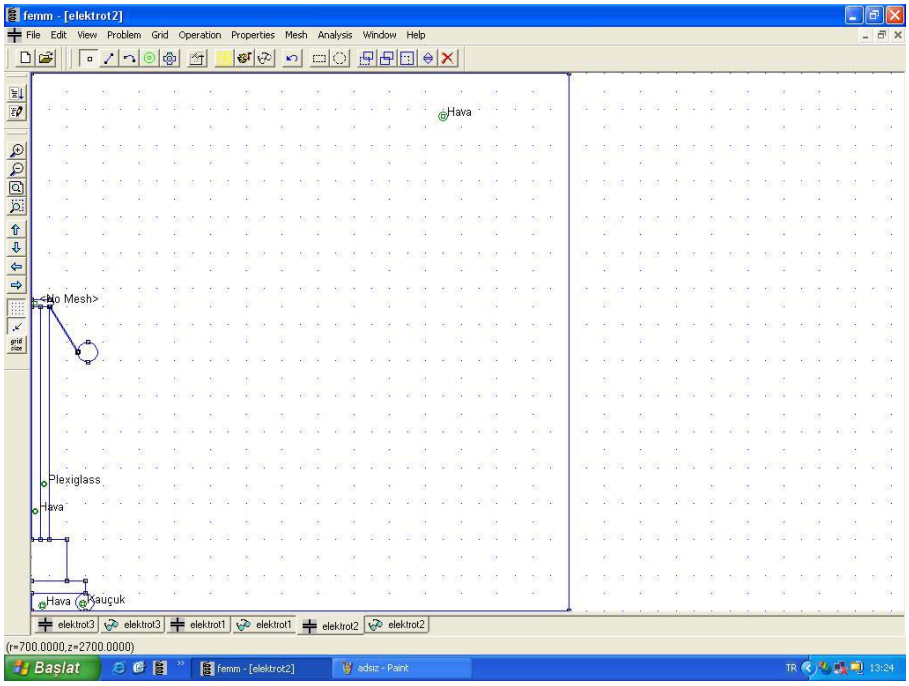


Şekil 4.7: Birinci elektrot sisteminin sonlu elemanlar yöntemi modeli

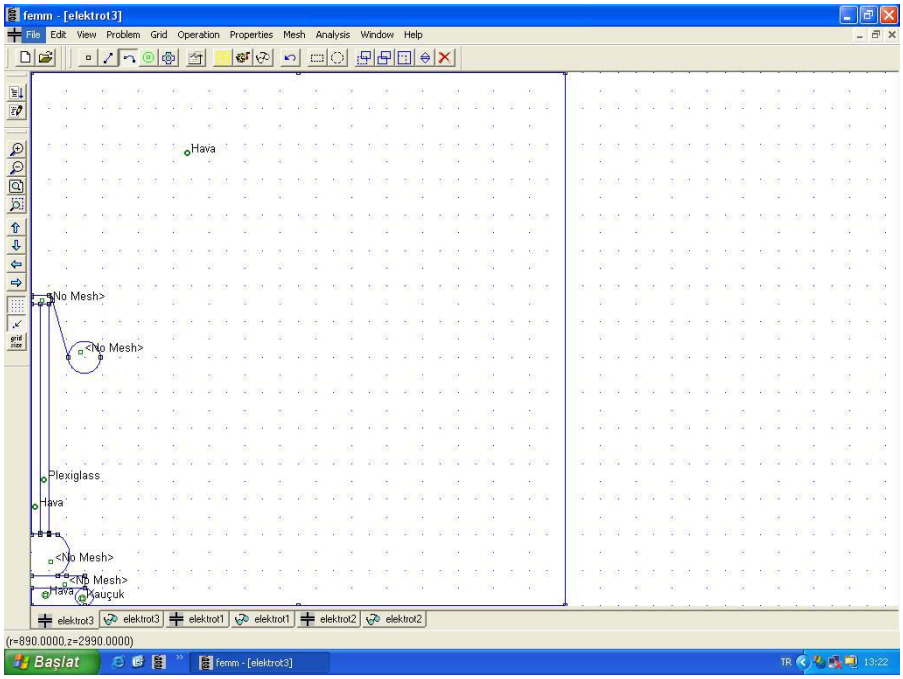
Analizi yapılan elektrot düzenleri 1., 2. ve 3. elektrot sistemi olarak adlandırılmıştır. Programa boyut bilgileri olarak bölücünün birebir ölçüleri girilmiştir. 1. elektrot sisteminde toroid elektrot bölücünün en üst noktasına yerleştirilmiş ve alt elektrot olarak ise alüminyum kasa seçilmiştir. 2. elektrot sisteminde mevcut toroid elektrot bölücünün üst noktasından yaklaşık 25 cm aşağıya çekilmiş ve alt elektrot ise 1.

elektrot sistemindeki durumunu korumuştur. 3. elektrot sisteminde ise üst elektrot, 2.elektrot sistemindeki yapısını korumuş ve alt bölüme ise çapı 40 cm ve yüksekliği 30 cm olan bir elektrot yerleştirilmiştir. 1. elektrot sisteminin FEMM analizi yapıldıktan sonra üst elektrodun üzerinde ve alt kutunun sivri bölgelerinde alan şiddetinin çok yüksek olduğu saptanmıştır (Şekil 4.7). Bu elektrot düzenine göre elektrik alan şiddetinin mutlak değer olarak en büyük radyal bileşeni E_r = 5781.77 V/m ve en büyük eksenel bileşeni E_z = 6660.13 V/m elde edilmiştir.

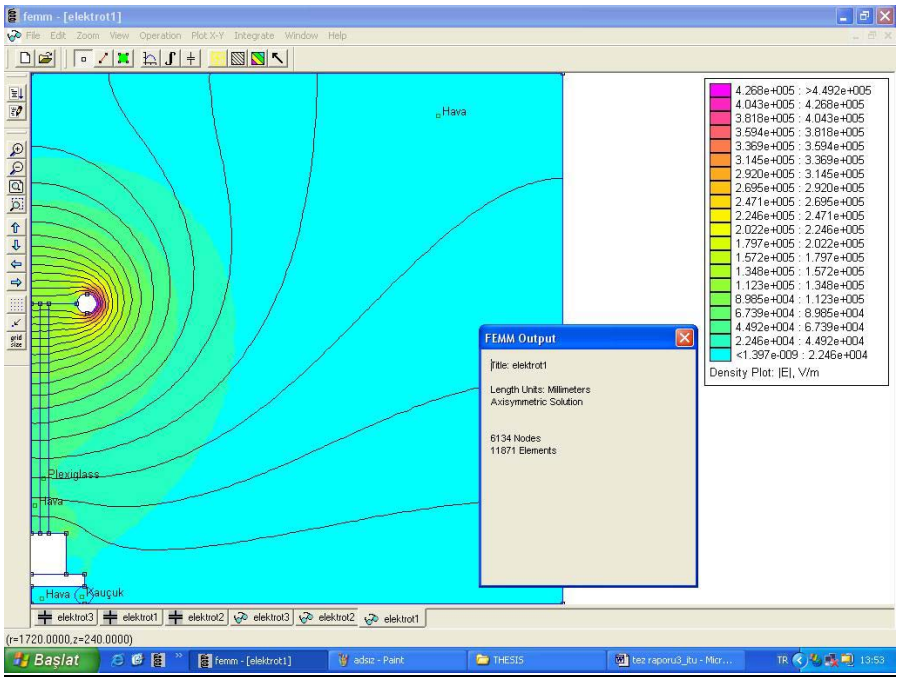
Yapıdaki elektrot düzenlerinin değiştirilmesi ve düzeltilmesi yoluna gidilmiştir. Bu kapsamda 2. elektrot sistemi oluşturulmuştur. Üst elektrot bölücü boyunun %20'si kadar aşağıya çekilmiştir. Ancak alt taraftaki kutunun yaratmış olduğu alan şiddeti yapılan değişikliğin yeterli düzeltmelere yol açmadığını ortaya koymuştur (Şekil 4.8).



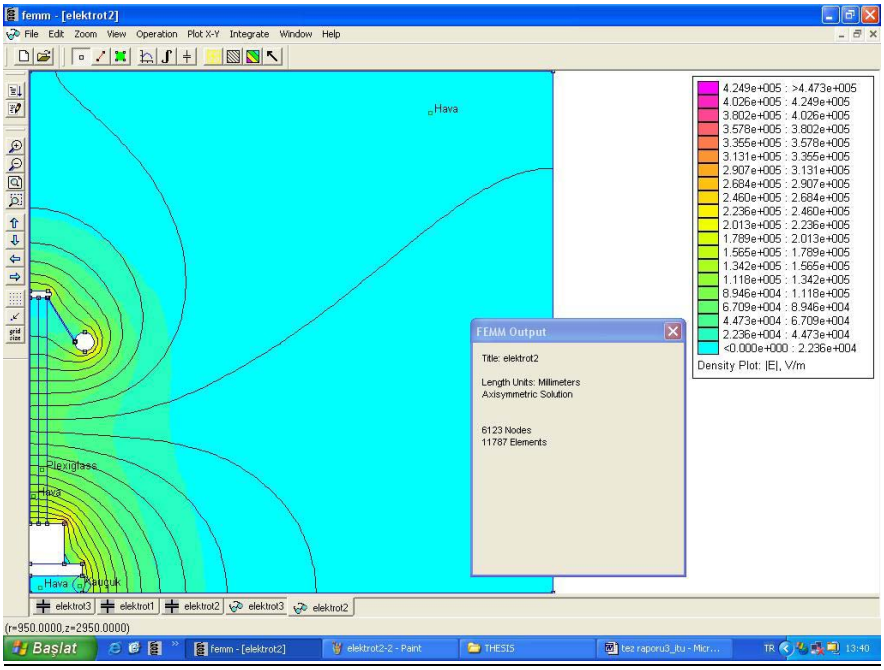
Şekil 4.8: İkinci elektrot sisteminin sonlu elemanlar yöntemi modeli



Şekil 4.9: Üçüncü elektrot sisteminin sonlu elemanlar yöntemi modeli

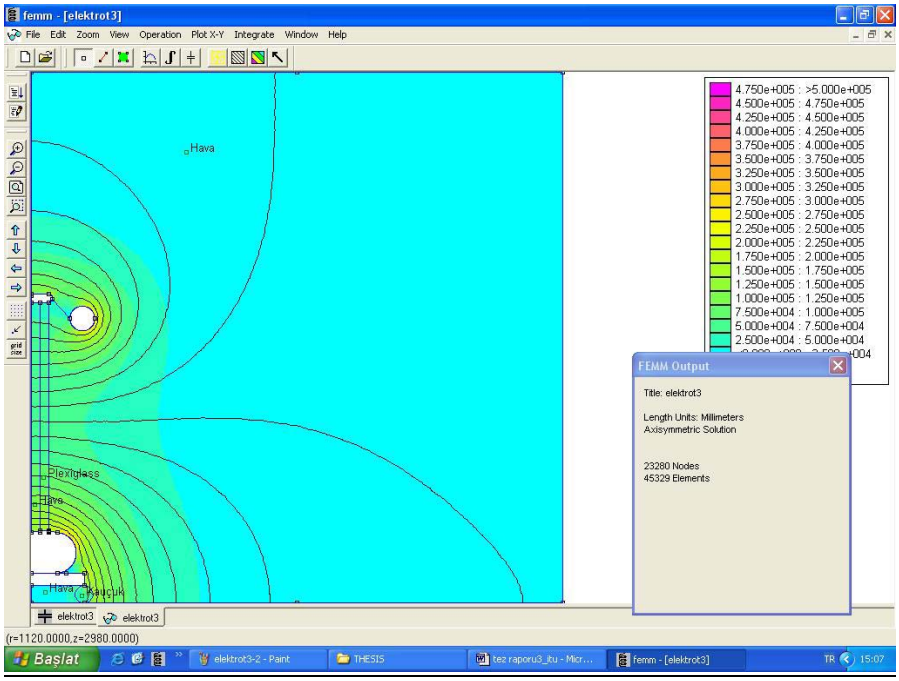


Şekil 4.10: Birinci elektrot sisteminin alan dağılımı



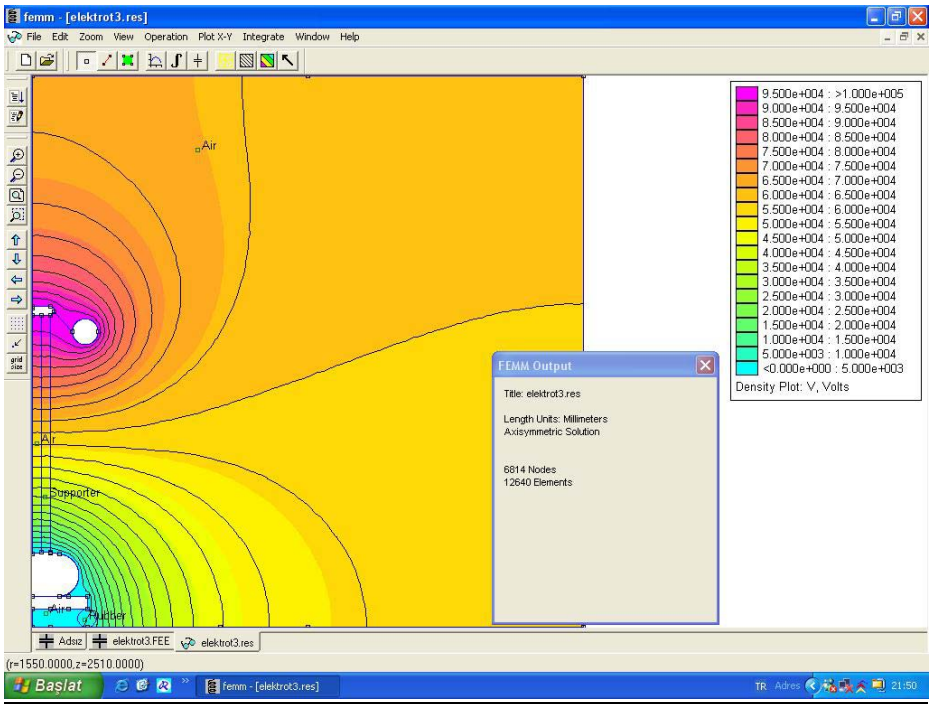
Şekil 4.11: İkinci elektrot sisteminin alan dağılımı

2. elektrot sistemi üzerinde düzeltmeler ve değişiklikler yapılarak bölücü boyunca elektrik alanın düzgün dağılımının sağlanması amaçlanmıştır. 100 mm çapa sahip üst elektrot kullanılmış ve çapı 400 mm, yüksekliği 300 mm olan alçak gerilim elektrodu kullanılmıştır (Şekil 4.9).



Şekil 4.12: Üçüncü elektrot sisteminin alan dağılımı

3. elektrot düzenine göre elektrik alan şiddetinin mutlak değer olarak en büyük radyal bileşeni E_r = 97.09 V/m ve en büyük eksenel bileşeni E_z = 2867.82 V/m elde edilmiştir.



Şekil 4.13: Üçüncü elektrot sisteminin potansiyel dağılımı

3. elektrot sistemindeki alan dağılımı ve şiddeti diğer elektrot sistemlerini göre en uygun sonuçlar vermiştir (Şekil 4.12). Sistemin potansiyel dağılımı Şekil 4.13'de gösterilmiştir.

BÖLÜM 5 YÜKSEK DOĞRU GERİLİM BÖLÜCÜSÜ PERFORMANS DENEYLERİ

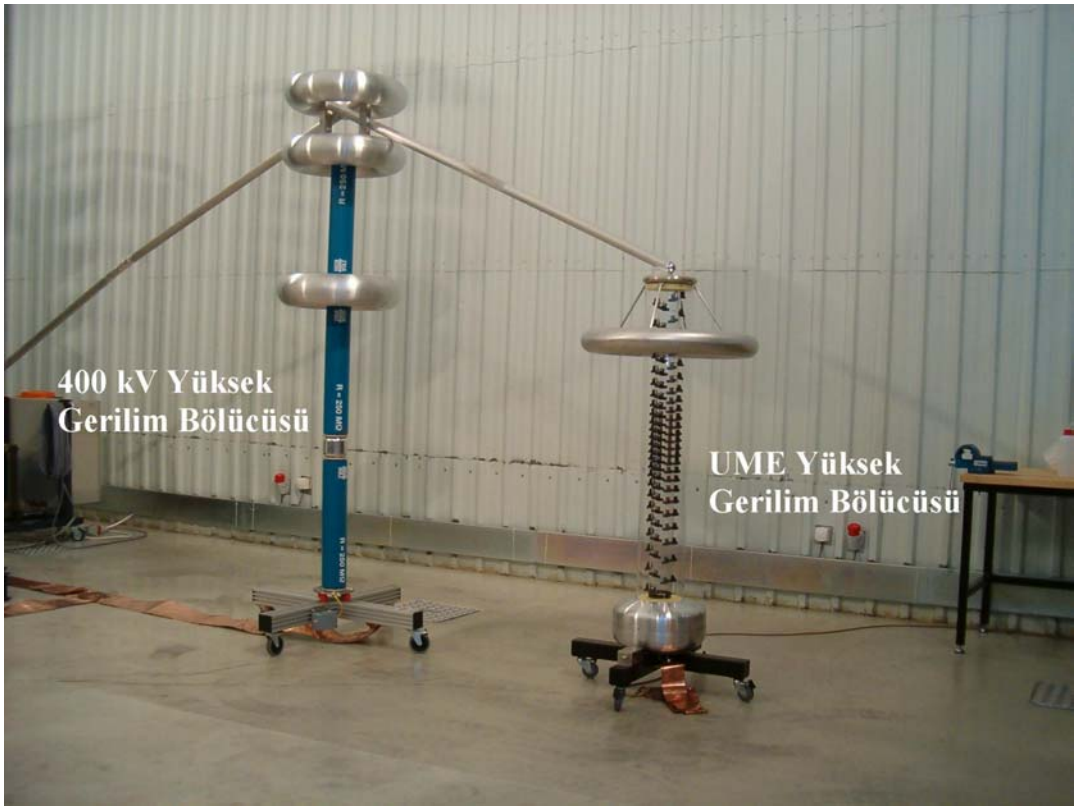
5.1 Giriş

Yüksek doğru gerilim bölücüsü tasarlanırken göz önünde bulundurulan teorik hesaplamaların uygulamadaki sonuçlarının görüldüğü ortamlar, bölücünün yüksek gerilim altındaki davranışının görüldüğü performans deneyleridir. Bölücünün anma gerilimi altında gerçekleştirilen deneyler ile bölücünün performansı ortaya konulmuştur. Belirsizlik bütçesinin de oluşturulmasında çok önemli katkıları olan deneyler aşağıda sıralanmışlardır:

- Anma yüksek doğru gerilimde bölücünün çevirme oranının zamanla değişiminin ve bölücü kararlılığının belirlenmesi deneyi,
- Uzun süreli yüksek doğru gerilim altında kalan gerilim bölücünün sıcaklık dağılımının belirlenmesi deneyi (sıcaklık etkisi),
- Farklı yüksek doğru gerilimler altında bölücünün çevirme oranının doğrusallığının belirlenmesi deneyi,
- Farklı yüksek alternatif gerilimler altında bölücünün çevirme oranının belirlenmesi deneyi,
- Gerilim bölücünün 50 Hz şebeke frekansındaki kısmi boşalma deneyi (kısmi boşalma (PD) etkisi),
- Yüksek doğru gerilimde korona deneyi ve korona başlangıç geriliminin belirlenmesi,
- Yüksek doğru gerilimde yalıtım elemanlarının neden olduğu kaçak akımların belirlenmesi,
- Birim basamak yanıtının belirlenmesi,

5.2 Kararlılık Deneyi

Duyarlı yüksek doğru gerilim ölçmeleri için en önemli koşul, bölücülerdeki direnç elemanlarının sıcaklıkla değişimlerinin minimum olması ve bölücünün çevirme oranının bu değişimlerden en az etkilenmesidir. Bu nedenle tasarımı yapılan bölücünün anma gerilim altındaki çevirme oranının sabit kaldığı çalışma bölgesinin belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca çalışma bölgesi belirlenen bölücünün çevirme oranının önceki bölümlerde belirtilen teorik çalışmalarla hesaplanan değerlerle karşılaştırılması, izlenen yolun geçerliliği açısından da büyük önem kazanmaktadır.



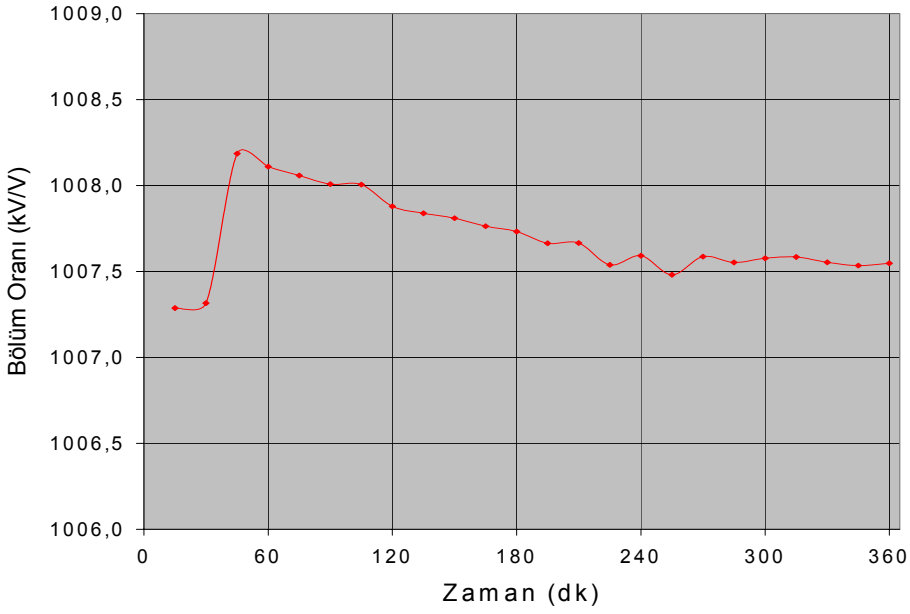
Şekil 5.1: Doğrusallık deney düzeneği

Kararlılık deneyi, gerilim bölücüye 6 saat boyunca 100 kV doğru gerilim uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Her 15 dakikada bir gerilim bölücünün çıkış gerilimi ölçülmüştür. Deney düzeneği Şekil 5.1'de gösterilmektedir. Kararlılık deneyinde kullanılan referans ve yardımcı aletler Tablo 5.1'de belirtilmiştir. Deneyde 0.4 mV/V ölçüm belirsizliğine sahip UME yüksek doğru gerilim referans ölçüm sistemi kullanılmıştır.

Tablo 5.1: Kararlılık deneyinde kullanılan aletler ve donanımlar

Donanım Adı	Marka/Model	Teknik Özelikleri	Kalibrasyon
Yüksek doğru gerilim kaynağı	HIGHVOLT/ LS1	Dalgalılık < 0.01%	UME2005
Yüksek doğru gerilim bölücüsü	HIGHVOLT/ GMR 800/400	750 MΩ	3241PTB04
Tepe Değer Ölçü Aleti	HIGHVOLT/MU17	1000 V maksimum giriş, çevirme oranı girişli	3242PTB04
Dijital Multimetre	HP/3458A	8.5 dijit multimetre	UME2004
Referans sisteme ait ölçü kablosu	L34/15	50 Ω, 15 m, çift ekranlı, N-tipi koaksiyel kablo	3242PTB04
Denenen bölücüye ait ölçü kablosu	L34/15	50 Ω, 15 m, çift ekranlı, N-tipi koaksiyel kablo	---

Gerilim bölücünün kararlılık deneyi sonucunda, gerilim bölücünün çevirme oranının 4-6 saat arasında kararlı hale geldiği ve bu sabit değerin 1007.5 olduğu belirlenmiştir. Bölüm 3.8'de elde edilen teorik çevirme oranı ile 1007.5 pratik değeri arasındaki fark, Bölüm 3.6'da da belirtildiği gibi kullanılan ölçü aletinin giriş empedansının çevirme oranına olan etkisinden ve referans ölçüm sisteminin yüksek belirsizliğinden kaynaklanmaktadır. Şekil 5.2'de çevirme oranının zamanla değişimi ve Tablo 5.2'de kararlılık deneyinin sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.2: Çevirme oranının zamanla değişimi

Tablo 5.2: Kararlılık deneyi sonuçları

Süre (Dakika)	Uygulanan Gerilim (kV)	Ölçülen Gerilim (V)	Standart Sapma (mV)	Çevirme Oranı
0	-	-	-	-
15	100.2	99.47509	3.82	1007.3
30	100.2	99.47223	3.56	1007.3
45	100.3	99.48561	3.22	1008.2
60	100.3	99.49305	3.14	1008.1
75	100.3	99.49819	2.01	1008.1
90	100.3	99.50315	2.03	1008.0
105	100.3	99.50343	4.83	1008.0
120	100.3	99.51591	3.65	1007.9
135	100.3	99.51992	4.28	1007.8
150	100.3	99.52273	2.73	1007.8
165	100.3	99.52731	3.38	1007.8
180	100.3	99.53036	4.01	1007.7
195	100.3	99.53715	3.32	1007.7
210	100.3	99.53696	4.50	1007.7
225	100.3	99.54956	3.14	1007.5
240	100.3	99.54429	2.88	1007.6
255	100.3	99.55520	3.61	1007.5
270	100.3	99.54479	2.65	1007.6
285	100.3	99.54811	3.66	1007.6
300	100.3	99.54575	2.77	1007.6
315	100.3	99.54501	3.88	1007.6
330	100.3	99.54804	3.16	1007.6
345	100.3	99.54993	4.08	1007.5
360	100.3	99.54858	3.61	1007.5

5.3 Sıcaklık Dağılım Deneyi

Yüksek gerilim bölücüsünde kullanılan dirençlerin 3 farklı noktadaki yüzey sıcaklıklarının belirlendiği Bölüm 3.2'de belirtilmiştir. Buna göre, dirençlerin en çok ısındığı orta bölgedeki yüzey sıcaklığının 35 ^{o}C'ye yakın değerlerde olduğu, ısıl dağılım ve güç faktörü etkisinden dolayı da diğer noktalardaki ısının daha düşük olduğu belirlenmiştir. 100 adet direncin sıralandığı gerilim bölücüde, taşıyıcı elemanların ısı tutma özelliğinden dolayı bölücünün toplam ısısı yükselir. Anma

geriliminde ve farklı zaman dilimleri içinde ısıl kamera kullanılarak yüksek gerilim bölücüsünde sıcaklık dağılımı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Gerilim bölücüsü çevirme oranının kararlı hale geldiği durumdaki sıcaklık dağılımı ve sıcaklık ortalaması, tasarım öncesi yapılan hesaplamaların doğruluğu açısından önem taşımaktadır. Deneyde kullanılan referans ve yardımcı cihazlar Tablo 5.3'de belirtilmiştir. Deney düzeneği Şekil 5.3'de gösterilmektedir.

Tablo 5.3: Sıcaklık dağılımı deneyinde kullanılan aletler ve donanımlar

Donanım Adı	Marka/Model	Teknik Özelikleri	Kalibrasyon
Yüksek doğru gerilim kaynağı	HIGHVOLT/ LS1	Dalgalılık < 0.01%	UME2005
Yüksek doğru gerilim bölücüsü	HIGHVOLT/ GMR 800/400	750 MΩ	3241PTB04
Tepe Değer Ölçü Aleti	HIGHVOLT/MU17	1000 V maksimum giriş, çevirme oranı girişli	3242PTB04
Isıl Kamera	AGEMA 570	Maksimum Sıcaklık: 2000 ^{o}C	---
Dijital Multimetre	HP/3458A	8.5 dijit multimetre	UME2004
Referans sisteme ait ölçü kablosu	L34/15	50 Ω, 15 m, çift ekranlı, N-tipi koaksiyel kablo	3242PTB04
Denenen bölücüye ait ölçü kablosu	L34/15	50 Ω, 15 m, çift ekranlı, N-tipi koaksiyel kablo	---

Gerilim bölücünün ısıl dağılımı, her 15 dakikada bir kamera ile 3 noktada belirlenmiştir. Bu 3 nokta; üst, orta ve alt nokta olarak adlandırılmıştır. Üst nokta, gerilim bölücüsünün en üst noktasından yaklaşık 200 mm aşağısı; alt nokta, gerilim bölücüsünün en alt noktasından yaklaşık 200 mm yukarısı ve orta nokta ise bölücünün orta bölgesi olarak seçilmiştir. Her ölçüm sonucunda ısıl kamera ile sıcaklık dağılımının fotoğrafları çekilmiştir.

Gerilim bölücünün sıcaklık dağılımı deneyi sonucunda, gerilim bölücünün çevirme oranının kararlı duruma ulaştığı 4 saat sonra, sıcaklık dağılımının 36 ^{o}C civarında olduğu saptanmıştır. Elde edilen bu değer, ısıl kamera ile 3 noktada yapılan ölçümlerin ortalamasıdır ve tüm ölçüm sonuçları Tablo 5.4'de verilmiştir.

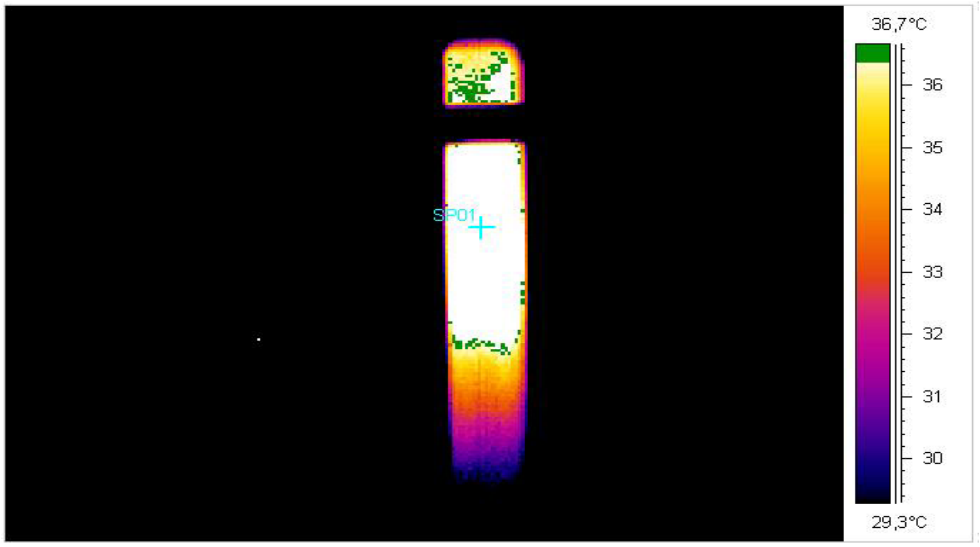


Şekil 5.3: Isıl kamera ve gerilim bölücü

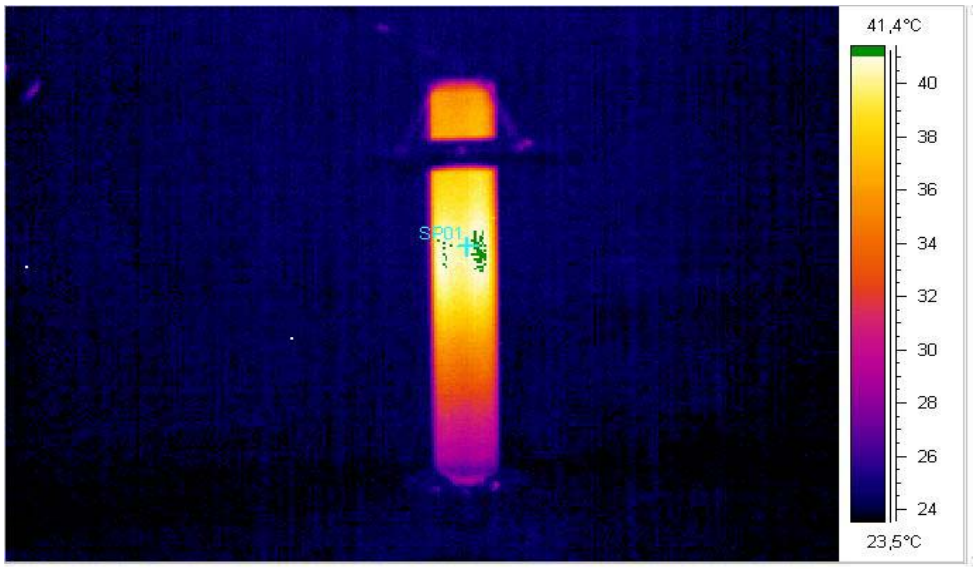
Bölücünün ısıl dağılım görüntüleri Ek-D'de verilmiştir. Şekil 5.4'de gerilim bölücünün 240 ve 360. dakikalardaki ısıl dağılımı gösterilmektedir. Sıcaklık dağılımı ölçümleri yapılırken deneyin gerçekleştirildiği UME Yüksek Gerilim Laboratuarı'nın nem, sıcaklık ve basınç bilgileri kaydedilmiştir. İlgili deney standartlarında belirtildiği gibi, bağıl hava yoğunluğu (δ_1) ve nem düzeltme katsayısı (δ_2) hesaplanmış ve ortam düzeltme katsayısı (δ_t) belirlenmiştir [8].

Tablo 5.4: Anma geriliminde bölücünün sıcaklık dağılım deneyi sonuçları

Süre (Dakika)	Bağıl Hava Yoğunluğu (δ_1)	Nem Düzeltme Katsayısı (δ_2)	Ortam Düzeltme Katsayısı ($\delta_t = \delta_1 \times \delta_2$)	Ölçülen Sıcaklık (^oC)			Ortalama Sıcaklık (^oC)
				Üst	Orta	Alt	
0	0.972	1.005	0.977	24.8	24.9	24.9	24.9
15	0.972	1.005	0.977	27.7	29.8	26.8	28.1
30	0.972	1.005	0.977	30.2	33.0	28.9	30.7
45	0.972	1.005	0.977	32.6	36.2	28.6	32.5
60	0.972	1.004	0.976	33.2	36.1	29.6	33.0
75	0.972	1.003	0.975	35.1	38.5	30.3	34.6
90	0.972	1.003	0.975	35.1	38.7	30.3	34.7
105	0.971	1.003	0.974	35.4	38.9	30.4	34.9
120	0.971	1.003	0.974	35.3	38.8	29.2	34.4
135	0.971	1.003	0.974	35.7	39.4	30.8	35.3
150	0.971	1.007	0.978	35.8	39.2	30.4	35.1
165	0.971	1.009	0.980	35.9	39.8	30.6	35.4
180	0.972	1.011	0.983	36.1	39.9	31.0	35.7
195	0.972	1.013	0.985	36.1	40.1	30.4	35.5
210	0.972	1.013	0.985	36.3	40.1	30.9	35.8
225	0.973	1.014	0.987	36.3	40.2	31.2	35.9
240	0.972	1.013	0.985	36.1	39.9	31.1	35.7
255	0.972	1.016	0.988	36.1	40.3	30.6	35.7
270	0.972	1.017	0.989	36.0	40.2	31.6	35.9
285	0.973	1.016	0.989	36.6	40.3	31.5	36.1
300	0.972	1.017	0.989	35.8	40.2	31.6	35.9
315	0.972	1.017	0.989	36.1	40.2	30.3	35.5
330	0.972	1.017	0.989	36.3	40.0	31.4	35.9
345	0.972	1.017	0.989	36.3	40.4	30.6	35.8
360	0.972	1.017	0.989	36.1	40.4	31.6	36.0



(a)



(b)

Şekil 5.4: Gerilim bölücünün 240. (a) ve 360. (b) dakikalardaki sıcaklık dağılımı

5.4 Doğrusallık Deneyi

Yüksek gerilim bölücüsünde kullanılan dirençler arasından seçilen 10 adet birim direncin gerilim katsayılarının belirlenmesi köprü yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve Bölüm 3.4'te anlatılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre dirençlerin gerilim katsayılarının ±0.05 ppm/V'dan küçük olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada

100 adet 1 MΩ'luk dirençten oluşan yüksek gerilim bölücüsünün doğrusallığı saptanmıştır.

Tablo 5.5: Doğrusallık deneyinde kullanılan aletler ve donanımlar

Donanım Adı	Marka/Model	Teknik Özelikleri	Kalibrasyon
Yüksek doğru gerilim kaynağı	HIGHVOLT/ LS1	Dalgalılık < 0.01%	UME2005
Yüksek doğru gerilim bölücüsü	HIGHVOLT/ GMR 800/400	750 MΩ	3241PTB04
Tepe Değer Ölçü Aleti	HIGHVOLT/MU17	1000 V maksimum giriş, çevirme oranı girişli	3242PTB04
Dijital Multimetre	HP/3458A	8.5 dijit multimetre	UME2004
Referans sisteme ait ölçü kablosu	L34/15	50 Ω, 15 m, çift ekranlı, N-tipi koaksiyel kablo	3242PTB04
Denenen bölücüye ait ölçü kablosu	L34/15	50 Ω, 15 m, çift ekranlı, N-tipi koaksiyel kablo	---

Yüksek gerilim bölücüsünün gerilim kararlılığı deneyi, bölücüye 5, 50 ve 100 kV uygulanması ve bölücünün ısınmasına olanak tanınmadan anlık bölünmüş değerin ölçülmesi suretiyle gerçekleştirilmiştir. Referans ölçüm sistemi olarak, % 0.8 ölçme belirsizliğine sahip UME Yüksek Gerilim Laboratuvarı referans ölçüm sistemi kullanılmıştır. Deneyde kullanılan referans ve yardımcı cihazlar Tablo 5.5'de belirtilmiştir. Deney sırasında laboratuvar ortam koşulları sıcaklık 23.1^{o}C, bağıl nem % 42 ve hava basıncı 992 mbar'dır. Ölçme sonuçları Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6: Doğrusallık deney sonuçları

Referans Ölçüm Sisteminden Uygulanan Gerilim (kV)	Ölçüm Sistemindeki Ölçülen Gerilim (V)	Çevirme Oranı (kV/V)
5.10	5.063	1007.3
50.0	49.627	1007.5
100.1	99.364	1007.4

5.5 Farklı Yüksek Alternatif Gerilimler Altında Bölücünün Çevirme Oranının Belirlenmesi Deneyi

Yapımı tamamlanan gerilim bölücüsü aynı zamanda yüksek alternatif gerilimlerin ölçülmesinde de kullanılabilmektedir. Bu amaçla, cihazın deneyleri arasına 50 Hz şebeke frekanslı yüksek alternatif gerilim altında çevirme oranının belirlenmesi deneyi katılmıştır. Deneyde referans ölçüm sistemi olarak UME Yüksek Gerilim Laboratuvarı yüksek alternatif gerilim referans ölçüm sistemi kullanılmıştır. Ölçümlerdeki belirsizlik 5 mV/V'dur. Deneyde kullanılan alet ve donanımlar Tablo 5.7'de verilmiştir.

Tablo 5.7: Yüksek alternatif gerilimler altında bölücünün çevirme oranının belirlenmesi deneyinde kullanılan aletler ve donanımlar

Donanım Adı	Marka/Model	Teknik Özelikleri	Kalibrasyon
Test Transformatörü	HIGHVOLT/ PEOI 200/4	400 kV, 200 kVA, 1 fazlı	---
Alternatif akım yüksek gerilim bölücüsü	HIGHVOLT/ MCP 400	400 kV, 50/60 Hz, 100 pF, SF_6 yalıtımlı	3241-3244PTB04
Tepe Değer Ölçü Aleti	HIGHVOLT/MU17	1000 V maksimum giriş, çevirme oranı	3242PTB04
Referans sisteme ait ölçü kablosu	L34/15	50 Ω, 15 m, çift ekranlı, N-tipi koaksiyel kablo	3242PTB04
Ölçüm sistemine ait multimetre	HP/3458A	8.5 dijit multimetre	UME2004
Sönümlendirici empedans	HIGHVOLT / LS 1/400	400 kV	---

Deneyler, 50 kV ve 100 kV tepe değerli yüksek doğru gerilimlere karşılık gelen yaklaşık 35 kV ve 71 kV etkin değerli yüksek alternatif gerilimler uygulanmıştır. Ölçü aletlerinden okunan değerler sürekli salınımlar yaptığından, her gerilim kademesi için 12'şer anlık ölçümler alınmış ve BS EN 60060-2:1995 standardında belirtilen çevirme oranı belirleme yöntemi kullanılmıştır. Ölçme sonuçları Tablo 5.8'de verilmiştir. Buna göre alınan toplam 24 değerin ortalaması olan 1011.2, gerilim bölücünün şebeke frekanslı yüksek alternatif gerilimler için çevirme oranıdır.

Tablo 5.8: Yüksek alternatif gerilimde bölücünün çevirme oranının belirlenmesi deney sonuçları

Referans Ölçüm Sisteminden Uygulanan Gerilim (kV)	Ölçüm Sistemindeki Ölçülen Gerilim (V)	Çevirme Oranı (kV/V)
72.99	72.25	1010.2
72.99	72.07	1012.8
73.12	72.14	1013.6
73.05	72.19	1011.9
72.02	72.08	999.2
72.75	71.99	1010.6
73.35	72.84	1007.0
73.11	72.22	1012.3
73.02	72.12	1012.5
73.06	72.26	1011.1
73.24	72.24	1013.8
73.38	72.34	1014.4
34.98	34.58	1011.6
34.98	34.59	1011.3
35.12	34.76	1010.4
35.21	34.84	1010.6
35.16	34.80	1010.3
35.15	34.71	1012.7
35.25	34.78	1013.5
35.29	34.79	1014.4
35.10	34.68	1012.1
35.09	34.66	1012.4
35.10	34.67	1012.4
35.09	34.78	1008.9
	Ortalama:	1011.2

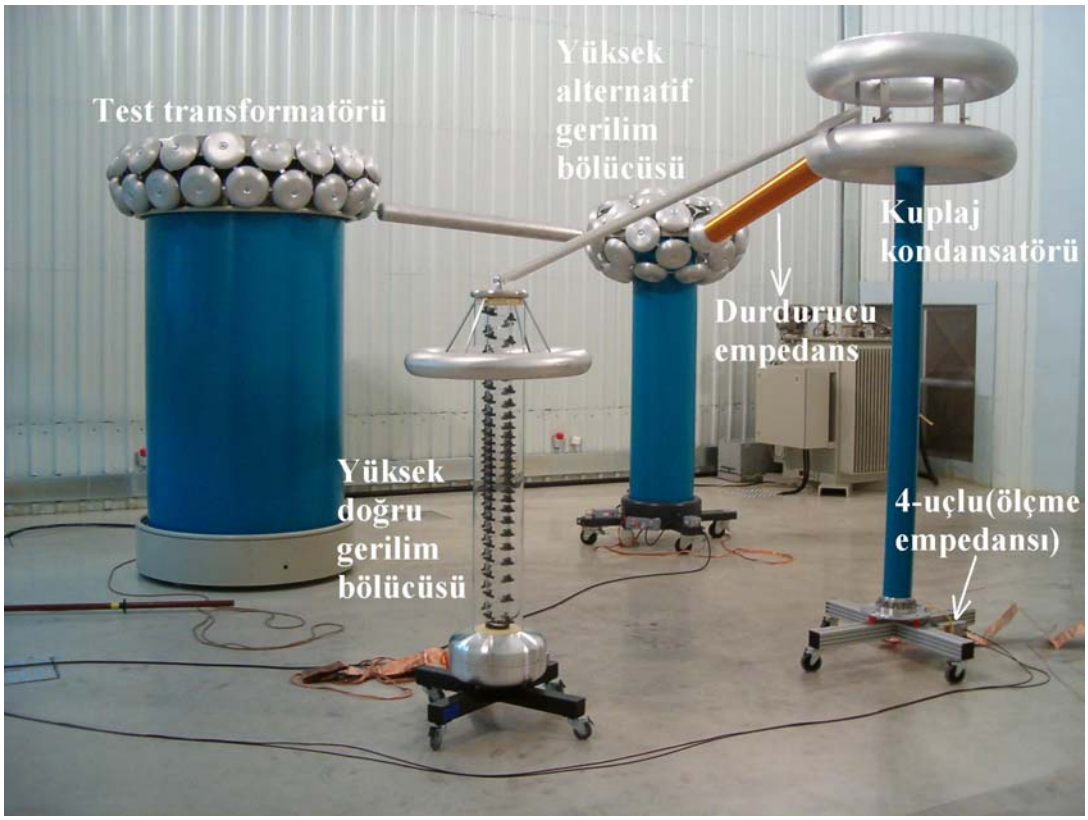
5.6 Kısmi Boşalma (PD) Deneyi

Kısmi boşalmalar iç ve dış kısmi boşalmalar olarak iki grupta toplanmaktadır. İç kısmi boşalmalar, katı ya da sıvı yalıtkan ortamlarda varolan boşluklarda meydana

gelir. Elektrik alan şiddeti, belli bir eşik gerilim değerini aştığında boşlukta yaratacağı tam olmayan ancak kendi kendi besleyen kısmi boşalmalara neden olurlar ve bu boşalmalar boşluğun kapasitesine bağlı olarak akım darbecikleri yaratırlar. Kısmi boşalmalar, uzun sürede yalıtkan malzemenin tahribatına neden olabilmektedirler. Dış kısmi boşalmalar, eğrilik yarıçapı küçük elektrotlarda meydana gelir ve alan şiddetinin yüksekliğine bağlı olarak gazlarda çarpma ile iyonlaşma yoluyla oluşur. Oluşan elektron çığı ve iyonizasyon, sistemde akım darbelerinin ve elektromanyetik dalgaların ortaya çıkmasına neden olmaktadır [5, 24, 67].

Kısmi boşalmaların ortaya çıkardığı akım darbecikleri, yapıda elektromanyetik girişim etkisi yaratarak duyarlı ölçüm yeteneğine sahip yüksek gerilim bölücülerinde, ölçüm sapmalarına yol açabilmektedir. Bu nedenle bölücünün direnç seçimlerinde korona oluşumuna izin vermeyecek dirençlerin seçilmesinin yanında; elektrotlarının tasarımında da kısmi boşalmaya neden olabilecek etkilerin ortadan kaldırılması için gerekli hesaplamaların ve uygun elektrot tasarımının yapılması zorunluluktur. Elektrotların boyutlandırılmasında elektrik alanın yarattığı kısmi boşalmalara neden olan kritik çap göz önünde bulundurulmalıdır [33, 59, 61]. Bu tür hesaplamalara Bölüm 4'de yer verilmiştir.

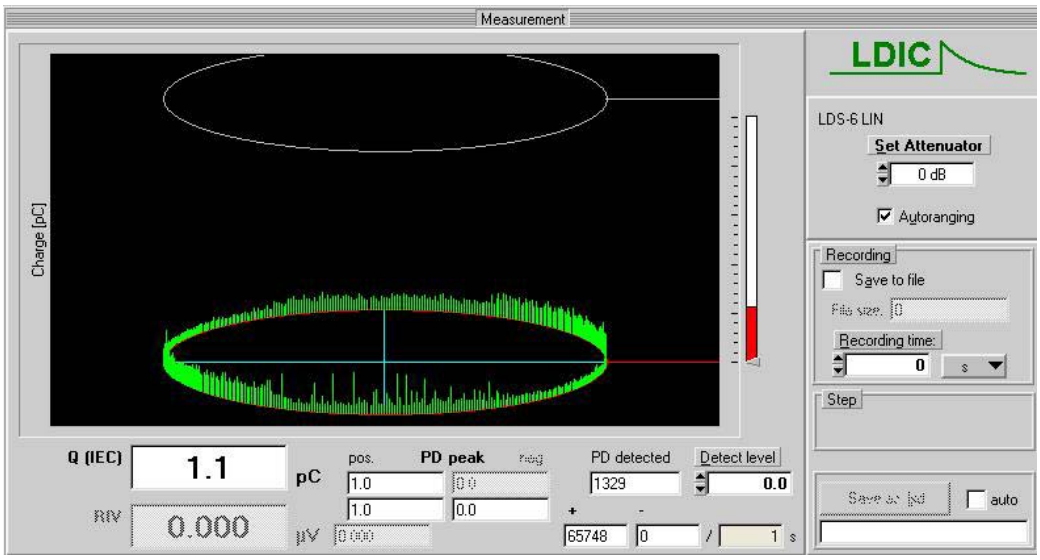
Anma yüksek gerilim altında bölücünün kısmi boşalma ölçmeleri için; Şekil 5.5'de gösterilen UME Yüksek Gerilim Laboratuvarı Kısmi Boşalma Ölçme Sistemi kullanılmıştır. Tablo 5.9'da ölçümlerde kullanılan aletler ve teknik özellikleri verilmiştir. Deney sırasında laboratuvar ortam koşulları, sıcaklık 22.9 ^{o}C, bağıl nem % 45 ve hava basıncı 992 mbar olarak kaydedilmiştir. Kısmi boşalma deneyi öncesinde ölçme sistemi kısmi boşalma kalibratörü ile 5 pC düzeyinde kalibre edilmiştir. Ölçmeler, U = 100 kV tepe değerli yüksek doğru gerilim değerine karşılık gelen 71 kV ($U/\sqrt{2}$) etkin değerli alternatif gerilimde gerçekleştirilmiştir. Ortamdan gelen yük miktarının 0.9 ile 1.1 pC arasında değiştiği saptanmıştır. Gerilimin yükselmesi ile bölücüde oluşan kısmi boşalmaların ortamdaki gibi yine 0.9 ile 1.1 pC arasında kaldığı yani değişmediği görülmüştür. Kısmi boşalma deney sonuçları Tablo 5.10'da ve dedektörden görülen darbeciklerin görüntüsü Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.5: Kısmi boşalma ölçme düzeneği

Tablo 5.9: Kısmi boşalma ölçmelerinde kullanılan alet ve donanımlar

Donanım Adı	Marka/Model	Teknik Özelikleri	Kalibrasyon
Deney Transformatörü	HIGHVOLT/ PEOI 200/4	400 kV, 200 kVA, 1 fazlı	---
Yüksek Alternatif Gerilim Bölücüsü	HIGHVOLT/ MCP 400	400 kV, 50/60 Hz, 100 pF, SF_6 yalıtımlı	3241-3244PTB04
Tepe Değer Ölçü Aleti	HIGHVOLT/MU17	1000 V maksimum giriş, çevirme oranı	3242PTB04
Referans sisteme ait ölçü kablosu	L34/15	50 Ω, 15 m, çift ekranlı, N-tipi koaksiyel kablo	3242PTB04
Kısmi boşalma kalibratörü	LDIC/LDC-5	5, 20, 100 ve 500 pC	3186PTB04
Kısmi boşalma dedektörü	LDIC/LDS-6	0.1 pC-100 nC, 12 bit, 30 MHz	3186PTB04
4-Uçlu (ölçme empedansı)	LDIC/LDM-5	50MΩ, t<15 ns, maksimum akım 5 A	---
Durdurucu empedans	HIGHVOLT / LS 1/400	400 kV	---
Kuplaj Kondansatörü	HIGHVOLT / WMCF 1.25/400	400.kV, 1.25 nF	---



Şekil 5.6: Anma gerilimindeki kısmi boşalmalar

Tablo 5.10: Kısmi boşalma ölçme sonuçları

Uygulanan Gerilim (50 Hz) [kV_{tepe}]	Ölçülen Kısmi Boşalma Genliği [pC]
10	1.0
20	0.9
30	1.0
40	1.1
50	1.0
60	1.1
70	1.0
80	1.0
90	1.1
100	1.1

5.7 Korona Deneyi ve Korona Başlangıç Geriliminin Belirlenmesi

Bir gerilim bölücünün metal aksamında oluşabilecek korona, bölücü boyunca elektrik alan dağılımını doğrudan etkilemektedir. Yüksek gerilim bölücüsünün elektrotları, bağlantı elemanları, taşıyıcı elemanlar vb. tüm metal aksam olası korona oluşumuna

olanak tanımayacak şekilde tasarlanmıştır. Kullanılan tüm metal konstrüksiyon için teorik hesaplamalar gerçekleştirilmiş ve bölücünün alan dağılımı FEMM 4.0 paket programı ile benzetimi yapılarak analiz edilmiştir. Bu konu hakkında detaylı çalışmalara Bölüm 4'de yer verilmiştir. Gerilim bölücünün yüksek gerilim altında, korona deneyi ve korona başlangıç geriliminin belirlenmesi deneyi iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. 1. aşamada gerilim bölücü 100 kV yüksek doğru gerilimde 60 dakika bekletilmiş ve herhangi bir korona oluşumuna rastlanılmamıştır. 2. aşama olan korona başlangıç gerilimi belirlenmesi için, gerilim bölücünün direnç gruplarına zarar vermemek amacıyla, direnç gruplarını taşıyan pleksiglas boru bölücüden çıkartılmış ve yerine aynı ölçülerde üzerinde herhangi bir direnç elemanı taşımayan pleksiglas boru yerleştirilerek deney gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği ve bölücünün görüntüsü Şekil 5.7'de verilmiştir. Tablo 5.11'de deneyde kullanılan aletler ve özellikleri verilmiştir.



Şekil 5.7: Korona deney düzeneği

Tablo 5.11: Korona deneyinde kullanılan aletler ve donanımlar

Donanım Adı	Marka/Model	Teknik Özelikleri	Kalibrasyon
Deney Transformatörü	HIGHVOLT/ PEOI 200/4	400 kV, 200 kVA, 1 fazlı	---
Yüksek Doğru Gerilim Bölücüsü	HIGHVOLT/ GMR 800/400	400 kV, 750 MΩ	3241PTB04
Tepe Değer Ölçü Aleti	HIGHVOLT/MU17	1000 V maksimum giriş, çevirme oranı girişli	3242PTB04
Referans sisteme ait ölçü kablosu	L34/15	50 Ω, 15 m, çift ekranlı, N-tipi koaksiyel kablo	3242PTB04
Doğru gerilim için doğrultma birimi	HIGHVOLT/ GZ 10/400	10 mA, 400 kV	---

Bölücüye yüksek doğru gerilim, pozitif ve negatif kutbiyette 375 kV'a kadar uygulanmış ve bu gerilim seviyesine kadar, korona başladığına dair herhangi bir ses yada ışıltıya rastlanılmamıştır. UME Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nın yüksek doğru gerilim kaynağı maksimum 400 kV olduğundan, bu seviyenin üzerine çıkılamamıştır. Sonuç olarak;

1. Anma geriliminde ve direnç grupları bağlı iken gerilim bölücüde koronaya rastlanmamıştır.

2. Direnç grupları bağlı değilken yapılan deney sonucunda, bölücünün metal aksamını ilgilendiren korona başlangıç geriliminin Uk > 375 kV olduğu belirlenmiştir.

3. Deney sırasında laboratuvar ortam koşulları, sıcaklık 23.1 ^{o}C, bağıl nem % 39 ve hava basıncı 993 mbar ölçülmüştür.

5.8 Kaçak Akım Deneyi

Yüksek gerilim bölücüsündeki kaçak akımların kaynakları ile ilgili ayrıntılı bilgi Bölüm 4.4'de verilmiştir. Bölücüde taşıyıcı ve koruyucu elemanlar olarak kullanılan pleksiglas borular, kaide ve ayırıcı elemanlar olarak kullanılan derlin gibi yalıtım malzemelerinin neden olduğu kaçak akımların ölçülmesi için, direnç gruplarını taşıyan pleksiglas boru bölücüden çıkartılmış ve yerine aynı ölçülerde boş bir

pleksiglas boru yerleştirilmiştir. Şekil 5.7'de gösterilen deney düzeneği ve Tablo 5.9'da belirtilen alet ve donanımlar kullanılmıştır. Bu düzeneğe ek olarak, bölücünün alt elektrodu ile toprak arasına HP 3458 marka/modelde 2004.ELV.164 sertifika numaralı 8.5 dijit multimetre ve L34/15 marka/model 50 Ω empedanslı, 15 m uzunluğunda, çift ekranlı, N-tipi koaksiyel kablo kullanılmıştır. 100 kV'ta kaçak akımın 40 ppm belirsizlikte (k = 2, %95 güvenilirlik düzeyi) 14.053 nA olarak ölçülmüştür. Ölçümler sırasında laboratuvar ortam koşulları, sıcaklık 23.2 ^{o}C, bağıl nem %40 ve hava basıncı 991 mbar ölçülmüştür.

5.9 Gerilim Bölücü Birim Basamak Yanıtının Belirlenmesi

5.9.1 Gerilim Bölücünün Geçici Rejim Yanıtının Özellikleri

Yıldırım ve anahtarlama darbe gerilimleri başta olmak üzere, zamanla ani değişen gerilimler karşısında, gerilim bölücü, ölçü kablosu ve kaydedicisinden oluşan yüksek gerilim ölçme sisteminin davranışının belirlenmesi için birim basamak yanıtının önemi bulunmaktadır. Yüksek gerilim tekniğindeki ölçüm büyüklüğü, gerilim bölücüsünün alçak gerilim kolu olan çıkış uçları, ölçü kablosu ve ölçü aletinin giriş uçları üzerinden elde edilmektedir. Ölçme sistemini oluşturan bu elemanlar sisteme bir gecikme katmaktadır ve ölçme sisteminin yeteneğinin belirlenmesi için sistemin birim basamak gerilimine yanıtının belirlenmesi gerekmektedir [68-73]. Ölçme sistemi genel olarak dört uçlu bir devre ile temsil edilebilir. Bu devreye $U_{1\infty}$ birim basamak gerilimi, giriş büyüklüğü olarak uygulanır. Sisteme uygulanan birim adım darbesi

$$u_1(t) = U_{1\infty}.s(t) \tag{5.1}$$

bağıntısındaki gibi ifade edilebilir. Çıkış gerilimi ise (5.2) bağıntısındaki gibidir.

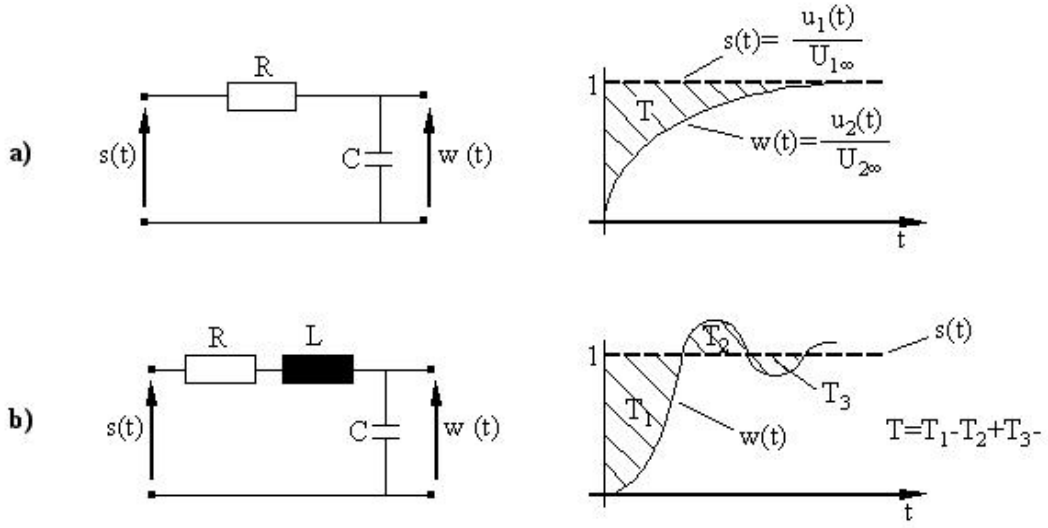
$$u_2(t) = U_{2\infty}.w(t) \tag{5.2}$$

Burada; $U_{2\infty}$, geçici rejim salınımları geçtikten sonraki anma çıkış değerini göstermektedir. w(t), giriş birim basamak fonksiyonu s(t)'ye karşılık devrenin birim basamak yanıtıdır.

Bilindiği gibi doğrusal sistemlerde $U_{1\infty}$ ve $U_{2\infty}$ orantılıdır ve bu orana dönüşüm oranı adı verilir. En önemli karakteristik olan yanıt,

$$T = \int_0^{\infty} [1 - w(t)]dt \tag{5.3}$$

bağıntısındaki alan hesabından elde edilmektedir. İlke olarak 4 uçlu devre olarak çalışan ölçüm sistemlerinin birim basamak yanıtı iki ayrı davranış sergilemektedir. Bunlar RC ve RLC davranışlarıdır, eşdeğer devreleri ve birim basamak yanıtları Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.8: Ölçme sistemlerinin birim basamak yanıtları [5]
a) RC davranışı b) RLC davranışı

Dirençsel gerilim bölücülerinin basamak yanıtındaki en önemli etkiyi, toprak kaçak kapasiteleri yapmaktadır. Devrenin birim basamak yanıtı,

$$g(t) = 1 - e^{-t/T_R} \tag{5.4}$$

bağıntısından türetilebilir. R için $R = R_1 + R_2^{/}$ eşitliği kullanılarak dirençsel gerilim bölücülerin birim basamak yanıtının yükselme zaman sabiti, teorik olarak

$$T_R \approx \frac{1}{6} RC_E \tag{5.5}$$

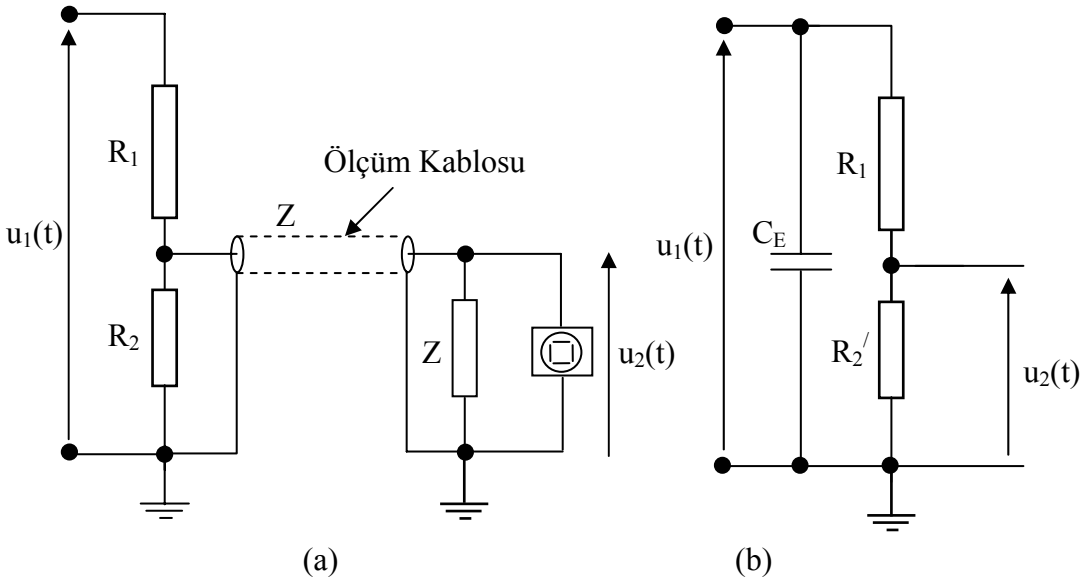
yaklaşık bağıntısı ile ifade edilmektedir [5, 10]. Şekil 5.9'da gerilim bölücünün eşdeğer devresi verilmiştir. Gerilim bölücülerinin birim basamak yanıt sürelerinin belirlenmesinde, ölçüm kablosunun empedansı, buna bağlı olarak kullanılacak olan sonlandırıcı empedansın değeri, kaydedici ya da osiloskobun giriş empedansı ve kapasitesi önemli bir rol oynamaktadır. Buna göre (5.5) bağıntısındaki $R_2^{/} = (R_2.Z)/(R_2 + Z)$ bağıntısı ile ifade edilir. Burada Z kablo empedansından gelecek etkiyi yok etmek amacıyla kullanılan sonlandırıcı empedanstır.

Şekil 5.8a'de gösterilen eğrideki yanıt süresi, T_R zaman sabitine eşittir. Ayrıca gerilim bölücüsünde uygun elektrot tasarımı yapılması durumunda, toprak kaçak kapasitesinin yüksek gerilim direnci boyunca homojen dağılımlı olduğu kabul edilir. Buna göre (5.5) bağıntısındaki ve Şekil 5.9.b'deki C_E büyük bir yaklaşıklıkla, bölücünün toplam toprak kaçak kapasitesidir. Buna göre yanıt süresi (5.6) bağıntısı ile tanımlanabilir.

$$T \approx \frac{1}{6} RC_E \tag{5.6}$$

Poletti ve Viola'nın yapmış oldukları çalışmada, (5.6) bağıntısındaki birim basamak süresinin, gerilim bölücüye yapılacak uygun elektrot sistemi ile minimuma indirebileceğini ispatlamışlardır [34]. Kullanılan elektrot sistemi, sadece korona oluşumunu önlemek değil aynı zamanda, yüksek gerilim-toprak, yüksek gerilim-terminaller ve direnç-direnç arasındaki kapasiteleri düşürdüğünden bölücünün birim basamak yanıt karakteristiğine olumlu sonuçlar vermektedir [29].

Doğru gerilim bölücülerinde kullanılan dirençlerin değerleri çok büyük olduklarından birim basamak yanıt süreleri darbe gerilim bölücülerine göre 5-10 katı daha büyüktür. Bir dirençsel gerilim bölücünün birim basamak yanıtı Şekil 5.8.a'daki gibi RC, karma gerilim bölücülerindeki birim basamak yanıtı Şekil 5.8.b'deki gibi RLC biçiminde davranmaktadır. Dirençsel gerilim bölücülerindeki birim basamak yanıt eğrisindeki salınımlar, bölücünün endüktif etkisini göstermektedir.



Şekil 5.9: Dirençsel gerilim bölücünün
a) Devre şeması b) Toprak kaçak kapasiteli eşdeğer devresi

5.9.2 Deney

Yüksek gerilim bölücüsünün birim basamak yanıtı deneyi UME Yüksek Gerilim Laboratuvarı referans darbe gerilim ölçme sistemi ekipmanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Darbe kalibratöründen üretilen 1000 V'luk referans darbe, birim basamak üreteci üzerinden gerilim bölücüye uygulanmıştır. Gerilim bölücünün çıkış uçlarındaki işaretler darbe kaydedici üzerinden incelenmiştir. Birim basamak darbeleri, 5 s aralıklarla 20 kez gerilim bölücüye otomatik olarak uygulanmış ve elde edilen sonuçlar 200 MS/s bit örnekleme oranında ve 12 bit çözünürlükte işlenerek sonuçlandırılmıştır. Deneyde kullanılan alet ve donanımların listesi ve görüntüleri sırasıyla Tablo 5.12 ve Şekil 5.10'da verilmiştir.

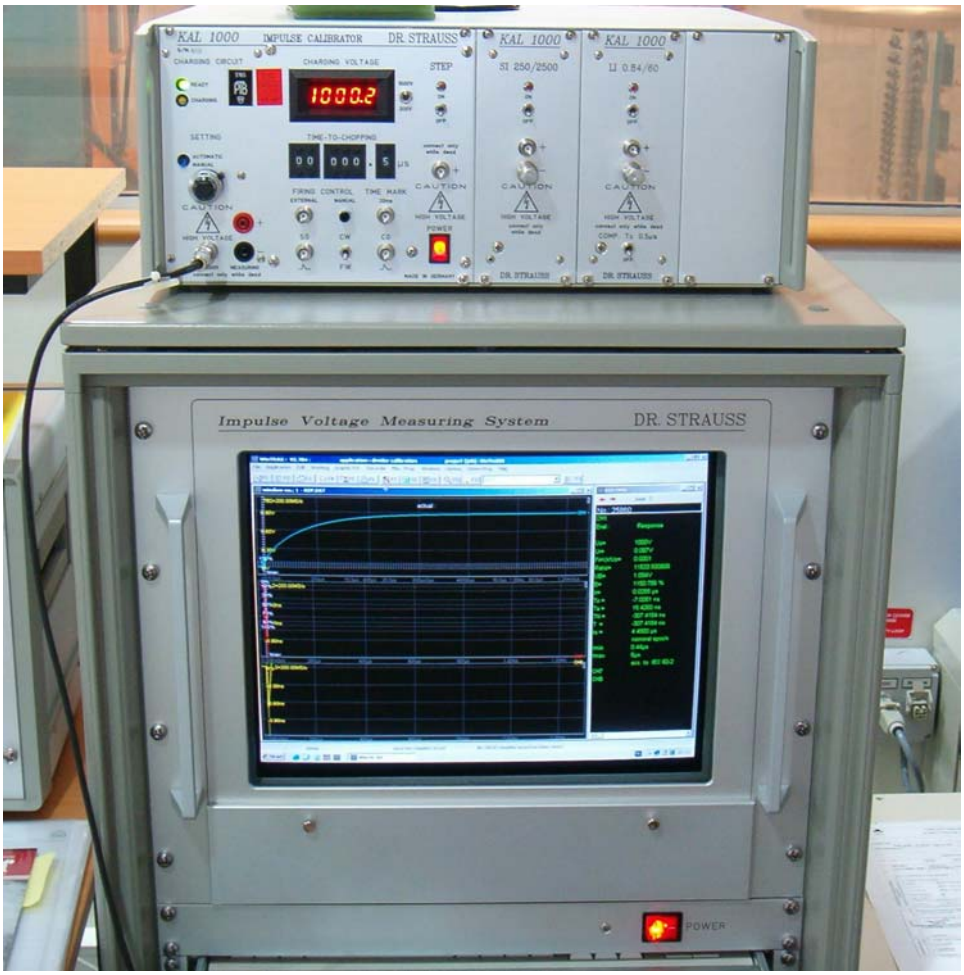
Deney sonucunda elde edilen verilere göre gerilim bölücüsünün birim basamak yanıtı süresinin 204 ns olduğu belirlenmiştir. Bu ölçmelerin gerçekleştirildiği UME Referans Ölçüm Sistemi'nin zaman ölçümlerindeki belirsizliği % 2'dir. (5.6) bağıntısı kullanılarak sistemin kapasitesi yaklaşık olarak $C_E = 12.24$ fF hesaplanmıştır.

Tablo 5.12: Birim basamak yanıtı deneyinde kullanılan aletler ve donanımlar

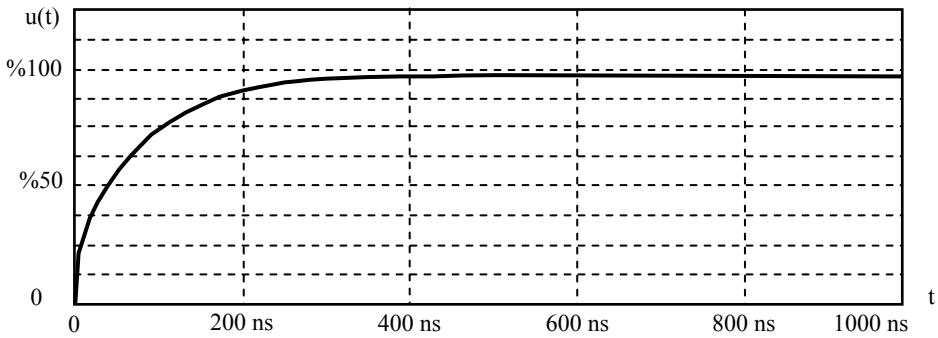
Donanım Adı	Marka/Model	Teknik Özelikleri	Kalibrasyon
Darbe Kalibratötü	DR.STRAUSS/ KAL1000	0-1000 kV arası yıldırım ve anahtarlama darbe gerilimi üreteci,	3185PTB04
Birim Basamak Üreteci	DR.STRAUSS/ RIG1000	0-000 kV arası birim basamak üreteci, 5.3 μF doldurma kapasitesi, elektronik anahtarlama	---
Darbe Kaydedicisi	DR.STRAUSS/ TR-AS 200/12	0 ile ±1600 kV arası yıldırım ve anahtarlama darbe gerilimleri analiz cihazı, 200 MS/s örnekleme ve 12 bit çözünürlük, 1 MΩ /30 pF giriş empedansı	3242PTB04
Referans sisteme ait ölçü kabloları	High-Voltage and Relay	50 Ω, 25 m, BNC	---
Ölçüm Kablosu	HighVolt/ L35/25	50 Ω, 2500 pF	3242PTB04
Sonlandırıcı empedans	HighVolt/ RA50-1	50 Ω	3201PTB04

Bölüm 3.1'de belirtildiği üzere, gerilim bölücüde kullanılan dirençlerin 50 Hz ile 10 MHz bölgesindeki kapasite değişiminin 1.1 pF ile 1.2 pF arasında olduğu, UME Empedans Standartları Laboratuvarı'nda yapılan ölçümler sonucunda belirlenmişti. 100 adet direnci seri olarak bağlandığı göz önünde bulundurulursa sistem kapasitesinin teorik olarak 11 fF ile 12 fF arasında olduğu ve hesaplanan değerle uyumlu olduğu görülmüştür.

Bölüm 3.8.1'de belirtildiği gibi endüktans etkisi çok az olan bir dirençsel gerilim bölücüdeki tipik birim basamak yanıt eğrisi Şekil 5.11'deki gibi elde edilmiştir. 1 MHz frekansta gerilim bölücünün endüktif etkisinin olduğu görülmüştür. Bu etkinin dirençler arasındaki bağlantılardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Nitekim UME Empedans Standartları Laboratuvarı'nda yapılan endüktans ölçümlerinde, dirençlerin 50 Hz ve 10 MHz bölgesi içinde 100 nH'den küçük ihmal edilebilir bir endüktansa sahip oldukları belirlenmiştir.



Şekil 5.10: Birim basamak yanıtı deneyinde kullanılan darbe kalibratörü ve kaydedicisi



Şekil 5.11: Bölücünün birim basamak yanıt eğrisi

BÖLÜM 6 YÜKSEK DOĞRU GERİLİM BÖLÜCÜSÜNÜN ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ

6.1 Giriş

Doğru akım ölçme sistemlerinin belli başlı belirsizlik bileşenleri konusuna 3. Bölümde yer verilmiştir. Bu bölümde yapımı gerçekleştirilen bölücünün ölçüm belirsizliğine etki eden en temel bileşenler ve belirsizlik bütçesinin oluşturulması konularına yer verilmiştir. UME yüksek gerilim bölücüsünde belirsizlik bileşenleri,

- Bölünmüş gerilim değerinin ölçüm belirsizliği,
- Alçak gerilimde bölücünün çevirme oranının belirlenmesindeki belirsizlik,
- Sıcaklık etkisinden kaynaklanan belirsizlik
- Gerilim etkisinden kaynaklanan belirsizlik,
- Kaçak akımların neden olduğu belirsizlik
- Korona akımlarının neden olduğu belirsizlik
- Kısa dönem kararlılığıdır.

6.2 Bölünmüş Gerilim Değerinin Ölçüm Belirsizliği

Yüksek gerilim bölücüleri, bilinen yöntemlerle gerilimlerin ölçülememesi sebebiyle, yüksek genlikli gerilimleri ölçülebilir düzeye indiren dönüştürücü elemanlardır. Ölçülebilir düzeye indirilmiş gerilimler, bilinen ve çok kullanılan duyarlı multimetreler veya tepe değer ölçü aletleri ile rahatlıkla ölçülebilirler. Ancak bu ölçümün hassasiyet derecesi, tüm yüksek gerilim ölçüm sisteminin belirsizliğine etki etmektedir. UME yüksek doğru gerilim bölücüsü, 100 kV'a kadar gerilimleri yaklaşık 1000:1 oranında bölmektedir. Çevirme oranından da anlaşılacağı gibi bölücünün

düşük gerilim direnç kolu üzerinde oluşabilecek maksimum 100 V doğru gerilim, eldeki olanaklar kullanılarak en düşük belirsizlikle ölçülmektedir. Ulusal gerilim standardı zinciri içerisinde bulunan, 8.5 dijit HP3458A dijital multimetre, yüksek doğru gerilim bölücüsünün düşük gerilim koluna paralel olarak bağlanan ölçme birimini oluşturmaktadır. Multimetrenin 10V-100V ölçüm bölgesindeki giriş empedansı 10 MΩ'dur. UME kalibrasyonlu ölçme cihazının 10-100 V ölçüm bölgesindeki bağıl belirsizliği k= 2 kapsam $u_L = \pm 20 \times 10^{-6}$. Bu ölçüm belirsizliğinin içerisine cihazın yıllık kayması ve uzun dönem kararlılığı dahil edilmiştir.

6.3 Alçak Gerilimde Çevirme Oranının Belirlenmesindeki Belirsizlik

Yüksek doğru gerilim bölücüsünün çevirme oranı en temel ifadeyle $K=(R_s+R_u)/R_u$ şeklindedir. Burada R_s, bölücünün yüksek gerilim kolunu oluşturan seri direnç grubu olup değeri yaklaşık 100 MΩ ve R_u ise bölücünün alçak gerilim kolunu oluşturan direnç olup değeri yaklaşık 100 kΩ'dur. Alçak gerilim direncinin değeri, UME Empedans Standartları Laboratuvarı'nda referans ölçüm sisteminde köprü yöntemiyle $u_u = \pm 5 \times 10^{-6}$ bağıl belirsizlikte belirlenmiştir. Bölücünün yüksek gerilim direnç değeri yüksek belirsizlik ve bölücünün boyutunun büyük olması nedeniyle direk olarak ölçülememiştir. Bu nedenle, daha önce yapılmış olan çalışmalarda olduğu gibi seri-paralel ölçüm devresi kurulmuş ve bu yöntem kullanılarak düşük bir hatayla direnç değeri belirlenmiştir. Bu yöntemle, yüksek gerilim koluna ait toplamda 100 MΩ değerindeki dirençler 1 MΩ değerine indirgenmiş ve köprü yöntemi kullanılarak düşük belirsizlikte toplam direnç değeri belirlenmiştir [24, 46, 74, 75].

Gerilim bölücüye 100 adet seri direnç, Tablo 4.1'de verilen sırada yerleştirilmiştir. 1. dirençten başlamak üzere, her 10 seri direnç için bir seri kol oluşturulmuştur. Bölücüde toplam 10 adet seri direnç kolu ise kendi aralarında paralel kol meydana getirmiştir. Buna göre tüm seri-paralel direncinin yaklaşık değeri $R_{sp} \approx 1$ MΩ bulunmuştur. Buna göre toplam seri direnç ideal durumda

$$R_s = a^2 \cdot R_{sp} \tag{6.1}$$

yaklaşık hesabıyla ifade edilebilir. Burada; a toplam paralel direnç kol sayısını göstermektedir. Ancak yüksek doğruluk söz konusu olduğunda (6.1) bağıntısını, paralel kollar arasındaki sapmalardan dolayı ek terimlerle genişletmek gerekmektedir. Bu gereklilik,

$$R_s = a^2 \cdot R_{sp}\left[1+\frac{1}{a}\sum_{i=1}^{a} f_i{}^2 - \frac{1}{a}\sum_{i=1}^{a} f_i{}^3 + ...\right] \tag{6.2}$$

bağıntısında yer almıştır. Burada $f_i = (R_i-R_m)/R_m$, R_i paralel kollardaki dirençlerin ortalaması ve R_m tüm dirençlerin ortalamasıdır. R_{sp} ifadesinden önce (6.2) ifadesindeki kareli ifadenin belirsizliğinin göz önünde bulundurulması gereklidir. Bu bağıntıyı u_w biçiminde tanımlarsak;

$$u_w = \frac{1}{a}\sum_{i=1}^{a} f_i{}^2 \tag{6.3}$$

olur. (6.3) ifadesinin ilk terimi kullanır ve diğer terimleri ihmal edilecek kadar küçük olduğundan ihmal edersek,

$$u_w = \frac{1}{a.R_m{}^2}\sum_{i=1}^{a}(R_i - R_m)^2 \tag{6.4}$$

genel ifadesini elde ederiz.

$$s = \sqrt{\frac{1}{a-1}\sum_{i=1}^{a}(R_i - R_m)^2} \tag{6.5}$$

bağıntısındaki standart sapma ifadesi kullanılacak olursa; (6.4) bağıntısında verilen belirsizlik ifadesi,

$$u_w = \frac{a-1}{a}\cdot\frac{s^2}{R_m{}^2} \tag{6.6}$$

bağıntısındaki gibi standart sapmaya bağlı olarak elde edilir. Gerilim bölücüde kullanılacak tüm dirençlerin değerlerinin belirlenmesi yerine çok büyük bir

yaklaşıklıkla her paralel kol içindeki bir direncin seçilmesi ve değerinin belirlenmesi yolu tercih edilebilir [24, 46, 74, 75]. Değeri belirlenen bu dirençler ve bu dirençlerin ortalaması sırasıyla R_i ve R_m olarak ifade edilebilir. Oluşturulan seri-paralel direnç yapısının değeri, köprü sistemi kullanılarak ve ısıl emf etkisini en aza indirgemek amacıyla pozitif ve negatif alçak gerilim altında 10 ppm belirsizlikle ölçülmüştür.

Her paralel koldan seçilen dirençler ve köprü sistemi kullanılarak elde edilen değerler Tablo 6.1'de verilmiştir. Bu dirençler seçildikleri paralel kolun ortalama direncini ifade etmektedir. Ölçümler 23^{o}C'de sabit ortam sıcaklığı sağlayan bir fırın içinde gerçekleştirilmiştir. Seçilen dirençlerin ortalama değeri R_m = 1000.045 kΩ ve standart sapma değeri s = 0.1795 kΩ olarak hesaplanmıştır.

(6.6) bağıntısı kullanılarak kestirimin ölçüm belirsizliği $u_w = \pm 0.03 \times 10^{-6}$ olarak hesaplanmıştır. Seri-paralel yapının direnç ölçümü ise yine fırın içerisinde ve köprü yöntemi kullanılarak ölçülmüş ve değeri R_{sp} = 1000.042 kΩolarak belirlenmiştir. Bu ölçüm sisteminin belirsizliği ise bağıl olarak $u_{sp} = \pm 10 \times 10^{-6}$ bulunmuştur.

Bulunan değer ile Tablo 6.1'deki f_i^2 ve f_i^3 ifadeleri kullanılarak (6.2) bağıntısındaki seri direnç değeri R_s = 100.00423 MΩ bulunmuştur. Bölüm 3.6'da, gerilim bölücüde kullanılacak alçak gerilim direncinin özellikleri ve seçimi detaylı olarak incelenmiştir. Seçilen direncin değeri R_u = 99.994426 kΩ'dur.

R_s = 100.00423 MΩ ve R_u = 99.994426 kΩ kullanılarak çevirme oranı yaklaşık bir değerle K = 1001.098 olarak elde edilmiştir. Bu çevirme oranının tespit edilmesindeki toplam belirsizlik, tüm bileşenler kullanılarak,

$$u_B = \sqrt{{u_u}^2 + {u_w}^2 + {u_{sp}}^2} \tag{6.7}$$

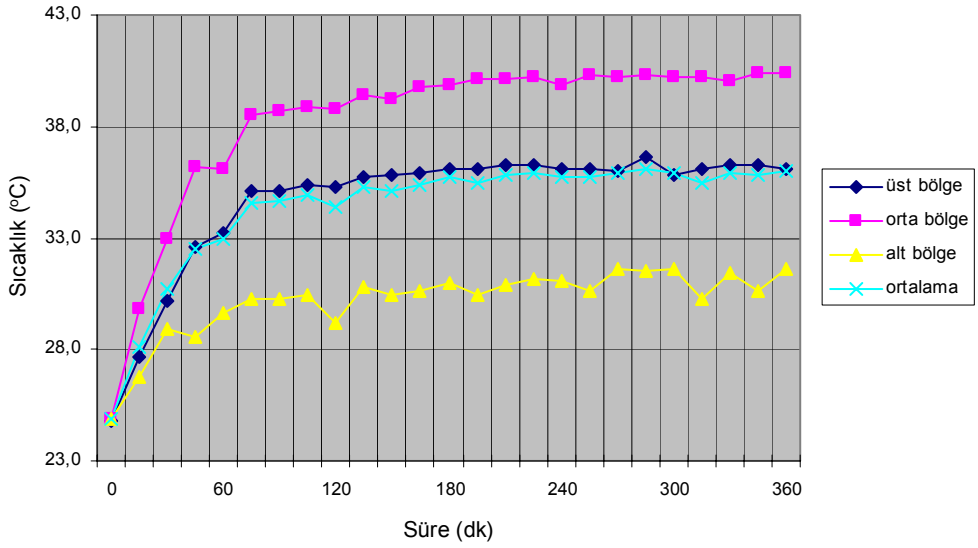
bağıntı yardımıyla, $u_B = \pm 11.2 \times 10^{-6}$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 6.1: Paralel kollardan seçilen dirençler

Paralel Kol Direnci (Ri)	Direnç No.	Köprü Ölçme Sisteminde Ölçülen Direnç (kΩ)	$f_i^2 = \left(\frac{R_i - R_m}{R_m}\right)^2$	$f_i^3 = \left(\frac{R_i - R_m}{R_m}\right)^3$
R_1	R048	999.992	2.8E-09	-1.5E-13
R_2	R086	999.981	4.1E-09	-2.6E-13
R_3	R192	1000.010	1.2E-09	-4.3E-14
R_4	R153	999.895	2.2E-08	-3.4E-12
R_5	R159	1000.273	5.2E-08	1.2E-11
R_6	R079	999.753	8.5E-08	-2.5E-11
R_7	R110	1000.262	4.7E-08	1.0E-11
R_8	R170	999.959	7.4E-09	-6.4E-13
R_9	R118	999.968	5.9E-09	-4.6E-13
R_{10}	R049	1000.352	9.4E-08	2.9E-11
R_m	Ortalama Direnç	1000.045		

6.4 Sıcaklık Etkisinden Kaynaklanan Belirsizlik

Gerilim bölücüde kullanılan dirençlerin seçimi, 23^{o}C ortam sıcaklığı ile anma gerilimindeki çalışma sıcaklığı olan 33^{o}C arasındaki sıcaklık katsayıları göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Bununla ilgili detaylı bilgiye Bölüm 3.3'de yer verilmiştir. Direnç elemanlarının anma gerilimindeki yüzey sıcaklıklarının 33^{o}C olması, tüm gerilim bölücüsünün anma gerilimindeki sıcaklık dağılımının 33^{o}C olacağı anlamını taşımamaktadır. Nitekim Bölüm 5.3'deki sıcaklık dağılım deneyi sonuçları bunu ispatlamaktadır. Tablo 5.4'de verilen deney sonuçlarına göre; 100 kV anma geriliminde bölücünün ısıl kararlığa ulaştığı 6 saat boyunca, bölücünün üst, orta ve alt noktalarında yapılan ölçümlerde ısıl dağılımı Şekil 6.1'deki gibi olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.1: Gerilim bölücünün üst, orta ve alt bölgelerindeki sıcaklık dağılımın zamanla değişimi

Isıl dengeye ulaştığı 6. saat sonunda gerilim bölücünün alt bölgesindeki sıcaklık 31^{o}C, orta bölgesindeki sıcaklık 40.4^{o}C ve üst bölgesindeki sıcaklık 36.1^{o}C olmuştur. Şekil 6.1'den de görüleceği gibi sıcaklık dağılımının ortalama eğrisi, üst bölgedeki değişim ile aynı karakteristiği taşımaktadır.

Gerilim bölücü, ısıl dengeye gelmeye başladığı 4. saat ile dengeye geldiği 6. saat arasında, en düşük sıcaklık bölgesi olan alt bölgede 31 ^{o}C ile en yüksek sıcaklık bölgesi olan orta bölgede 41^{o}C sıcaklık arasında değişim göstermiştir. Bundan dolayı gerilim bölücünün sıcaklık etkisi belirsizlik bileşeni belirlenirken, dirençlerin 33^{o}C ile 43^{o}C arasındaki sıcaklık katsayılarının göz önünde bulundurulmuştur. Gerilim bölücünün 33^{o}C ile 43^{o}C arasındaki toplam sıcaklık katsayısı, seçilen dirençler için bu sıcaklık bölgesindeki sıcaklık katsayılarının belirlenmesi sonucu -50 ppm/^{o}C olarak hesaplanmıştır. Buna göre gerilim bölücünün sıcaklık etkisinden gelen bağıl belirsizlik $u_T = \pm 50 \times 10^{-6}$ olarak belirlenmiştir.

6.5 Gerilim Etkisinden Kaynaklanan Belirsizlik

Gerilim bölücüyü oluşturan dirençlerin gerilim artışıyla birlikte göstermiş olduğu kararlılık, gerilim bölücünün kararlılığına doğrudan etki yapmaktadır. Bu etki, dirençlerin sıcaklık değişimi ile olarak yapmış oldukları pozitif etkiye oranla çok

daha düşüktür. Ancak yapılacak ölçümün düşük belirsizlikte olması istendiği durumlarda, gerilim katsayısından kaynaklanan hataların göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bölüm 5.4'de detaylı olarak anlatıldığı gibi, gerilim bölücüde kullanılan dirençlerin üretici firmasının belirtmiş olduğu ±0.05 ppm/V gerilim katsayısı bilgisinin doğruluğu, oluşturulan ölçme düzeneği kullanılarak ispatlanmıştır. Kullanılan her bir dirençten gelecek gerilim katsayısına bağlı hatanın ±0.05 ppm/V olduğu varsayılırsa, 100 adet direnç için sisteme yansıyacak bağıl belirsizlik,

$$u_V = \sqrt{100 \times \left(0.05 \times 10^{-6}\right)^2} \tag{6.8}$$

ifadesinden $u_V = 0.5 \times 10^{-6}$ olarak belirlenmiştir.

6.6 Kaçak Akımların Neden Olduğu Belirsizlik

Bölüm 4.4'de detaylı olarak anlatıldığı gibi, kaçak akımların oluşumuna etki eden birçok neden bulunmaktadır. Ancak bunların başlıcaları, bölücüde kullanılan yalıtım malzemeleri ve direnç dizilimleridir. Kaçak akımlar, direnç boyunca akacak akımın genliğinin ve fazının değişimine yol açmaktadır. Bu değişim cihazın ölçme yeteneğine olumsuz etki yapmaktadır. Bölüm 5.8'de de ölçme yöntemi detaylı olarak anlatılan deney sonucunda, kaçak akım 14.053 nA olarak belirlenmiştir. 100 kV anma geriliminde gerilim bölücüden akacak olan anma akımın değeri 1 mA'dir. Buna göre 1 mA nominal akım ve 14.053 nA olan kaçak akıma göre, kaçak akımların neden olduğu hata bağıl olarak $u_I = \pm 14.1 \times 10^{-6}$ hesaplanmıştır.

6.7 Korona Akımlarının Neden Olduğu Belirsizlik

Gerilim bölücünün korona deneyi, 100 kV doğru gerilime karşılık gelen 71 kV şebeke frekanslı alternatif gerilimde gerçekleştirilmiştir. Deney yöntemi ve sonuçları Bölüm 5.6'da ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Deney sonucunda yük ölçümlerinin, deneyin yapıldığı UME Yüksek Gerilim Laboratuvar ortamındaki düzey olan 0.9 pC ile 1.1 pC arasında değiştiği görülmüş ve herhangi bir boşalma olmadığı sonucuna varılmıştır.

6.8 Kısa Dönem Kararlılığı

Gerilim bölücünün 3 ay aralıkla yapılan iki ölçüm sonucunda 100 kV anma gerilimindeki çevirme oranları belirlenmiştir. Çevirme oranları arasındaki farkın, anma çevirme oranına olan oranı, kısa dönem kararlığını bağıl olarak vermekte ve bu değer belirsizlik bileşeni olarak değerlendirilmektedir. Bölücünün kısa dönem kararlılığı $u_K = \pm 10 \times 10^{-6}$ olarak elde edilmiştir.

6.9 Belirsizlik Bütçesi

Gerilim bölücünün belirsizlik bileşenlerini, bölünmüş gerilim değerinin ölçüm belirsizliği (u_L), alçak gerilimde bölücünün çevirme oranının belirlenmesindeki belirsizliği (u_B), sıcaklık etkisinden kaynaklanan belirsizlik (u_T), gerilim etkisinden kaynaklanan belirsizlik (u_V), kaçak akımların neden olduğu belirsizlik (u_I) ve kısa dönem kararlılığı (u_K) oluşturmaktadır. Tüm belirsizlik bileşenleri k = 1 kapsam faktöründe normal dağılıma dönüştürüldükten sonra bileşik belirsizlik hesaplanmıştır.

$$u_X = \sqrt{\sum_i u_i^{\,2}} \tag{6.9}$$

bağıntısı kullanılarak bileşik belirsizlik elde edilir. Belirsizlik bütçesi Tablo 6.2'de verilmiştir. Genişletilmiş belirsizlik, k=1 kapsam faktöründe hesaplanan bileşik belirsizliğin k=2 katsayısı ile genişletilmesi ve %95 güvenilirlik düzeyine çekilmesi ile (6.10) bağıntısı kullanılarak elde edilmiştir.

$$U_x = 2.u_x \tag{6.10}$$

Gerilim bölücünün, HP/3458A marka/model 8.5 dijit ulusal standartlara izlenebilir bir multimetre ve 34L/15 marka/model 50 ohm ve 15 pF'lık çift ekranlı ölçü kablosu ile oluşturacağı ölçme sisteminin %95 güvenilirlik düzeyi (k = 2) için ölçüm belirsizliği bağıl olarak,

$$U_X = 66 \times 10^{-6} \tag{6.11}$$

olarak belirlenmiştir.

Tablo 6.2: Belirsizlik bütçesi

Belirsizlik Kaynağı	Bağıl Belirsizlik u_i	Dağılım
Bölünmüş gerilim değerinin ölçüm belirsizliği	$u_L = 20.0 \times 10^{-6}$	Normal (k = 2)
Alçak gerilimde bölücünün çevirme oranının belirlenmesindeki belirsizlik	$u_B = 11.2 \times 10^{-6}$	Dikdörtgen (k=$\sqrt{3}$)
Sıcaklık etkisinden kaynaklanan belirsizlik	$u_T = 50.0 \times 10^{-6}$	Dikdörtgen (k=$\sqrt{3}$)
Gerilim etkisinden kaynaklanan belirsizlik	$u_V = 0.5 \times 10^{-6}$	Dikdörtgen (k=$\sqrt{3}$)
Kaçak akımların neden olduğu belirsizlik	$u_I = 14.1 \times 10^{-6}$	Dikdörtgen (k=$\sqrt{3}$)
Kısa dönem kararlılığı	$u_K = 10.0 \times 10^{-6}$	Dikdörtgen (k=$\sqrt{3}$)
Bileşik belirsizlik	$u_X = 32.8 \times 10^{-6}$	k= 1
Genişletilmiş belirsizlik	$U_x = 65.6 \times 10^{-6}$	k= 2

BÖLÜM 7 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yüksek gerilim tekniğinde duyarlı ölçmelerin yapılabilmesi için en temel unsur, gerilim bölücünün zaman ve gerilim değişimi ile birlikte çok az sapma gösteren çevirme oranına sahip olmasıdır. Gerilim bölücünün çevirme oranı değişimi, kullanılan dirençlerin sıcaklık artışı karşısındaki değişimine, bölücüden toprağa olan kapasitelerin neden olduğu kaçak akımlara ve korona oluşumuna bağlıdır. Bu çalışmada, söz konusu bu üç faktörün etkisini en aza indirecek şekilde bir tasarım yapılmış ve bölücünün yapımı bu teorik hesaplamalara göre gerçekleştirilmiştir. Bu cihazın yapımı ile Türkiye'de yüksek doğru gerilim tekniğinde kullanılan tüm ölçme cihaz ve sistemlerinin, 100 ppm'den küçük (66 ppm) ölçüm belirsizliğinde kalibrasyonuna olanak tanıyacak 100 kV yüksek doğru gerilim bölücüsünün tasarımı ve yapımı gerçekleştirilmiş olmaktadır.

Yapımı gerçekleştirilen gerilim bölücünün yüksek gerilim kolunda, 100 adet 1 MΩ'luk, 2 W gücünde MEGATRON 9070 marka sarım direnç kullanılmıştır. Bu dirençlerin en önemli özelliği, endüktans etkisini minimuma indirmek için bifilar sarım tekniğinde üretilmiş olmalarıdır. Nitekim Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Empedans Standartları Laboratuvarında, 5 ppm ölçüm belirsizliğinde, dirençlerin kapasite ve endüktans ölçümleri yapılmış ve bu ölçümlere göre; dirençlerin frekansa bağlı olduğu aralık 50 Hz-10 MHz frekans aralığı olarak belirlenmiştir. Dirençlerin kapasitesinin 50 Hz-10 MHz'de 1.1 ile 1.2 pF arasında değiştiği ve yine aynı frekansta endüktansın 100 nH'den küçük olduğu belirlenmiştir. Direnç telleri üzerinde oluşacak yüksek elektrik alan etkisini azaltmak için dirençlerin yüzeyi karbon miktarı yüksek yalıtkan malzeme ile kaplanmıştır.

Gerilim bölücüde kullanılan 100 adet direncin elektriksel özellikleri, gerilim bölücünün ölçüm belirsizliğine direk etki yaptığından, direnç seçimi bir dizi işlemler sonucunda gerçekleştirilmiştir. Seçimi yapılan dirençler, 194 adet direnç içinden gerçekleştirilmiştir. Dirençlerin sıcaklık katsayılarının belirleneceği sıcaklık aralığının bilinmesi için farklı gerilimler altında direnç yüzey sıcaklıkları

belirlenmiştir. Dirençlerin yüzey sıcaklıklarının ortalama olarak 23^{o}C ile 33^{o}C arasında değiştiği anma geriliminde yapılan deneyler sonucunda saptanmıştır. Gerilim bölücüde kullanılacak dirençlerin sıcaklık katsayılarının belirlenmesi, bölücünün çevirme oranının tam olarak belirlenmesi açısından büyük önem taşıdığından, dirençlerin bu bölge içerisindeki sıcaklık katsayılarının 5 ppm/^{o}C olduğu üretici firma tarafından beyan edilmesine rağmen, oluşturulan özel ölçme düzeneği ile 194 direncin 13^{o}C ile 43^{o}C arasındaki sıcaklık-direnç eğrileri oluşturulmuştur (Ek-D).

Dirençlerin bir başka elektriksel özelliği olan gerilim katsayısı tayini, Wheatstone köprü sistemi kullanılarak 500 ppm ölçüm belirsizliğinde gerçekleştirilmiştir. Tüm dirençlerin gerilim katsayılarının üretici firmanın belirtmiş olduğu 0.05 ppm/V değerinden küçük olduğu belirlenmiştir.

Yüksek gerilim kolunda kullanılacak dirençlerin anma gerilimindeki yüzey sıcaklıkları, 23^{o}C ile 33^{o}C arasındaki sıcaklık katsayıları ve farklı gerilim altında belirlenen gerilim katsayısı bilgileri göz önünde bulundurularak dirençlerin seçimi gerçekleştirilmiştir. 100 adet direncin yarısının pozitif diğer yarısının negatif sıcaklık katsayısına sahip olmasına özen gösterilmiştir. Her pozitif sıcaklık katsayısına sahip olan direnç aynı değerde ancak negatif sıcaklık katsayısına sahip bir başka dirençle eşleştirilmiş ve bu suretle yüksek gerilim koluna ait toplam direncin sıcaklık katsayısı minimuma indirilmiştir. Buna göre toplamda yüksek gerilim direnç kolunun sıcaklık katsayısı -0.00044 ppm/^{o}C olarak elde edilmiştir. Tablo 3.3'de seçilen ve eşleme yapılan dirençler verilmiştir.

Gerilim bölücünün alçak gerilim kolunda kullanılan 100 kΩ'luk, 0.2 W güce sahip direnç 6 adet RHOPOINT/ E10C100K marka sarım direnç arasından seçilmiştir. Bu dirençlerin, yüksek gerilim kolunda kullanılan dirençler gibi en önemli özelliği, bifilar sarım yapısı taşıması ve endüktanssız olmasıdır. 6 adet direncin sıcaklık katsayıları yağ banyosu ölçüm sistemi kullanılarak 5 ppm ölçüm belirsizliğinde saptanmıştır. Alçak gerilim kolunda kullanılan direnç, Şekil 3.14'teki direnç eğrileri göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Sıcaklık artışıyla direnç değişimi minimum olan R_{L03} direnci gerilim bölücünün alçak gerilim direnci olarak seçilmiştir.

Gerilim bölücünün kaçak akımlarının sınırlandırılması, bölücü boyunca elektrik alan dağılımının düzgün olmasına bağlıdır. Kaçak akımların azaltılması bir başla deyişle,

gerilim bölücü boyunca elektrik alanın düzgün olması, gerilim bölücüde uygun elektrot yapısı kullanılarak ve dirençlerin gerilim bölücüye helisel bir yapıda yerleştirilmesiyle sağlanmıştır.

Tasarımı yapılan gerilim bölücünün alan dağılımı, temeli Sonlu Elemanlar Yöntemi'ne (SEY) dayanan FEMM (Finite Element Method Magnetics) Version 4.0 serbest kullanım bilgisayar programı kullanılarak farklı elektrot yapıları için gerçekleştirilmiştir. Minimum elektrik alan şiddetinin, Şekil 4.12'da verilen elektrot düzeni tarafından sağlandığı belirlenmiş ve bu elektrot düzeni gerilim bölücüde kullanılmıştır.

Gerilim bölücünün performans deneyleri yüksek gerilim altında gerçekleştirilmiştir. Bölücünün anma gerilimindeki çevirme oranının sabit kaldığı çalışma bölgesi belirlenmiştir. Kararlılık deneyi olarak adlandırılan deneyde, gerilim bölücü 6 saat boyunca 100 kV gerilim altında tutulmuş ve her 15 dakikada bir ölçümler alınmıştır. Gerilim bölücünün 4. saatten sonra ısıl dengeye ulaştığı belirlenmiştir.

Gerilim bölücünün 100 kV'taki ısıl dağılımı, bir termal kamera ile 6 saat süresinde incelenmiştir. Gerilim bölücünün ulaştığı maksimum sıcaklığın ortalama 36.0 ^{o}C olduğu ve bunun, direncin maksimum çalışma sıcaklığı olan ortalama 33.0 ^{o}C ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Aradaki 3.0 ^{o}C'lik sıcaklık farkı bölücüde kullanılan ısı tutucu yalıtım malzemelerinin yarattığı düşünülmektedir.

Gerilim bölücünün doğrusallık deneyi; 5, 50 ve 100 kV gerilimlerdeki çevirme oranlarının belirlenmesi suretiyle gerçekleştirilmiştir. Çevirme oranları arasındaki farkın 2 ppm arasında değiştiği sonucuna varılmıştır.

Gerilim bölücünün şebeke frekanslı yüksek alternatif gerilimde de kullanılabileceği düşünülerek alternatif gerilim için çevirme oranı deneysel olarak, 50 kV ve 100 kV'luk tepe değerli yüksek doğru gerilimlerin genlik değerine karşılık gelen yaklaşık 35 kV ve 71 kV etkin değerli alternatif gerilimler uygulanarak belirlenmiştir.

Kısmi boşalma deneyi, U = 100 kV tepe değerli yüksek doğru gerilim değerine karşılık gelen 71 kV ($U/\sqrt{2}$) etkin değerli alternatif gerilimde gerçekleştirilmiştir. Gerilimin yükselmesi ile bölücüde oluşan kısmi boşalmaların ortamın yük miktarıyla aynı olan 0.9 ile 1.1 pC arasında değiştiği görülmüş ve her hangi bir kısmi boşalma

darbesine rastlanmamıştır. Aynı deney kapsamında, gerilim bölücünün direnç gruplarına zarar vermemek amacıyla, direnç gruplarını taşıyan pleksiglas boru bölücüden çıkartılarak ve yerine aynı ölçülerde üzerinde herhangi bir direnç elemanı taşımayan pleksiglas boru yerleştirilerek korona başlangıç gerilimi belirleme deneyi yapılmıştır. Bölücüye yüksek doğru gerilim, pozitif ve negatif kutbiyette 375 kV'a kadar uygulanmıştır. Bu gerilim seviyesinde korona ile ilgili herhangi bir ses ya da ışıltıya rastlanmamıştır. Daha yüksek gerilim seviyesine, eldeki yüksek gerilim kaynağının yetersizliği nedeniyle çıkılamamıştır.

Bölücüde taşıyıcı ve koruyucu elemanlar olarak kullanılan pleksiglas borular ve derlin gibi yalıtım malzemelerinin neden olduğu kaçak akımların ölçülmesi için, direnç gruplarını taşıyan pleksiglas boru bölücüden çıkartılmış ve yerine aynı ölçülerde boş bir pleksiglas boru yerleştirilmiştir. Bölücünün alt elektrodu ile toprak arasına konulan dijital ampermetre ile kaçak akımlar 14.053 nA olarak ölçülmüştür. Bölücünün anma akımı 1 mA olduğundan akan kaçak akımlardan gelecek hatanın 14.1 ppm olduğu belirlenmiştir.

Yüksek gerilim bölücünün birim basamak yanıtı deneyi UME Yüksek Gerilim Laboratuvarı referans darbe gerilim ölçüm sistemi donanımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Darbe kalibratöründen üretilen 1000 V'luk referans darbe, birim basamak üreteci üzerinden gerilim bölücüye uygulanmıştır. Gerilim bölücünün çıkış uçlarındaki işaretler darbe kaydedici üzerinden incelenmiştir. Deney sonucunda gerilim bölücünün birim basamak yanıtı süresinin 204 ns olduğu belirlenmiştir. (5.6) bağıntısı kullanılarak sistemin kapasitesi yaklaşık olarak $C_E = 12.24$ fF olarak hesaplanmıştır. Gerilim bölücüde kullanılan dirençlerin 50 Hz ile 10 MHz bölgesindeki kapasite değişiminin 1.1 pF ile 1.2 pF arasında olduğu, Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Empedans Standartları Laboratuvarı'nda yapılan ölçümler sonucunda belirlenmiştir. 100 adet direncin seri olarak bağlandığı göz önünde bulundurulursa sistem kapasitesinin teorik olarak 11 fF ile 12 fF arasında olduğu ve bu sonucun birim basamak yanıtı bilgisinden bulunan kapasite değeri ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Tez çalışmasının son aşamasında bölücünün belirsizlik bileşenleri belirlenmiş ve belirsizlik bütçesi oluşturulmuştur. Gerilim bölücünün çıkış uçlarındaki alçak gerilimlerin ölçülmesinden gelen belirsizlik $u_L = \pm 20 \times 10^{-6}$, çevirme oranından

gelen belirsizlik $u_B = \pm 11.2 \times 10^{-6}$, bölücünün sıcaklık etkisinden kaynaklanan belirsizlik $u_T = \pm 50 \times 10^{-6}$, gerilim etkisinden kaynaklanan belirsizlik $u_V = 0.5 \times 10^{-6}$, kaçak akımların neden olduğu belirsizlik $u_I = \pm 14.1 \times 10^{-6}$ ve kısa dönem kararlılığından gelen belirsizlik $u_K = \pm 10 \times 10^{-6}$ olarak belirlenmiştir. Tüm belirsizlik bileşenleri (6.9) ve (6.10) bağıntılarında kullanılarak, toplam belirsizlik %95 güvenilirlik düzeyi (k =2) için $U = 66 \times 10^{-6}$ olarak hesaplanmıştır.

Bölücüdeki belirsizlik bileşenleri arasında bulunan, bölücünün sıcaklık etkisinden kaynaklanan belirsizlik bileşeni, toplam belirsizliğe en baskın etkiyi yapmaktadır. Bu belirsizlik bileşeninin düşürülmesi ile gerilim bölücüdeki toplam belirsizliğin ciddi anlamda düşürülmesi mümkündür. Bu ancak gerilim bölücünün ısıl dağılımının çok daha kararlı ve düzgün dağılımlı olmasına bağlıdır. Gerilim bölücüdeki ısıl dağılımın kararlılığı, tüm dirençlerin aynı sıcaklıkta çalışması anlamına gelmektedir. Çok iyi bir ısıl kararlılığı sıcaklık kontrollü gerilim bölücülerden elde etmek olanaklıdır. Bu tür yapılarda, sıcaklık kontrol devresinin gerçeklenmesi ve kontrolün yağ yada gaz ile yapılması uygun olabilecektir. Sıcaklık kontrol sistemi olan bölücülerde, sıcaklık gerilim bölücü boyunca düzgün olarak dağılır, tüm direnç elemanları tüm gerilim düzeylerinde eşit sıcaklıklarda çalışır ve bölücü, ortamdan gelecek ısıl etkilerden korunmuş olur. Bölücüleri sıcaklık kontrollü olarak yaparak, çevirme oranından gelecek belirsizliği ve kısa dönem kararlılığından gelecek sapmaları da azaltmak mümkün olabilecektir.

KAYNAKLAR

[1] **Ryan, H. M.,** 2001. High-Voltage Engineering and Testing, Institution of Electrical Engineers Publication, Wiltshine.

[2] **Kuffel, E., Zaengl, W. S. and Kuffel J.,** 2000. High-Voltage Engineering Fundamentals, Newnes, Toronto.

[3] **Schwarz, H.,** 1999. Megavolts In Cottbus, Etv, Essen.

[4] **Cavallus, N. H.,** 1988. High Voltage Laboratory Planning, Haefely, Basel.

[5] **Kind, D. and Feser, K.,** 1999. High-Voltage Test Techniques, Vieweg/SBA Publications, New Delhi.

[6] **Özkaya, M.,** 1996. Yüksek Gerilim Tekniği **Cilt 2**, Birsen Yayınevi, İstanbul.

[7] **Lucas, J. R.,** 2001. High-Voltage Engineering, Departmant of Electrical Engineering of University of Moratuwa Publications, Sri Lanka.

[8] **IEC 60060-1,** 1989. High-voltage test techniques, Part:1 General definitions and test requirements

[9] **EN 60060-2,** 1994. High-Voltage Test Techniques, **Part:2** Measuring systems, *European Standards.*

[10] **Naidu, M. S. and Kamaraju, V.,** 1995. High-Voltage Engineering, McGraw-Hill, New York.

[11] **IEEE Std 4,** 1995. IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing, *IEEE Standards.*

[12] **Özkaya, M.,** 1996. Yüksek Gerilim Tekniği **Cilt 1**, Birsen Yayınevi, İstanbul.

[13] **BS EN 60052,** 2002. Voltage measurement by means of standard air gaps, *European Standards.*

[14] **Kreuger, F. H.,** 1992. Industrial High Voltage, Volume 2, Delft University Press, Delft.

[15] **Salam, M. A., Anis, H., Morshedy, A. and Radwan, R.,** 2000. High-Voltage Engineering, 2nd Edition, Marcel Dekker, New York.

[16] **Marinescu, A. and Dumbrava, I.,** 1999. A High Voltage Calibration Method Using The Measuring Spark Gap, *11th International Symposium on High Voltage Engineering*, London-UK, 23-27 August, **1,** 222-225.

[17] **Denno, K.,** 1992. High Voltage Engineering in Power Systems, CRC Press, Florida.

[18] **Khalifa, M.,** 1990. High-Voltage Engineering, Marcel Dekker, New York.,

[19] **Akpınar, S.,** 1997. Yüksek Gerilim Tekniğinin Temelleri, Karadeniz Teknik Üniversitesi Basımevi, Trabzon.

[20] **Alston, L. L.,** 1968. High-Voltage Technology, Oxford University Press, London.

[21] **Kuffel, E. and Abdullah, M., (Çev.: Özkaya, M., Tüfekçi, T. ve Ergan, N.)** 1986. Yüksek Gerilim Tekniği, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.

[22] **Park, J. H.,** 1962. Special Shielded Resistor for High-Voltage DC Measurement, *Journal of Research of the National Bureau of Standards,* **66C1**, 19-24

[23] **Ziegler, N. F.,** 1970. Dual Highly Stable 150 kV Divider, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,* **IM-19**, 281-285.

[24] **Peier, D. and Graetsch, V.,** 1979. A 300 kV DC Measuring Device with High Accuracy, *3rd International Symposium on High Voltage Engineering*, Milan-Italy, 28-31 August, **43.08**: 1-4.

[25] **Marx, R.,** 2001. New Concept of PTBs Standard Divider for Direct Voltages of up to 100 kV, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,* **50,** 426-429.

[26] **Marx, R.,** 2000. 100 kV DC Voltage Standard Divider of Shielded Type, *Conference on Precision Electromagnetic Measurements'2000,* Sydney-Australia, 14-19 May 2000, 417-418.

[27] **Merev, A., Yılmaz, O. and Kalenderli, O.,** 2003. Selecting Resistors for a High Voltage Divider, *13rd International Symposium on High Voltage Engineering*, Delft-The Netherlands, 25-29 August.

[28] **Kiseliev, V. V.,** 1995. Reference Meter of Differential Type up to 100 kV, *9th International Symposium on High Voltage Engineering*, Graz-Austria, **4536:**1-2.

[29] **Bolognesi, F., Rizzi, G., Gobbo, R., Pesavento, G., La Paglia, G. and Saracco O.,** 1995. Reference Measuring System for High Direct Voltages, *9th International Symposium on High Voltage Engineering*, Graz-Austria, **4915:**1-4.

[30] **Hirayama, H., Kobayashi, M., Murakami, K. and Kato, T.,** 1974. 10 kV High Accuracy DC Voltage Divider, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,* **IM-23-4**, 314-317.

[31] **Knight, R. B. D. and Martin, P.,** 1993. A High Voltage Divider Having an Uncertainty of 5 ppm at 100 kV, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **42-2**, 568-570.

[32] **Su, T. H., Chen, I. P. and Tsao, S. H.,** 2000. Automated Calibration Methods For A High-Voltage Park Divider, *Conference on Precision Electromagnetic Measurements'2000,* Sydney-Australia, 14-19 May 2000, 307-308.

[33] **Berril, J., Christensen, J. M., Crichton, G. C. and Mc Allister, I. W.,** 1979. A High Precision 300 kV DC Measuring System, 3rd *International Symposium on High Voltage Engineering*, Milan-Italy, 28-31 August, **43.03**:1-3.

[34] **Poletti, F. and Viola, F.,** 1995, Design of an High Voltage Precision Resistive Divider with SF_6 Insulation, *9th International Symposium on High Voltage Engineering*, Graz-Austria, 28-31 August, **4513**:1-4 (in English).

[35] **Pastacı, H.,** 2003. Elektrik ve Elektronik Ölçmeleri, Birsen Yayınevi, İstanbul.

[36] **Howart, P. and Redgrave, F.,** 2003. Metrology in short, Mkom Aps, Denmark.

[37] **BIPM,** 1998. The International System of Units (SI), *Organization Intergouvernementale de la Convention du Metre,* Paris.

[38] **Weck, K. H.,** 1999. Quality of High-Voltage Research and Testing, *11th International Symposium on High Voltage Engineering*, London, UK, 23-27 August, 1-4.

[39] **Yılmaz, Ö., Yılmaz, O. ve Selçik, S.,** 1999. UME Gerilim Laboratuvarı ve Türkiye'de Gerilim Biriminin Gerçekleştirilmesi, *Elektrik-Elektronik Bilgisayar Mühendisliği 8.Ulusal Kongresi*, Gaziantep, **Cilt:1**, 361-364.

[40] **Li, Y., Rungis, J., Jing, T., Su, T., Chen, P. and Lee, K.,** 2001. International Comparison of a Resistive Divider at 100 kV DC, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,* **IM-50,** 436-439.

[41] **Li, Y., Rungis, J., Kim, K. T., Cho, Y. M., McComb, T. R., Dunn, J. G., Der Zwan, L. V. and Hoffman, D.,** 1999. Interlaboratory Comparison of High Direct Voltage Resistor Dividers, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,* **48-2**, 158-161.

[42] **McComb, T. R., So, E., Bennett, D., Shimizu, K., Shishido, K., Miyakoda, M. and Hirayama, H.** 2002. Intercomparison Measurements of Direct Voltage From 10 kV to 200 kV Between NRC, Canada and Jemic, Japan, *Conference on Precision Electromagnetic Measurements'2002*, Ottawa-Canada, 16-21 June 2002, 296-297.

[43] **McComb, T. R., So, E. and Bennett, D.,** 2002. Improvements and Extensions of High Direct Voltage Measurements at NRC, Canada, *Conference on Precision Electromagnetic Measurements'2002*, Ottawa-Canada, 16-21 June 2002, 300-301.

[44] **Deacon, T. A.,** 1985. Intercomparison Measurement of the Ratios of a 100 Kilovolt DC Voltage Divider, *Directorate-General Science*, Research and Development BCR Information, 1-23.

[45] **Hirayama, H., Nagai, K., Kitagawa, H. and Iguchi, T.,** 1995. Calibration of AC and DC High Voltage Standards and Their Traceability by means of JCSS in Japan, *9th International Symposium on High Voltage Engineering,* Graz-Austria, August-28, 4924:1-4.

[46] **Childers, C. B., Dzibua, R. F. and Lee, L. H.,** 1976. A Resistive Ratio Standard for Measuring Direct Voltages to 10 kV, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,* **IM-25,** 505-508.

[47] **Bergman, A.,** 1996. Absolute Calibration of a 100 kV DC Divider, *Conference on Precision Electromagnetic Measurements'1996,* Germany, 17-20 June 1996, 565-566.

[48] **Kopshyn, V. V., Kikalo, V. N. and Butenko, O. G.,** 2002. The International Comparison of The DC High Voltage and AC Voltage Ratio Standars Between VNIIMS and UKRCSM, *Conference on Precision Electromagnetic Measurements'2002*, Ottawa-Canada, 16-21 June 2002, 321-322.

[49] **Angrisani, L., Daponte, P., Dias, C. and Do Vale A. A.,** 1998. Advanced Processing Techniques of High-Voltage Impulse Test Signals, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,* **47-2**, 439-445.

[50] **Campisi, F., Rinaldi, E., Rizzi, G. and Valagussa, C.,** 1999. A New Wirewound Resistive Divider for Steep Front Impulse Tests: Design Criteria and Calibration Procedure, *11th International Symposium on High Voltage Engineering,* London,UK, 23-27 August, 164-167.

[51] **Harada, T., Wakimoto, T., Sato, S. and Saeki, M.,** 2000. Development of Japan's National Standard Class 500kV Lightning Impulse Voltage Divider, *Power Engineering Society Winter Meeting,* USA, 23-27 January, 1564-1568.

[52] **AKR1,** 2002. Laboratuvar Akreditasyon Eğitim Dökümanı, Ulusal Metroloji Enstitüsü, Kocaeli.

[53] **BS EN ISO/IEC 17025,** 2005. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, *European Standards.*

[54] **MEGATRON,** 2000. Prazisions-und Spezial-widerstande, MEGATRON Bauelemente, München, Germany.

[55] **Thomas, J. L.,** 1948. Precision Resistors and Their Measurement, National Bureau of Standards Circular 470 Technical Report, October 8.

[56] **Braudaway, D. W.,** 1999. Precision Resistor: A Review of Material Characteristics, Resistor Design, and Construction Practices, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,* **IM-48-5**, 878-883.

[57] **Kim, K. T., Lee, S. H., Chung, J. and Song, Y. S.,** 2002. Determination of Voltage Coefficient of High DC Voltage Resistor, *Conference on Precision Electromagnetic Measurements'2002*, Ottawa-Canada, 16-21 June 2002, 280-281.

[58] **RHOPOINT,** 2000. Precision Wire-Wound Resistors, Rhopoint Components Documents, England.

[59] **Di Napoli, A., and Mazzetti, C.,** 1979, Electrostatic and Electromagnetic Field Computation for The H.V. Resistive Divider Desing, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,* **98,** 197-206.

[60] **Feser, K.,** 1972. Dimensioning of Electrodes in the UHV Range-Illustrated with the Example of Toroid Electrodes for Voltage Dividers, *International Symposium on High Voltage Engineering*, Munich, Federal Republic of Germany, 9-14 March 1972, 91-97.

[61] **Hauschild, W.,** 1995. The Electrodes of High-Voltage Test Systems on the Basis of the Physics of Discharges in Air, *9th International Symposium on High Voltage Engineering*, Graz-Austria, August-28, 9002:1-11.

[62] **Meeker, D.,** 2004. Finite Element Method Magnetics User's Manual, FEMM, Pennsylvania.

[63] **Naidu, S. R. and Neto, A. F. C.,** 1985. The Stray-Capacitance Equivalent Circuit for Resistive Voltage Divider *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **IM-34-3**, 393-398.

[64] **Zucca, M., Sardi, A., Bottauscio, O. and Saracco, O.,** 1999. Modelling HV Reference Dividers for Lightning Impulses, *11th International Symposium on High Voltage Engineering*, London-UK, 23-27 August, 70-73.

[65] **Kalenderli, Ö.,** 2003. Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi, Ders Notları, İ.T.Ü., İstanbul.

[66] **Öztürk, O.İ.,** 2004. Geçici Aşırı Gerilimlerin Topraklanmasında Toprak ve Topraklayıcıların Davranışının İncelenmesi, *Doktora Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[67] **Kreuger, F. H.,** 1989. Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment, Butterworth, London.

[68] **Harada, T., Wakimoto, T., Sato, S., and Saeki, M.,** 1999. Development of National Standard Class Reference Divider for impulse voltage measurements, *11th International Symposium on High Voltage Engineering*, London-UK, 23-27 August, **1**, 13-16.

[69] **Koester, H. J.,** 1999. Influence of the Test Set-Up in HV Divider Calibrations, *11th International Symposium on High Voltage Engineering*, London-UK, 23-27 August, 246-249.

[70] **Tang, H. and Bergman, A.,** 1999. Uncertainty Calculation for an Impulse Voltage Divider Characterised by Step Response, *11th International Symposium on High Voltage Engineering*, London-UK, 23-27 August, 62-65.

[71] **Rojas, P. M. and Teixeira, J. A.**, 1991. Measurements of the Ratio of a Divider and its Scale Factors for Different Waveforms, *7th International Symposium on High Voltage Engineering,* Dresden, Federal Republic of Germany, 26-30 August, 25-29.

[72] **Kato, S. and Okabe, S.,** 1995. Response Analysis of Voltage Divider by Numerical Electromagnetic Field Computation, *9th International Symposium on High Voltage Engineering*, Graz-Austria*,* 28-31 August, **4524**: 1-4.

[73] **Arndt, V. and Schon, K.,** 1993. On the Uncertainty of the IEC Response Parameters, *8th International Symposium on High Voltage Engineering,* Yokohama-Japan, 23-27 August, 293-296.

[74] **D'Emilio, S., Gabanna, F., La Paglia, G., Negro, M., and Rua, G.,** 1985. Calibration of DC Voltage Dividers up to 100 kV, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,* **IM-34,** 224-227.

[75] **Riley, J. C.,** 1967. The Accuracy of Series and Parallel Connections of Four-Terminal Resistors, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,* **IM-16-3**, 258-268.

EK A R97 VE R169 DİRENÇLERİNİN YÜZEY SICAKLIKLARI VE ZAMAN İLİŞKİSİ

Tablo A.1: R97 direncinin farklı gerilimlerdeki yüzey sıcaklıkları ve zaman ilişkisi

Uygulanan Gerilim (V)	Zaman (Dakika)	Yüzey Sıcaklıkları (^{o}C)			Ortalama Yüzey Sıcaklığı (^{o}C)
		Nokta-1	Nokta-2	Nokta-3	
1000 (%100 Un)	0	23.27	22.32	22.12	22.57
	5	30.47	30.58	29.67	30.24
	10	33.12	33.12	31.60	32.61
	15	33.38	34.42	31.78	33.19
	20	34.23	35.48	32.61	34.11
	25	33.77	35.16	32.62	33.85
	30	33.98	34.33	32.85	33.72
	35	33.61	34.72	32.56	33.63
	40	33.69	34.88	32.25	33.61
	45	33.83	34.82	33.23	33.96
	50	33.89	34.98	32.82	33.90
	55	33.10	34.81	32.95	33.62
	60	33.48	35.14	31.88	33.50
750 (%75 Un)	0	22.20	22.25	22.03	22.16
	5	26.34	26.25	25.71	26.10
	10	27.06	27.58	26.68	27.11
	15	27.87	28.65	27.38	27.97
	20	27.13	28.62	26.78	27.51
	25	27.38	29.07	27.67	28.04
	30	27.64	28.67	27.05	27.79
	35	27.15	29.26	27.18	27.86
	40	28.11	28.48	27.44	28.01
	45	27.36	28.65	26.65	27.55
	50	27.62	28.56	26.98	27.72
	55	27.40	27.98	27.52	27.63
	60	27.39	28.30	27.34	27.68

Tablo A.2: R97 direncinin farklı gerilimlerdeki yüzey sıcaklıkları ve zaman ilişkisi (devamı)

Uygulanan Gerilim (V)	Zaman (Dakika)	Yüzey Sıcaklıkları (^{o}C)			Ortalama Yüzey Sıcaklığı (^{o}C)
		Nokta-1	Nokta-2	Nokta-3	
500 (%50 Un)	0	22.37	22.25	21.90	22.17
	5	23.56	24.27	23.15	23.66
	10	24.35	24.34	23.54	24.08
	15	24.34	24.85	23.97	24.39
	20	24.34	24.44	23.58	24.12
	25	24.20	24.14	23.87	24.07
	30	24.18	24.51	23.91	24.20
	35	24.54	24.28	24.12	24.31
	40	23.96	24.49	24.15	24.20
	45	24.70	24.57	23.80	24.36
	50	24.15	24.37	23.91	24.14
	55	24.08	24.28	23.88	24.08
	60	24.15	24.34	24.10	24.20
250 (%25 Un)	0	22.17	22.13	22.10	22.13
	5	22.47	22.73	22.61	22.60
	10	22.64	22.88	22.81	22.78
	15	22.75	22.73	22.87	22.78
	20	22.68	22.70	22.75	22.71
	25	22.68	22.75	22.82	22.75
	30	22.63	22.78	22.80	22.74
	35	22.54	22.75	22.83	22.71
	40	22.88	22.71	22.80	22.80
	45	22.81	22.78	22.61	22.73
	50	22.76	22.57	22.52	22.62
	55	22.71	22.61	22.52	22.61
	60	22.70	22.60	22.60	22.63

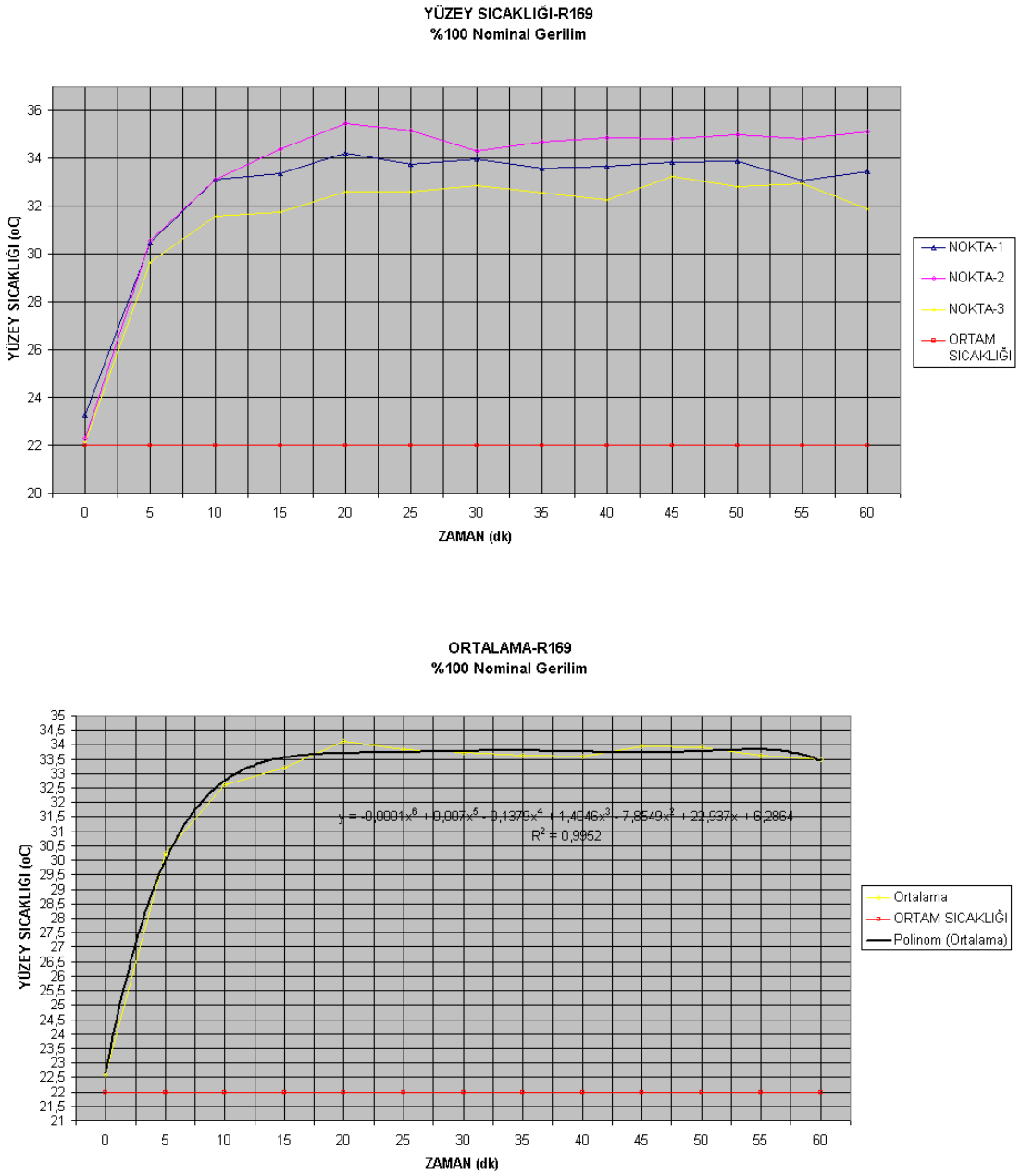
Tablo A.3: R169 direncinin farklı gerilimlerdeki yüzey sıcaklıkları ve zaman ilişkisi

Uygulanan Gerilim (V)	Zaman (Dakika)	Yüzey Sıcaklıkları (^{o}C)			Ortalama Yüzey Sıcaklığı (^{o}C)
		Nokta-1	Nokta-2	Nokta-3	
1000 (%100 Un)	0	22.28	22.09	22.12	22.16
	5	28.35	31.45	29.67	29.82
	10	31.00	31.80	31.60	31.47
	15	32.59	33.07	31.78	32.48
	20	32.69	33.87	32.61	33.06
	25	32.77	33.96	32.62	33.12
	30	33.36	33.05	32.85	33.09
	35	32.97	33.45	32.56	32.99
	40	31.63	33.79	32.25	32.56
	45	31.98	33.72	33.23	32.98
	50	31.88	34.56	32.82	33.09
	55	33.35	33.91	32.95	33.40
	60	32.56	34.90	33.88	33.78
750 (%75 Un)	0	22.25	22.49	22.35	22.36
	5	25.84	26.31	25.29	25.81
	10	26.39	27.34	26.42	26.72
	15	27.93	28.06	26.94	27.64
	20	26.61	27.38	27.01	27.00
	25	27.36	27.25	26.78	27.13
	30	27.17	28.01	27.07	27.42
	35	27.14	27.66	27.13	27.31
	40	27.35	27.73	26.71	27.26
	45	26.43	27.65	27.26	27.11
	50	27.91	28.08	27.17	27.72
	55	27.08	27.65	27.38	27.37
	60	27.58	28.28	27.15	27.67

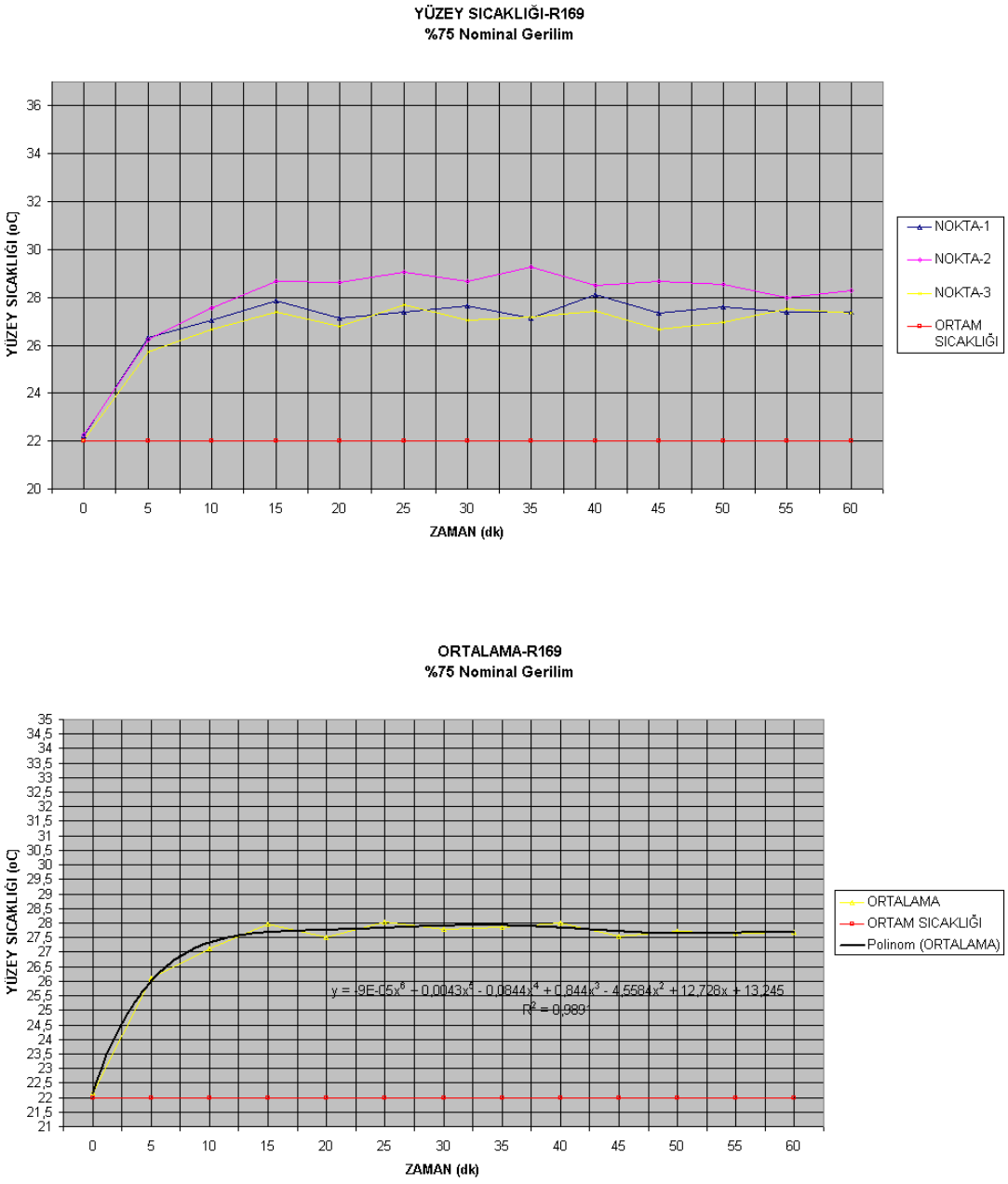
Tablo A.4: R169 direncinin farklı gerilimlerdeki yüzey sıcaklıkları ve zaman ilişkisi (devamı)

Uygulanan Gerilim (V)	Zaman (Dakika)	Yüzey Sıcaklıkları (^{o}C)			Ortalama Yüzey Sıcaklığı (^{o}C)
		Nokta-1	Nokta-2	Nokta-3	
500 (%50 Un)	0	21.92	21.57	21.93	21.81
	5	22.47	23.61	23.81	23.30
	10	23.76	23.96	24.19	23.97
	15	23.93	24.35	24.45	24.24
	20	24.04	24.37	24.06	24.16
	25	24.21	24.56	24.37	24.38
	30	23.80	24.63	24.31	24.25
	35	24.05	24.58	24.37	24.33
	40	24.17	24.83	24.58	24.53
	45	24.07	24.07	24.29	24.14
	50	24.32	24.57	24.20	24.36
	55	24.28	24.59	24.35	24.41
	60	24.22	24.67	24.54	24.48
250 (%25 Un)	0	21.90	22.02	22.13	22.02
	5	22.30	22.56	22.48	22.45
	10	22.48	22.82	22.58	22.63
	15	22.64	22.70	22.66	22.67
	20	22.58	22.80	22.70	22.69
	25	22.71	22.69	22.67	22.69
	30	22.75	22.68	22.81	22.75
	35	22.79	22.78	22.76	22.78
	40	22.84	22.78	22.75	22.79
	45	22.89	22.84	22.77	22.83
	50	22.87	22.81	22.78	22.82
	55	22.80	22.86	22.91	22.86
	60	22.79	22.87	22.60	22.75

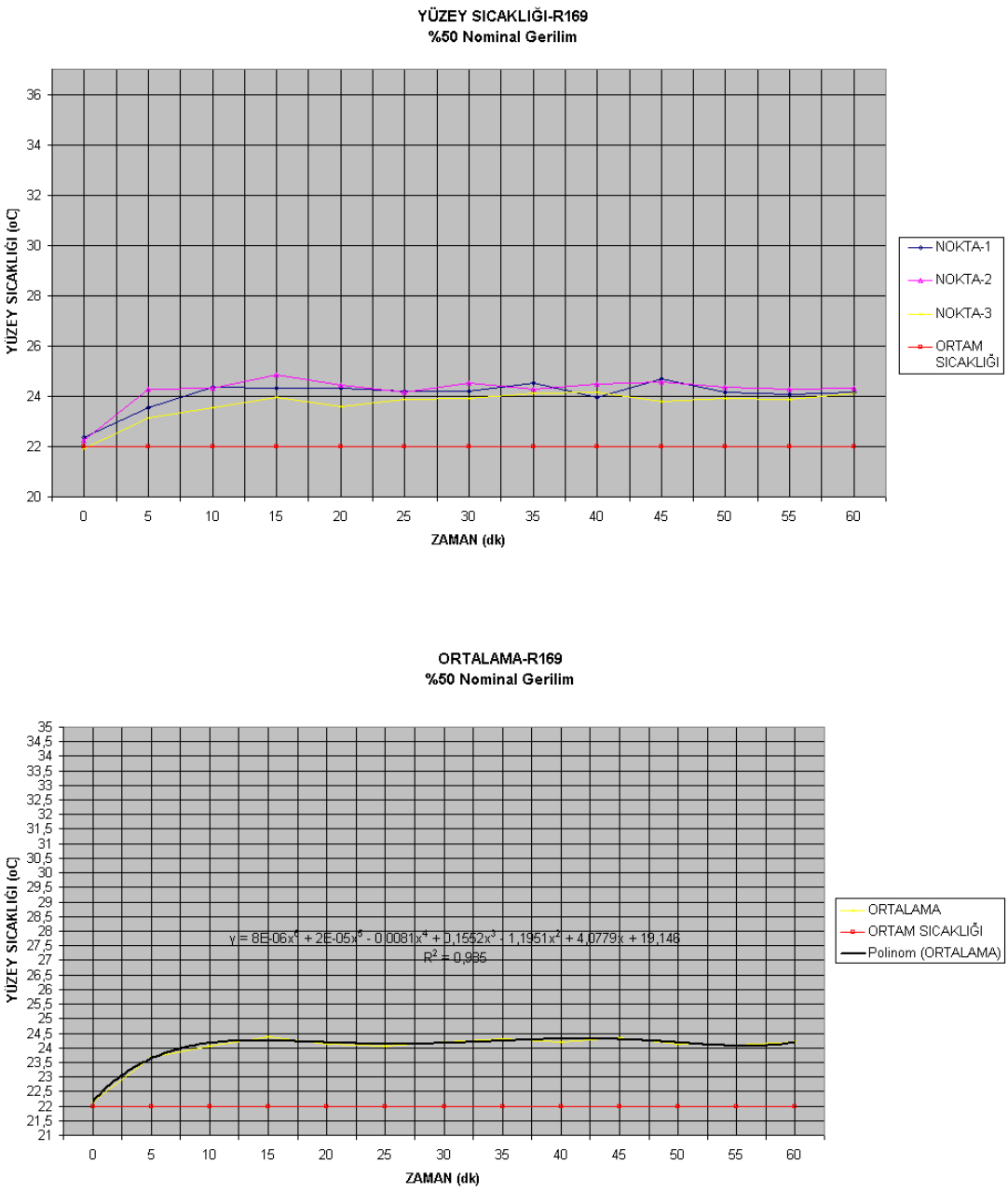
EK B R97 VE R169 DİRENÇLERİNİN YÜZEY SICAKLIKLARININ BELİRLENMESİ



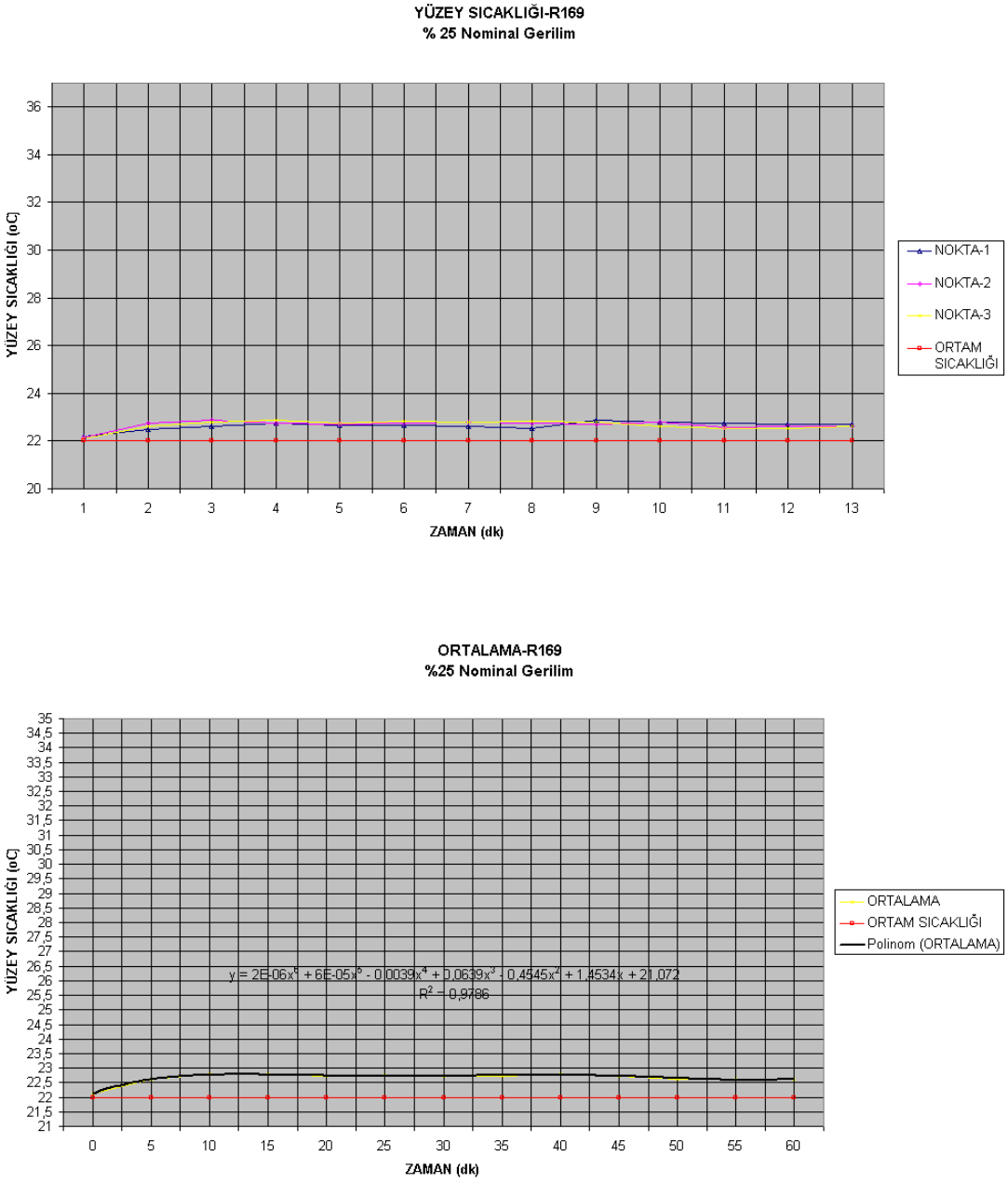
Şekil B.1: R169 direncinin anma gerilimindeki yüzey sıcaklığı



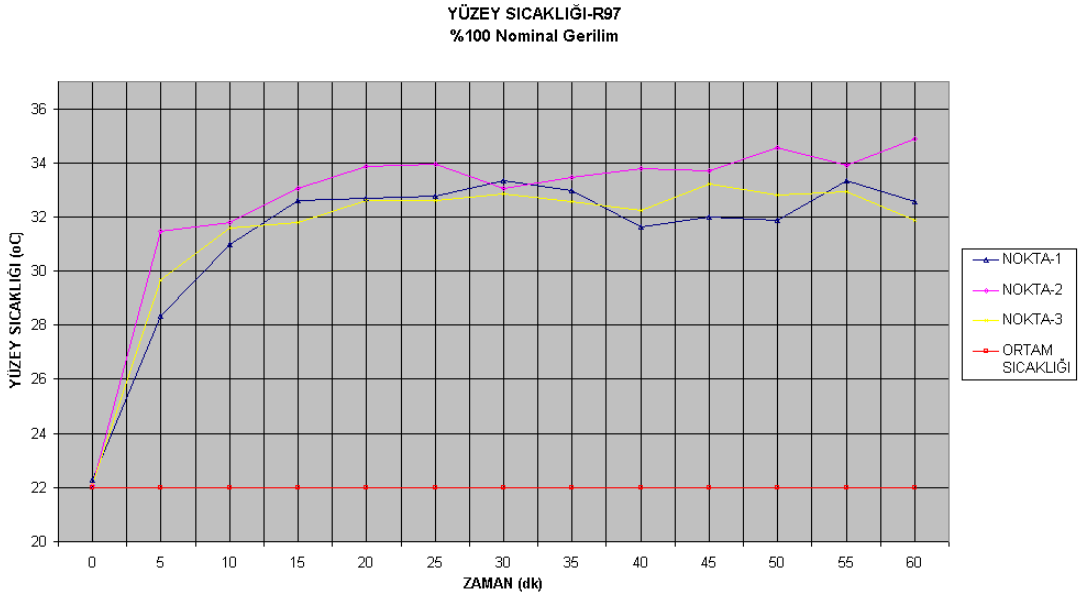
Şekil B.2: R169 direncinin anma geriliminin %75'indeki gerilimde yüzey sıcaklığı

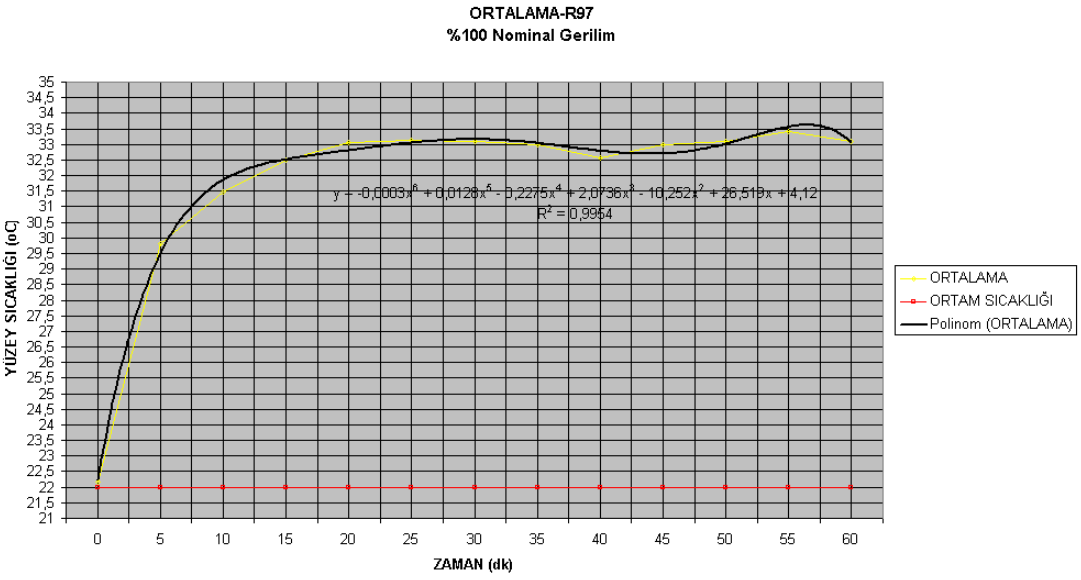


Şekil B.3: R169 direncinin anma geriliminin %50'sindeki gerilimde yüzey sıcaklığı

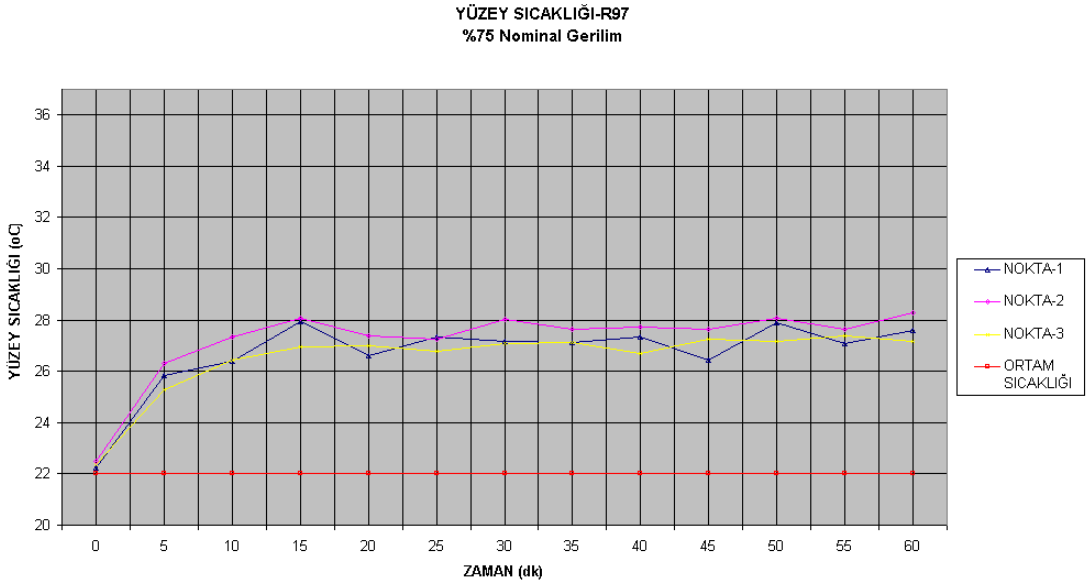


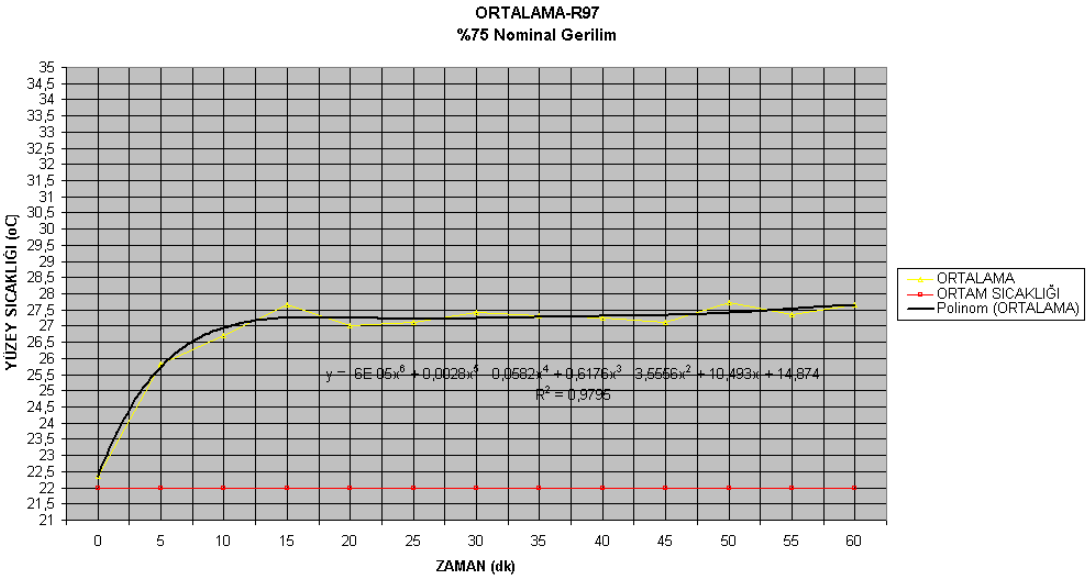
Şekil B.4: R169 direncinin anma geriliminin %25'indeki gerilimde yüzey sıcaklığı



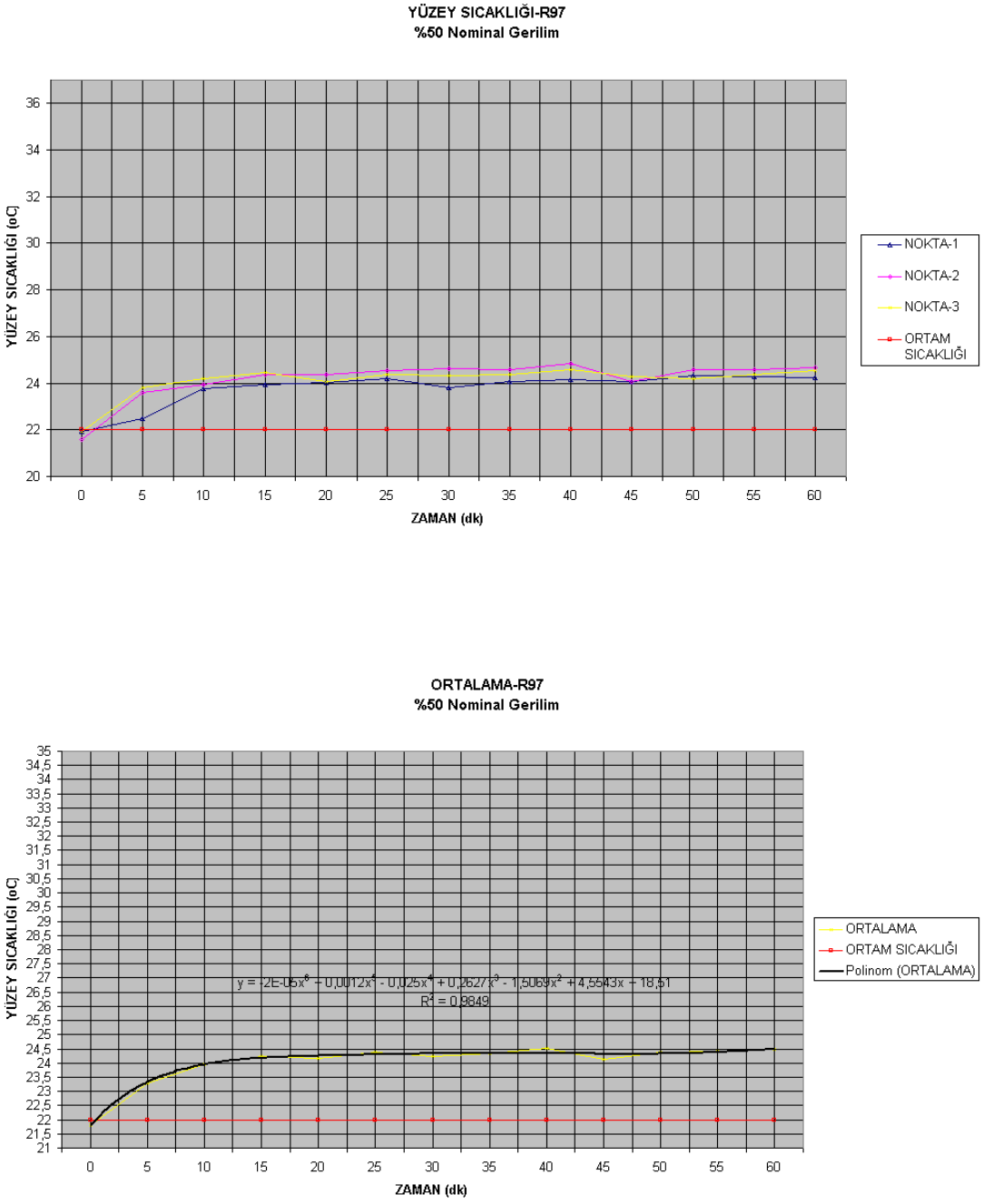


Şekil B.5: R97 direncinin anma gerilimindeki yüzey sıcaklığı

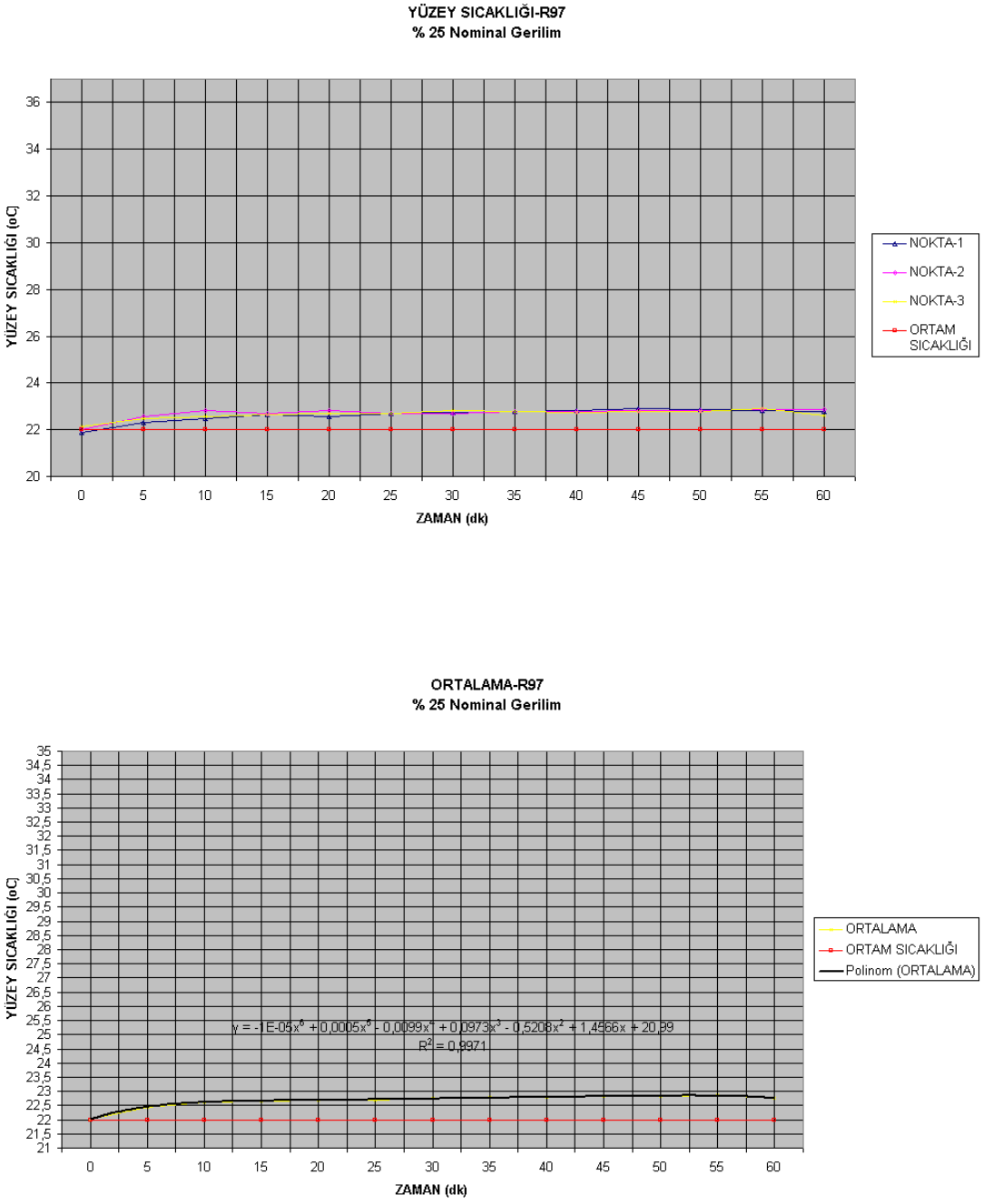




Şekil B.6: R97 direncinin anma geriliminin %75'indeki gerilimde yüzey sıcaklığı



Şekil B.7: R97 direncinin anma geriliminin %50'sindeki gerilimde yüzey sıcaklığı



Şekil B.8: R97 direncinin anma geriliminin %25'indeki gerilimde yüzey sıcaklığı

EK C SICAKLIK KATSAYILARI BELİRLENEN DİRENÇ ELEMANLARININ 13-43°C SICAKLIK ARASINDAKİ DEĞERLERİ VE 23-33°C SICAKLIK ARASINDAKİ SICAKLIK KATSAYILARI

Tablo C.1: R1-R28 numaralı dirençlerin farklı sıcaklıklardaki direnç değerleri ve 23°C-33°C aralığındaki sıcaklık katsayıları

Direnç No	Direnç Değerleri (kΩ)				23°C-33°C aralığındaki sıcaklık katsayısı (ppm/°C)
	13 °C	23 °C	33 °C	43 °C	
R1	999.877	999.903	999.925	999.943	2.2
R2	999.599	999.639	999.664	999.697	2.5
R3	1000.148	1000.146	1000.137	1000.125	-0.9
R4	1000.013	999.995	999.971	999.948	-2.4
R5	1000.183	1000.212	1000.207	1000.208	-0.5
R6	1000.300	1000.317	1000.335	1000.343	1.8
R7	1000.038	1000.069	1000.098	1000.119	2.9
R8	1000.320	1000.301	1000.264	1000.232	-3.7
R9	999.711	999.686	999.657	999.631	-2.9
R10	1000.295	1000.278	1000.255	1000.232	-2.3
R11	999.768	999.772	999.776	999.772	0.4
R12	1000.167	1000.151	1000.122	1000.097	-2.9
R13	1000.131	1000.157	1000.188	1000.212	3.1
R14	1000.218	1000.187	1000.142	1000.096	-4.5
R15	1000.418	1000.394	1000.350	1000.307	-4.4
R16	999.887	999.916	999.941	999.964	2.5
R17	999.917	999.938	999.946	999.948	0.8
R18	999.937	999.927	999.896	999.865	-3.1
R19	1000.119	1000.009	1000.042	999.992	3.3
R20	999.658	999.663	999.665	999.663	0.2
R21	999.991	1000.028	1000.063	1000.095	3.5
R22	999.651	999.631	999.597	999.563	-3.4
R23	999.931	999.948	999.956	999.970	0.8
R24	1000.202	1000.224	1000.233	1000.246	0.9
R25	1000.417	1000.432	1000.437	1000.448	0.5
R26	1000.117	1000.138	1000.147	1000.164	0.9
R27	1000.149	1000.13	1000.085	1000.001	-4.5
R28	1000.015	1000.02	1000.015	1000.021	-0.5

Tablo C.2: R29-R64 numaralı dirençlerin farklı sıcaklıklardaki direnç değerleri ve 23^oC-33^oC aralığındaki sıcaklık katsayıları

Direnç No	Direnç Değerleri (kΩ)				23^oC-33^oC aralığındaki sıcaklık katsayısı (ppm/^oC)
	13 ^oC	23 ^oC	33 ^oC	43 ^oC	
R29	999.833	999.846	999.852	999.844	0.6
R30	1000.472	1000.48	1000.482	1000.483	0.2
R31	999.835	999.841	999.846	999.848	0.5
R32	1000.120	1000.115	1000.098	1000.087	-1.7
R33	999.842	999.896	999.903	999.928	0.7
R34	999.753	999.758	999.758	999.752	0.0
R35	999.650	999.690	999.722	999.749	3.2
R36	1000.303	1000.267	1000.225	1000.189	-4.2
R37	999.087	999.109	999.115	999.139	0.6
R38	1000.161	1000.14	1000.109	1000.085	-3.1
R39	999.989	999.971	999.933	999.899	-3.8
R40	999.889	999.909	999.919	999.925	1.0
R41	999.925	999.942	999.954	999.953	1.2
R42	999.655	999.632	999.603	999.560	-2.9
R43	999.760	999.747	999.719	999.690	-2.8
R44	1000.194	1000.174	1000.137	1000.093	-3.7
R45	1000.201	1000.223	1000.236	1000.246	1.3
R46	999.736	999.748	999.751	999.747	0.3
R47	1000.276	1000.253	1000.212	1000.173	-4.1
R48	999.933	999.980	1000.02	1000.058	4.0
R49	1000.379	1000.366	1000.331	1000.278	-3.5
R50	1000.220	1000.207	1000.183	1000.156	-2.4
R51	999.908	999.895	999.865	999.825	-3.0
R52	1000.260	1000.251	1000.231	1000.202	-2.0
R53	1000.037	1000.046	1000.051	1000.043	0.5
R54	999.605	999.632	999.647	999.652	1.5
R55	1000.055	1000.042	1000.012	999.973	-3.0
R56	999.348	999.329	999.298	999.262	-3.1
R57	1000.006	999.999	999.984	999.959	-1.5
R58	999.969	1000.005	1000.039	1000.06	3.4
R59	999.231	999.265	999.300	999.324	3.5
R60	1000.144	1000.160	1000.171	1000.172	1.1
R61	1000.346	1000.335	1000.304	1000.265	-3.1
R62	999.996	1000.026	1000.051	1000.053	2.5
R63	999.961	999.990	1000.014	1000.02	2.4
R64	1000.033	1000.058	1000.074	1000.075	1.6

Tablo C.3: R65-R100 numaralı dirençlerin farklı sıcaklıklardaki direnç değerleri ve 23^oC-33^oC aralığındaki sıcaklık katsayıları

Direnç No	Direnç Değerleri (kΩ)				23^oC-33^oC aralığındaki sıcaklık katsayısı (ppm/^oC)
	13 ^oC	23 ^oC	33 ^oC	43 ^oC	
R65	999.983	1000.008	1000.025	1000.040	1.7
R66	1000.322	1000.339	1000.346	1000.339	0.7
R67	1000.005	999.989	999.951	999.913	-3.8
R68	1000.256	1000.241	1000.206	1000.172	-3.5
R69	999.772	999.787	999.789	999.793	0.2
R70	1000.202	1000.186	1000.147	1000.112	-3.9
R71	999.776	999.765	999.733	999.707	-3.2
R72	1000.075	1000.105	1000.131	1000.142	2.6
R73	999.997	1000.034	1000.071	1000.095	3.7
R74	999.872	999.861	999.834	999.807	-2.7
R75	1000.288	1000.271	1000.232	1000.202	-3.9
R76	1000.080	1000.087	1000.083	1000.062	-0.4
R77	999.983	1000.008	1000.028	1000.039	2.0
R78	999.988	1000.014	1000.036	1000.042	2.2
R79	999.751	999.757	999.749	999.739	-0.8
R80	1000.284	1000.301	1000.306	1000.316	0.5
R81	1000.571	1000.552	1000.516	1000.474	-3.6
R82	997.145	997.167	997.192	997.208	2.5
R83	999.907	999.891	999.857	999.822	-3.4
R84	1000.010	1000.045	1000.080	1000.111	3.5
R85	1000.203	1000.224	1000.240	1000.244	1.6
R86	1000.011	999.988	999.955	999.916	-3.3
R87	999.671	999.682	999.686	999.682	0.4
R88	1000.280	1000.268	1000.243	1000.215	-2.5
R89	1000.040	1000.025	999.991	999.955	-3.4
R90	999.954	999.962	999.958	999.955	-0.4
R91	999.993	1000.026	1000.049	1000.066	2.3
R92	1000.057	1000.031	999.989	999.942	-4.2
R93	999.939	999.918	999.869	999.814	-4.9
R94	1000.115	1000.162	1000.198	1000.225	3.6
R95	1000.024	1000.042	1000.056	1000.067	1.4
R96	999.878	999.918	999.951	999.975	3.3
R97	999.966	999.993	1000.018	1000.036	2.5
R98	999.934	999.937	999.940	999.938	0.3
R99	1000.072	1000.108	1000.138	1000.164	3.0
R100	1000.412	1000.399	1000.369	1000.339	-3.0

Tablo C.4: R101-R136 numaralı dirençlerin farklı sıcaklıklardaki direnç değerleri ve 23°C-33°C aralığındaki sıcaklık katsayıları

Direnç No	Direnç Değerleri (kΩ)				23°C-33°C aralığındaki sıcaklık katsayısı (ppm/°C)
	13 °C	23 °C	33 °C	43 °C	
R101	999.676	999.727	999.702	999.676	-2.5
R102	999.956	999.929	999.946	999.956	1.7
R103	1000.056	1000.071	1000.065	1000.056	-0.6
R104	999.992	999.964	999.983	999.992	1.9
R105	999.984	1000.032	1000.007	999.984	-2.5
R106	1000.029	1000.007	1000.019	1000.029	1.2
R107	999.959	999.956	999.960	999.959	0.4
R108	1000.244	1000.229	1000.237	1000.244	0.8
R109	1000.111	1000.077	1000.096	1000.111	1.9
R110	1000.282	1000.262	1000.273	1000.282	1.1
R111	999.851	999.877	999.864	999.851	-1.3
R112	999.801	999.801	999.804	999.801	0.3
R113	1000.029	1000.048	1000.029	1000.029	-1.9
R114	999.860	999.928	999.893	999.860	-3.5
R115	1000.062	1000.149	1000.105	1000.062	-4.4
R116	999.997	999.972	999.988	999.997	1.6
R117	999.774	999.833	999.803	999.774	-3.0
R118	999.812	999.76	999.789	999.812	2.9
R119	1000.099	1000.035	1000.07	1000.099	3.5
R120	1000.125	1000.197	1000.162	1000.125	-3.5
R121	1000.013	1000.03	1000.047	1000.041	1.7
R122	1000.196	1000.189	1000.172	1000.168	-1.7
R123	999.777	999.786	999.783	999.786	-0.3
R124	999.884	999.867	999.835	999.794	-3.2
R125	999.942	999.939	999.93	999.912	-0.9
R126	999.922	999.944	999.971	999.986	2.7
R127	100.297	1000.291	1000.264	1000.227	-2.7
R128	1000.084	1000.078	1000.067	1000.049	-1.1
R129	999.937	999.848	999.953	999.952	10.5
R130	1000.001	1000.023	1000.051	1000.051	2.8
R131	1000.221	1000.231	1000.237	1000.237	0.6
R132	1000.022	1000.051	1000.087	1000.108	3.6
R133	1000.089	1000.092	1000.092	1000.078	0.0
R134	1000.03	1000.067	1000.103	1000.127	3.6
R135	1000.169	1000.155	1000.118	1000.073	-3.7
R136	1000.047	1000.051	1000.048	1000.037	-0.3

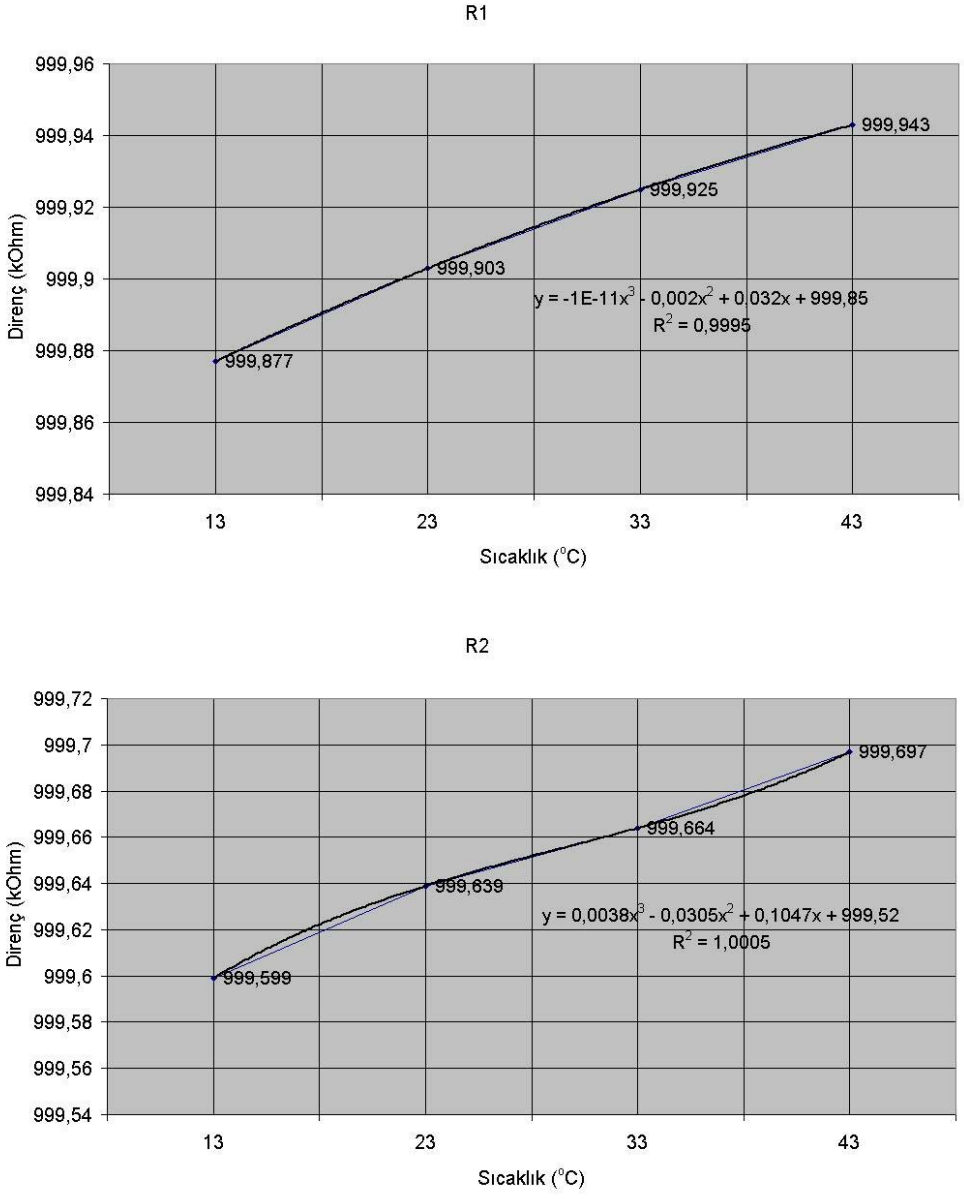
Tablo C.5: R137-R172 numaralı dirençlerin farklı sıcaklıklardaki direnç değerleri ve 23 ^{o}C-33 ^{o}C aralığındaki sıcaklık katsayıları

Direnç No	Direnç Değerleri (kΩ)				23^{o}C-33^{o}C aralığındaki sıcaklık katsayısı (ppm/^{o}C)
	13 ^{o}C	23 ^{o}C	33 ^{o}C	43 ^{o}C	
R137	1000.023	1000.006	999.978	999.952	-2.8
R138	999.757	999.769	999.779	999.775	1.0
R139	999.837	999.81	999.768	999.719	-4.2
R140	999.828	999.81	999.786	999.758	-2.4
R141	999.953	999.973	999.992	1000.003	1.9
R142	999.834	999.845	999.842	999.829	-0.3
R143	999.910	999.924	999.936	999.930	1.2
R144	1000.221	1000.223	1000.224	1000.216	0.1
R145	1000.02	1000.037	1000.08	1000.104	4.3
R146	1000.008	1000.025	1000.045	1000.052	2.0
R147	1000.142	1000.165	1000.199	1000.226	3.4
R148	1000.128	1000.127	1000.122	1000.107	-0.5
R149	1000.17	1000.154	1000.127	1000.104	-2.7
R150	999.909	999.936	999.956	999.957	2.0
R151	1000.138	1000.133	1000.117	1000.092	-1.6
R152	999.899	999.926	999.961	999.980	3.5
R153	999.919	999.908	999.888	999.881	-2.0
R154	999.648	999.627	999.576	999.544	-5.1
R155	999.911	999.932	999.947	999.953	1.5
R156	1000.027	1000.037	1000.074	1000.053	3.7
R157	999.862	999.835	999.803	999.760	-3.2
R158	1000.096	1000.089	1000.053	1000.008	-3.6
R159	1000.26	1000.276	1000.289	1000.291	1.3
R160	1000.043	1000.075	1000.104	1000.13	2.9
R161	999.674	999.635	999.597	999.554	-3.8
R162	999.994	999.999	1000.016	1000.025	1.7
R163	999.774	999.742	999.716	999.685	-2.6
R164	1000.212	1000.178	1000.153	1000.127	-2.5
R165	999.910	999.882	999.860	999.840	-2.2
R166	999.905	999.909	999.925	999.936	1.6
R167	1000.144	1000.145	1000.154	1000.157	0.9
R168	999.961	999.975	999.994	1000.012	1.9
R169	1000.034	999.997	999.969	999.940	-2.8
R170	999.996	999.968	999.944	999.917	-2.4
R171	984.731	984.743	984.769	984.79	2.6
R172	999.979	1000.001	1000.033	1000.062	3.2

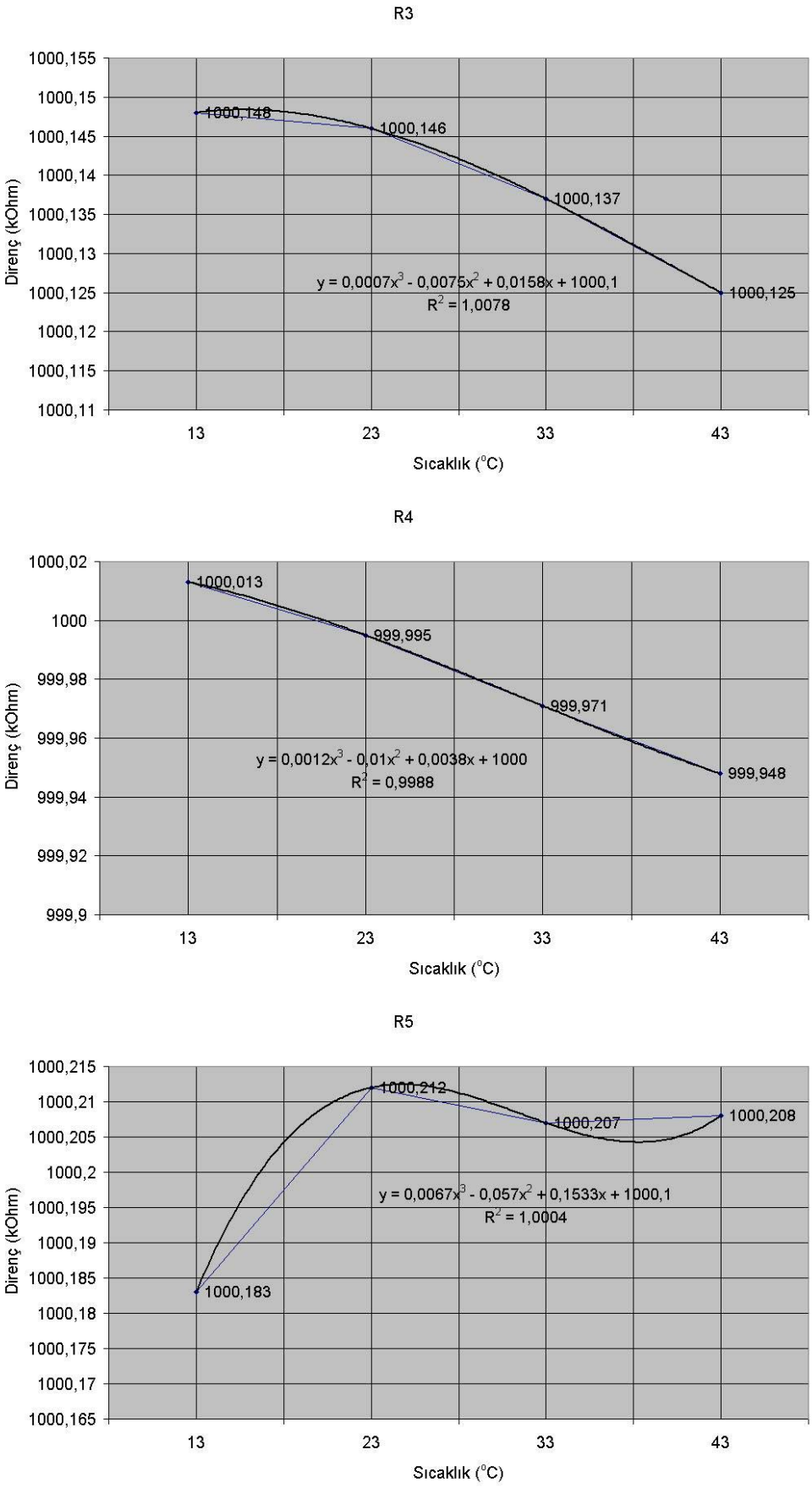
Tablo C.6: R173-R194 numaralı dirençlerin farklı sıcaklıklardaki direnç değerleri ve 23 ^{o}C-33 ^{o}C aralığındaki sıcaklık katsayıları

Direnç No	Direnç Değerleri (kΩ)				23^{o}C-33^{o}C aralığındaki sıcaklık katsayısı (ppm/^{o}C)
	13 ^{o}C	23 ^{o}C	33 ^{o}C	43 ^{o}C	
R173	999.854	999.862	999.88	999.896	1.8
R174	999.341	999.307	999.28	999.254	-2.7
R175	999.935	999.964	1000.006	1000.043	4.2
R176	1000.010	1000.022	1000.041	1000.062	1.9
R177	999.969	999.998	1000.022	1000.055	2.4
R178	1000.053	1000.056	1000.076	1000.092	2.0
R179	1000.237	1000.196	1000.153	1000.11	-4.3
R180	999.965	999.969	999.978	999.984	0.9
R181	999.994	1000.002	1000.025	1000.036	2.3
R182	999.894	999.910	999.924	999.934	1.4
R183	999.974	999.995	1000.016	1000.025	2.1
R184	1000.268	1000.277	1000.287	1000.29	1.0
R185	999.702	999.679	999.643	999.613	-3.6
R186	999.929	999.957	999.966	999.970	0.9
R187	1000.068	1000.092	1000.108	1000.119	1.6
R188	999.993	999.028	999.058	999.086	3.0
R189	999.885	999.910	999.924	999.929	1.4
R190	999.813	999.844	999.846	999.84	0.2
R191	999.945	1000.003	1000.025	1000.046	2.2
R192	999.966	1000.008	1000.038	1000.064	3.0
R193	1000.159	1000.152	1000.116	1000.083	-3.6
R194	1000.014	1000.103	1000.122	1000.137	1.9

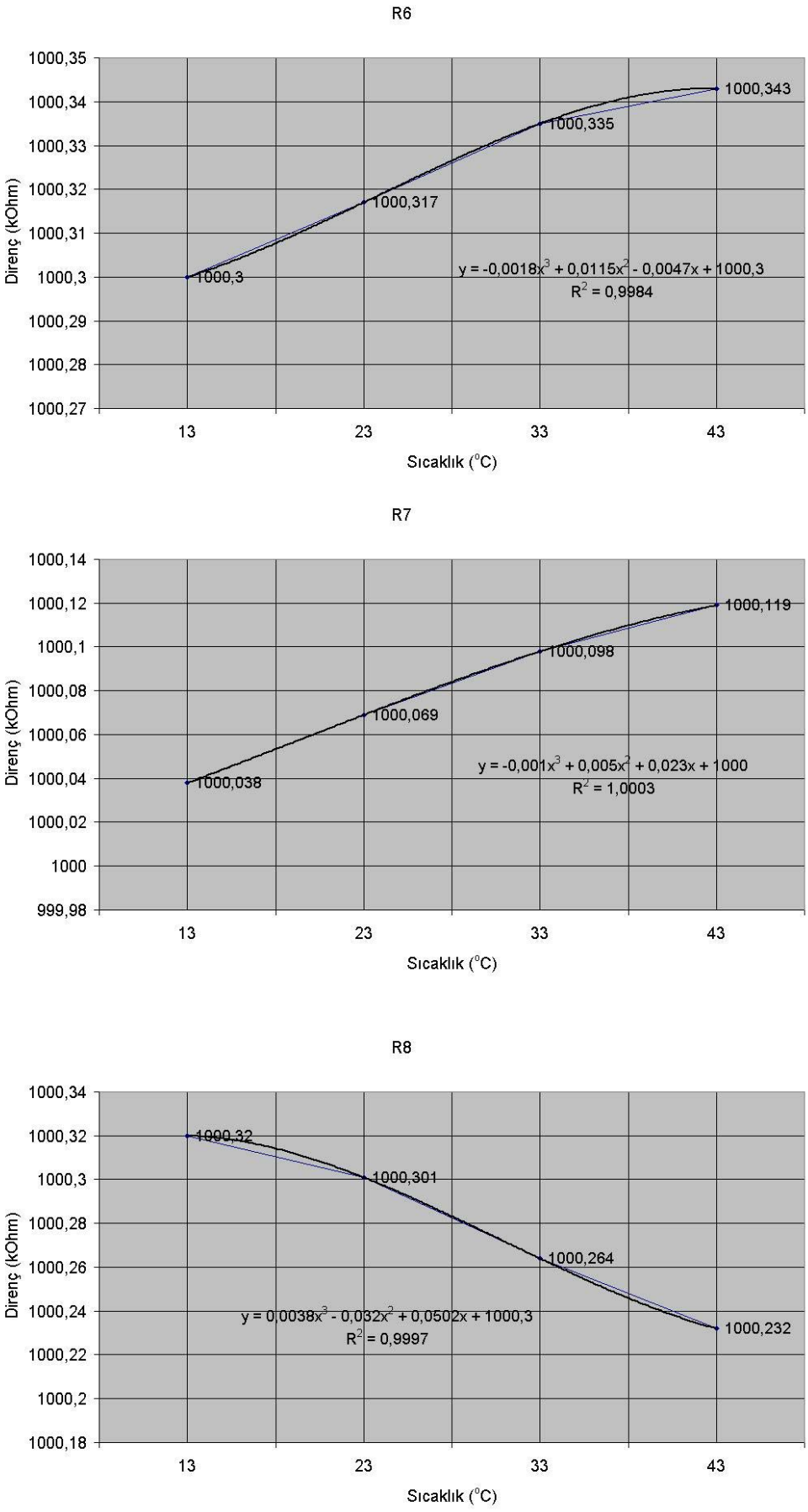
EK D SICAKLIK KATSAYILARI BELİRLENEN DİRENÇ ELEMANLARININ 13-43°C SICAKLIK ARASINDAKİ DEĞİŞİMLERİ



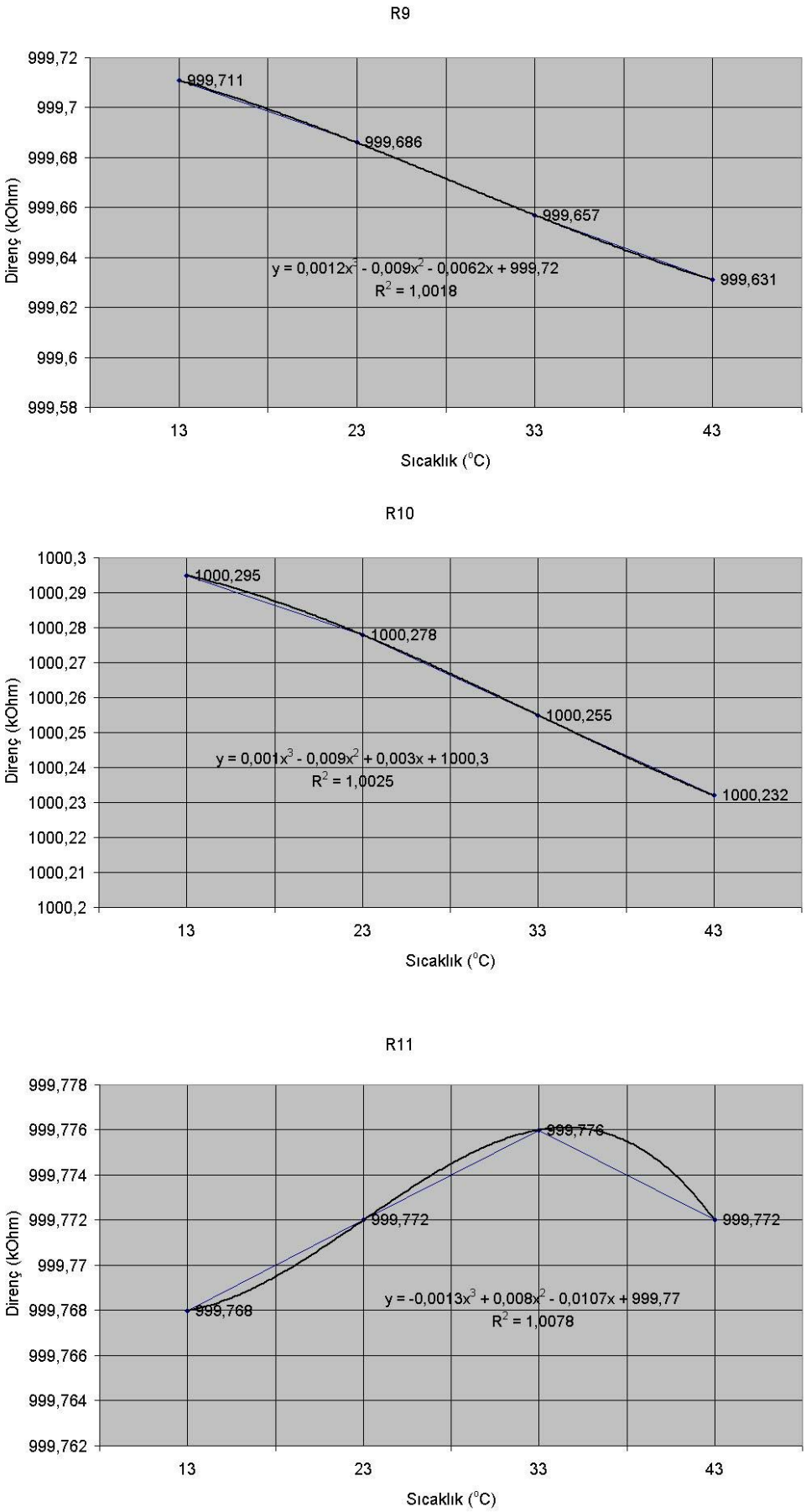
Şekil D.1: R1 ve R2 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



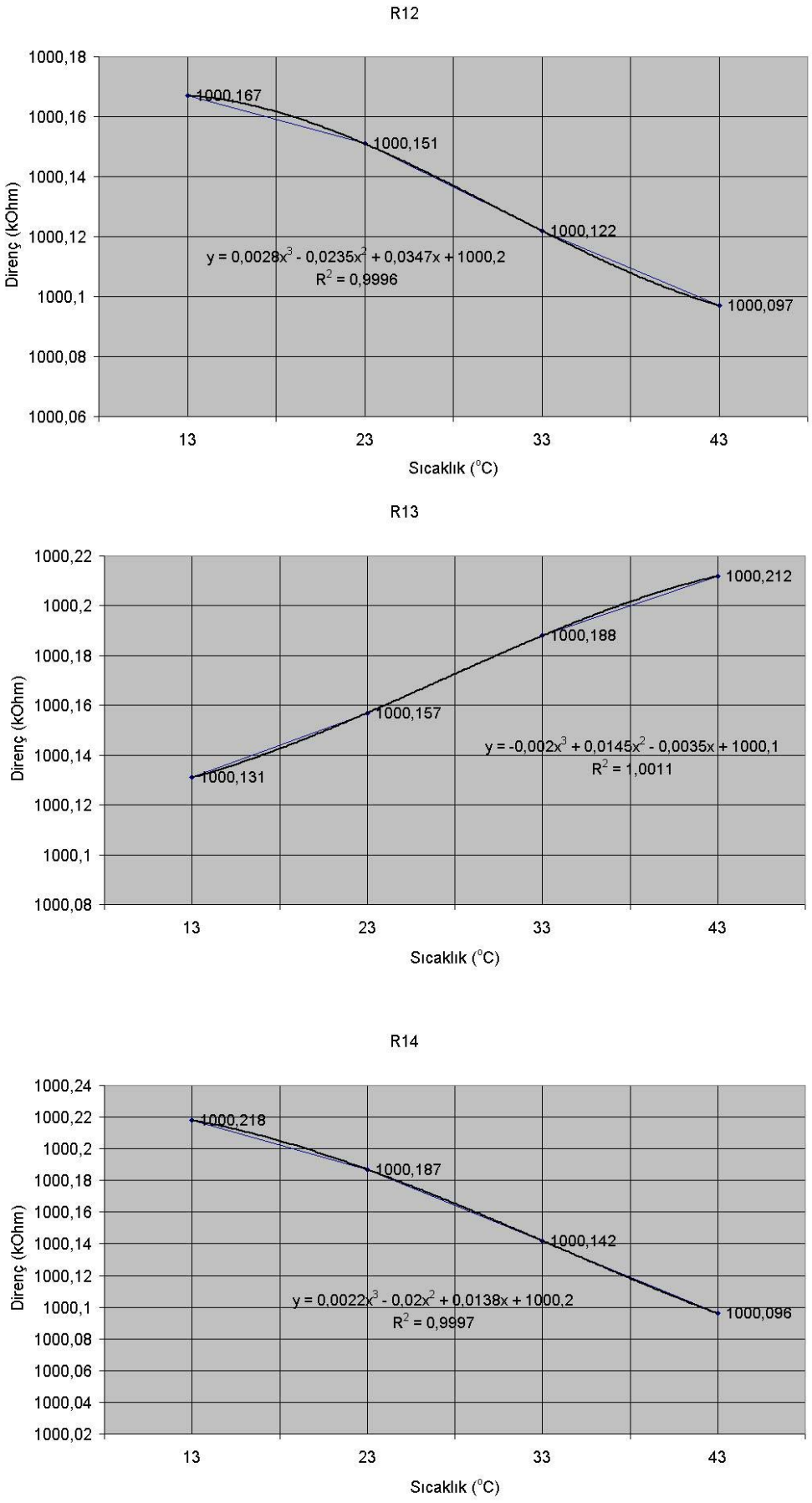
Şekil D.2: R3, R4 ve R5 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



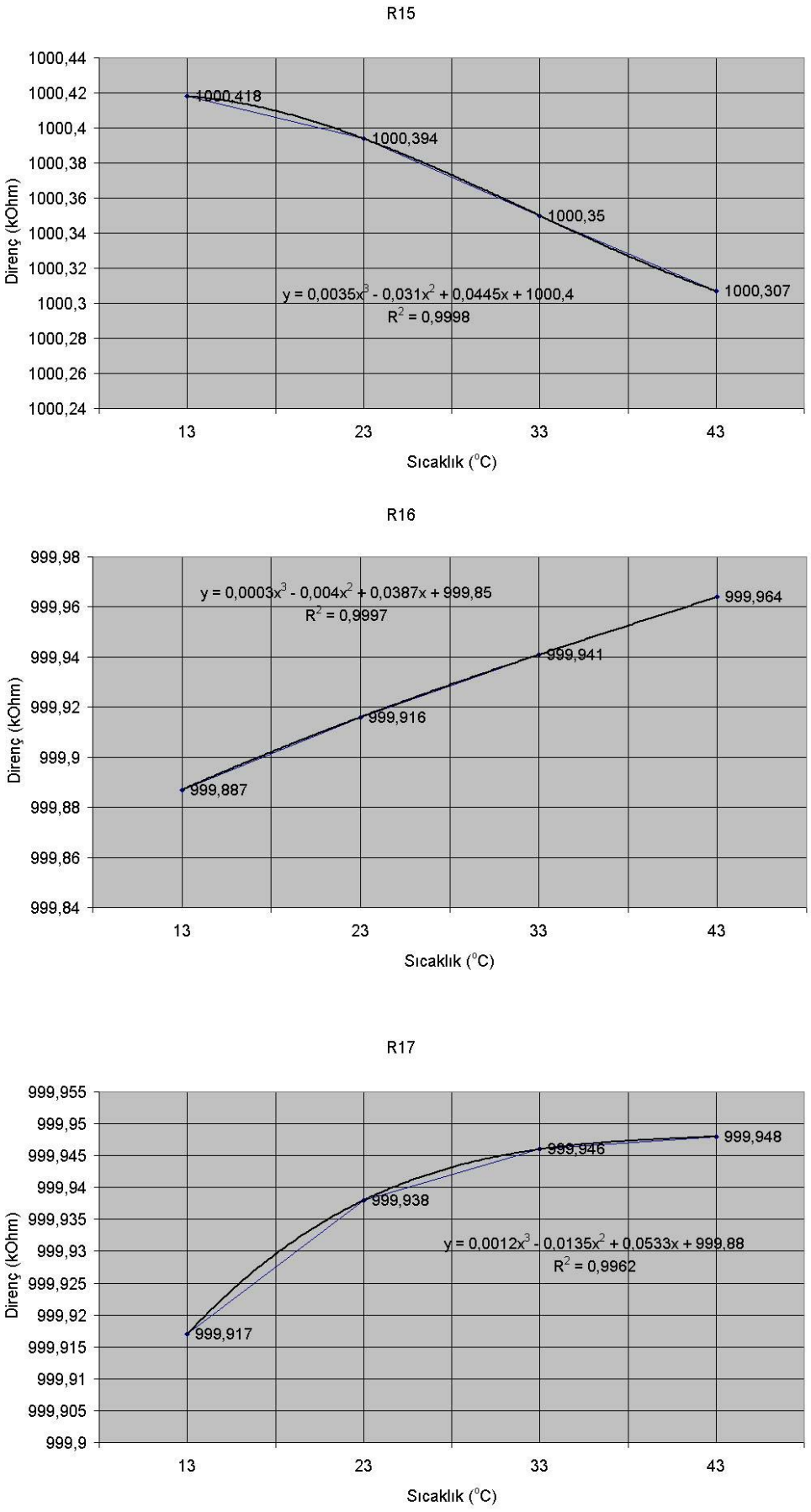
Şekil D.3: R6, R7 ve R8 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



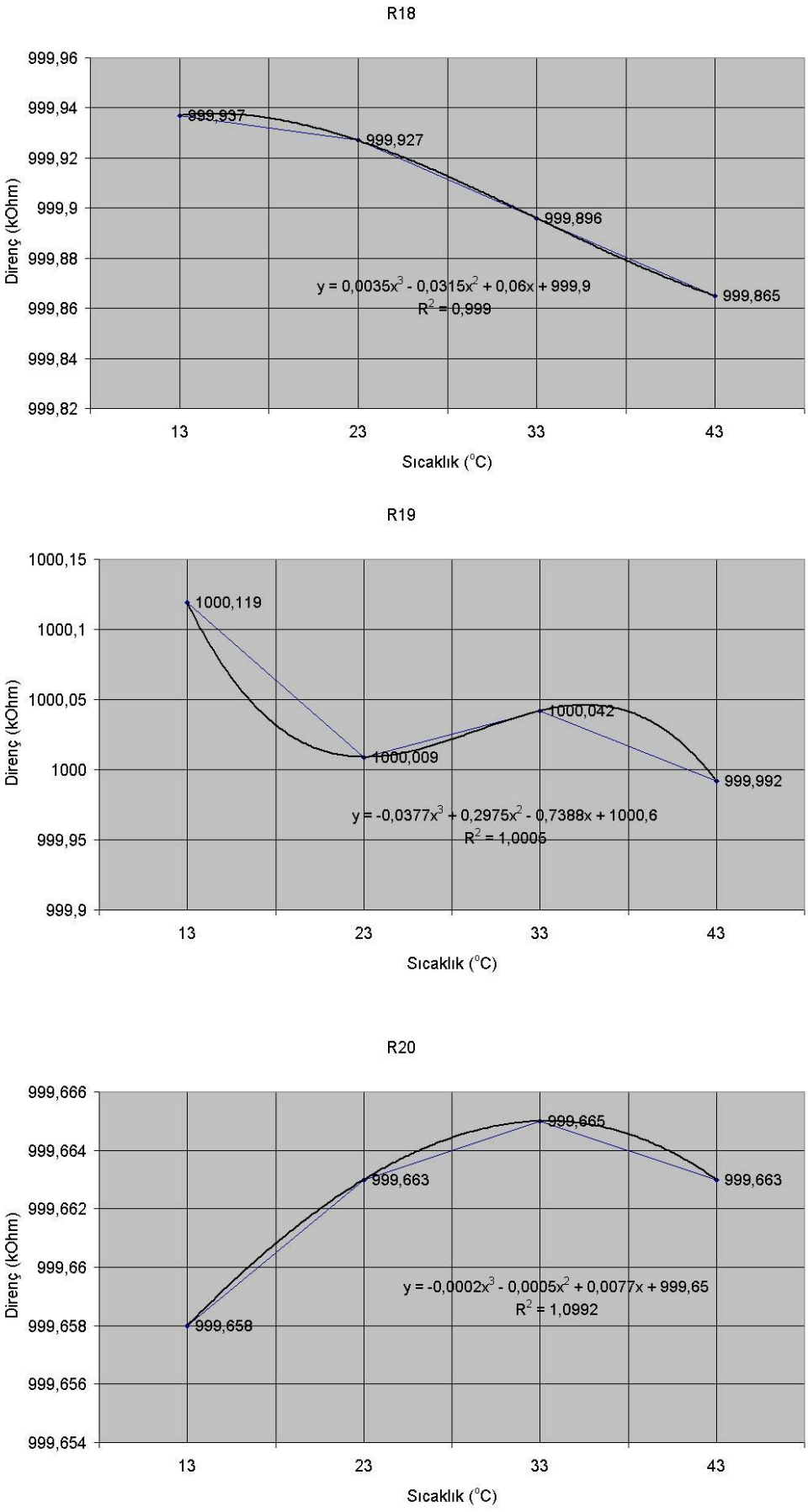
Şekil D.4: R9, R10 ve R11 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



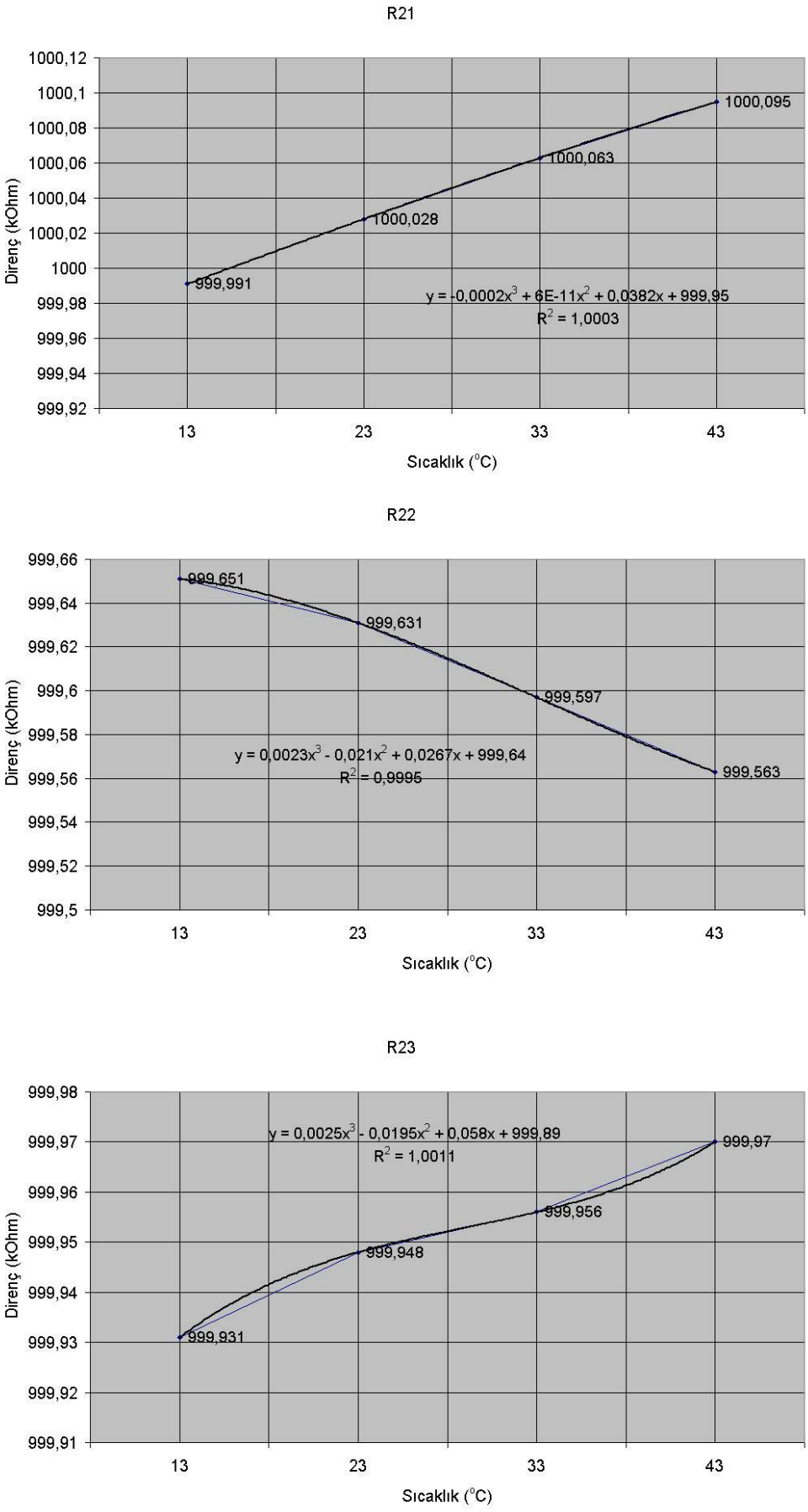
Şekil D.5: R12, R13 ve R14 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



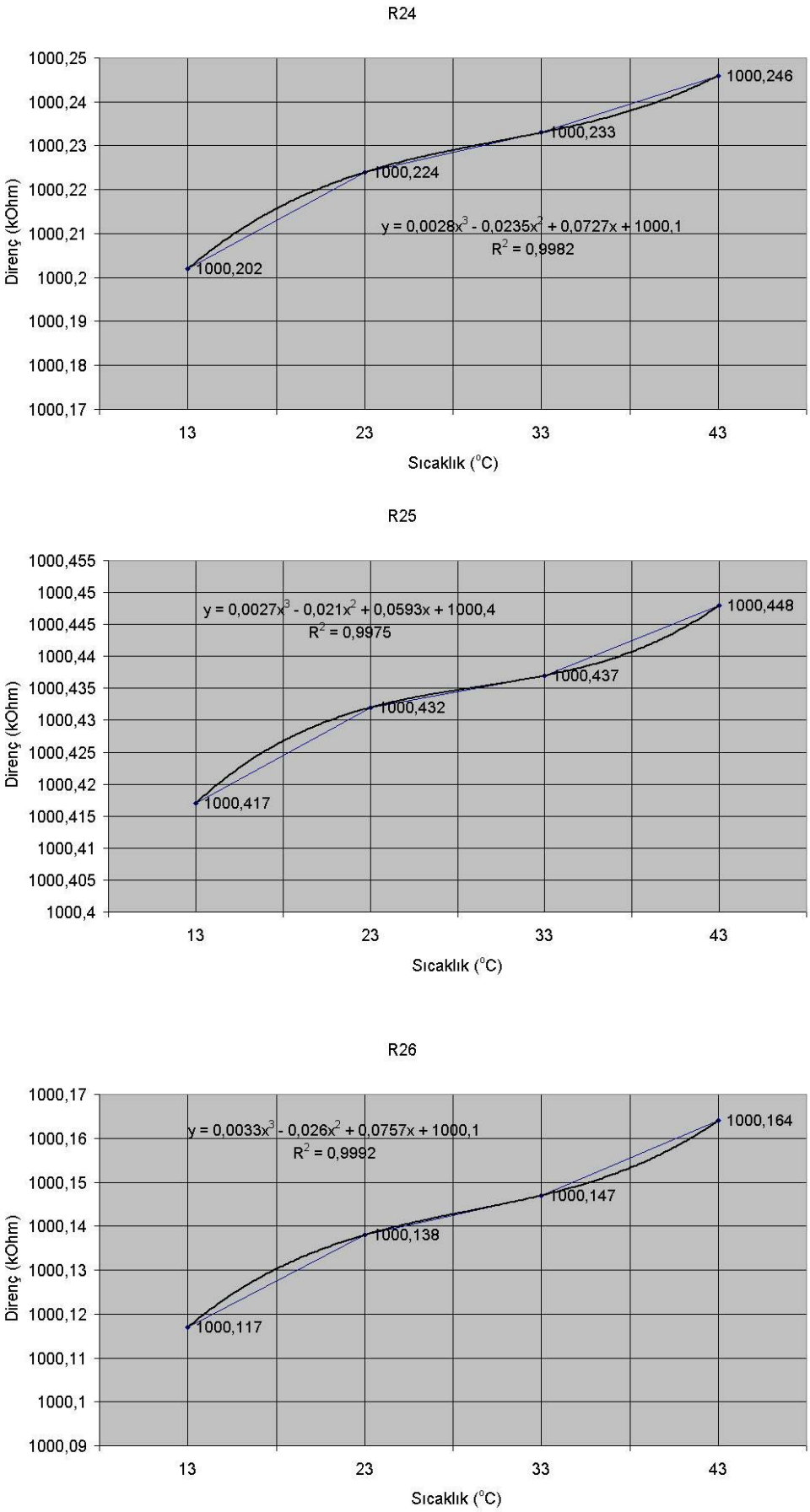
Şekil D.6: R15, R16 ve R17 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



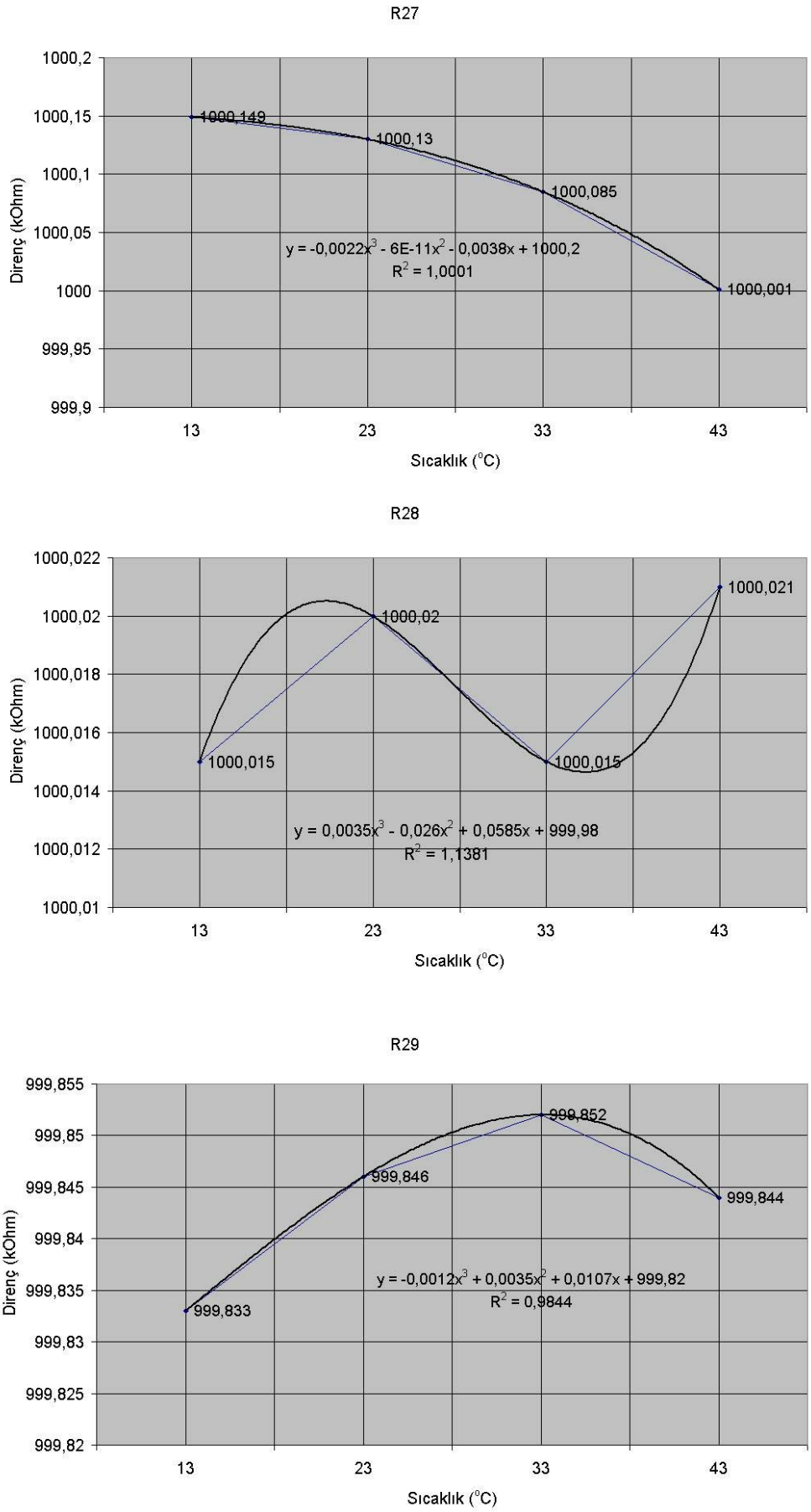
Şekil D.7: R18, R19 ve R20 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



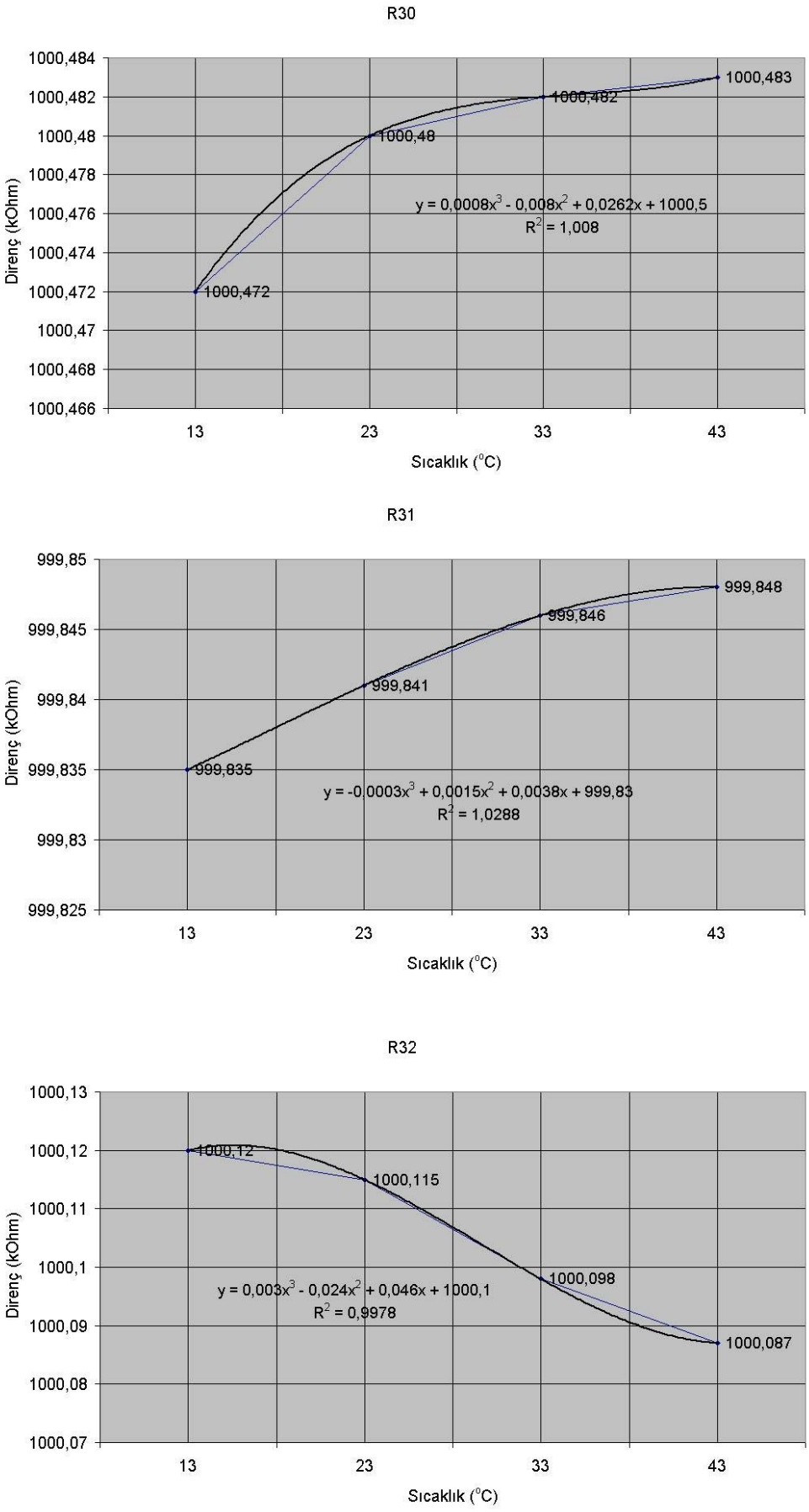
Şekil D.8: R21, R22 ve R23 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



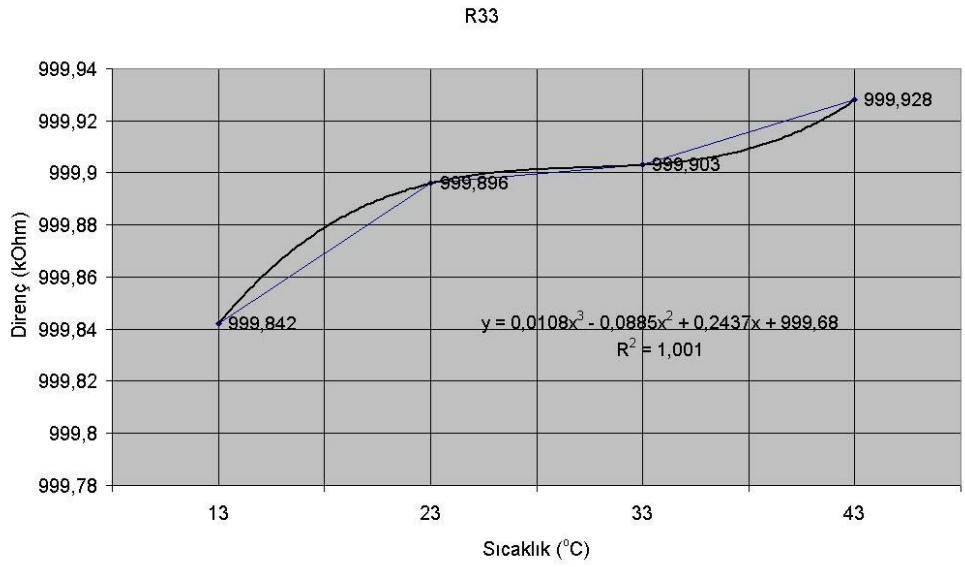
Şekil D.9: R24, R25 ve R26 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri

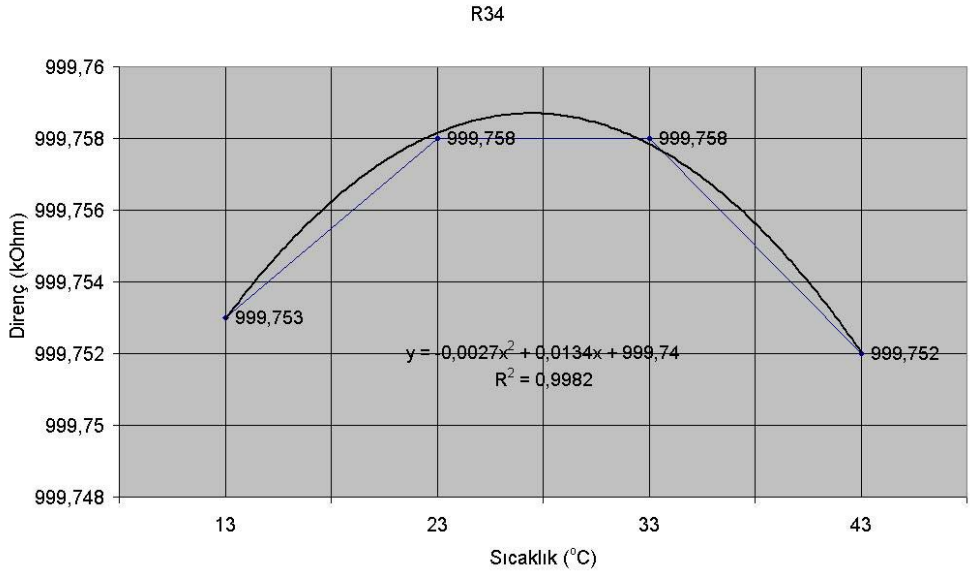


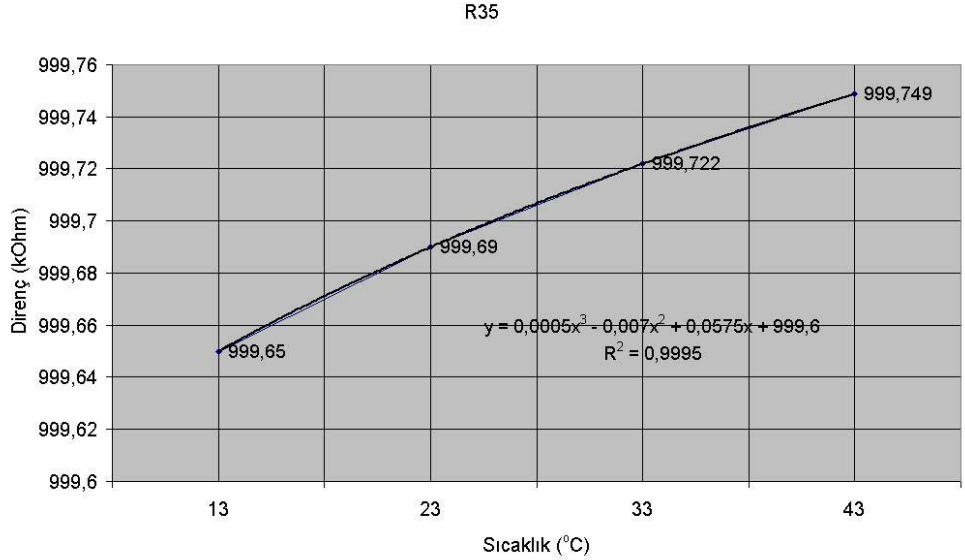
Şekil D.10: R27, R28 ve R29 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



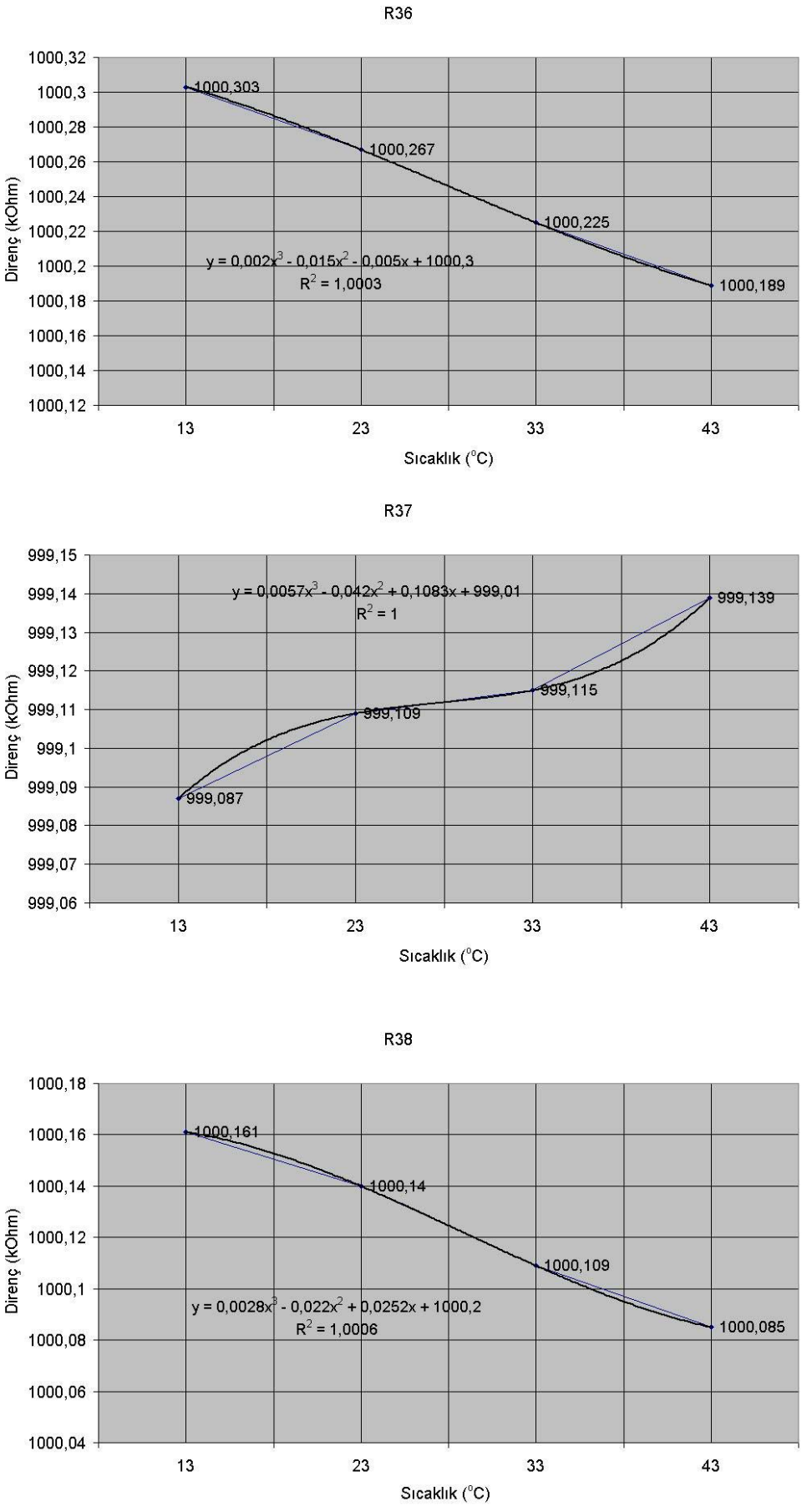
Şekil D.11: R30, R31 ve R32 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



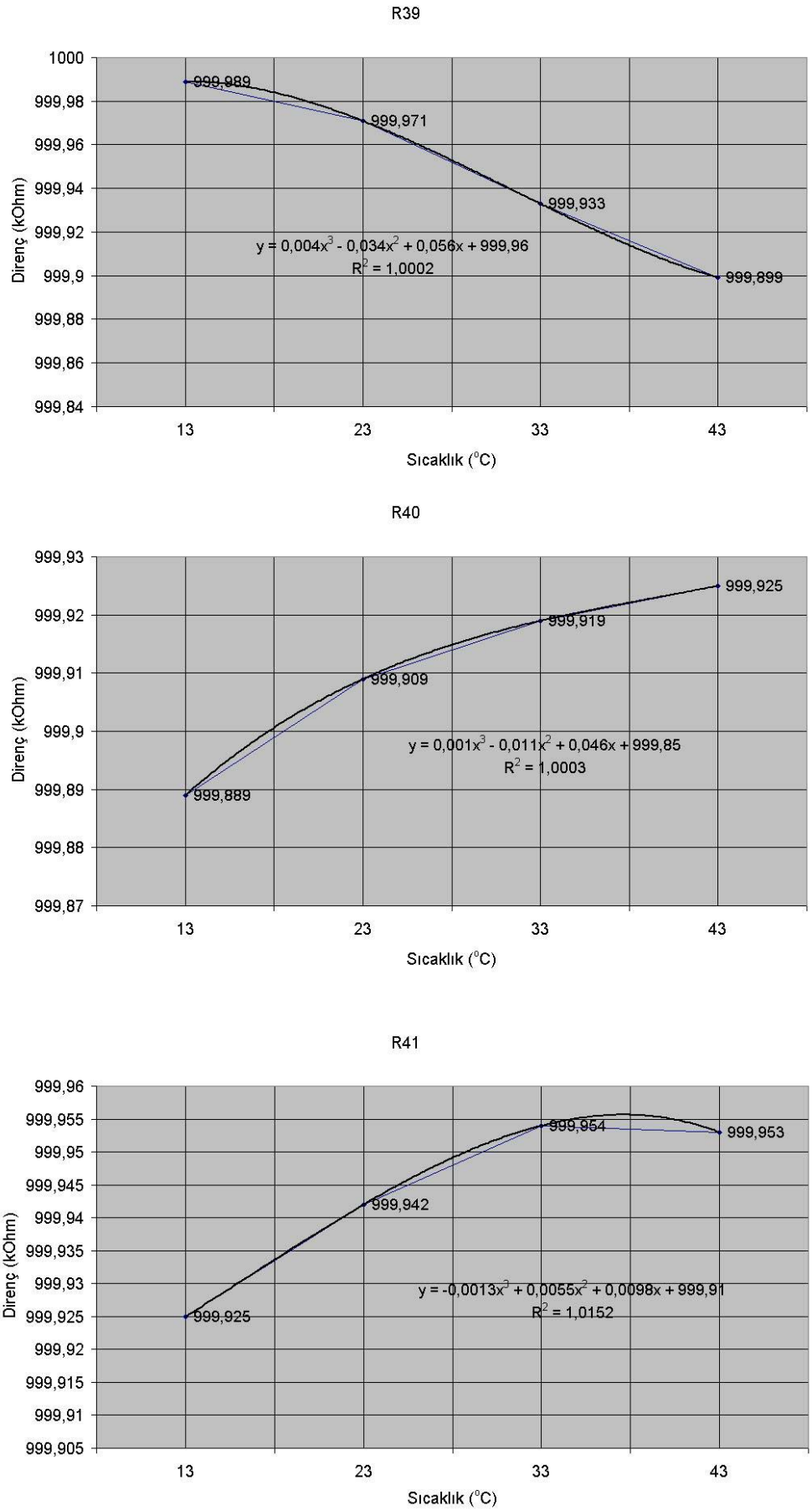




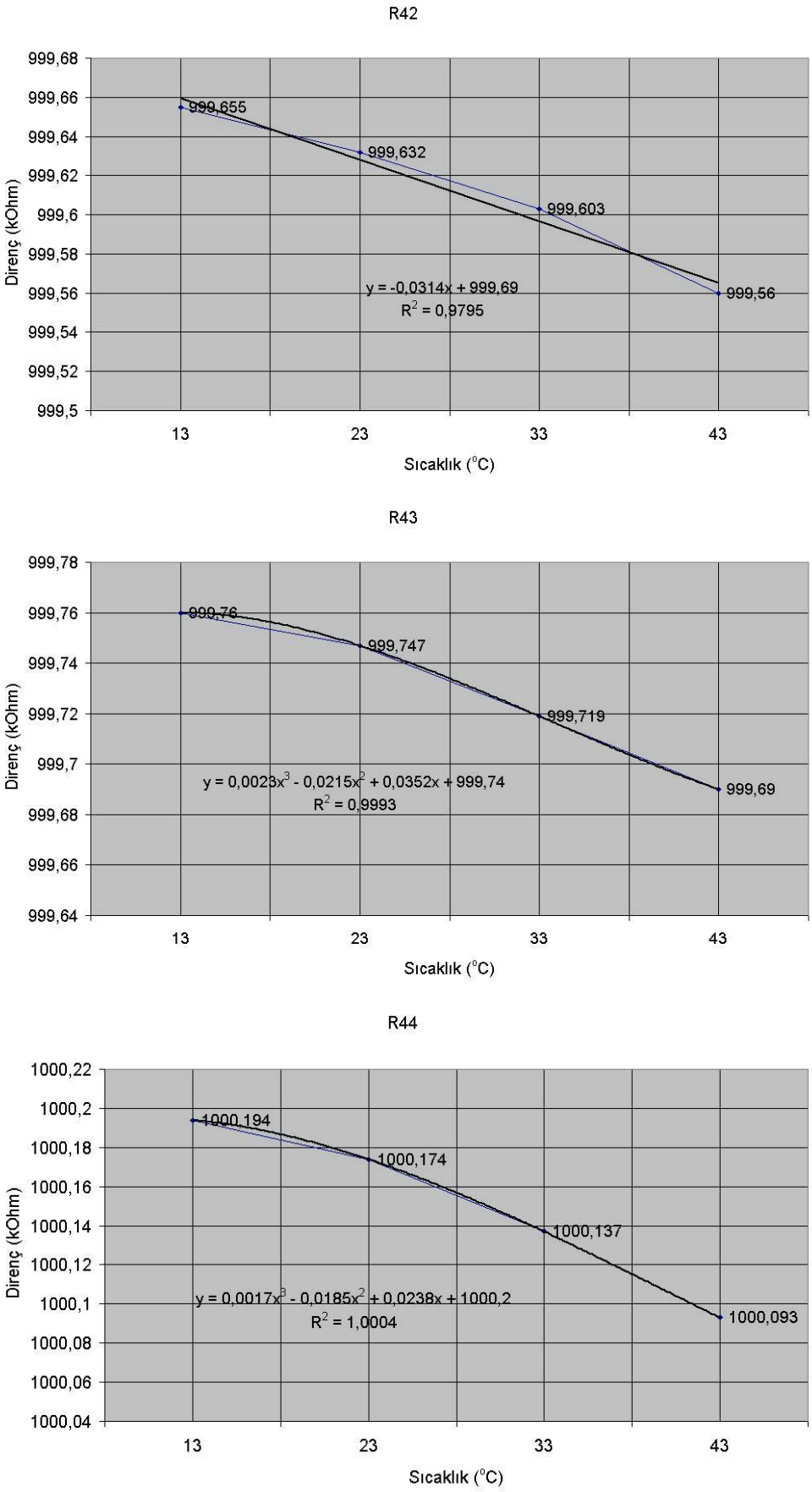
Şekil D.12: R33, R34 ve R35 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



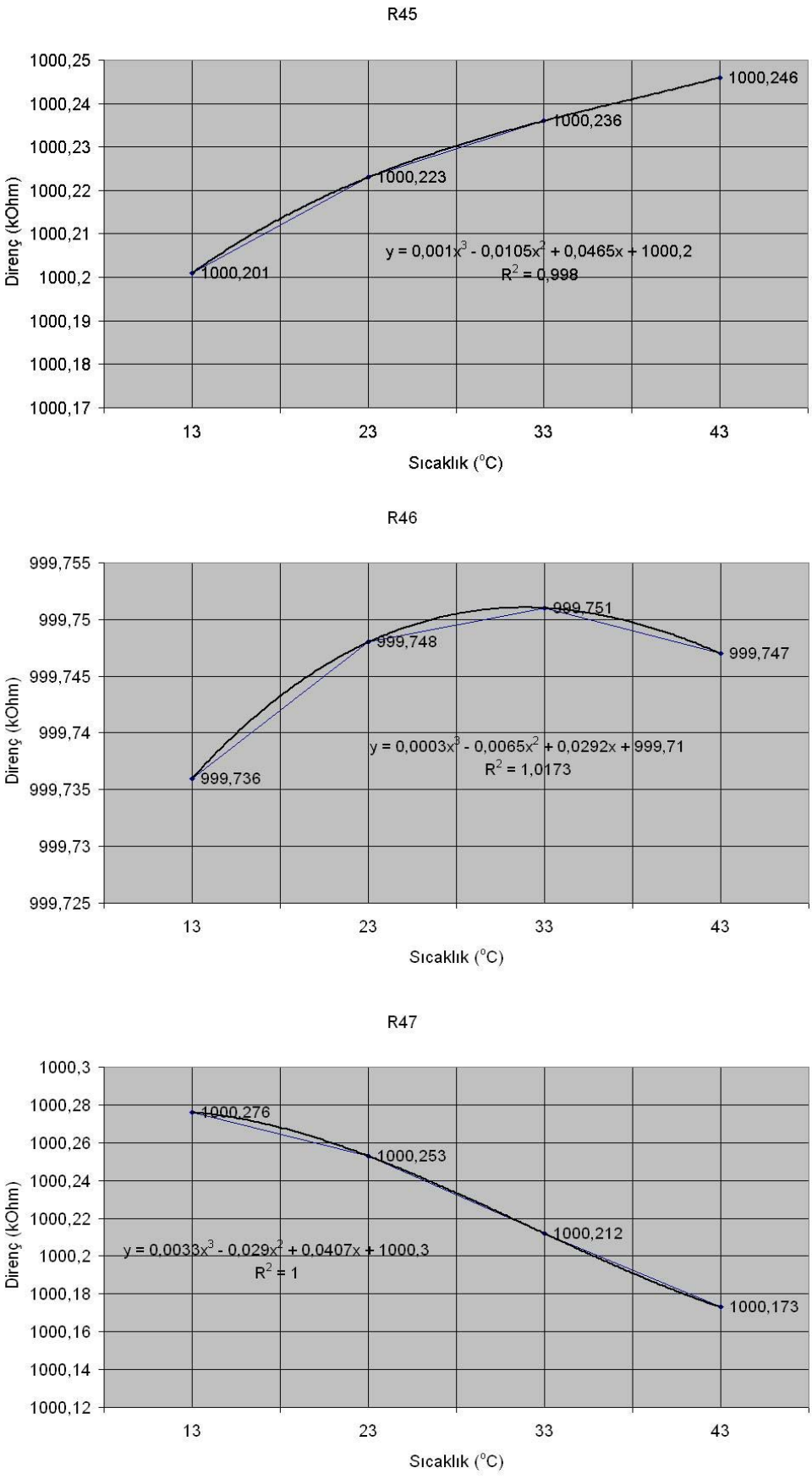
Şekil D.13: R36, R37 ve R38 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



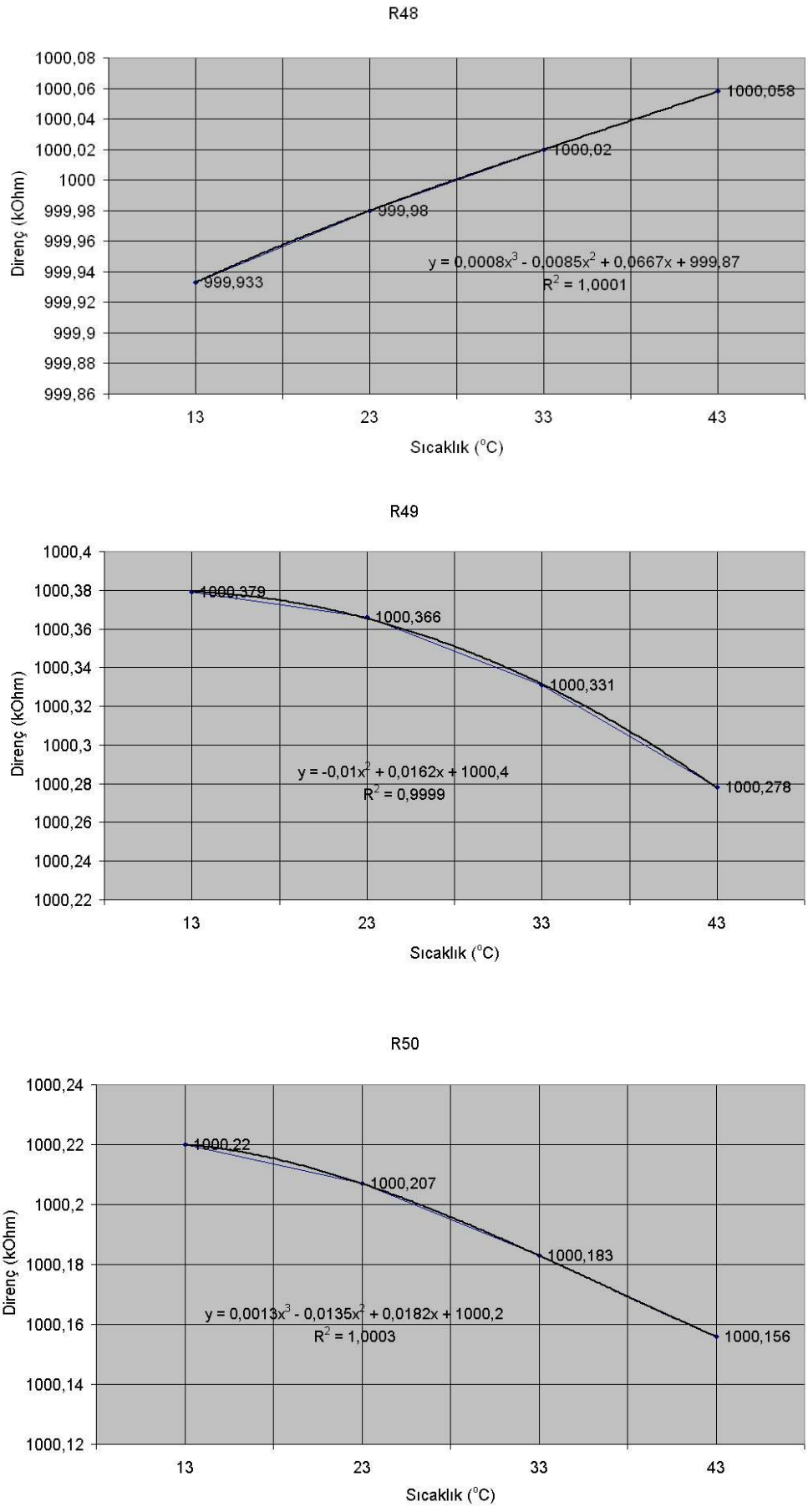
Şekil D.14: R39, R40 ve R41 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



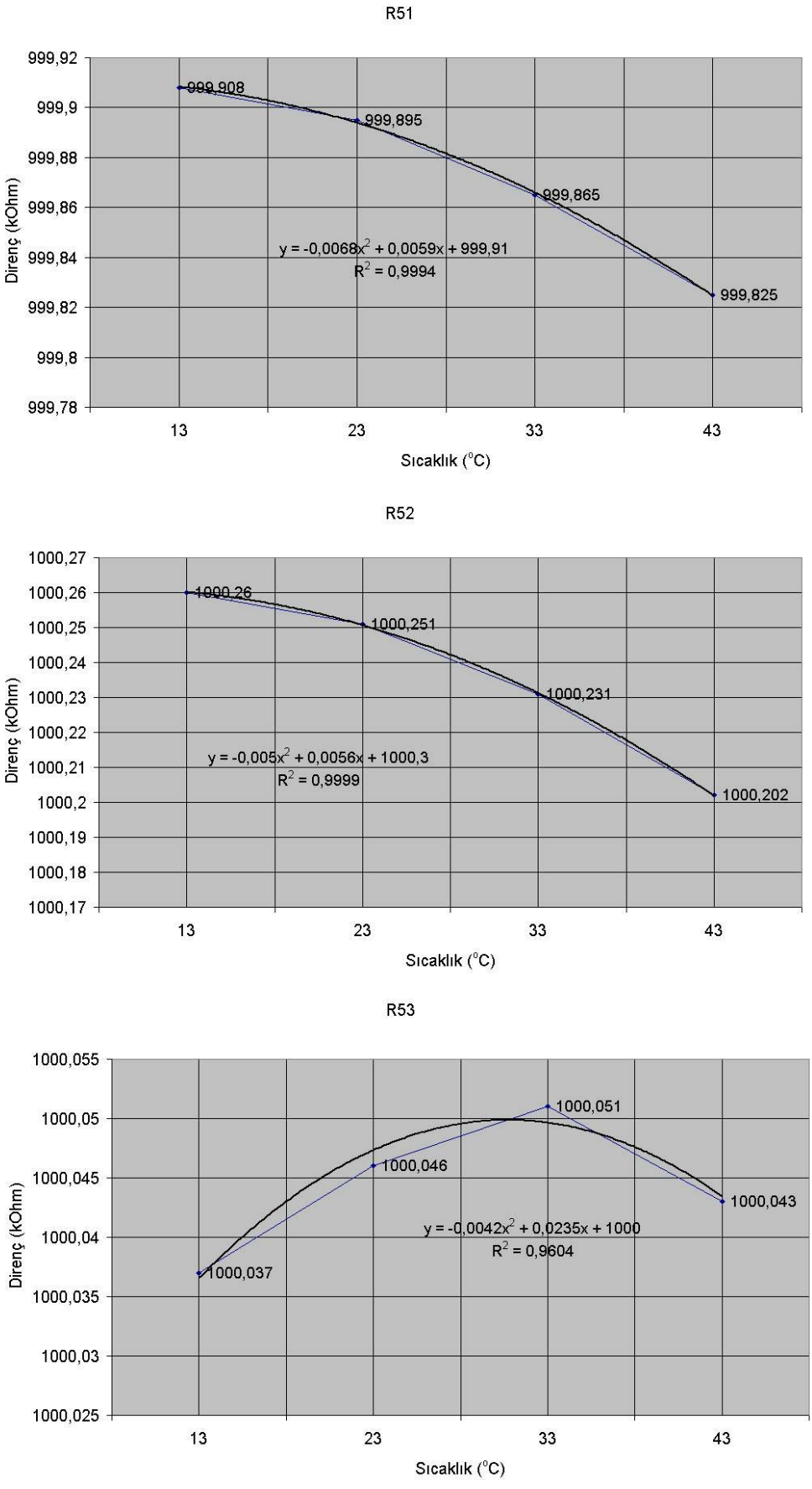
Şekil D.15: R42, R43 ve R44 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



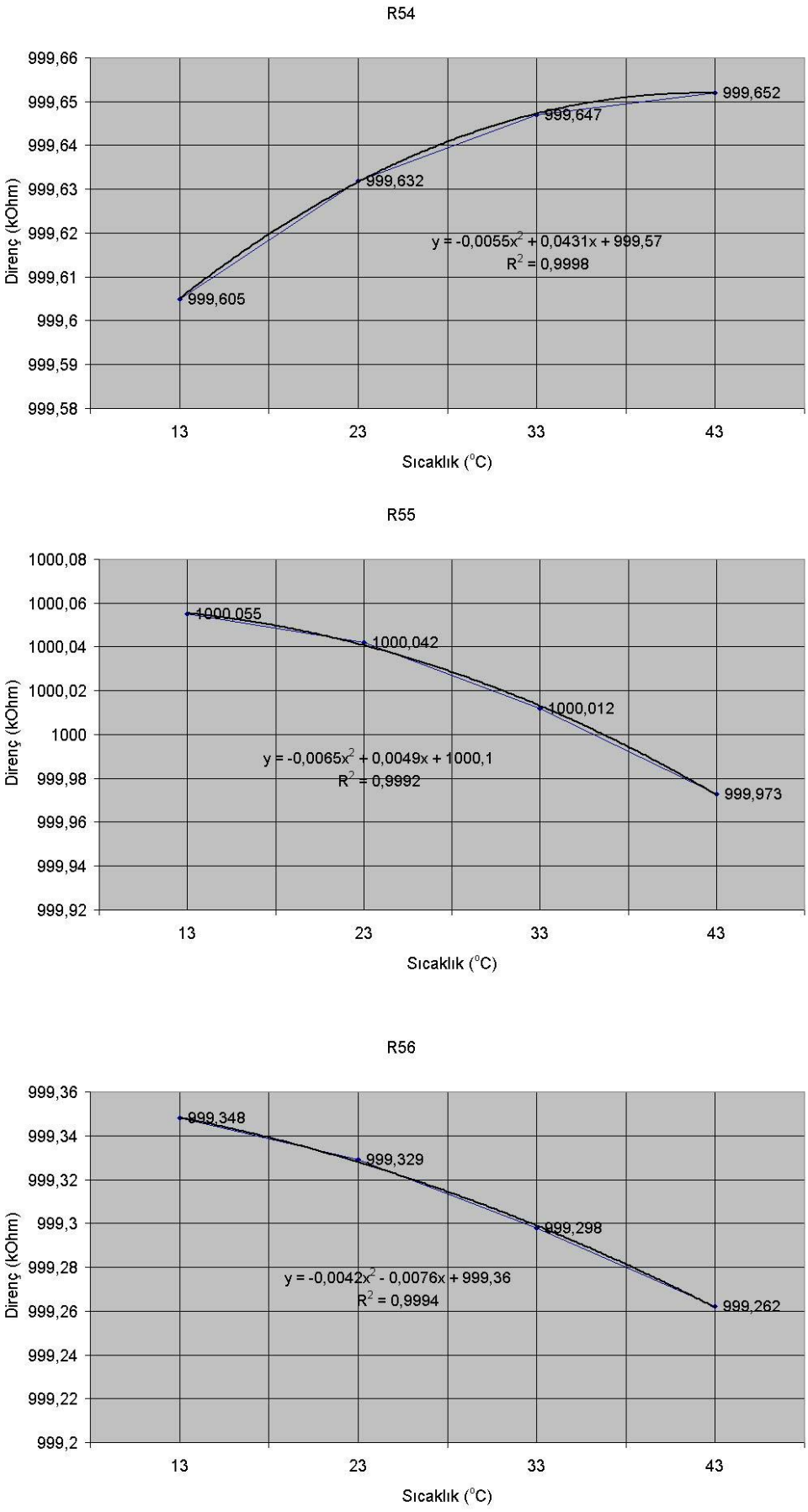
Şekil D.16: R45, R46 ve R47 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



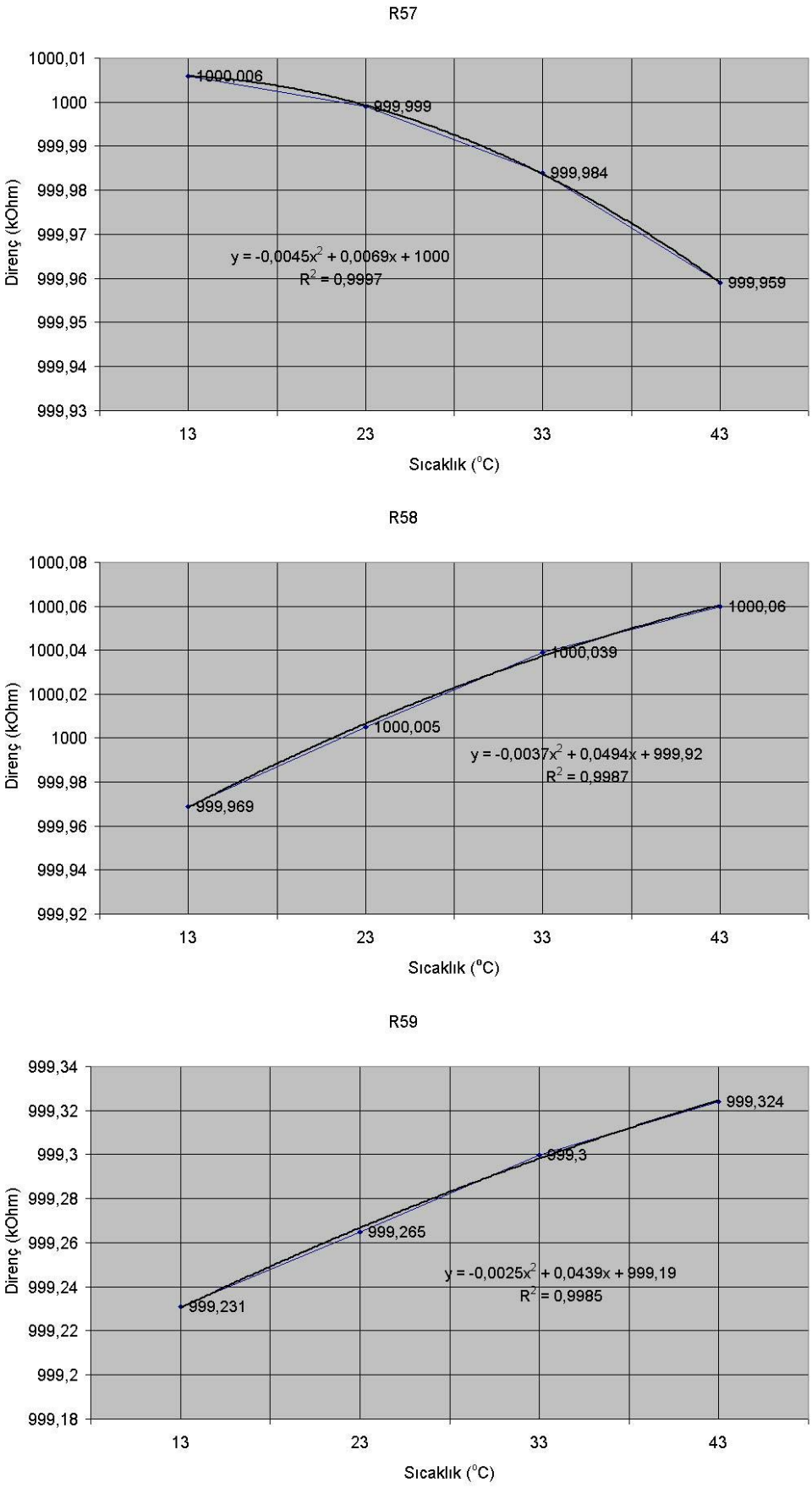
Şekil D.17: R48, R49 ve R50 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



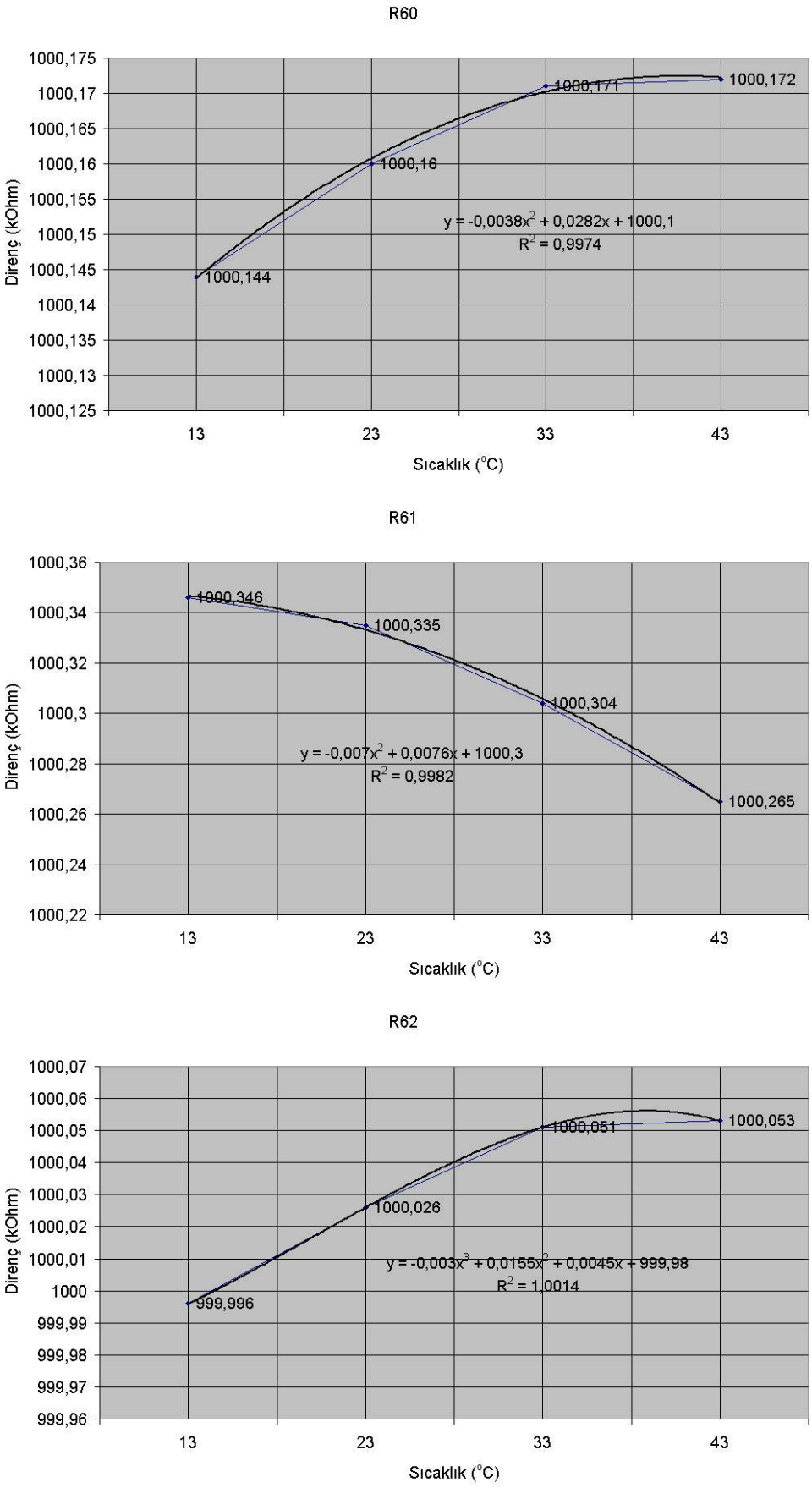
Şekil D.18: R51, R52 ve R53 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



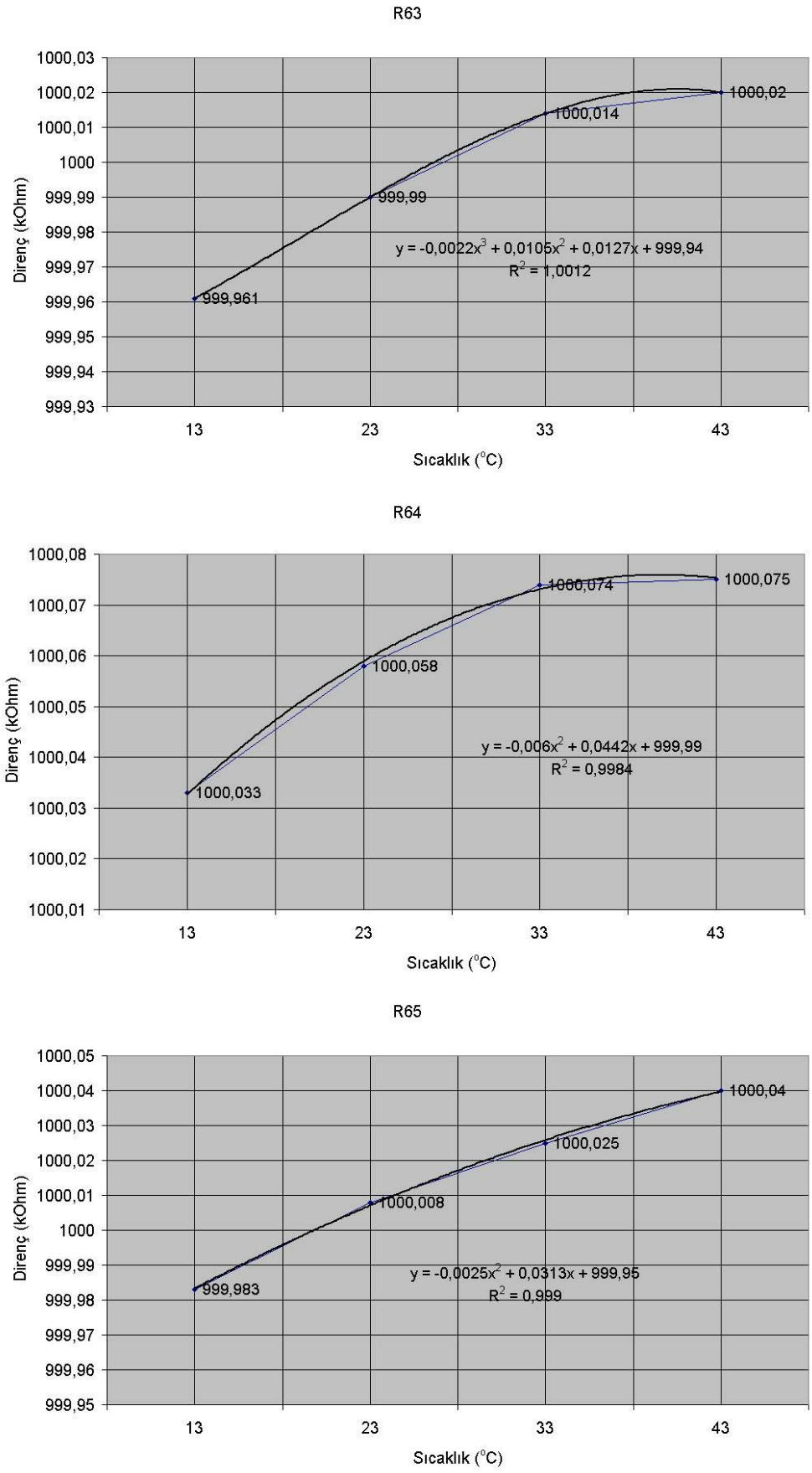
Şekil D.19: R54, R55 ve R56 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



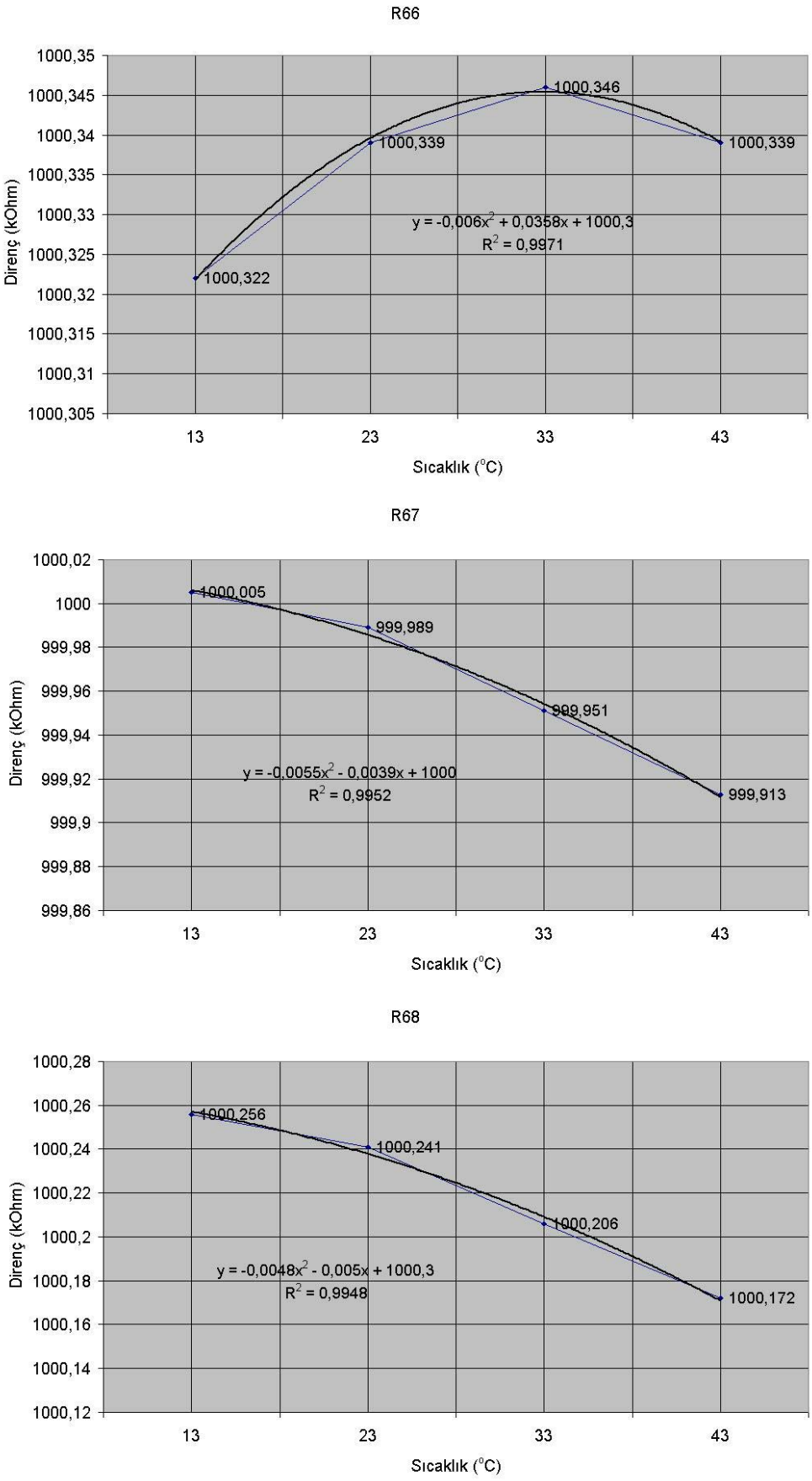
Şekil D.20: R57, R58 ve R59 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



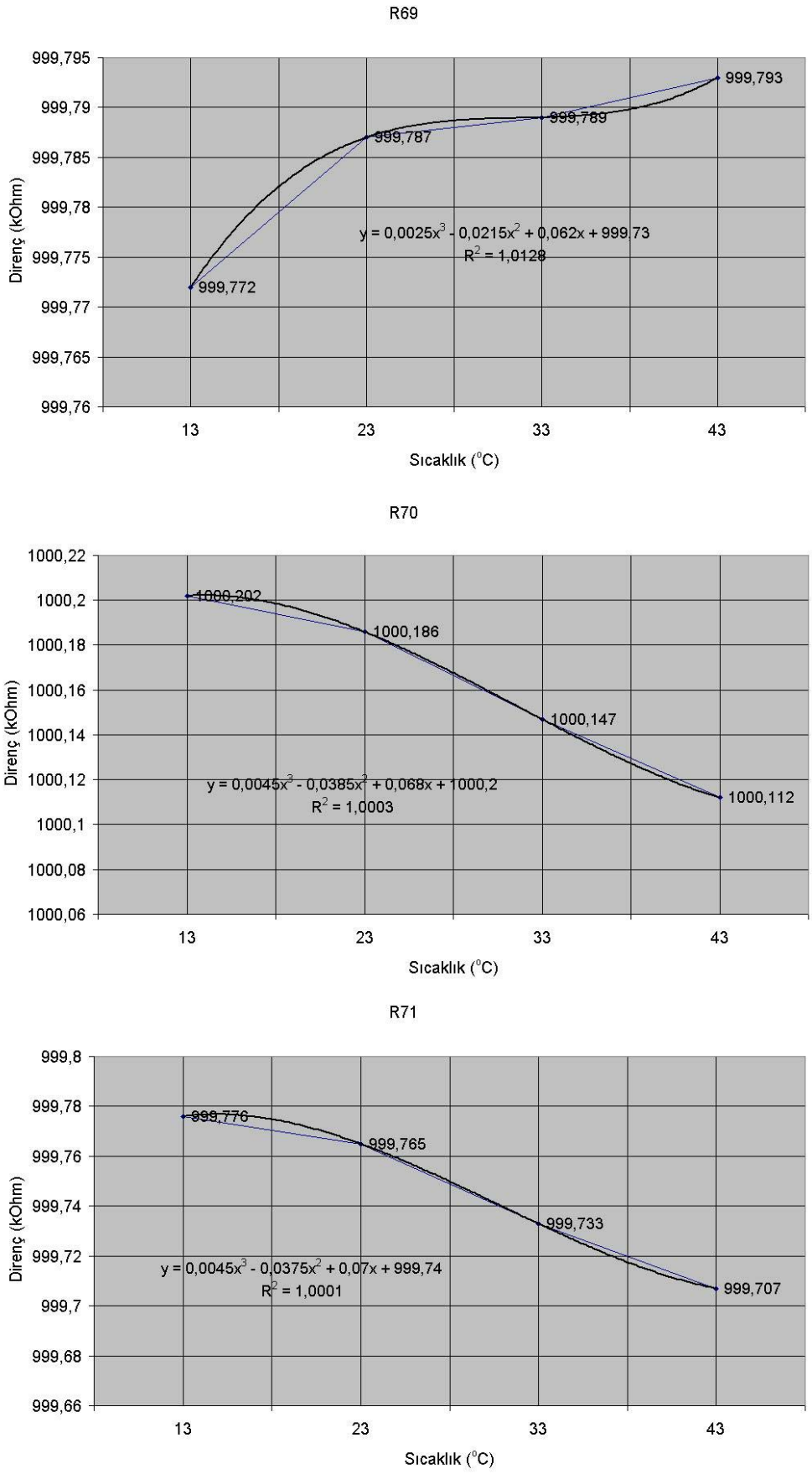
Şekil D.21: R60, R61 ve R62 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



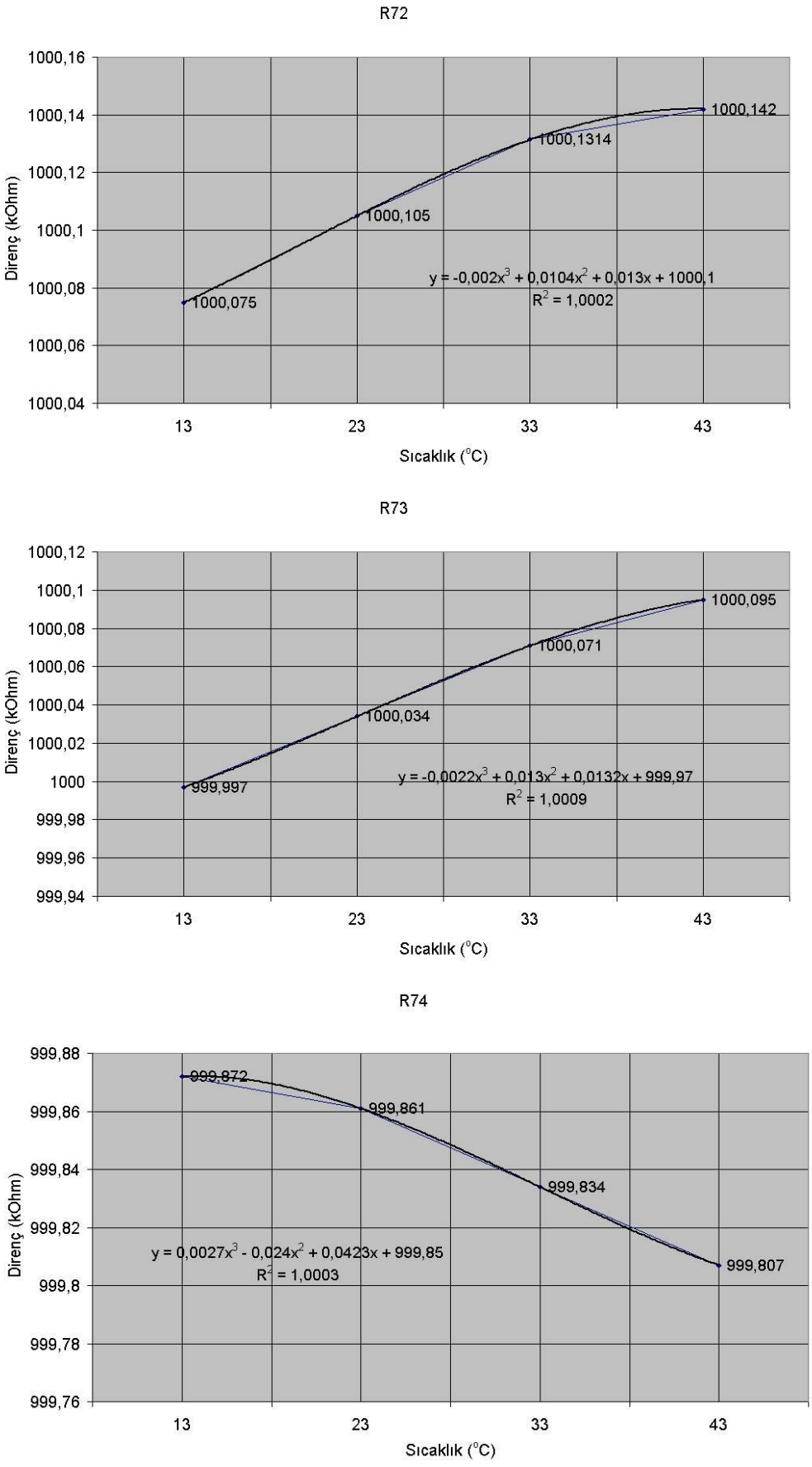
Şekil D.22: R63, R64 ve R65 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



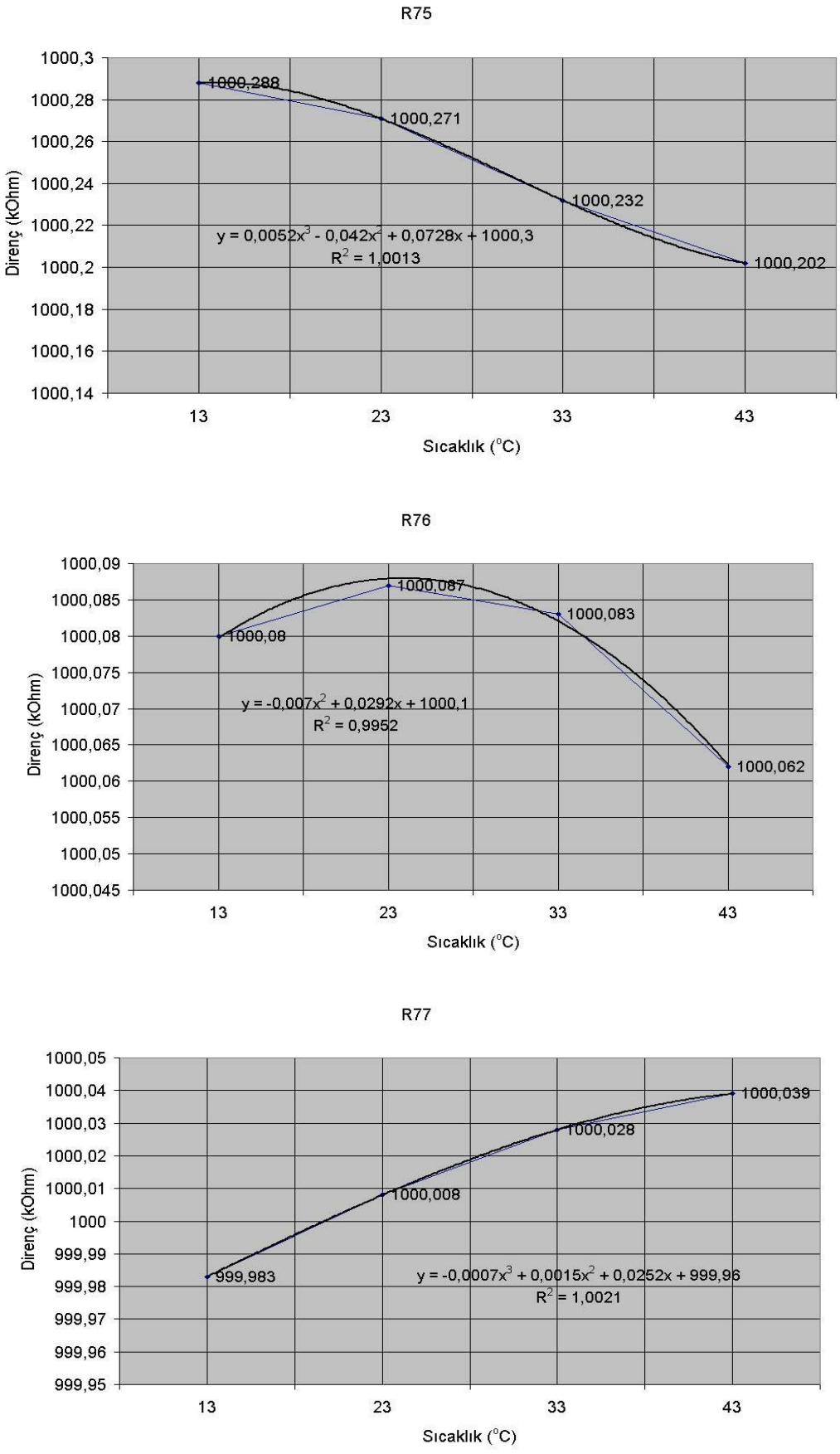
Şekil D.23: R66, R67 ve R68 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



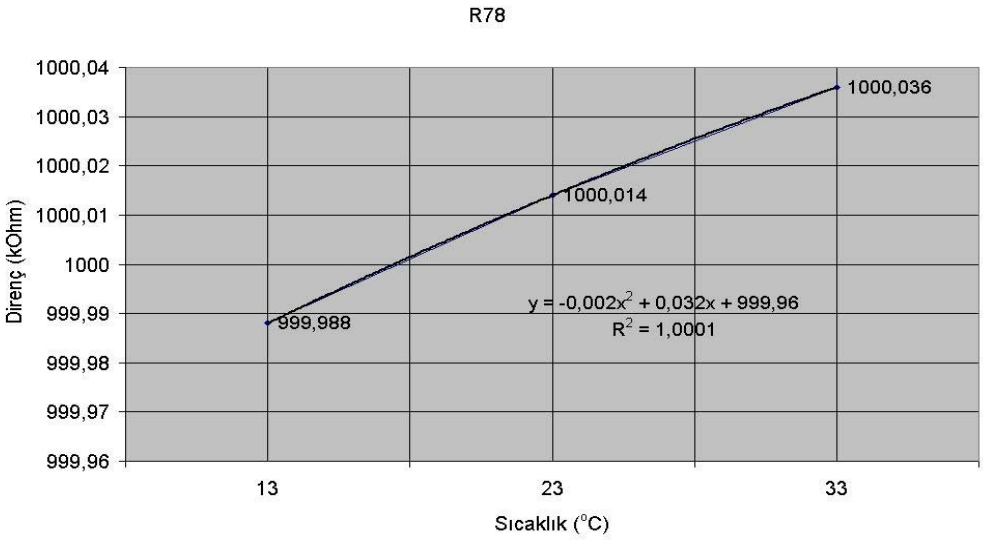
Şekil D.24: R69, R70 ve R71 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri

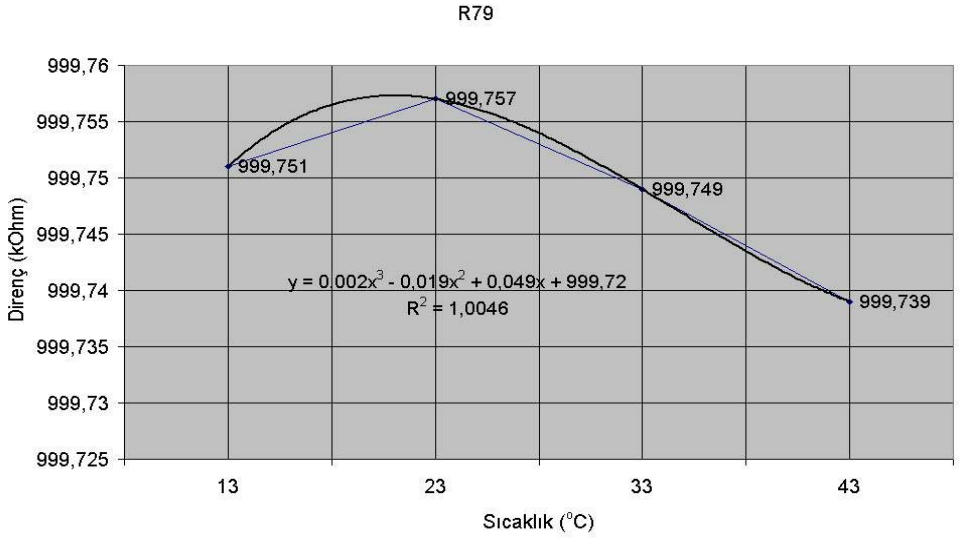


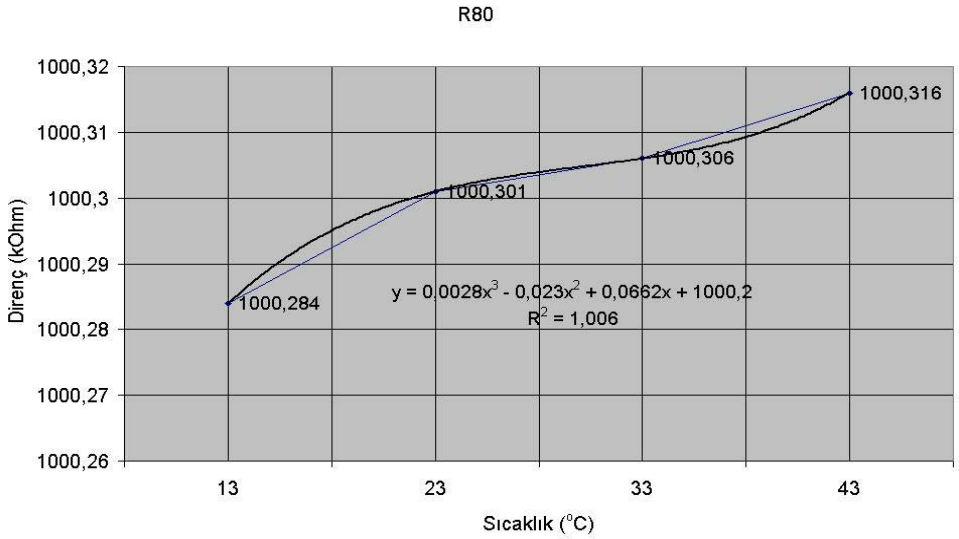
Şekil D.25: R72, R73 ve R74 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



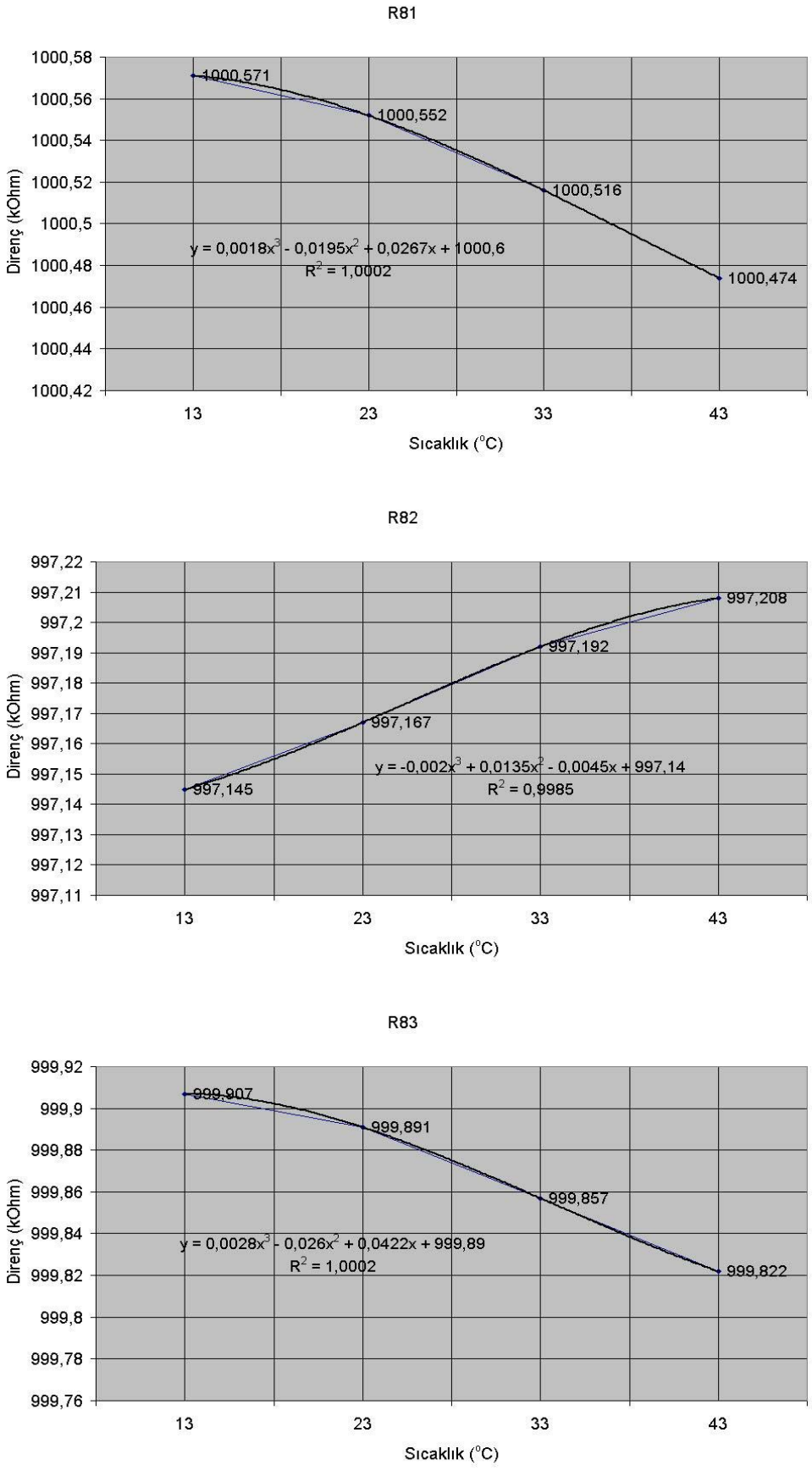
Şekil D.26: R75, R76 ve R77 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



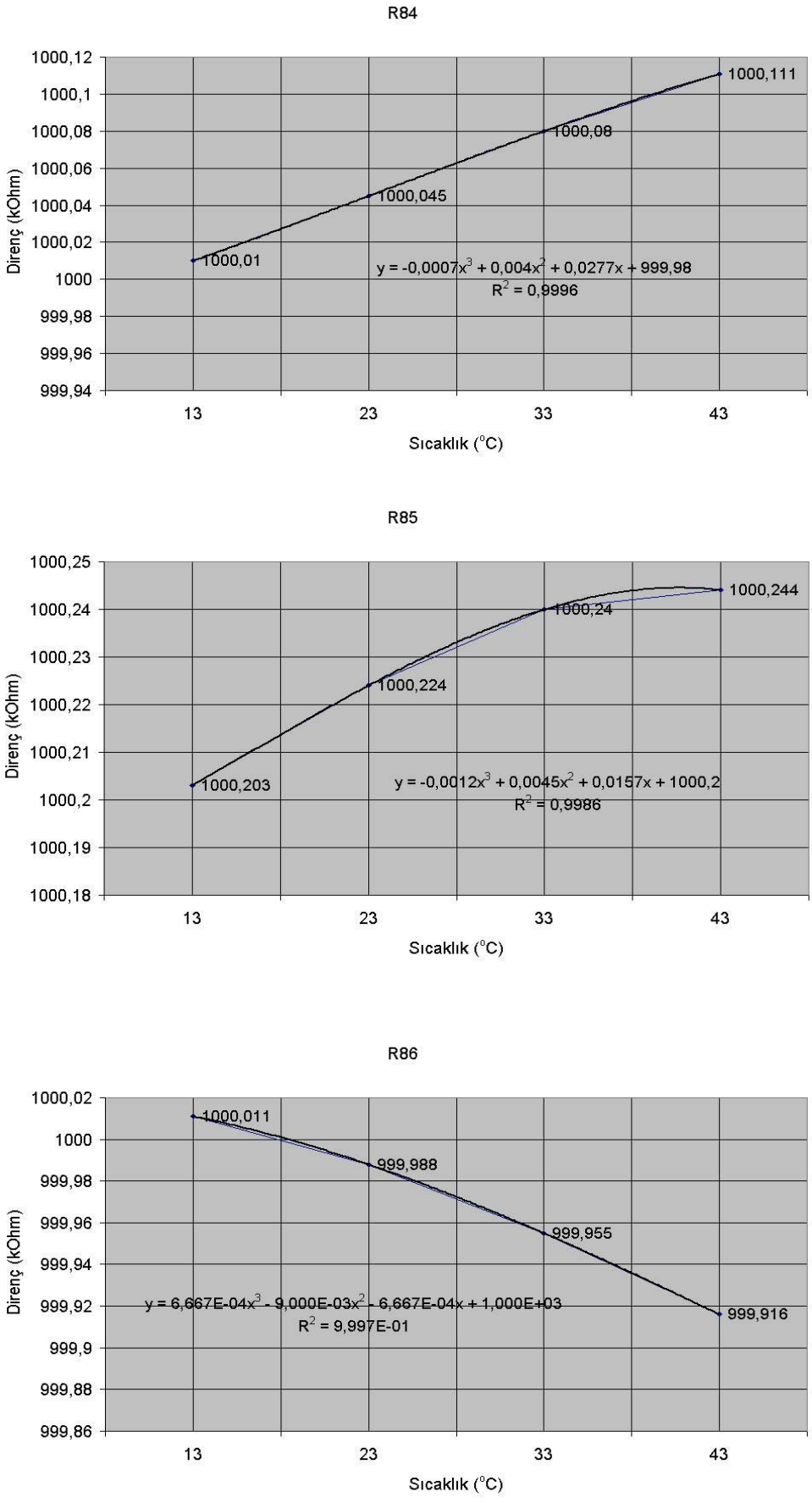




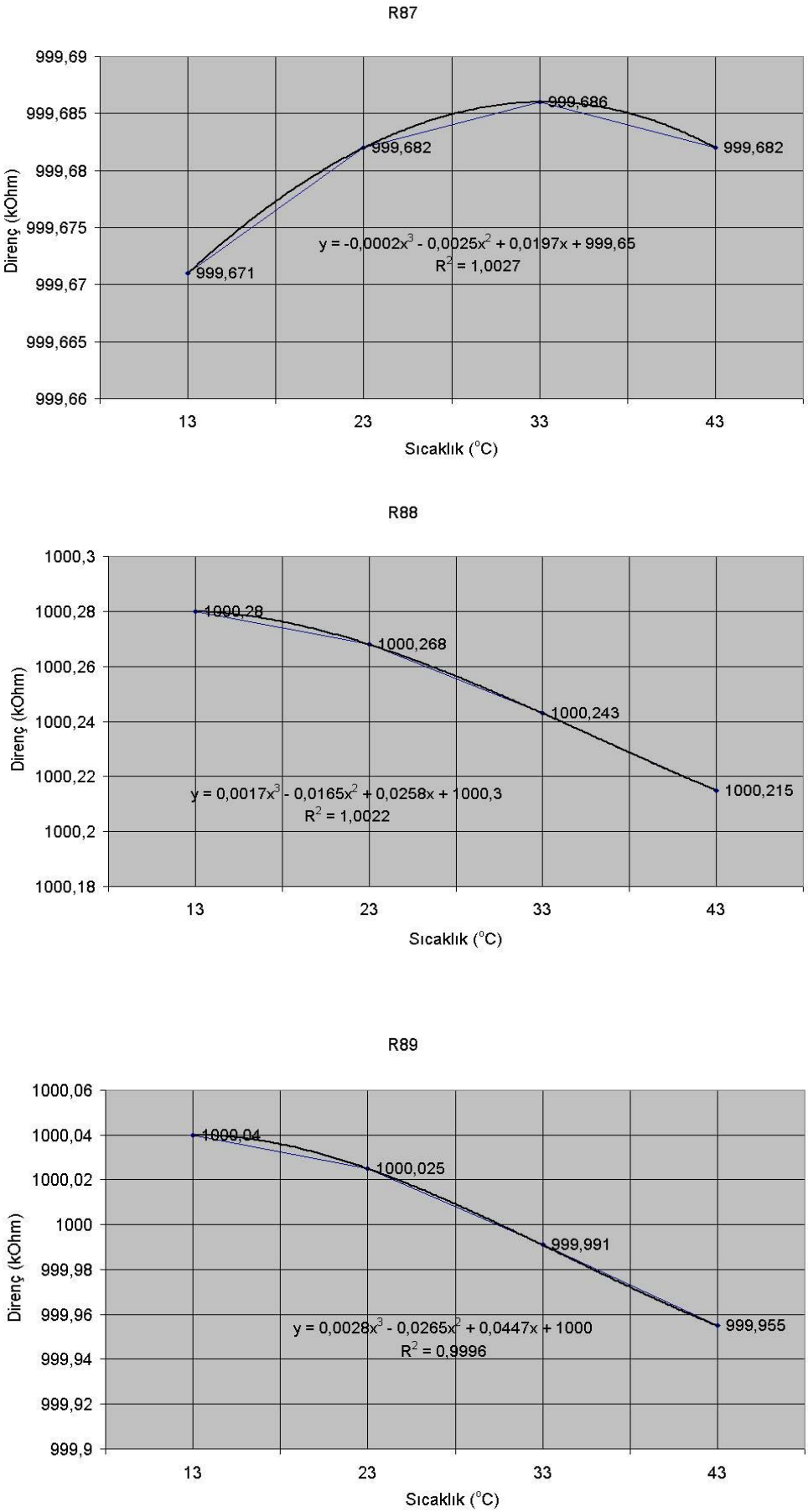
Şekil D.27: R78, R79 ve R80 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



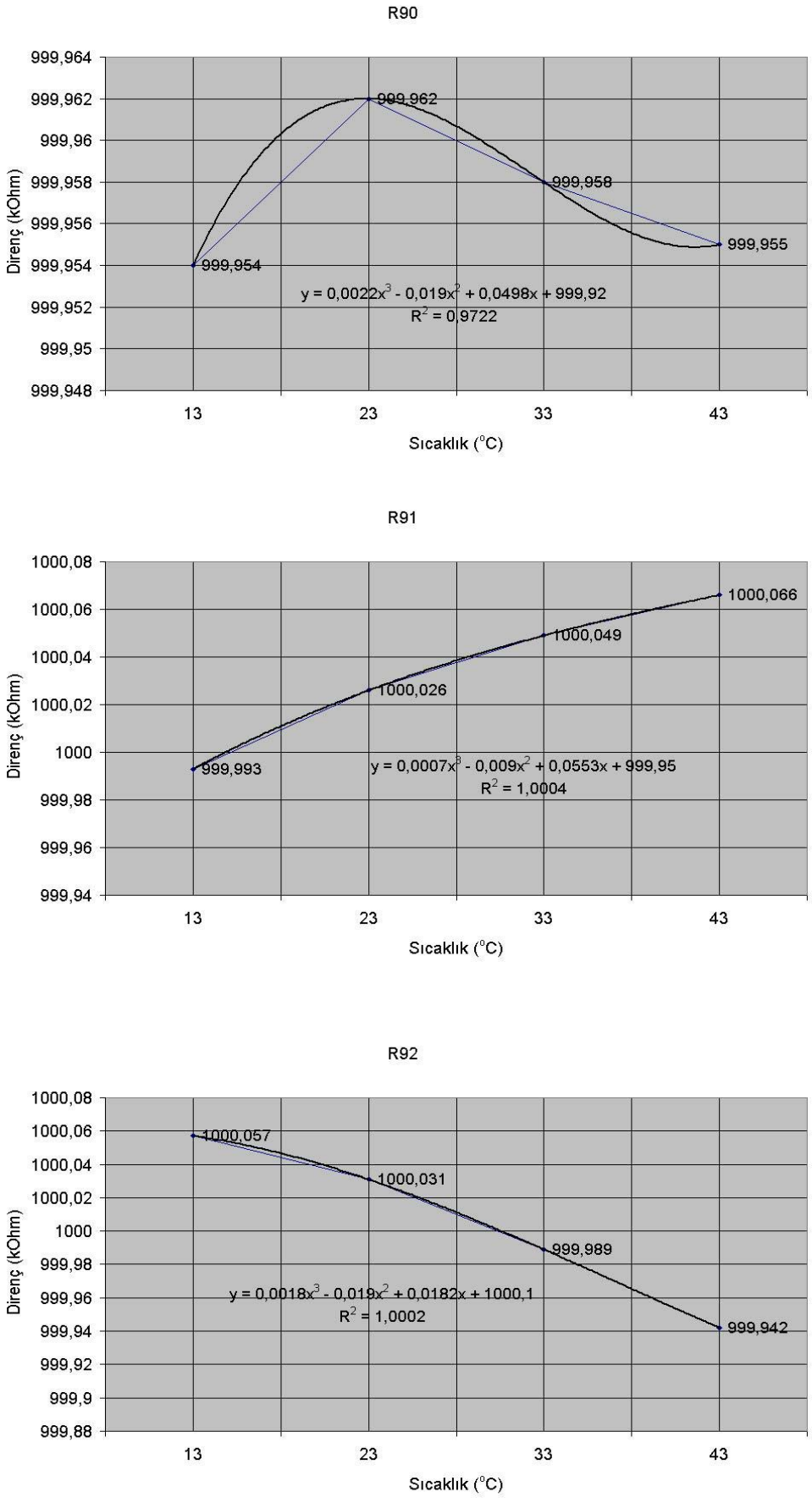
Şekil D.28: R81, R82 ve R83 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



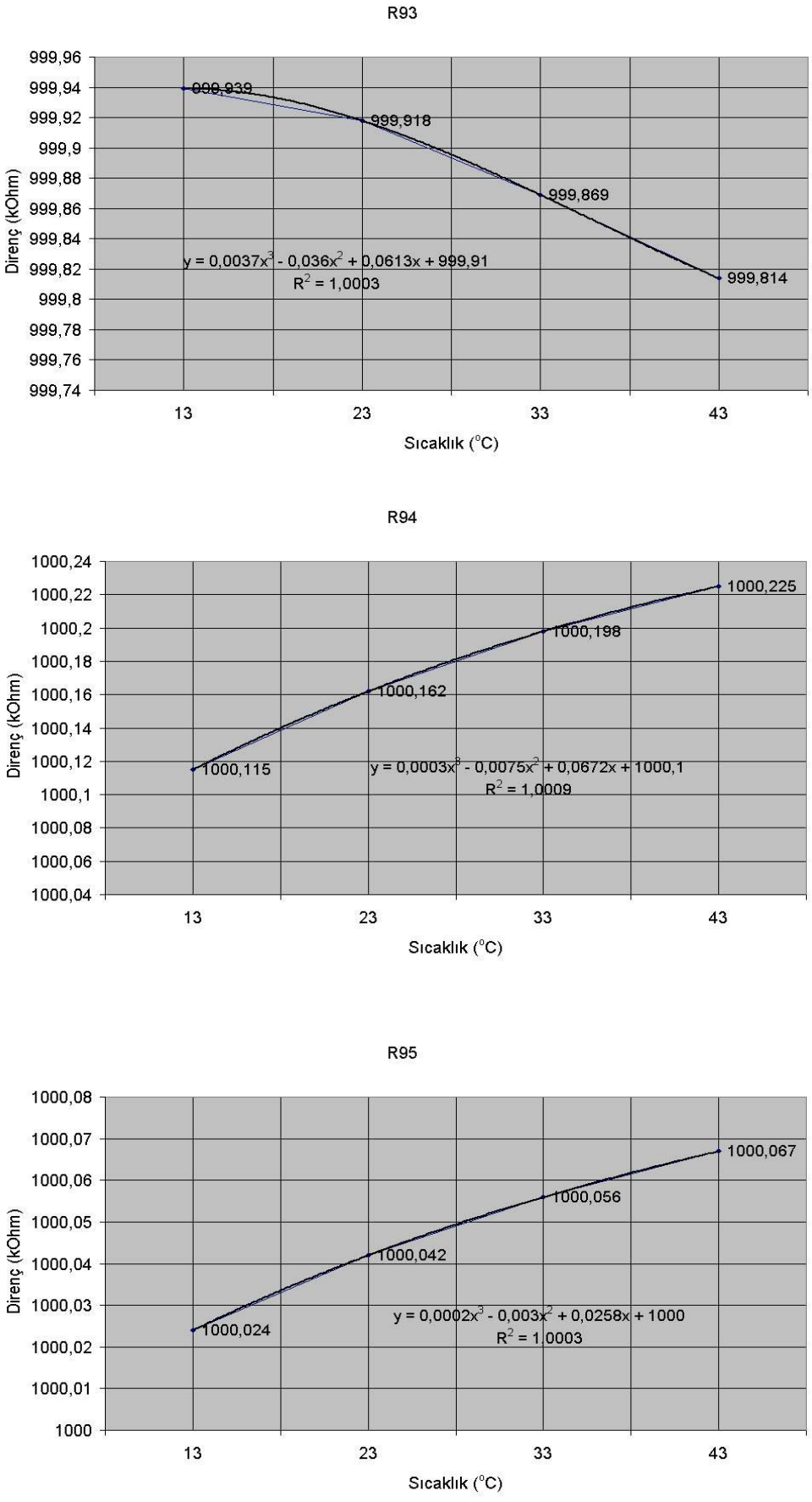
Şekil D.29: R84, R85 ve R86 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



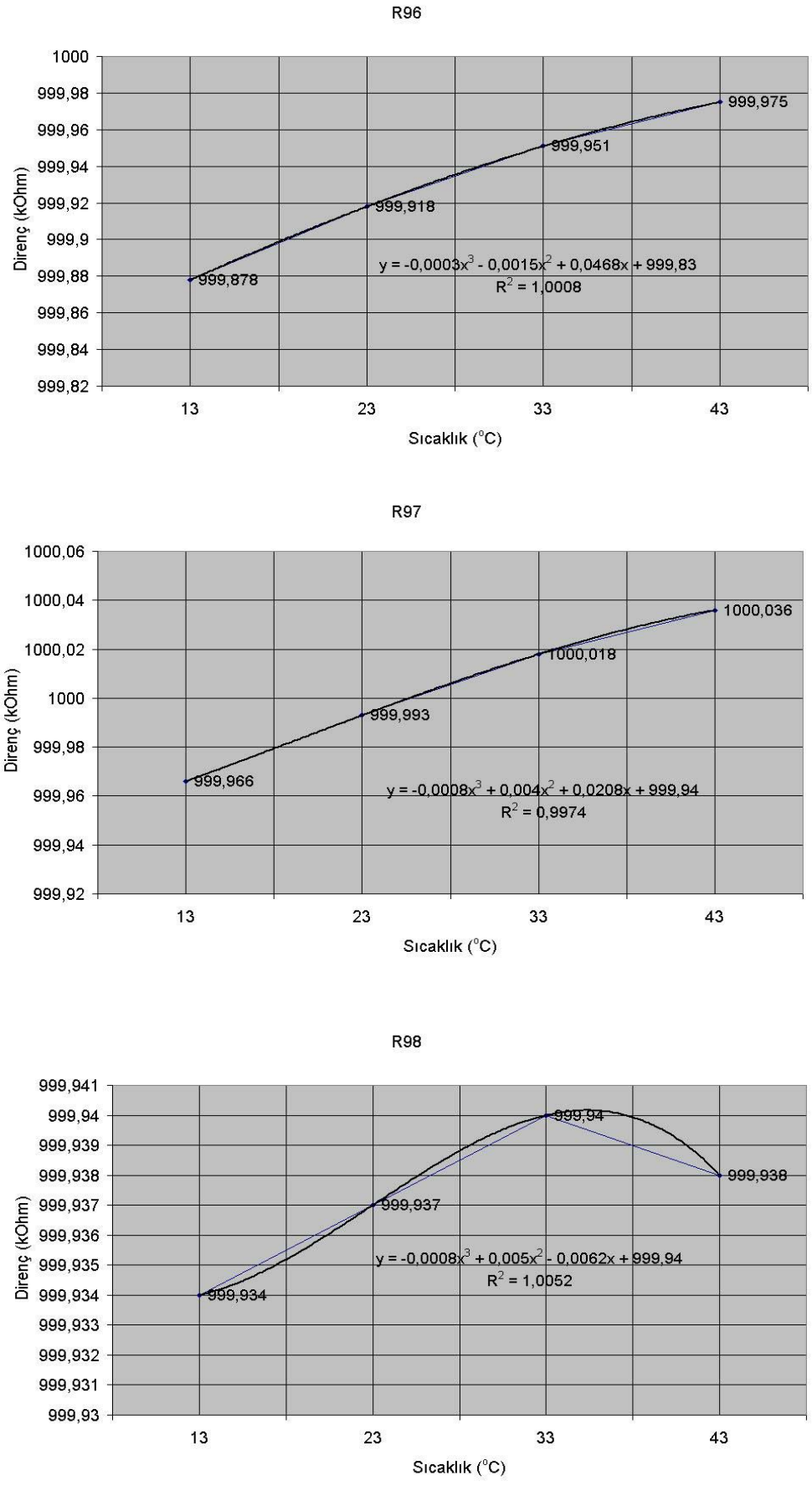
Şekil D.30: R87, R88 ve R89 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



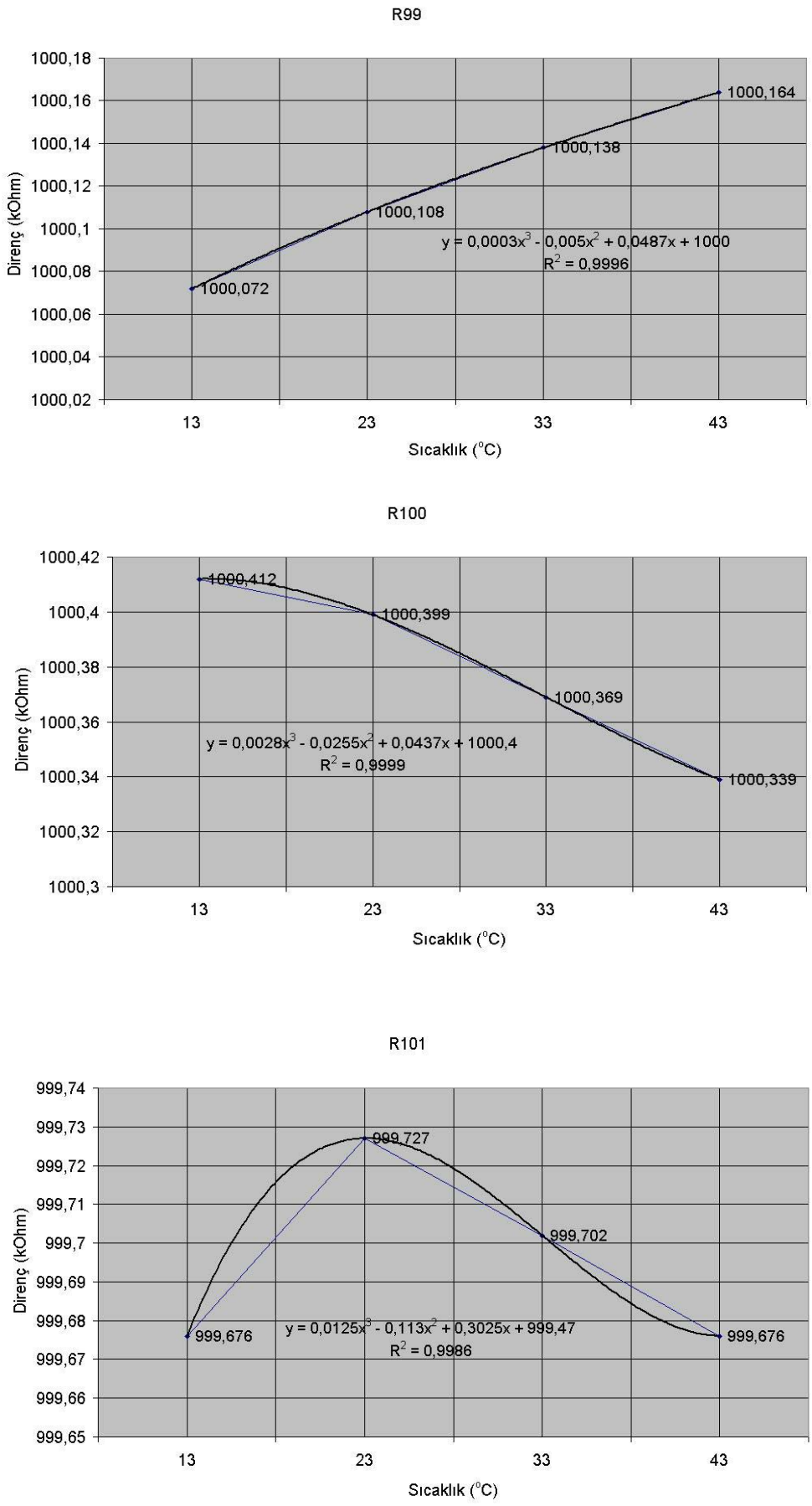
Şekil D.31: R90, R91 ve R92 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



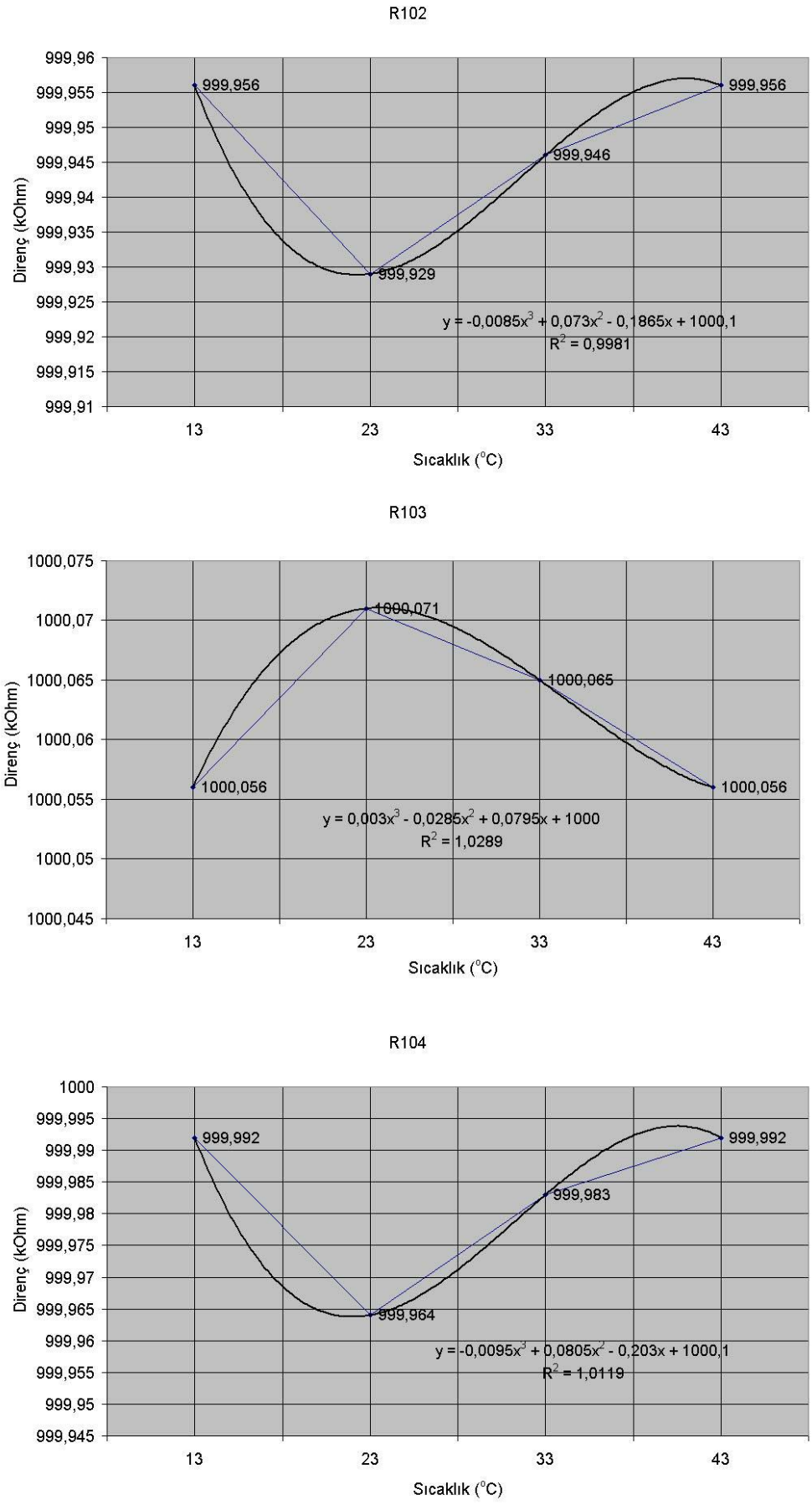
Şekil D.32: R93, R94 ve R95 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



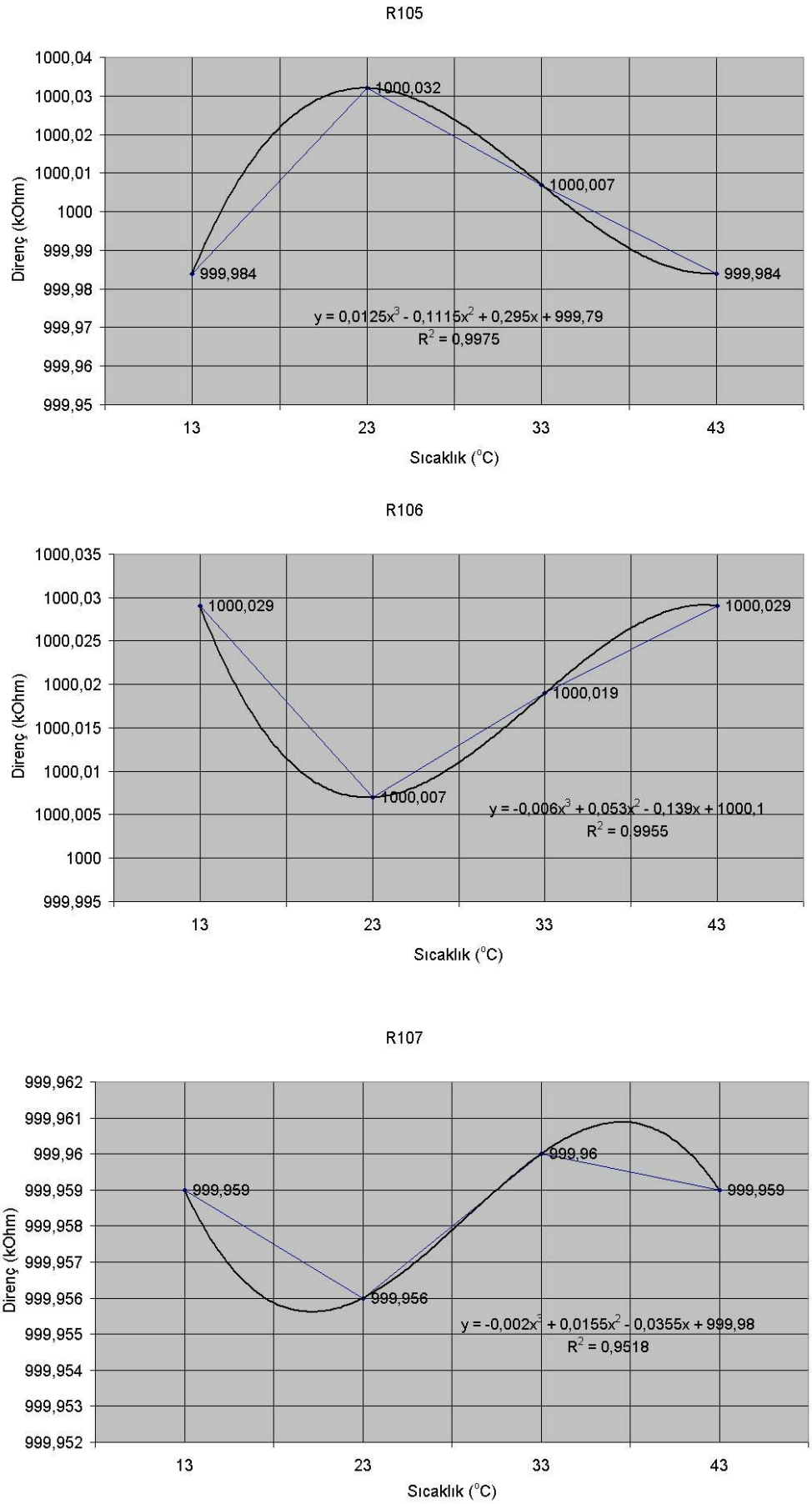
Şekil D.33: R96, R97 ve R98 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



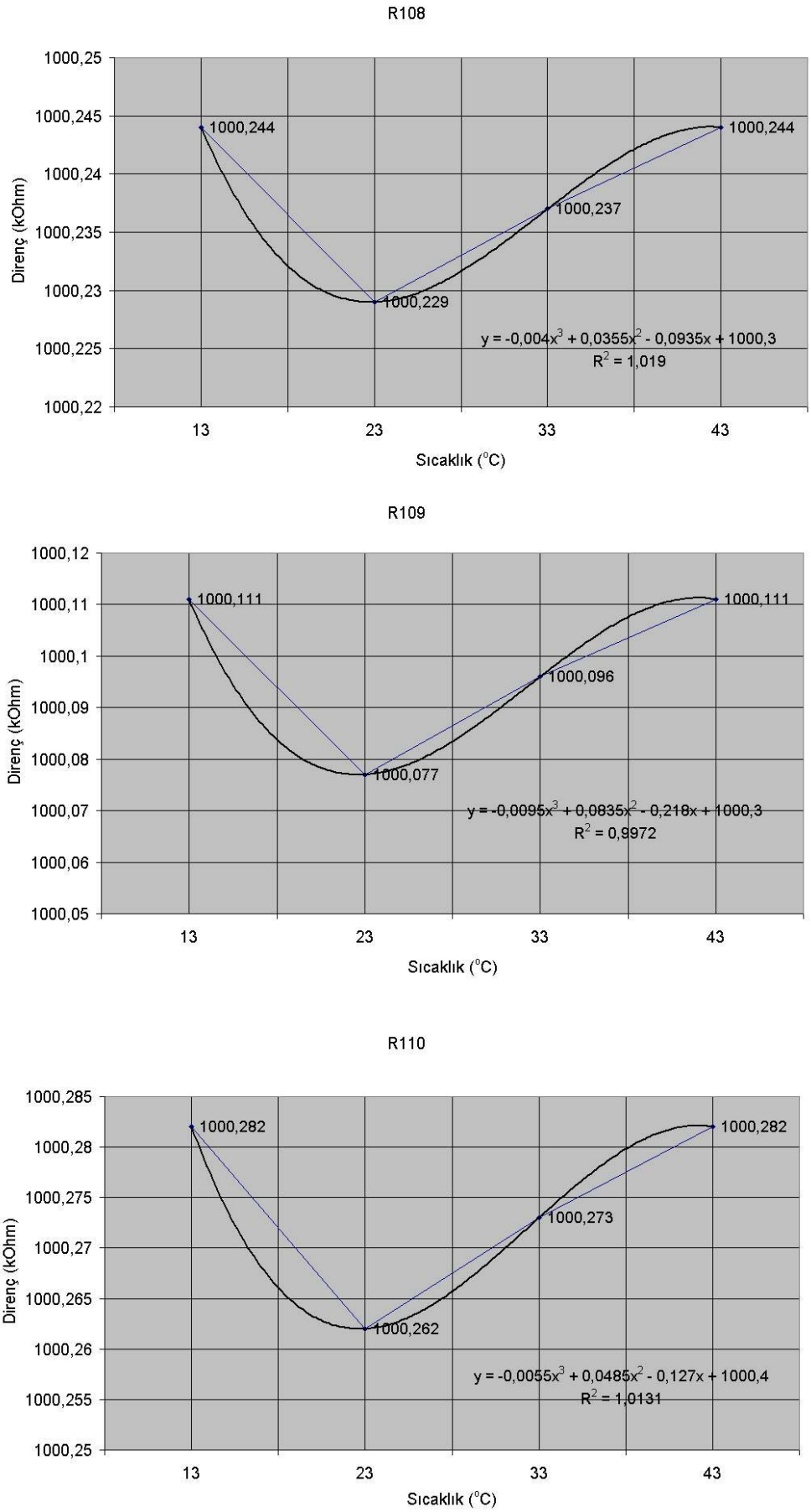
Şekil D.34: R99, R100 ve R101 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



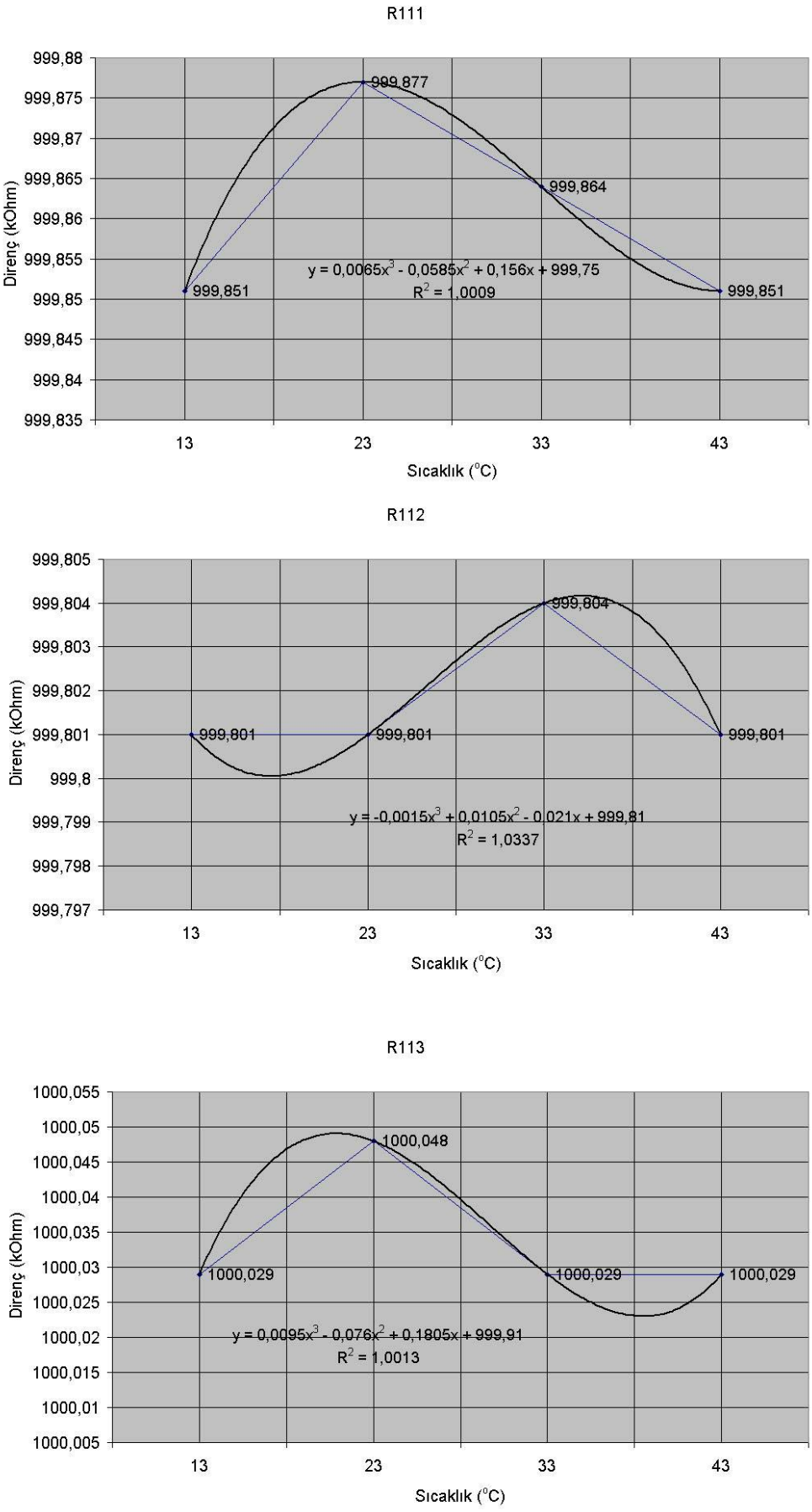
Şekil D.35: R102, R103 ve R104 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



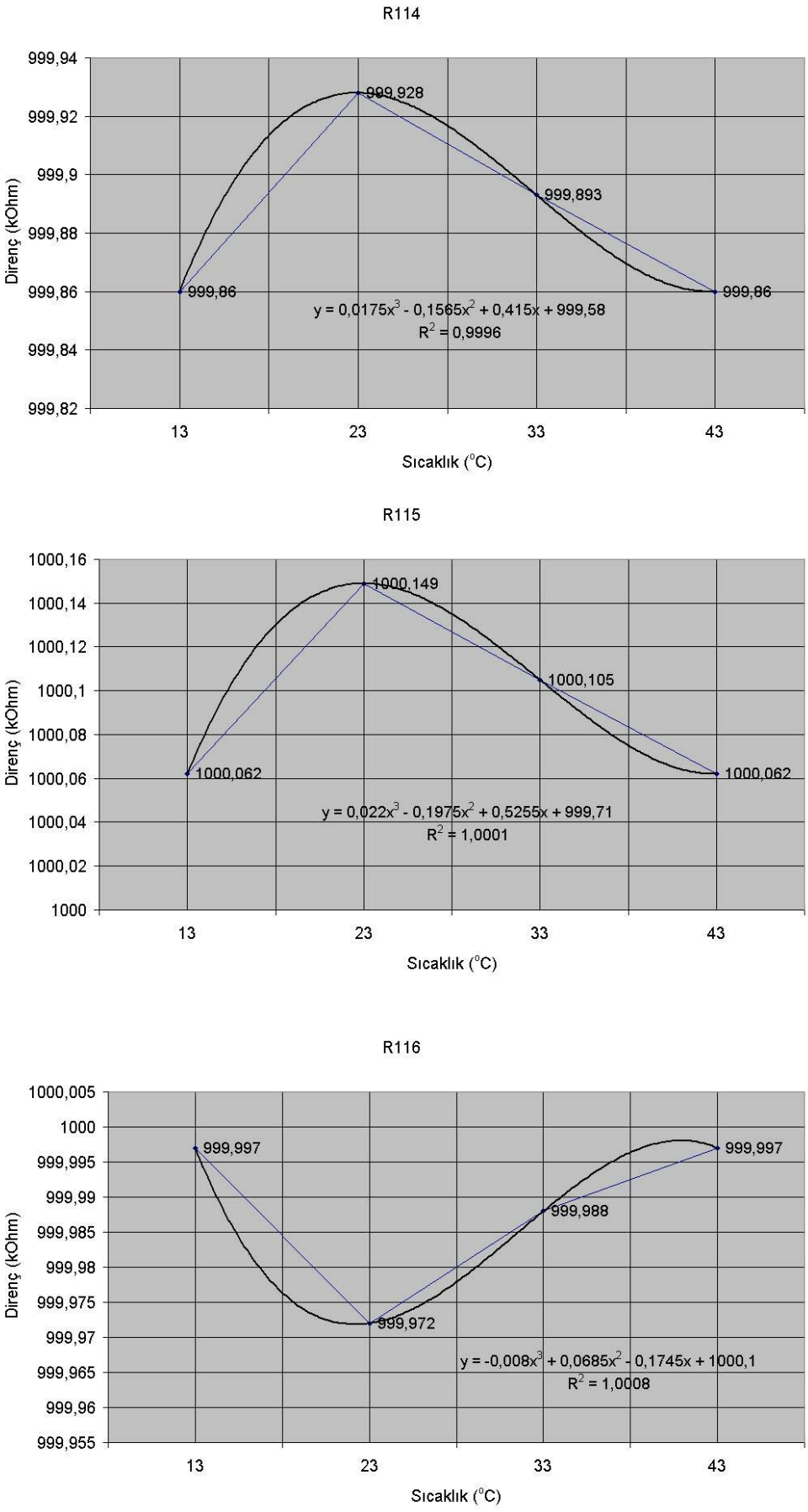
Şekil D.36: R105, R106 ve R107 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



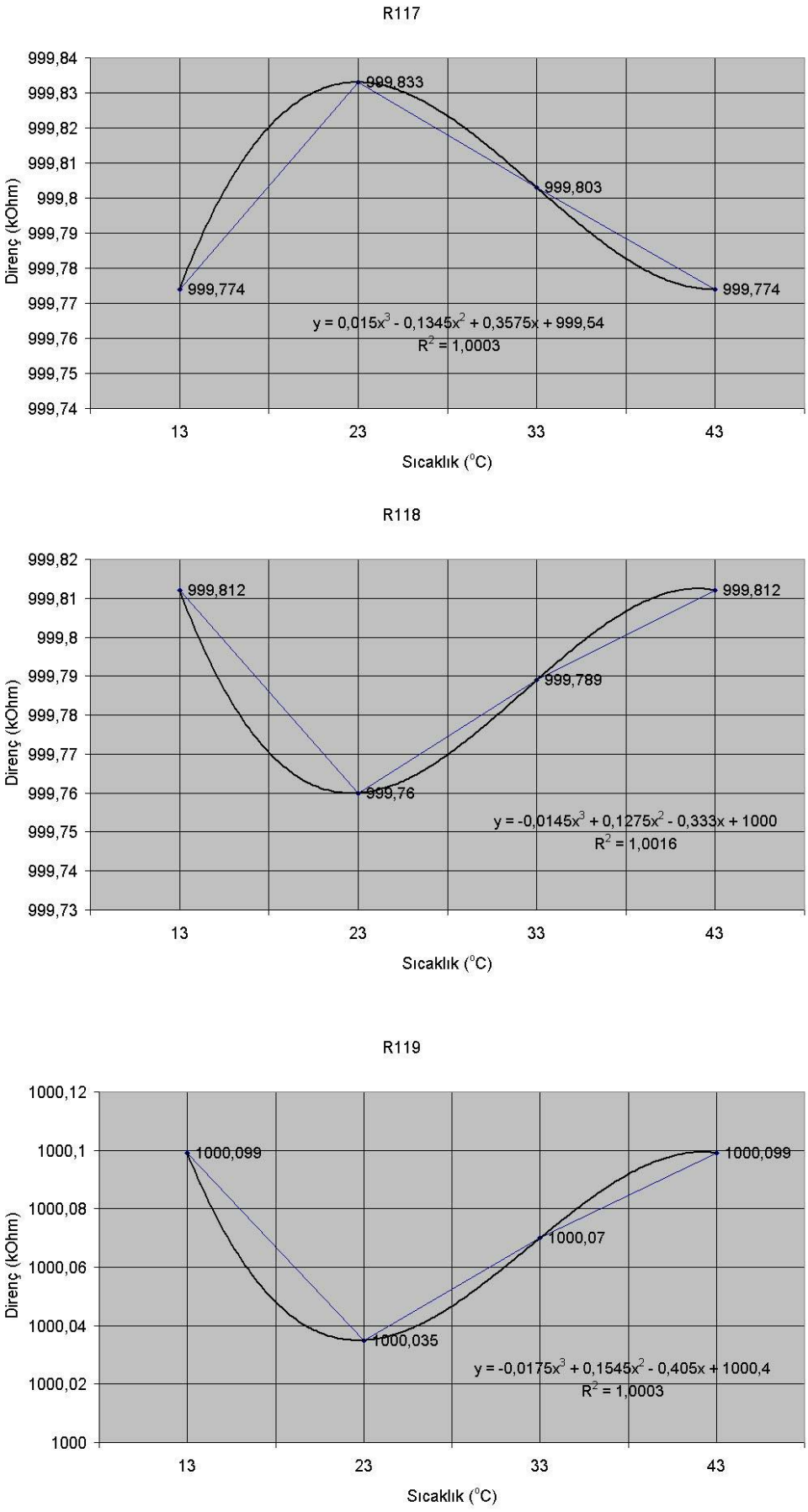
Şekil D.37: R108, R109 ve R110 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



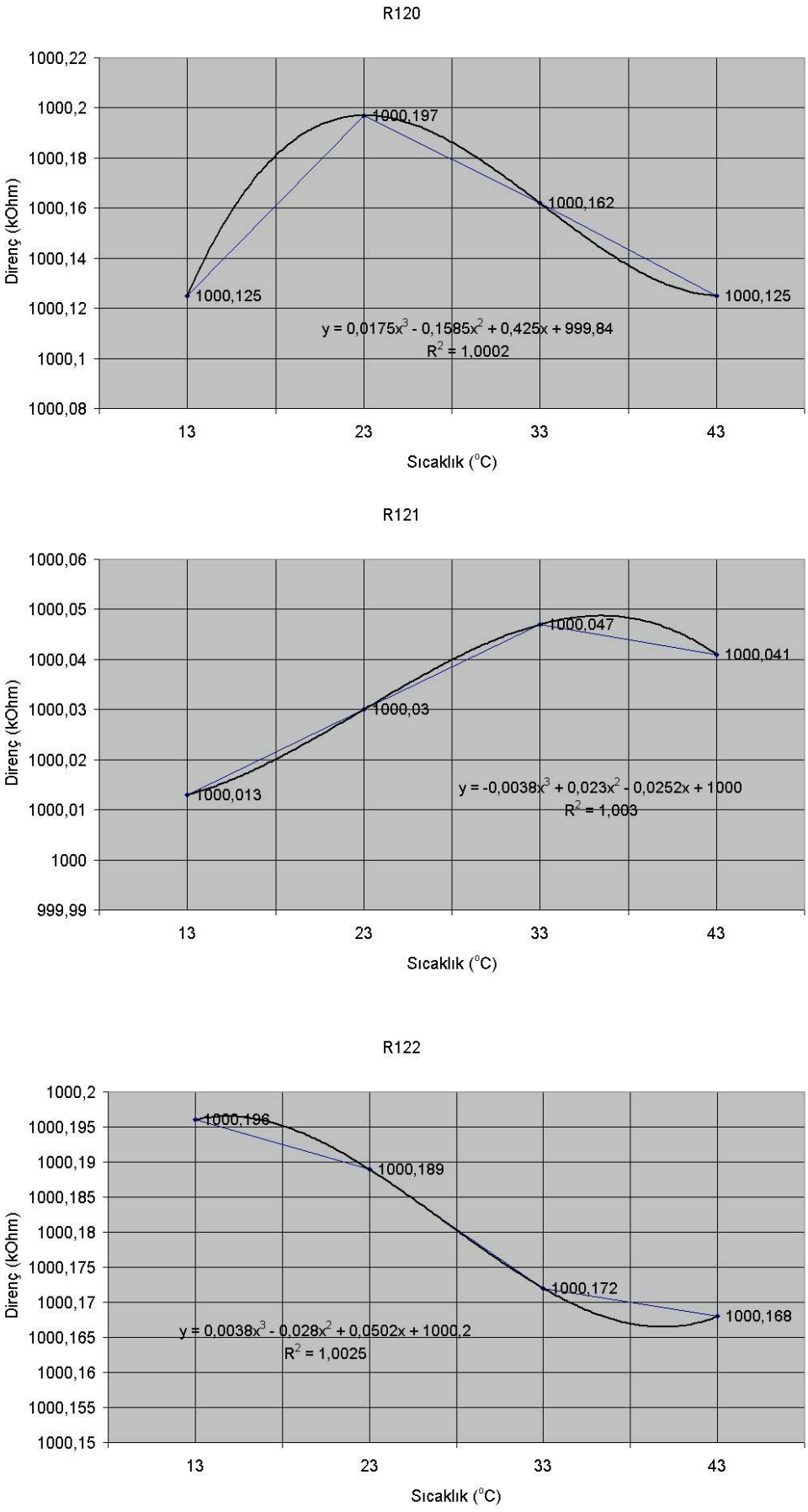
Şekil D.38: R111, R112 ve R113 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



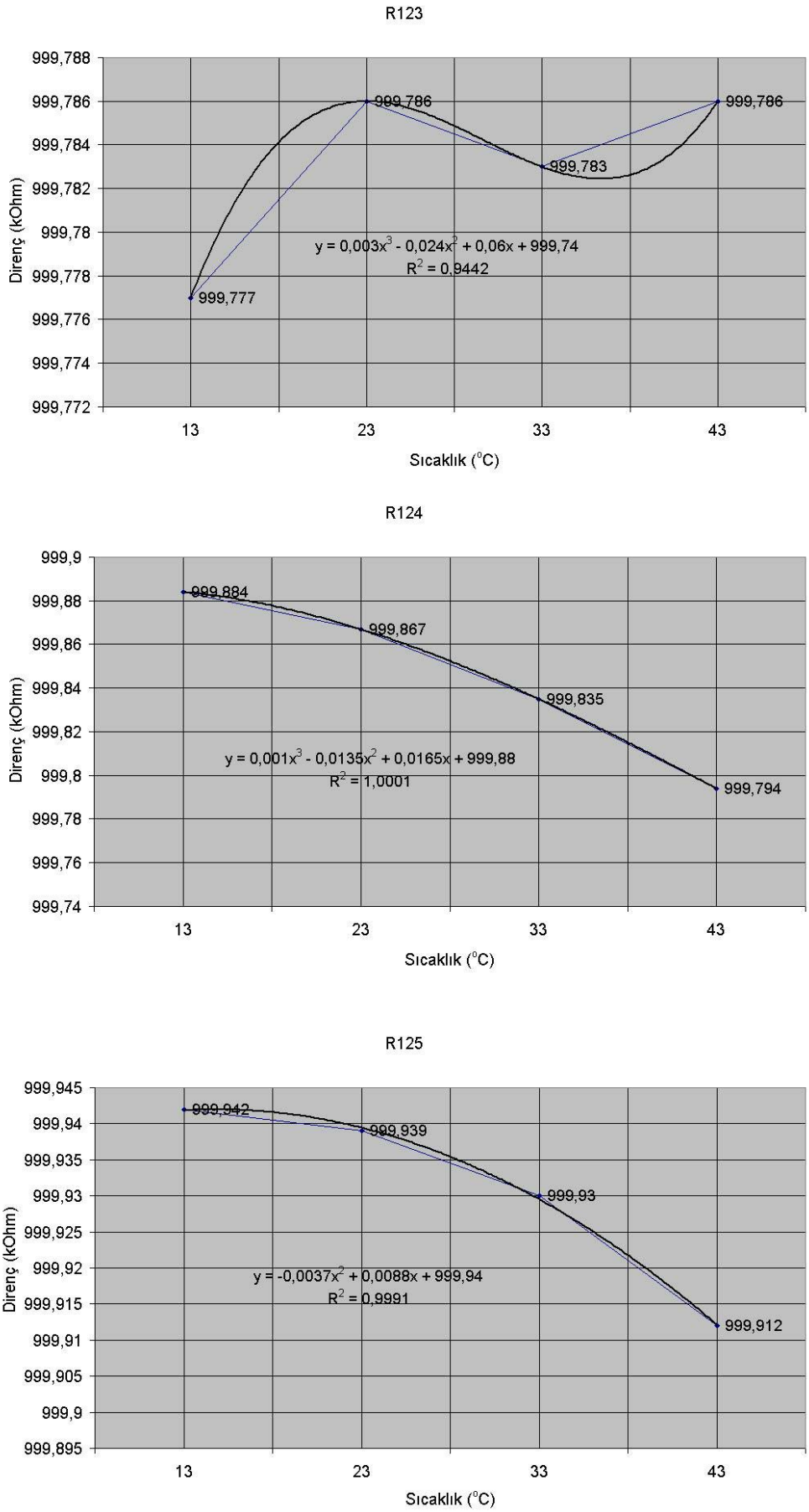
Şekil D.39: R114, R115 ve R116 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



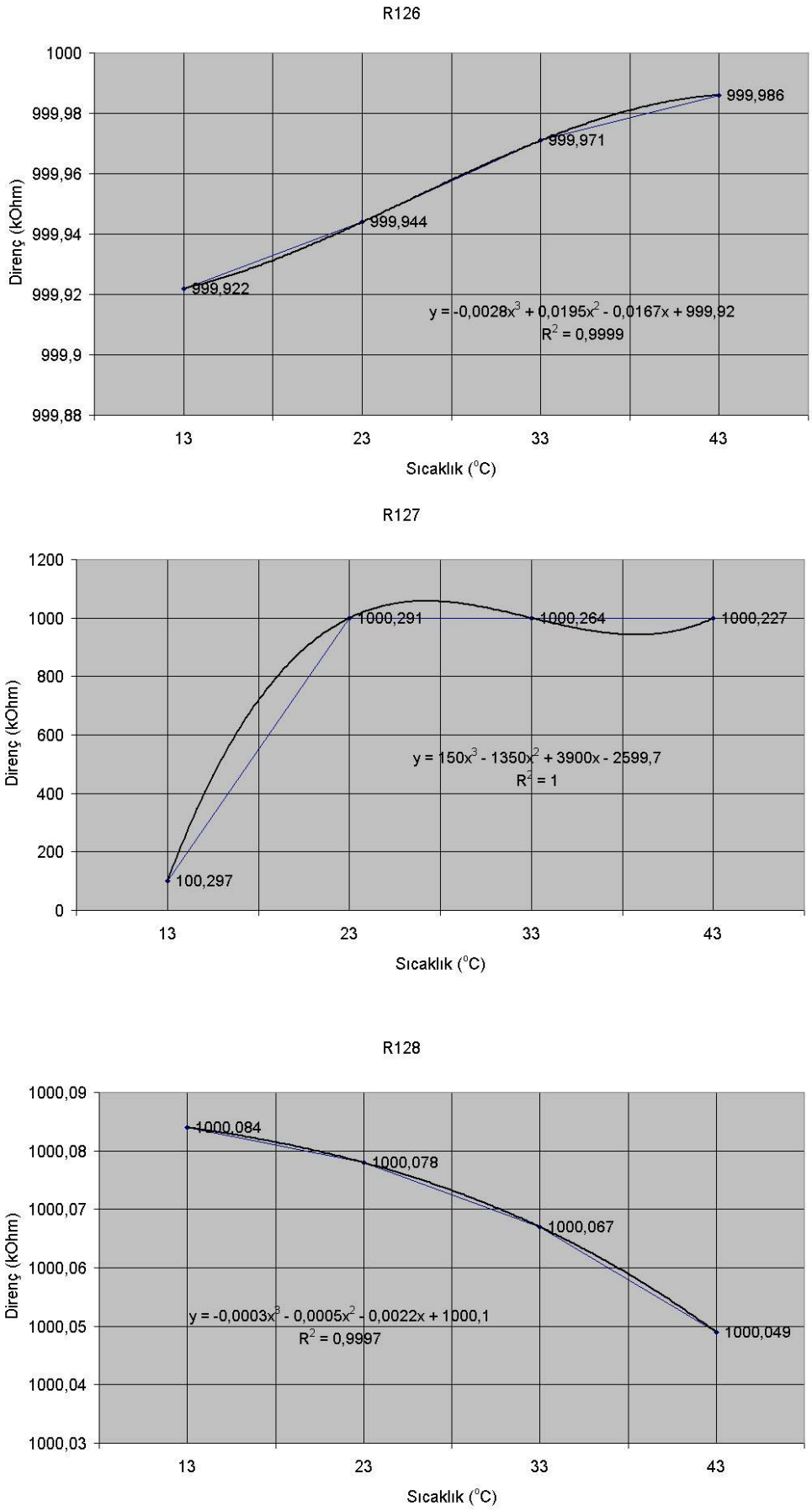
Şekil D.40: R117, R118 ve R119 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



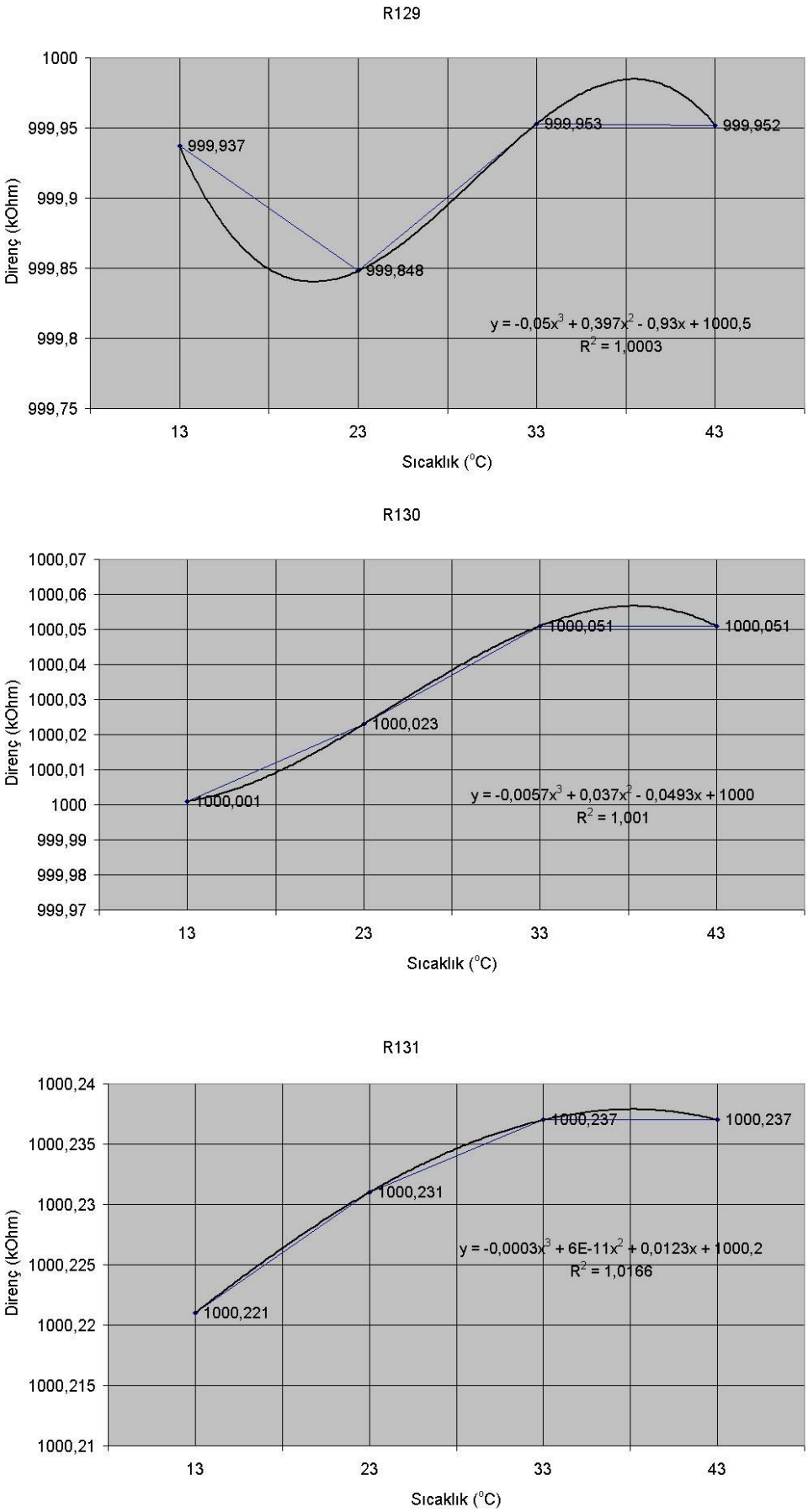
Şekil D.41: R120, R121 ve R122 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



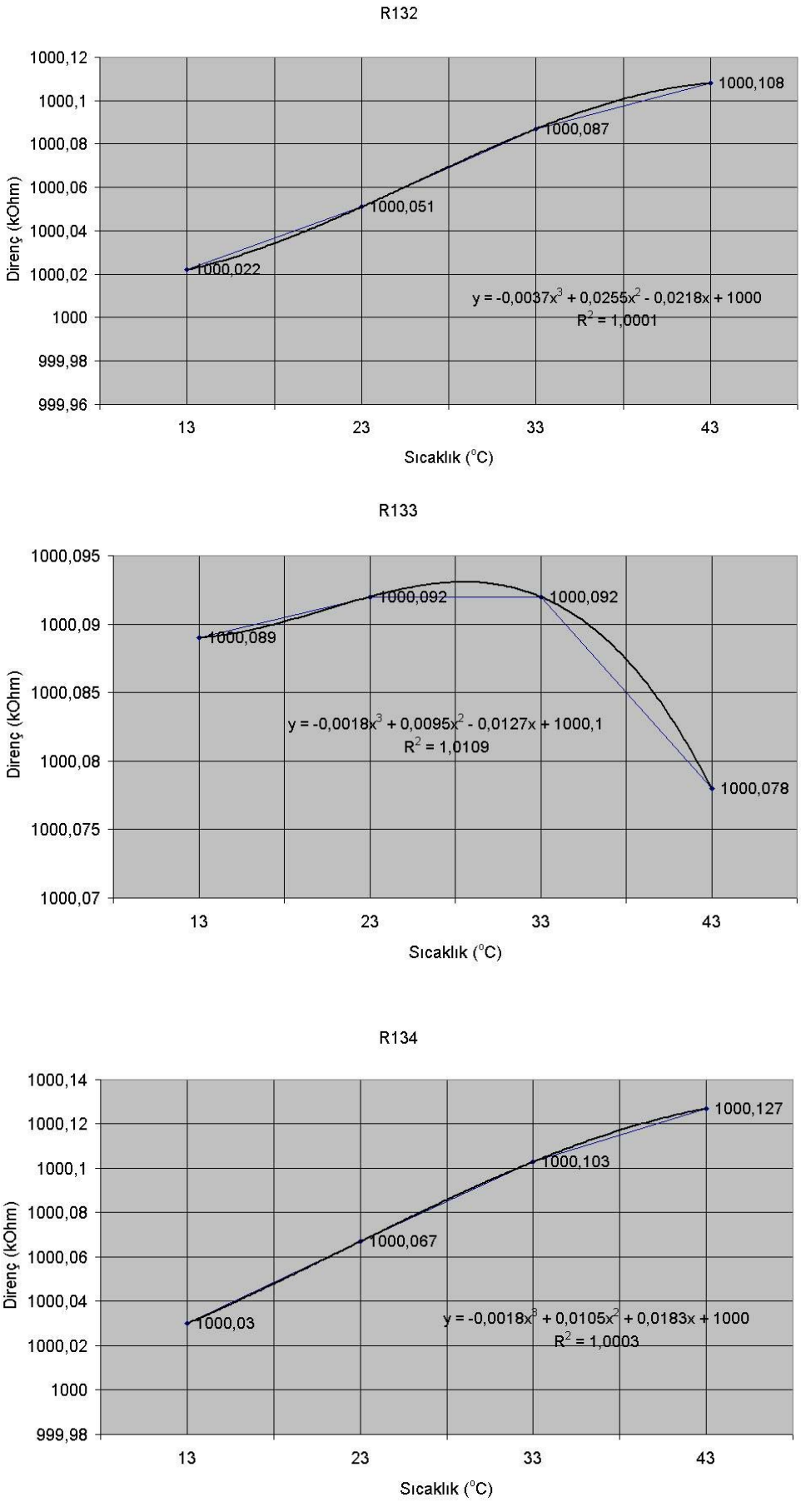
Şekil D.42: R123, R124 ve R125 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



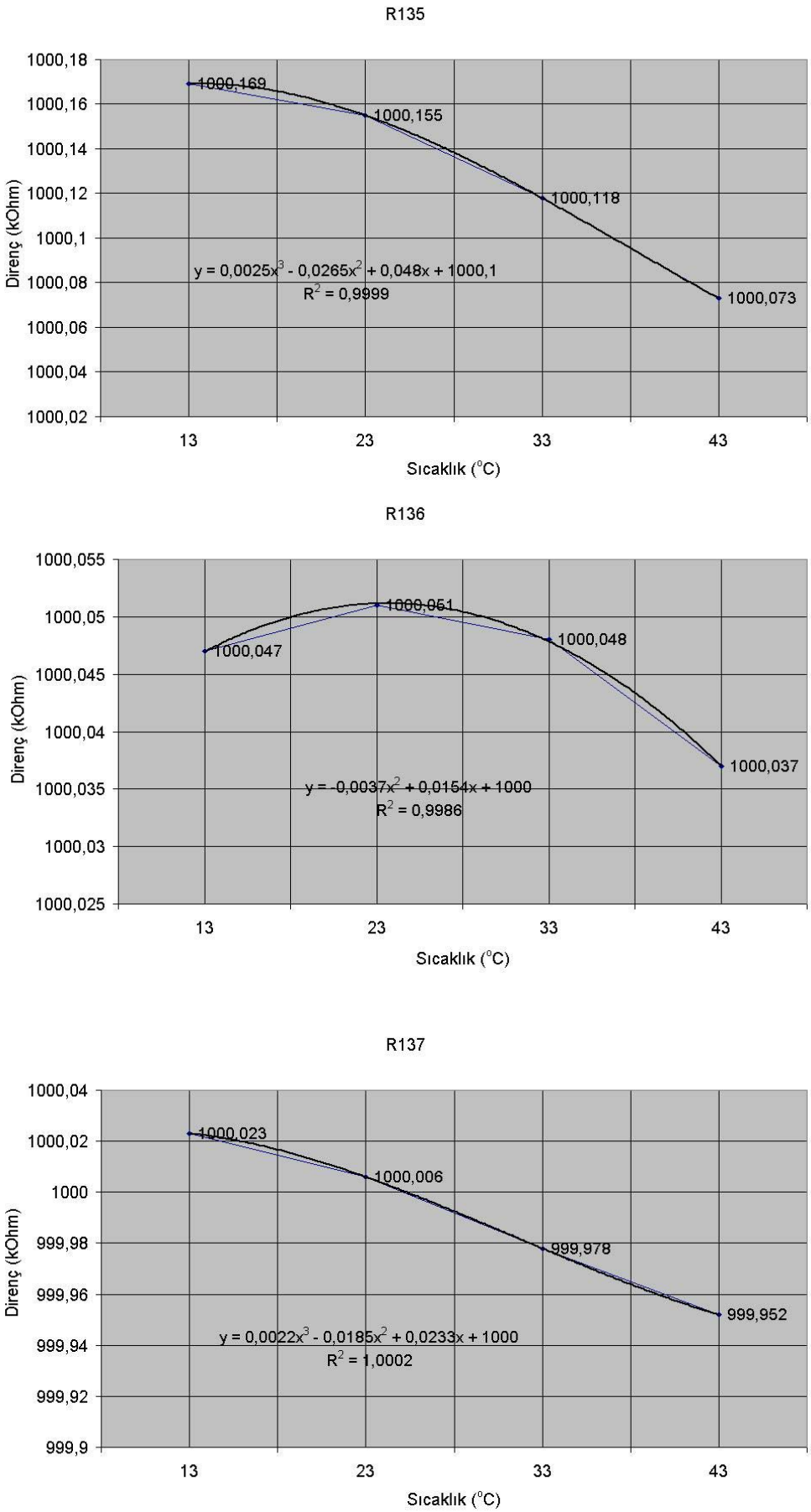
Şekil D.43: R126, R127 ve R128 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



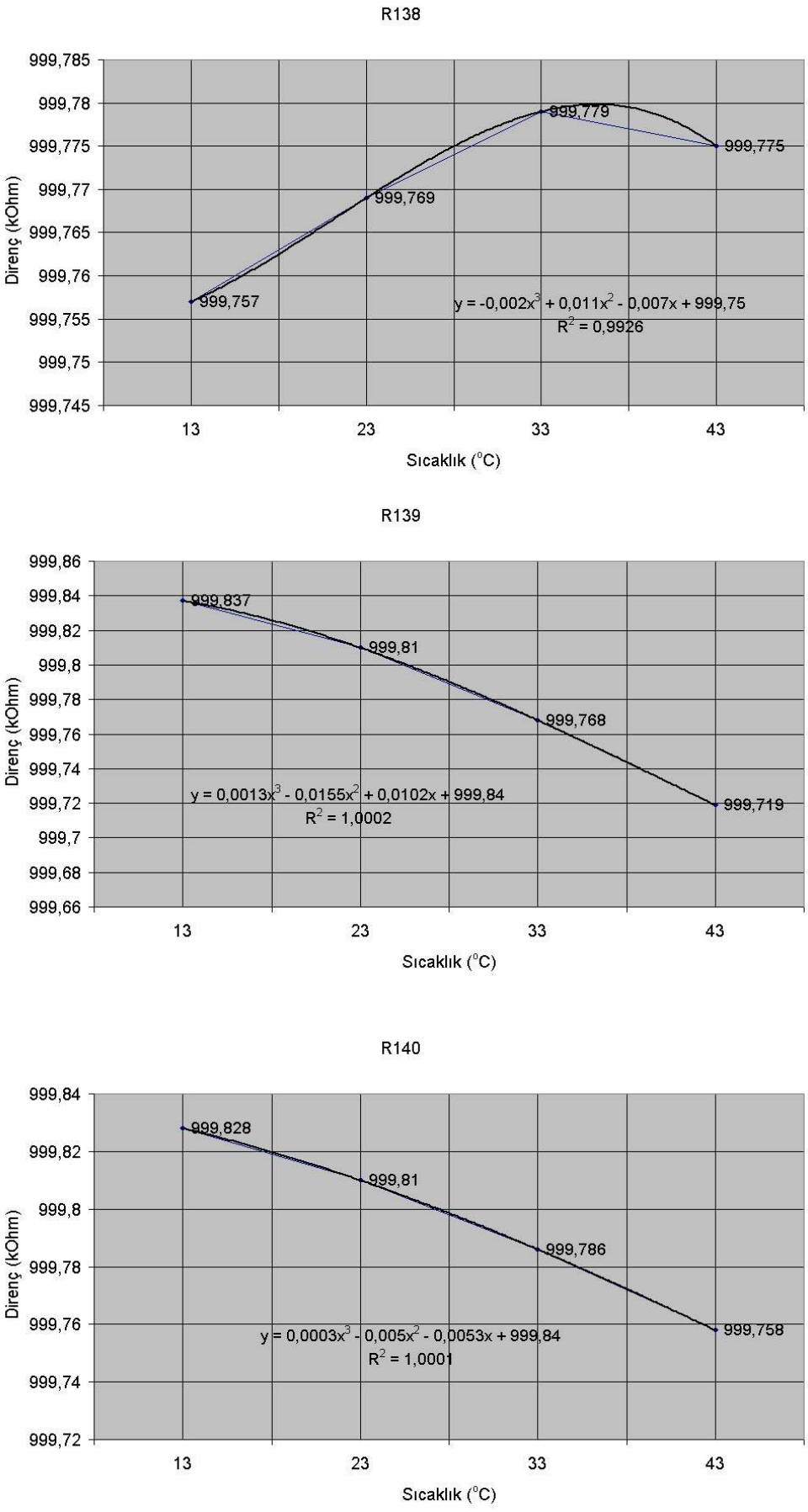
Şekil D.44: R129, R130 ve R131 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



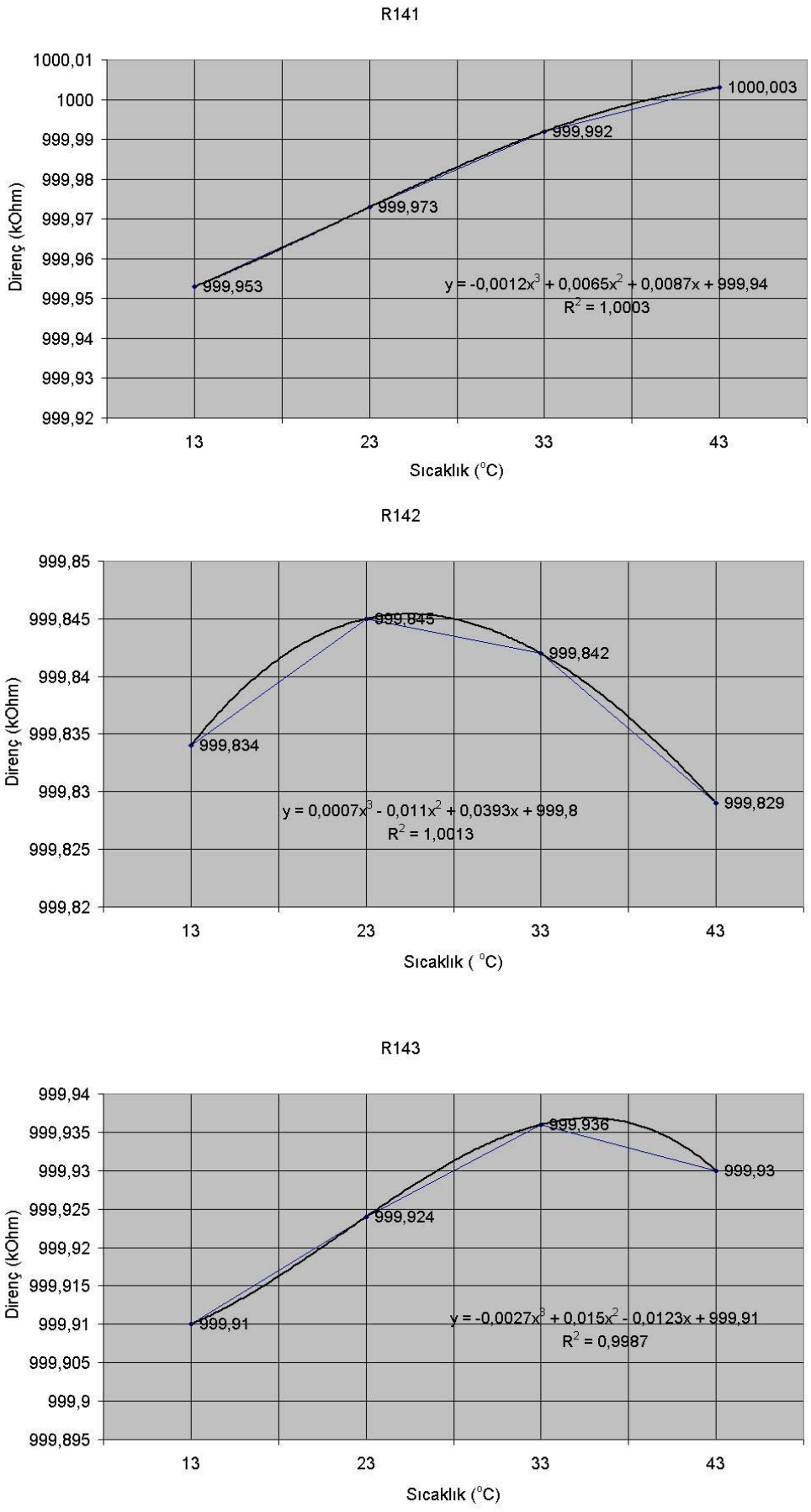
Şekil D.45: R132, R133 ve R134 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



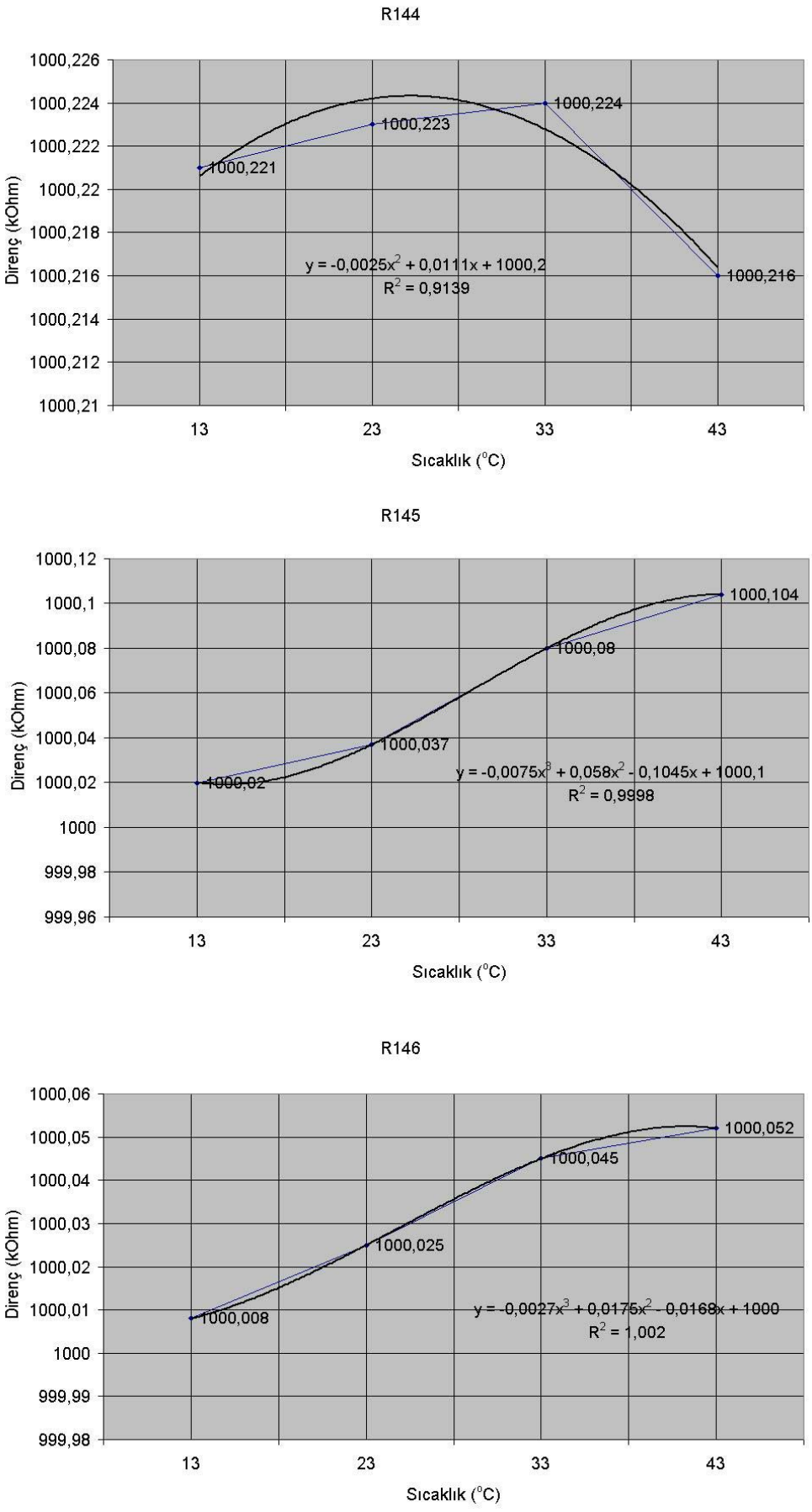
Şekil D.46: R135, R136 ve R137 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



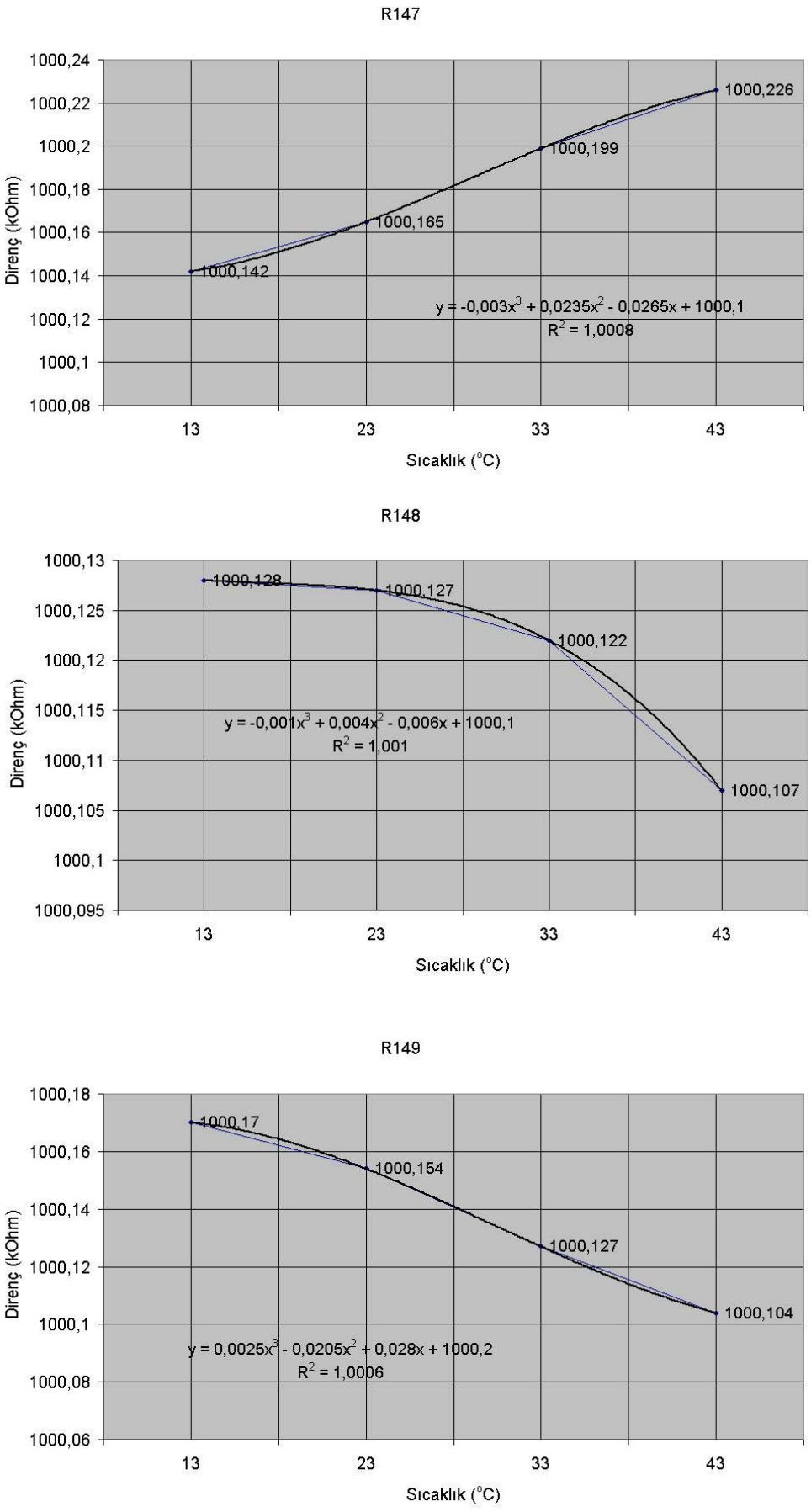
Şekil D.47: R138, R139 ve R140 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



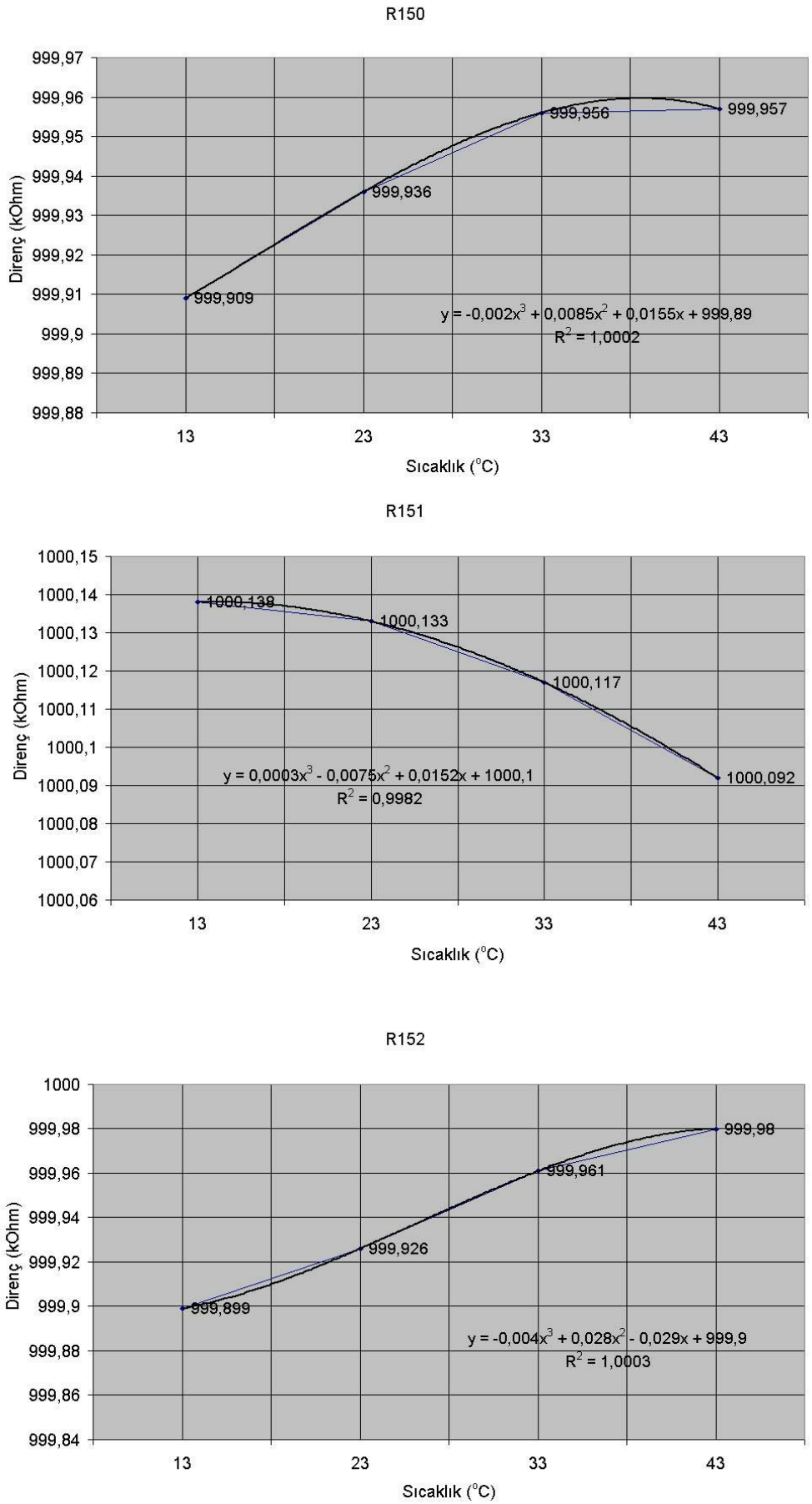
Şekil D.48: R141, R142 ve R143 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



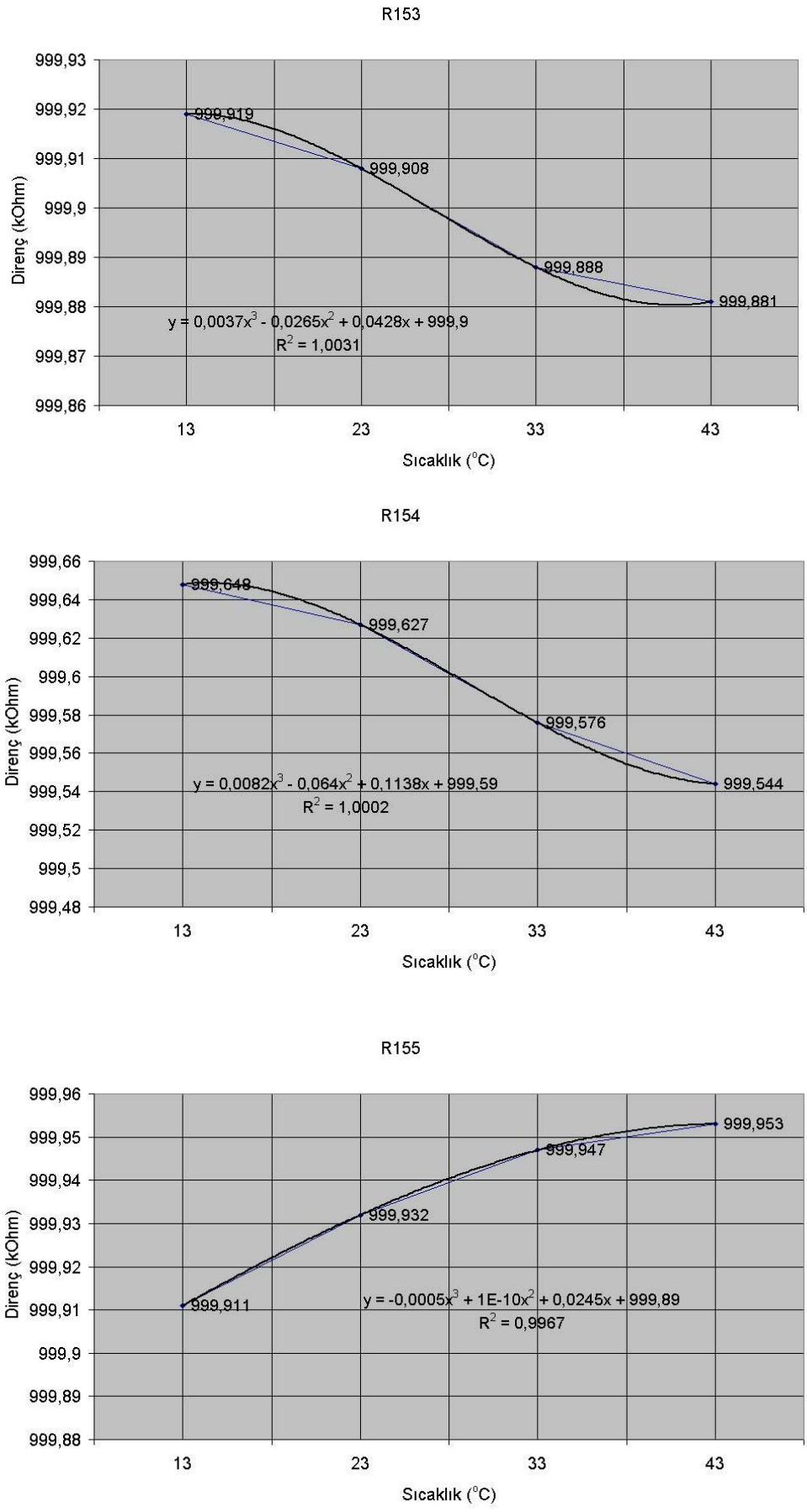
Şekil D.49: R144, R145 ve R146 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



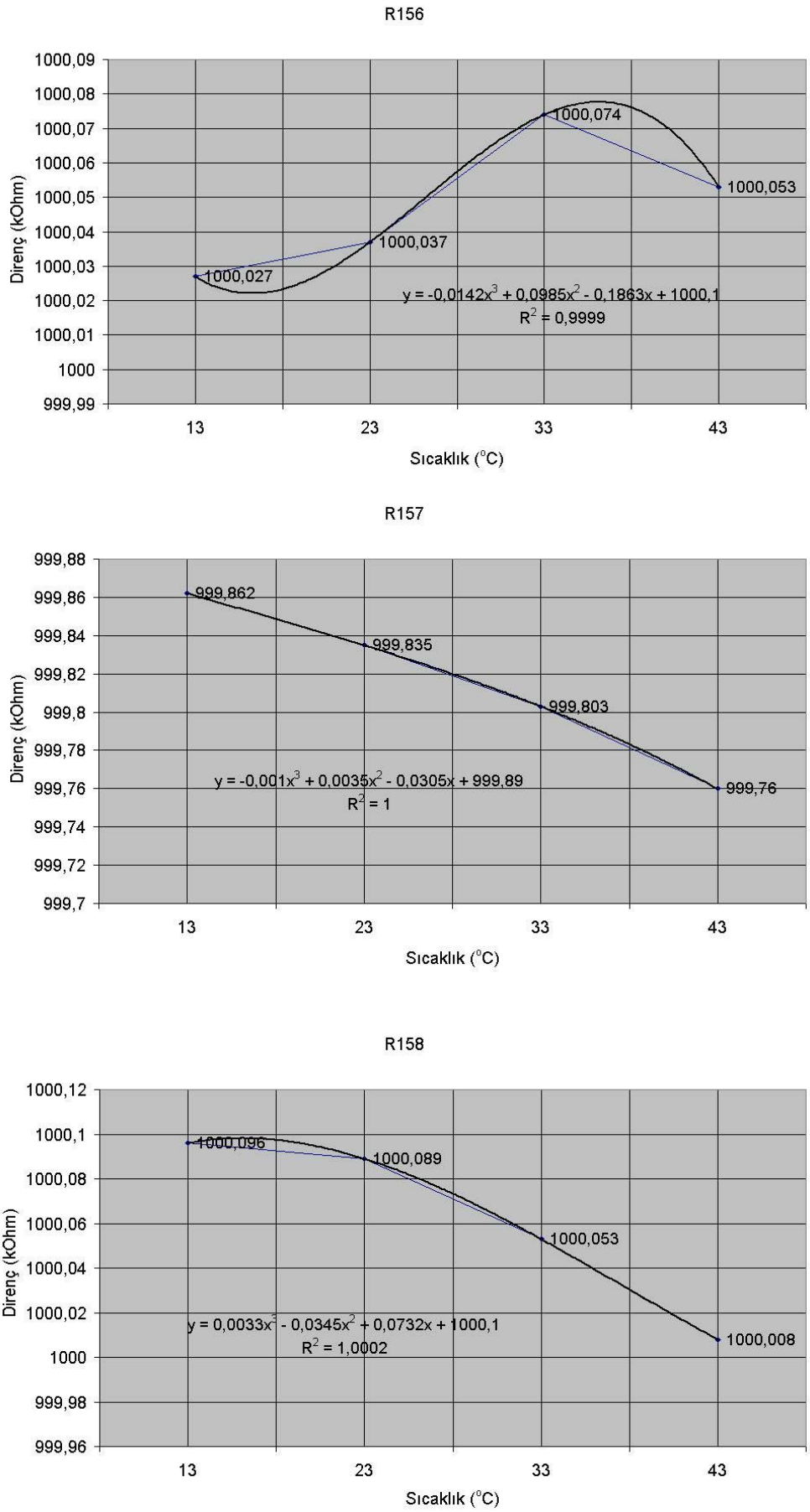
Şekil D.50: R147, R148 ve R149 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



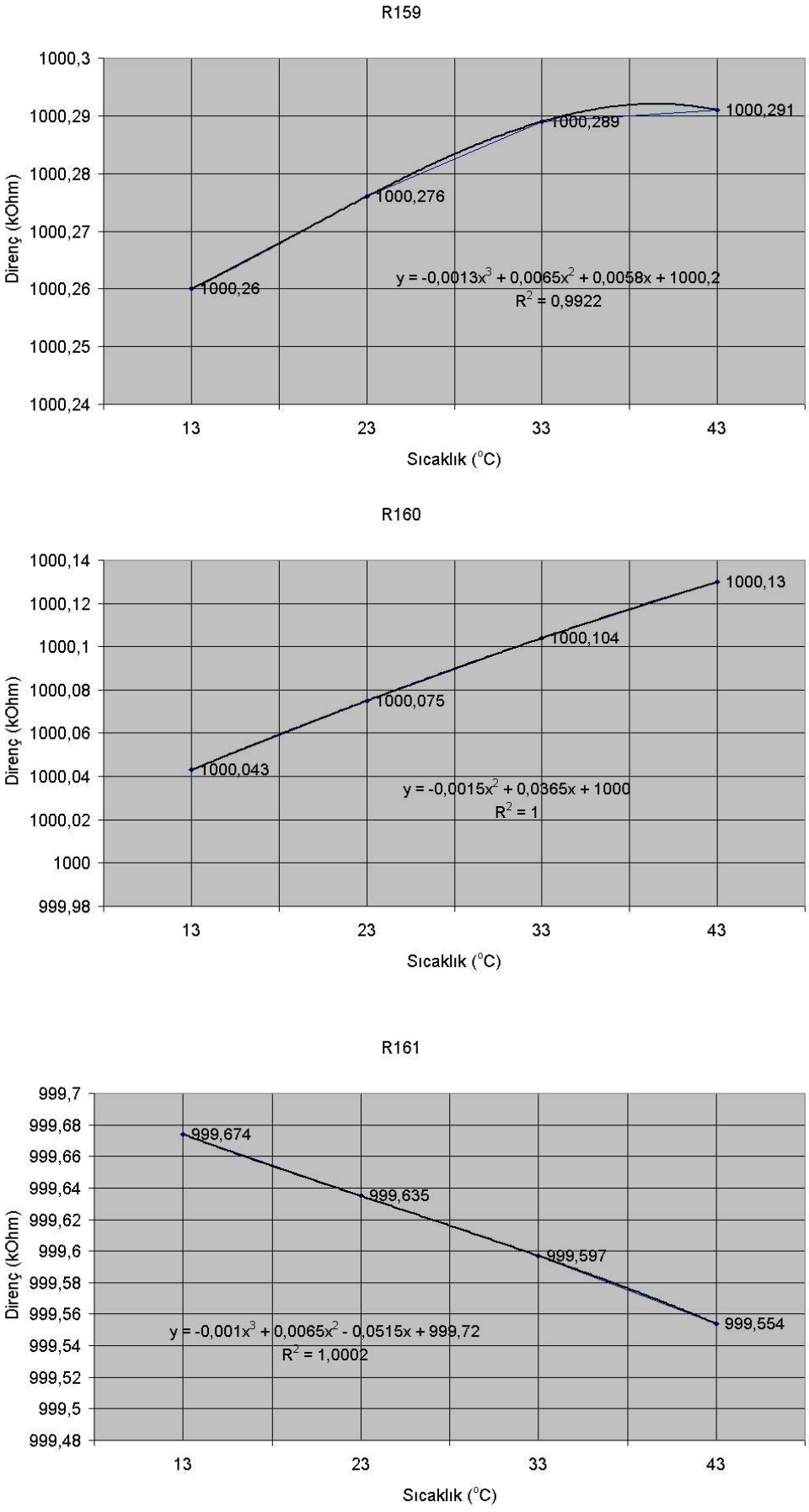
Şekil D.51: R150, R151 ve R152 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



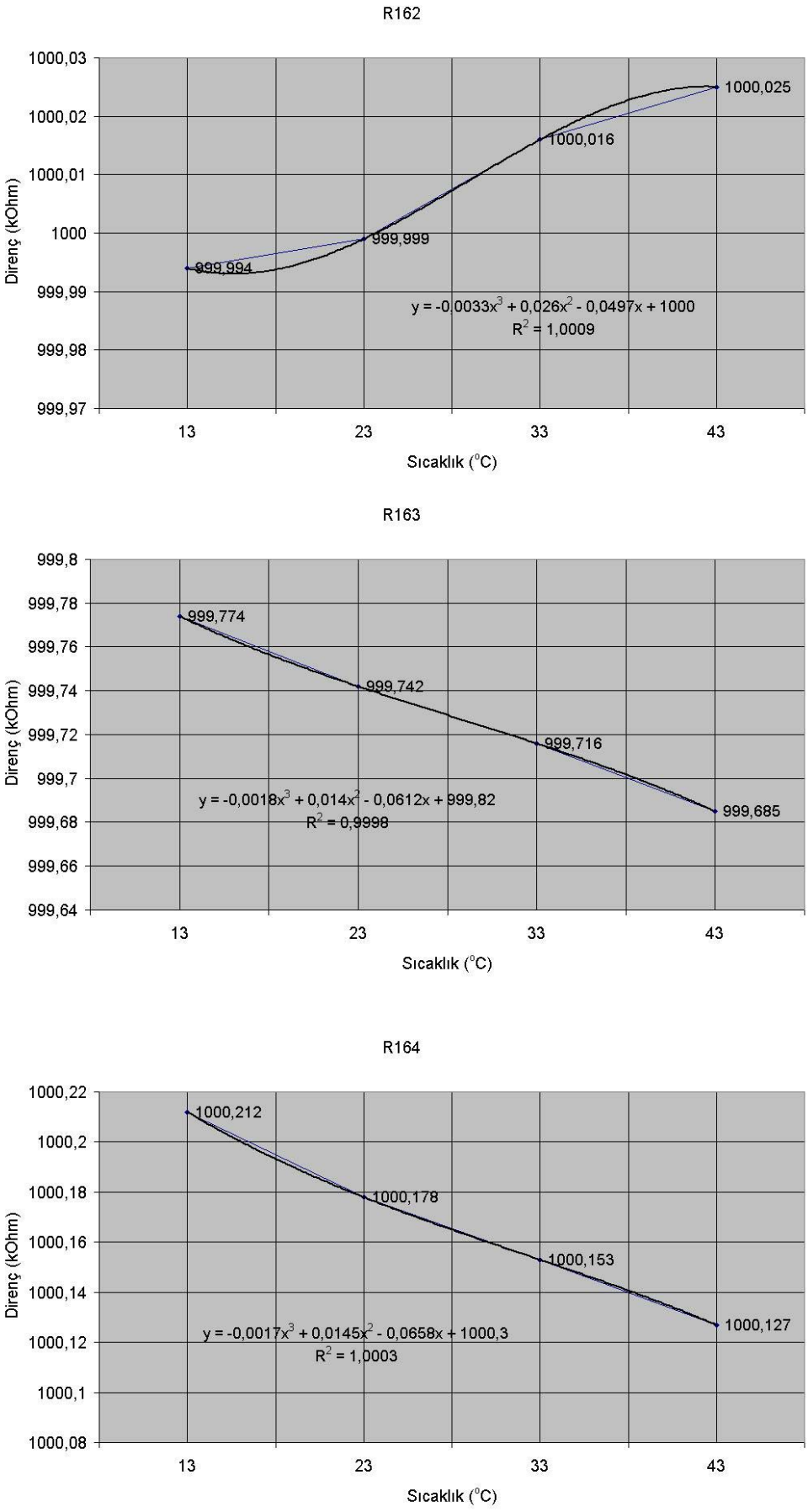
Şekil D.52: R153, R154 ve R155 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



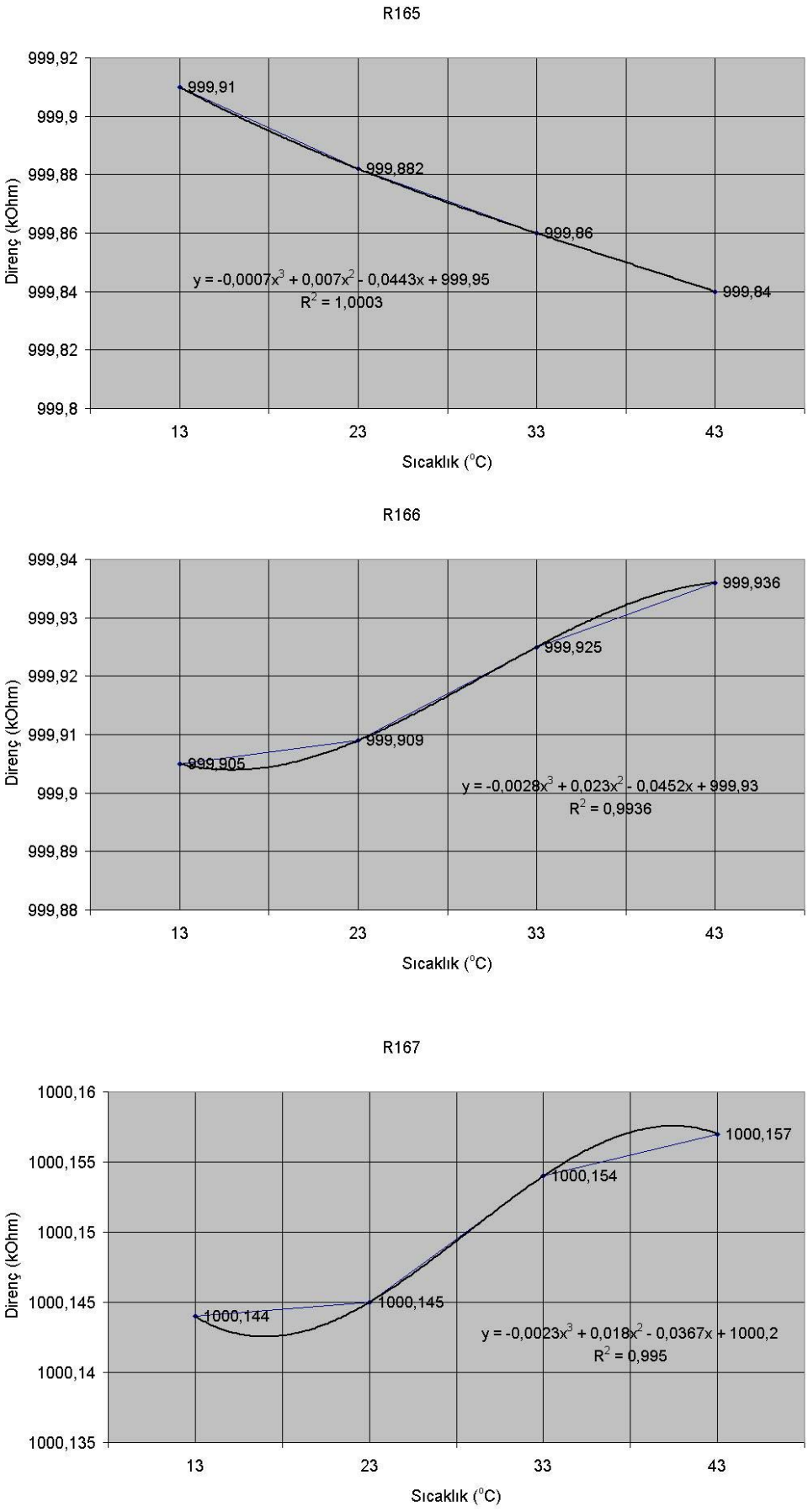
Şekil D.53: R156, R157 ve R158 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



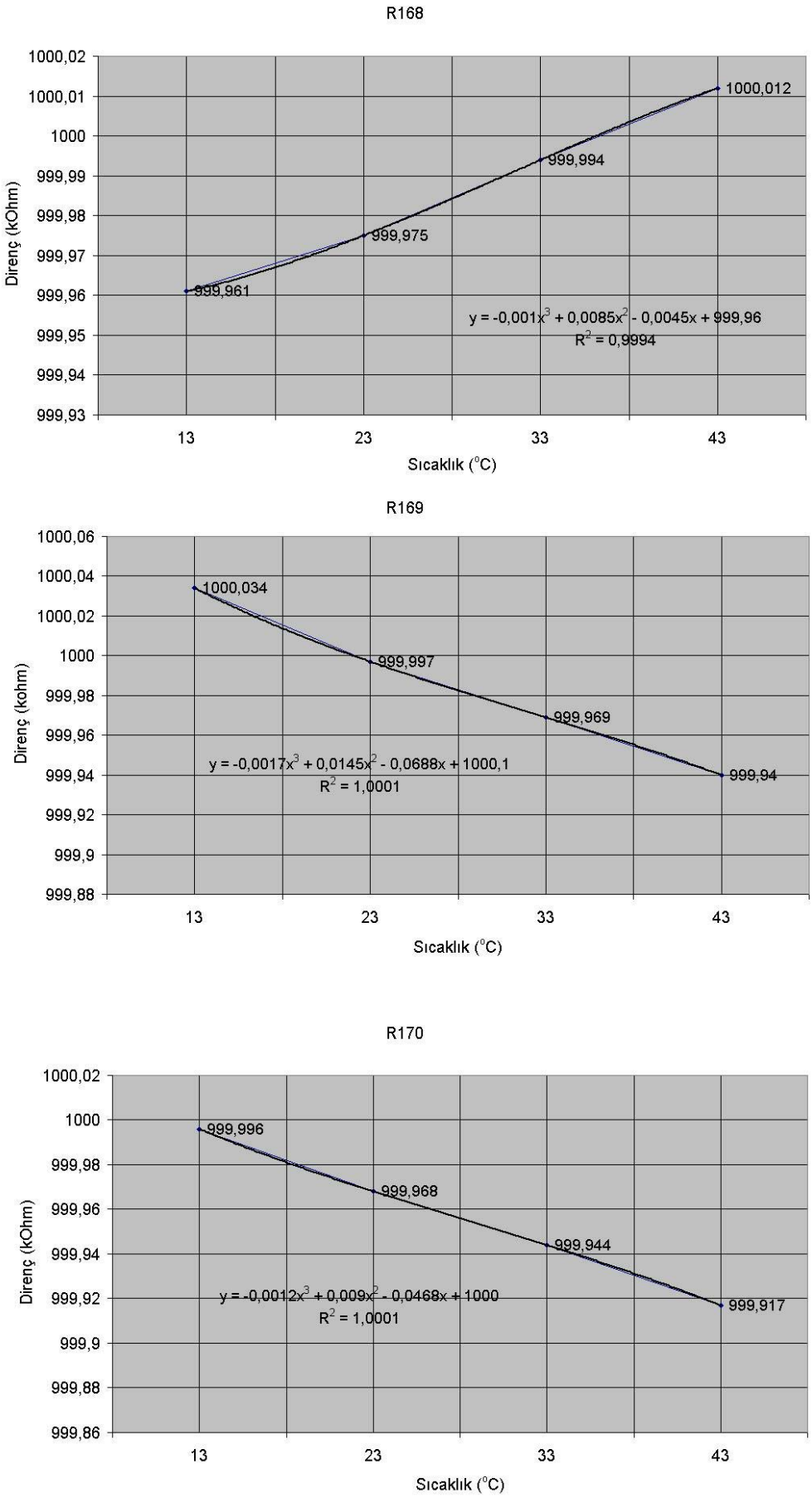
Şekil D.54: R159, R160 ve R161 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



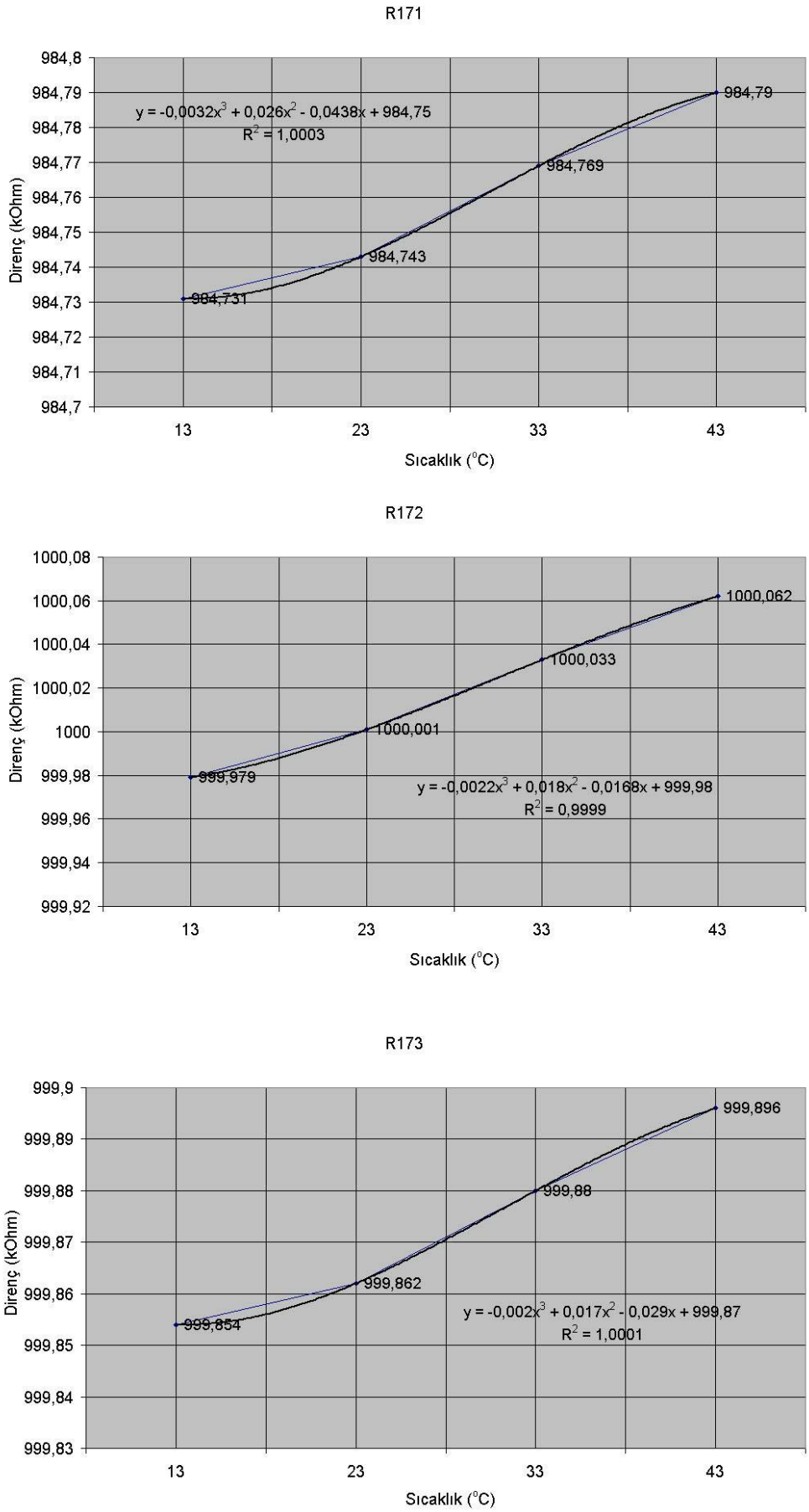
Şekil D.55: R162, R163 ve R164 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



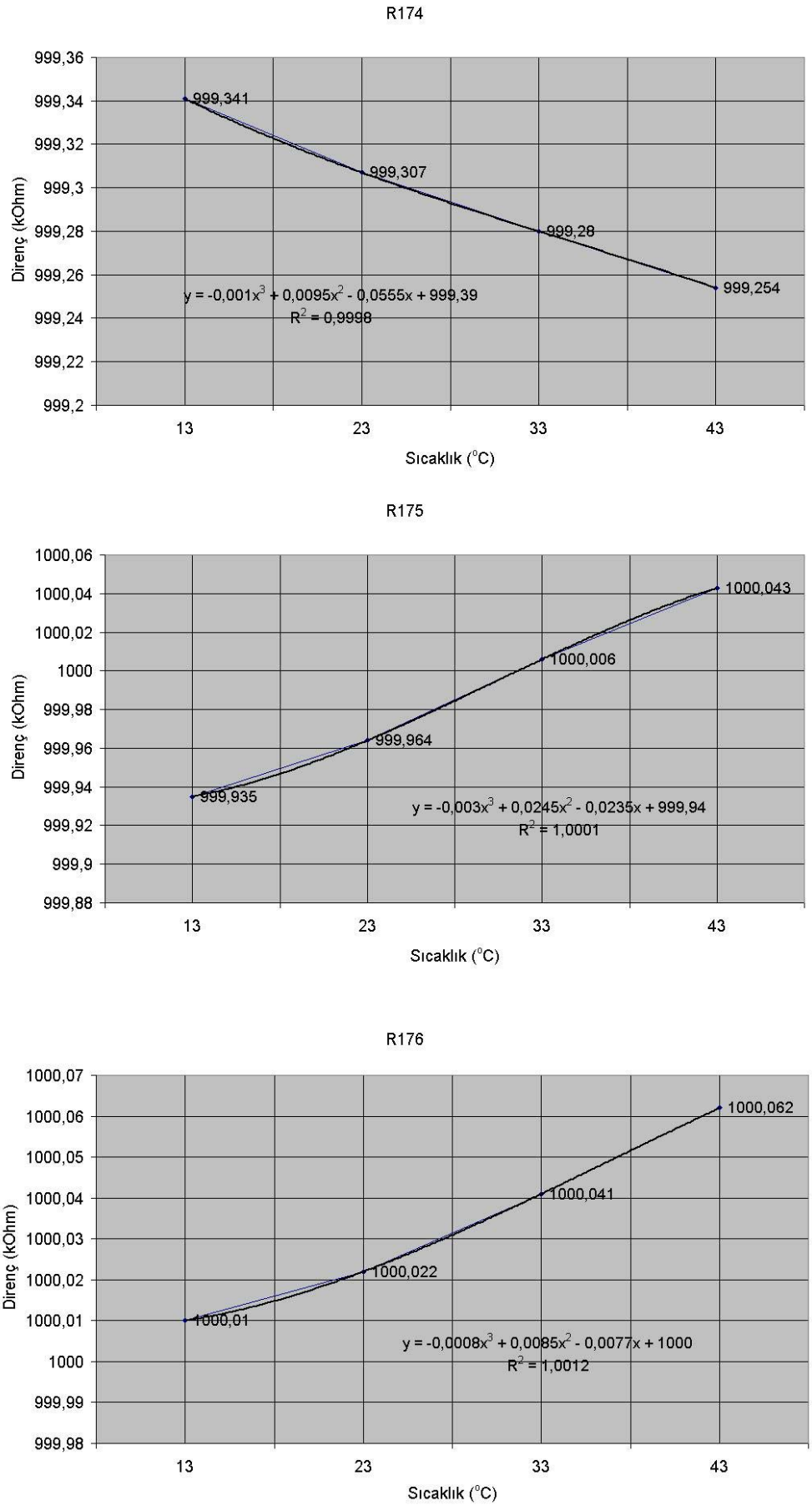
Şekil D.56: R165, R166 ve R167 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



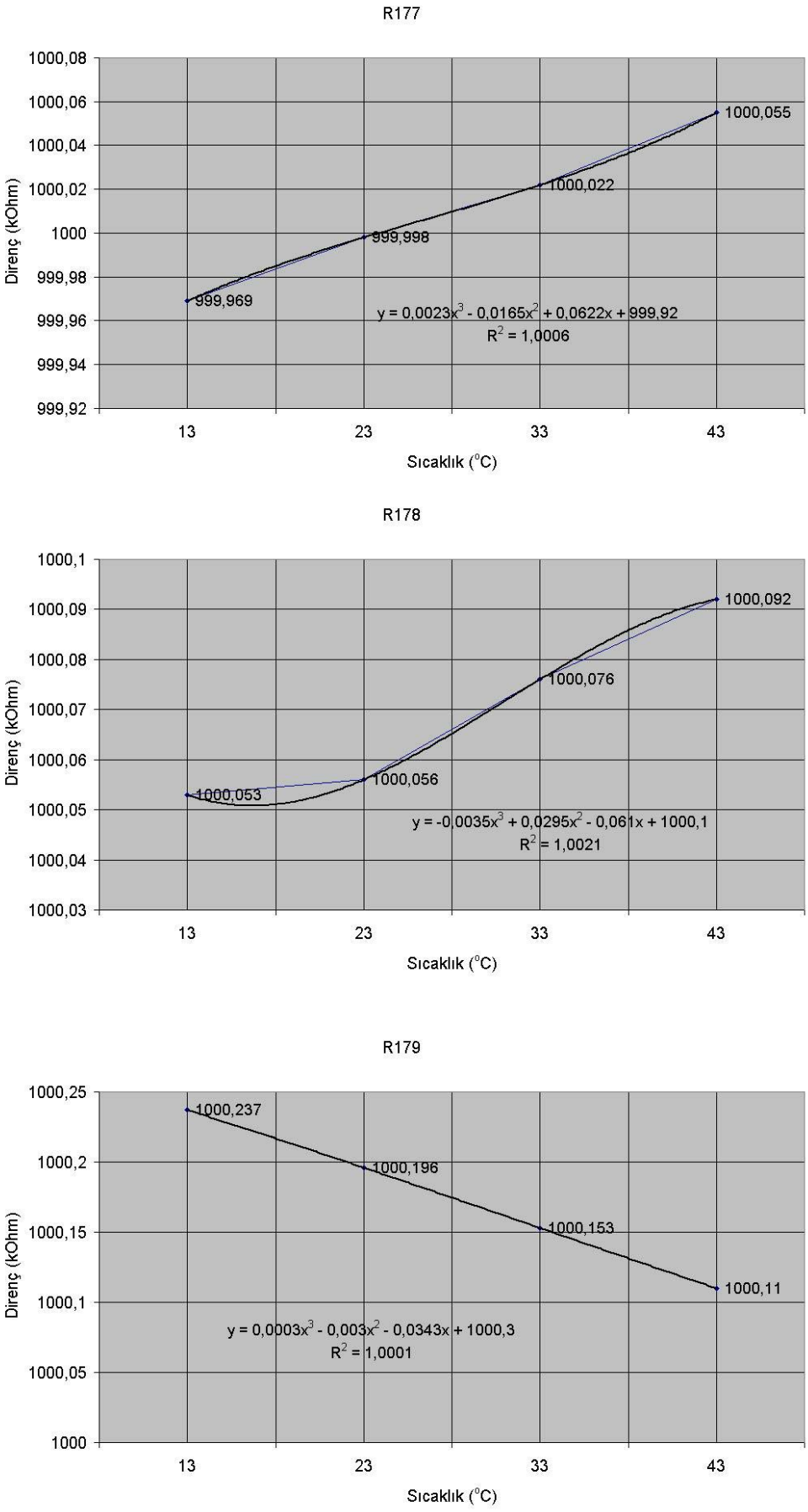
Şekil D.57: R168, R169 ve R170 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



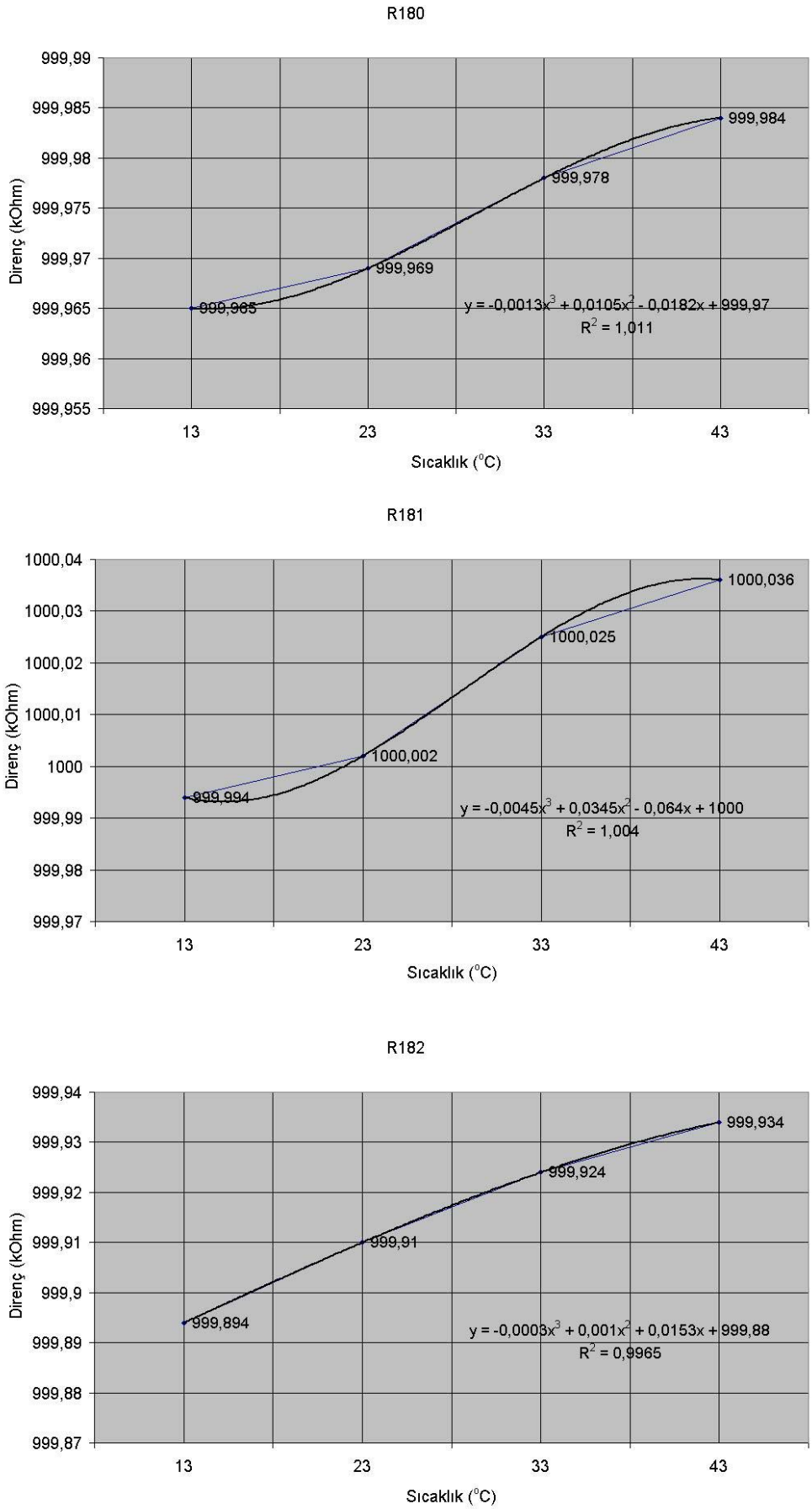
Şekil D.58: R171, R172 ve R173 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



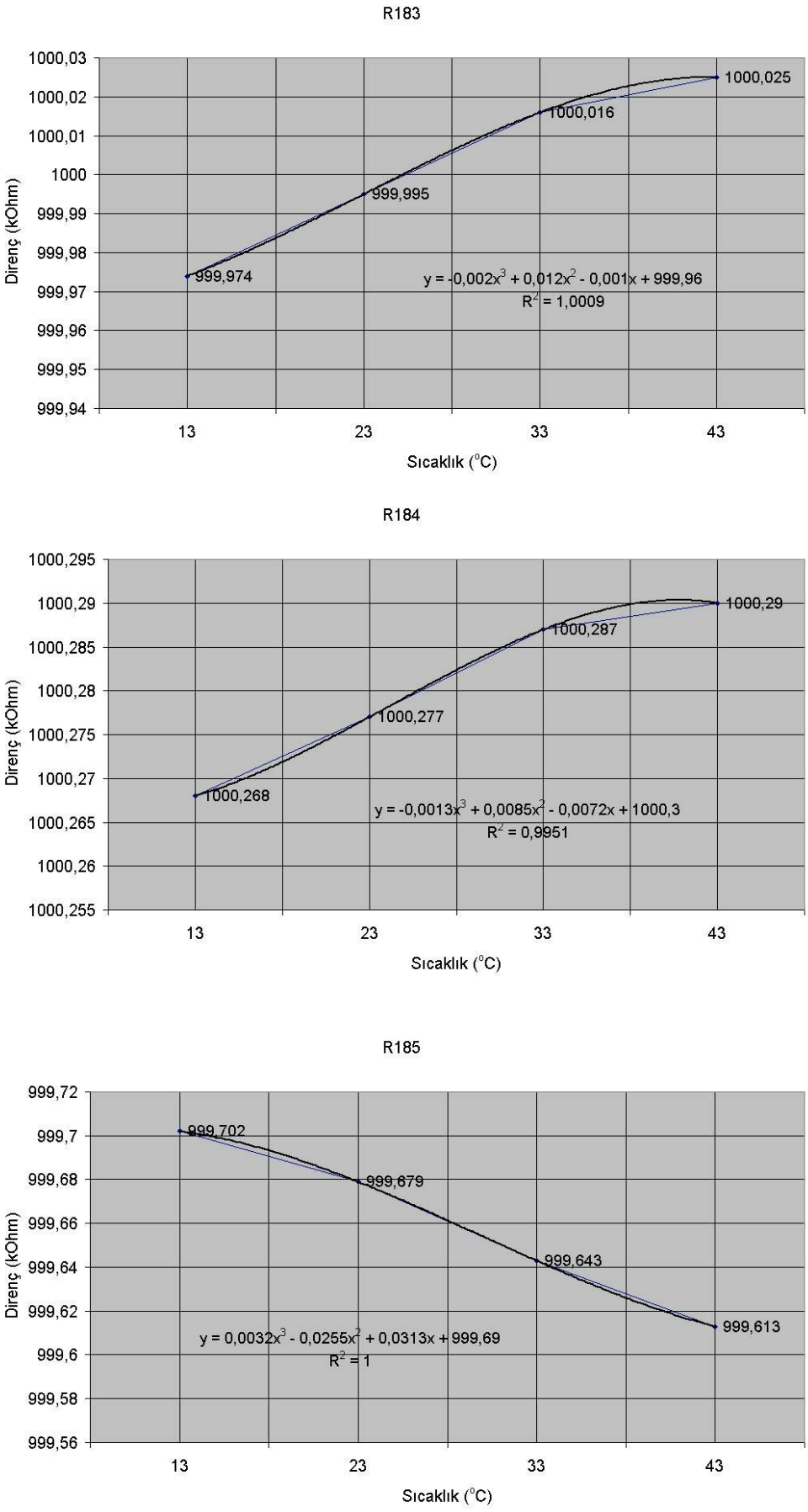
Şekil D.59: R174, R175 ve R176 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



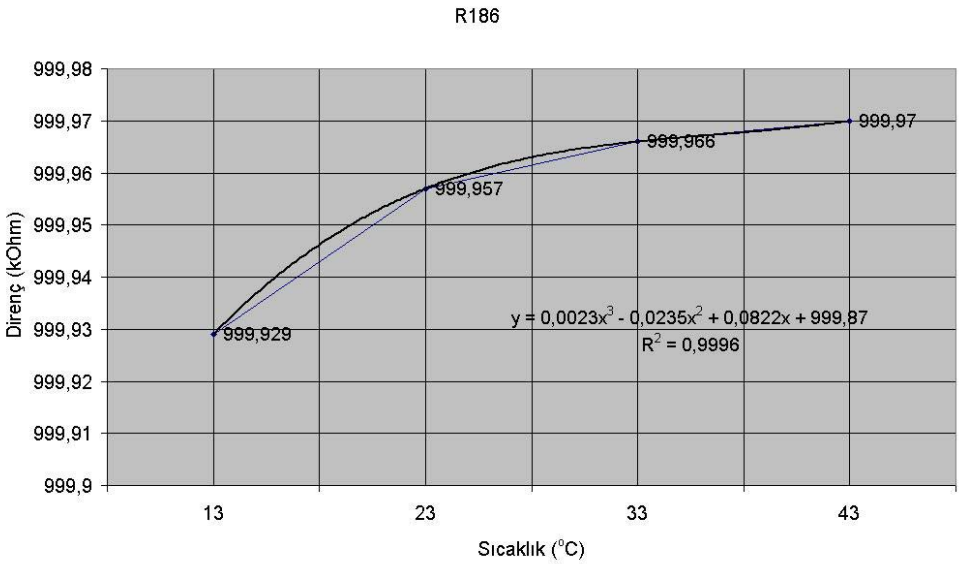
Şekil D.60: R177, R178 ve R179 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri

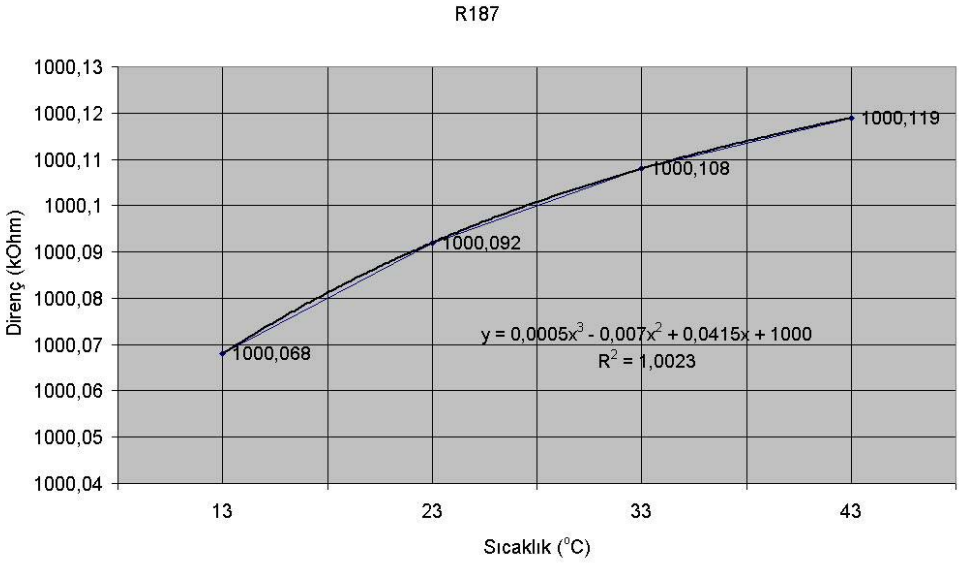


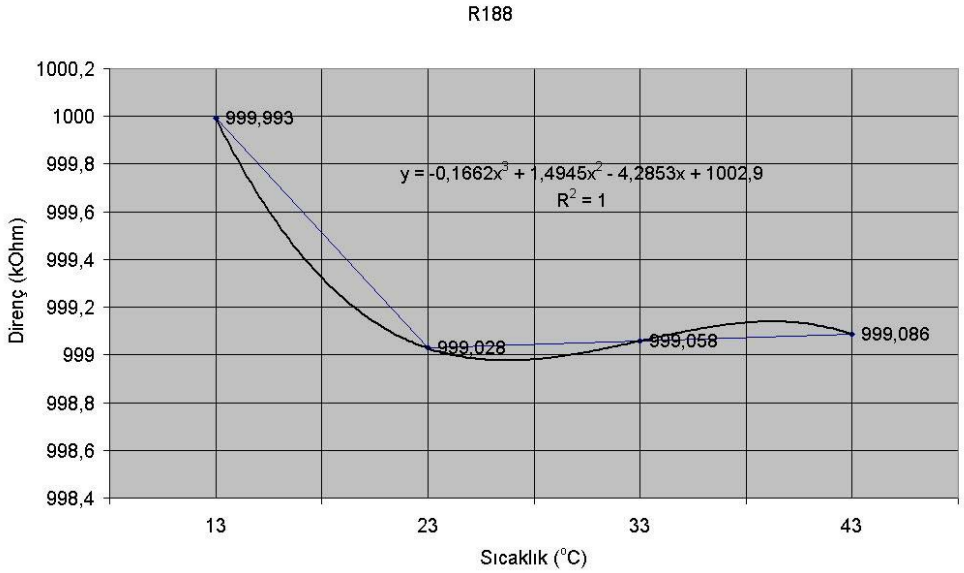
Şekil D.61: R180, R181 ve R182 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



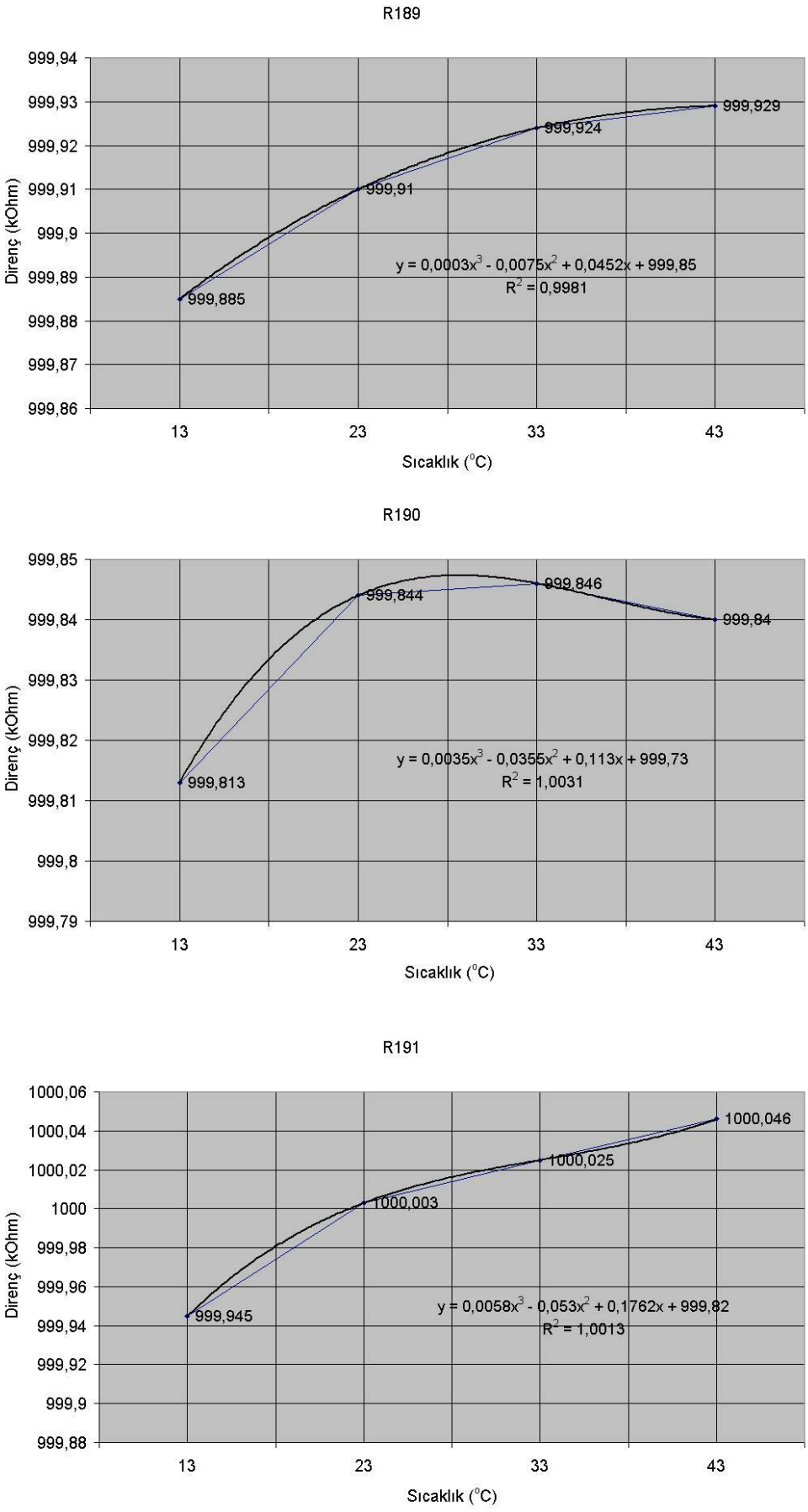
Şekil D.62: R183, R184 ve R185 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



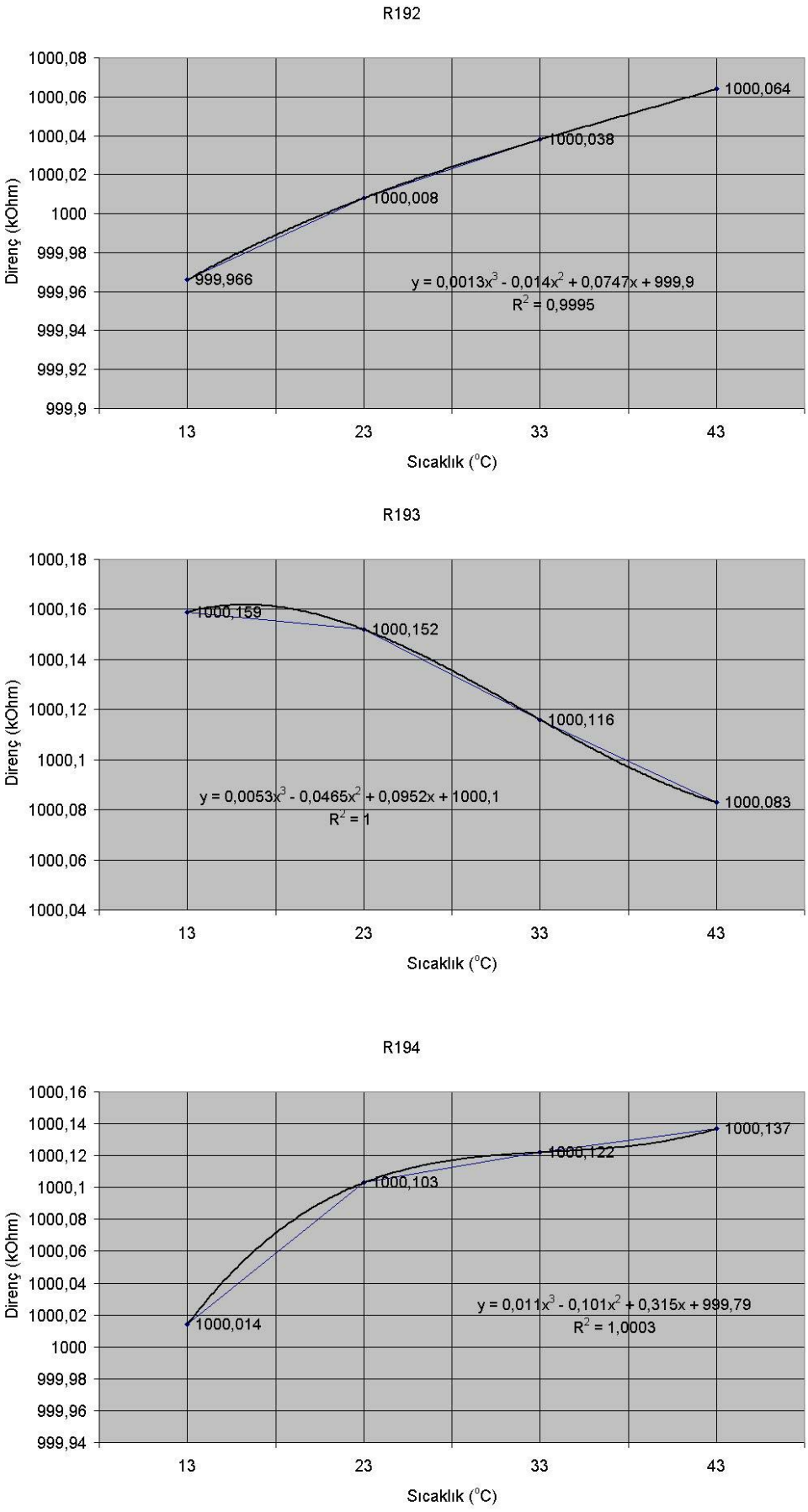




Şekil D.63: R186, R187 ve R188 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



Şekil D.64: R189, R190 ve R191 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri



Şekil D.65: R192, R193 ve R194 dirençlerinin sıcaklıkla değişimleri

EK E SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE EKSENEL SİMETRİLİ ALAN PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ

Ek E.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

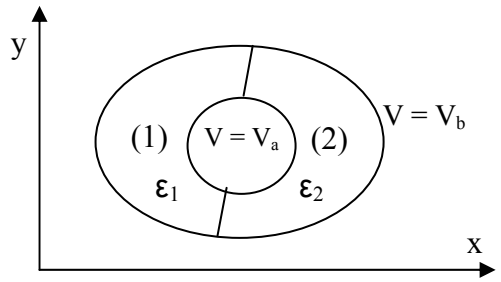
Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) elektrik alanı incelenecek bölge içindeki enerjinin en küçük değere indirgenmesi (minimumlaştırılması) ilkesine dayanır. Bölge içindeki alan Laplace veya Poisson tipinde bir elektrik alan olabilir.

Sonlu elemanlar yönteminde de diğer sayısal yöntemlerde olduğu gibi bir sistemin sonlu sayıdaki bilinmeyen büyüklüğünün sistemin bilinen büyüklükleri cinsinden bulunması yolu izlenir.

Şekil E.1'de iki boyutlu, sınırlardaki potansiyel değerleri (V_a ve V_b) verilmiş (Dirichlet tipi) bir A bölgesi gösterilmiştir. Bölge kesikli çizgi ile (1) ve (2) alt bölgelerine ayrılmıştır. Alt bölgelerin ara kesitinde serbest yüklerin bulunmadığı ve koşulların bilindiği varsayılır. Bölge içindeki toplam enerji

$$W = z\iint\left\{\frac{1}{2}\left[\varepsilon_x\left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)^2 + \varepsilon_y\left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2\right]\right\}dx.dy \qquad (E.1)$$

şeklinde yazılabilir. Burada z sabittir. Buradan yazılacak $w = W / z$ bağıntısı z uzunluğu başına enerji yoğunluğunu gösterir. ε_x ve ε_y elektrik alanın yönüne bağlı olarak değer alan dielektrik katsayılarıdır.



Şekil E.1: İki boyutlu bölge

Enerji bağıntısından yararlanarak enerjiyi minimum yapan potansiyel değerlerini bulabilmek için öncelikle katsayıları henüz bilinmeyen ve basit işlevlerin toplamından oluşmuş bir V(x, y) potansiyel yaklaşım işlevinin tanımlanmış olması gerekir. Tanımlanacak bu potansiyel işlevinin bölge içinde sürekli olduğu ve sonlu sayıda türevi bulunacağı göz önünde tutulmalıdır.

Bir çözüm bölgesi içinde sınır koşullarını sağlayan birden fazla potansiyel işlevi elde etmek olasıdır, ancak bunlardan bir tanesi

$$\nabla^2 V = \Delta V = 0 \qquad \text{(E.2)}$$

Laplace denklemini sağlar ve bu işlev tektir. Laplace denklemini sağlayan bu çözüm aynı zamanda bölge içindeki potansiyel enerjiyi minimum yapan çözümdür. Bunun tersi de söylenebilir, yani, bölge içinde enerjiyi minimum yapan potansiyel çözümü, Laplace denklemini sağlayan potansiyel çözümüdür.

Bu nedenle sonlu elemanlar yönteminde Laplace denklemini çözmek yerine, enerji denklemini minimum yapan bir potansiyel çözümünü bulmak yoluna gidilir. Herhangi bir problemin sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü temel olarak dört adımda gerçekleştirilir:

- Çözüm bölgesinin sonlu elemanlara veya alt bölgelere ayrılması
- Herbir eleman için temel denklemlerin yazılması
- Çözüm bölgesindeki tüm elemanların birleştirilmesi
- Elde edilen denklem sisteminin çözümü

Ek E.2 Problemin Silindirsel Koordinat Sisteminde İncelenmesi

Probleme uygun koordinat sistemi, silindirsel koordinat sistemidir. Silindirsel koordinat sisteminde, eksenel simetri nedeniyle herhangi bir (r, θ, z) noktasındaki potansiyelin değeri r ve z sabit kalmak koşuluyla θ ile değişmez. Bu durumda problem üç boyutlu bir uzay yerine iki boyutlu bir düzlem üzerinde incelenebilir.

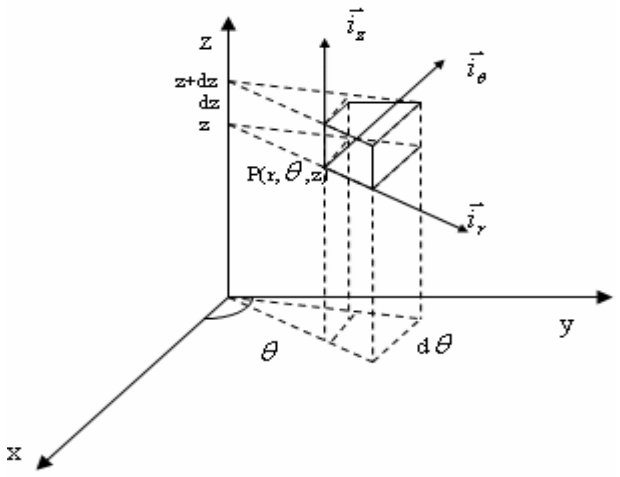
Silindirsel koordinatlarda üç boyutlu potansiyel gradyanı

$$\nabla V = \frac{\partial V}{\partial r}\vec{i}_r + \frac{1}{r}\frac{\partial V}{\partial \theta}\vec{i}_\theta + \frac{\partial V}{\partial z}\vec{i}_z \qquad \text{(E.3)}$$

şeklindedir. Burada potansiyelin θ dönme açısından bağımsız ($\partial V / \partial \theta = 0$) ve dolayısıyla V = V(r, z) olması nedeniyle iki boyutlu potansiyel gradyanı

$$\nabla V = \frac{\partial V}{\partial r}\vec{i}_r + \frac{\partial V}{\partial z}\vec{i}_z \qquad \text{(E.4)}$$

biçiminde yazılabilir.



Şekil E.2: Silindirsel koordinat sistemi

Ek E.3 Elektrostatik Enerji

İncelenen elektrot sisteminin simetri ekseninden geçen düzlem üzerindeki B çözüm bölgesinin yarısının simetri ekseni etrafında 2π kadar döndürülmesiyle oluşan V hacmi içerisinde depolanan potansiyel enerji

$$W = \iiint \frac{1}{2}\varepsilon E^2 dV \text{ , } E = \text{-grad } V, \; dV = r.dr.d\theta.dz$$

$$W = \frac{\varepsilon}{2}\iiint \left|\text{grad}\vec{V}\right|^2 .r.dr.d\theta.dz \qquad \text{(E.5)}$$

dir. Burada r.dr.dθ.dz sonsuz küçük dV hacmidir. (E.4) eşitliği (E.5) eşitliğinde yerine konur ve θ = *0* - *2*π arasında integre edilirse enerji

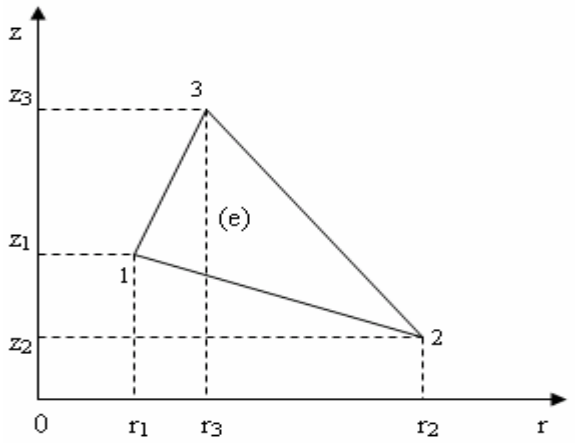
$$W = \frac{\varepsilon}{2}\iint .\int_0^{2\pi}\left[\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right)\vec{i}_r + \left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)\vec{i}_z\right]^2 d\theta.r.dr.dz$$

$$W = \varepsilon\pi\iint .\left[\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)^2\right] r.dr.dz \qquad \text{(E.6)}$$

olarak bulunur.

Ek E.4 Problemin Formülasyonu

Potansiyelin, dönme açısı θ dan bağımsız olması dolayısıyla üçgen elemanlar r-z koordinat sisteminde tanımlanırlar. Şekil E.3'de bir üçgen elemanın bu koordinat sisteminde tanımlanması gösterilmiştir. Burada r ve z radyal ve eksenel koordinatları göstermektedir.



Şekil E.3: Radyal-eksenel koordinatlarda bir üçgen eleman

Üçgen elemanlar içinde potansiyelin doğrusal değişeceği kabul edilirse potansiyel

$$V = a + br + cz \qquad \text{(E.7)}$$

şeklinde bir bağıntı ile verilebilir. (E.7)'deki potansiyel işlevi her düğüm için yazılırsa

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & r_1 & z_1 \\ 1 & r_2 & z_2 \\ 1 & r_3 & z_3 \end{bmatrix}.\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \qquad \text{(E.8)}$$

elde edilir. (E.8)'deki denklem takımından a, b, ve c katsayıları örneğin Cramer kuralı ile bulunabilir. Katsayı matrisinin determinantı

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & r_1 & z_1 \\ 1 & r_2 & z_2 \\ 1 & r_3 & z_3 \end{vmatrix} = 2S = (r_2 z_3 - r_3 z_2) + (r_3 z_1 - r_1 z_3) + (r_1 z_2 - r_2 z_1) \qquad \text{(E.9)}$$

dir. S üçgen elemanın alanı olmak üzere, bu determinant üçgeninin alanının iki katına (2S) eşittir. a, b, ve c katsayıları Cramer yöntemine göre

$$a = \frac{\begin{vmatrix} V_1 & r_1 & z_1 \\ V_2 & r_2 & z_2 \\ V_3 & r_3 & z_3 \end{vmatrix}}{(r_2 z_3 - r_3 z_2) + (r_3 z_1 - r_1 z_3) + (r_1 z_2 - r_2 z_1)}$$

$$b = \frac{\begin{vmatrix} 1 & V_1 & z_1 \\ 1 & V_2 & z_2 \\ 1 & V_3 & z_3 \end{vmatrix}}{(r_2 z_3 - r_3 z_2) + (r_3 z_1 - r_1 z_3) + (r_1 z_2 - r_2 z_1)},$$

$$c = \frac{\begin{vmatrix} 1 & r_1 & V_1 \\ 1 & r_2 & V_2 \\ 1 & r_3 & V_3 \end{vmatrix}}{(r_2 z_3 - r_3 z_2) + (r_3 z_1 - r_1 z_3) + (r_1 z_2 - r_2 z_1)} \qquad \text{(E.10)}$$

eşitliklerinden bulunur. (E.10) eşitliğindeki işlemlerin sonucunda

$$a = \frac{1}{2S}\left[(r_2 z_3 - r_3 z_2)V_1 + (r_3 z_1 - r_1 z_3)V_2 + (r_1 z_2 - r_2 z_1)V_3\right]$$

$$a = \frac{1}{2S}\left[a_1 V_1 + a_2 V_2 + a_3 V_3\right]$$

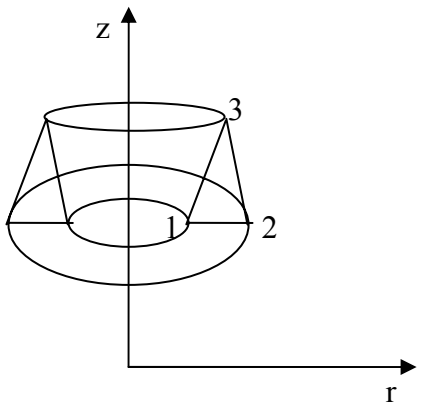
$$b = \frac{1}{2S}\left[(z_2 - z_3)V_1 + (z_3 - z_1)V_2 + (z_1 - z_2)V_3\right]$$

$$b = \frac{1}{2S}\left[b_1 V_1 + b_2 V_2 + b_3 V_3\right]$$

$$c = \frac{1}{2S}\left[(r_3 - r_2)V_1 + (r_1 - r_3)V_2 + (r_2 - r_1)V_3\right]$$

$$c = \frac{1}{2S}\left[c_1 V_1 + c_2 V_2 + c_3 V_3\right] \qquad \text{(E.11)}$$

olarak bulunur.



Şekil E.4: Radyal-eksenel koordinatlarda bir üçgen kesitli halka eleman

$V = a + b.r + c.z$ 'nin $\partial V / \partial r$ ve $\partial V / \partial z$ şeklindeki türevleri düzenlenerek (E.6)'da yerine konursa, bir üçgen elemanın z-ekseni etrafında 2π kadar döndürülmesiyle Şekil E.4'de gösterilen üçgen kesitli bir elemanın oluşturduğu hacim içerisindeki enerji

$V = a + br + cz$

$dv/dr = b,\ dv/dz = c$

$$W^{(e)} = \varepsilon^{(e)}\pi\iint.\left[\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)^2\right] r.dr.dz$$

$$W^{(e)} = \varepsilon^{(e)}\pi(b^2 + c^2)\iint_{S^{(e)}} r.dr.dz$$

$$\varepsilon^{(e)} = \varepsilon_o.\varepsilon_r^{(e)}$$

$$W^{(e)} = \varepsilon_o.\varepsilon_r^{(e)}.\pi.(b^2 + c^2)\iint_{S^{(e)}} r.dr.dz \qquad (E.12)$$

$\varepsilon_r^{(e)}$: Eleman içindeki ortamın bağıl dielektrik sabiti

ε_0 : Boşluğun dielektrik sabiti

olarak bulunur. Şekil C3'deki üçgen elemanın $S^{(e)}$ yüzeyi üzerinden yapılan integrasyon işleminin sonucu

$$\iint_{S^{(e)}} r.dr.dz = \frac{S}{3}(r_1 + r_2 + r_3) = S.r_c \qquad (E.13)$$

$$r_c = \frac{1}{3}(r_1 + r_2 + r_3)$$

olur, (E.12)'de yerine konulursa bir üçgen kesitli halka elemanı içinde biriken enerji

$$W^{(e)} = \varepsilon_o.\varepsilon_r^{(e)}.\pi.(b^2 + c^2).S.r_c = \varepsilon_o.\varepsilon_r^{(e)}.\pi.E^2.S.r_c \qquad (E.14)$$

olur. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), tüm bölge içindeki enerjinin en küçük değere indirgenmesi ilkesine dayanır. Ele alınan bir elemanın enerjisi elemanın düğüm potansiyellerine bağlı olarak yazılabildiğinden düğüm potansiyellerine göre enerjinin minimum değeri

$$\frac{\partial W^{(e)}}{\partial V_i} = 0...(i = 1,2,3) \qquad (E.15)$$

yapılırsa

$$\frac{\partial W^{(e)}}{\partial V_i} = \varepsilon_o . \varepsilon_r^{(e)} . \pi . S \left[2b \frac{\partial b}{\partial V_i} + 2c \frac{\partial . c}{\partial . V_i} \right] . r_c = 0 \qquad \text{(E.16)}$$

i = 1, 2, 3 olmak üzere

$$\left[K^{(e)}\right]\left[V^{(e)}\right] = \begin{bmatrix} k_{11}^{(e)} & k_{12}^{(e)} & k_{13}^{(e)} \\ k_{21}^{(e)} & k_{22}^{(e)} & k_{23}^{(e)} \\ k_{31}^{(e)} & k_{32}^{(e)} & k_{33}^{(e)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = 0 \qquad \text{(E.17)}$$

3x3 boyutunda "eleman katsayılar matrisi" $[K^{(e)}]$ elde edilir. (E.16)'deki cebirsel işlemler sonucunda simetrik bir matris olan katsayılar matrisinin elemanları

$$k_{11}^{(e)} = \frac{\varepsilon^{(e)} . \pi}{2S} (b_1^2 + c_1^2) . r_c$$

$$k_{12}^{(e)} = \frac{\varepsilon^{(e)} . \pi}{2S} (b_1 b_2 + c_1 c_2) . r_c$$

$$k_{13}^{(e)} = \frac{\varepsilon^{(e)} . \pi}{2S} (b_1 b_3 + c_1 c_3) . r_c$$

$$k_{21}^{(e)} = k_{12}^{(e)}$$

$$k_{22}^{(e)} = \frac{\varepsilon^{(e)} . \pi}{2S} (b_2^2 + c_2^2) . r_c$$

$$k_{23}^{(e)} = \frac{\varepsilon^{(e)} . \pi}{2S} (b_2 b_3 + c_2 c_3) . r_c$$

$$k_{33}^{(e)} = \frac{\varepsilon^{(e)} . \pi}{2S} (b_3^2 + c_3^2) . r_c$$

veya genel olarak

$$k_{ij}^{(e)} = \frac{\varepsilon^{(e)}.\pi}{2S^{(e)}}(b_i b_j + c_i c_j).r_c^{(e)}$$

şeklinde bulunur. Bu eşitliklerde

$$a_1 = r_2 z_3 - r_3 z_2$$

$$a_2 = r_3 z_1 - r_1 z_3$$

$$a_3 = r_1 z_2 - r_2 z_1$$

$$b_1 = z_2 - z_3$$

$$b_2 = z_3 - z_1$$

$$b_3 = z_1 - z_2$$

$$c_1 = r_3 - r_2$$

$$c_2 = r_1 - r_3$$

$$c_3 = r_2 - r_1$$

$$r_c = \frac{1}{3}(r_1 + r_2 + r_3)$$

$$\varepsilon^{(e)} = \varepsilon_o.\varepsilon_r^{(e)}$$

$$S = \frac{1}{2}(b_2 c_3 - b_3 c_2) \qquad \text{(E.18)}$$

dir. Yukarda anlatılan minimumlaştırma ilkesi, çözümün yapılacağı bölgedeki elemanlara aynı anda uygulanacak olursa, tanımlanan tüm elemanların düğüm potansiyelleri arasındaki bağıntı bir lineer denklem sistemine dönüşür.

$$[K][V] = 0 \qquad \text{(E.19)}$$

Burada [V], sistemin düğüm noktalarının potansiyellerinden oluşan bir sütun

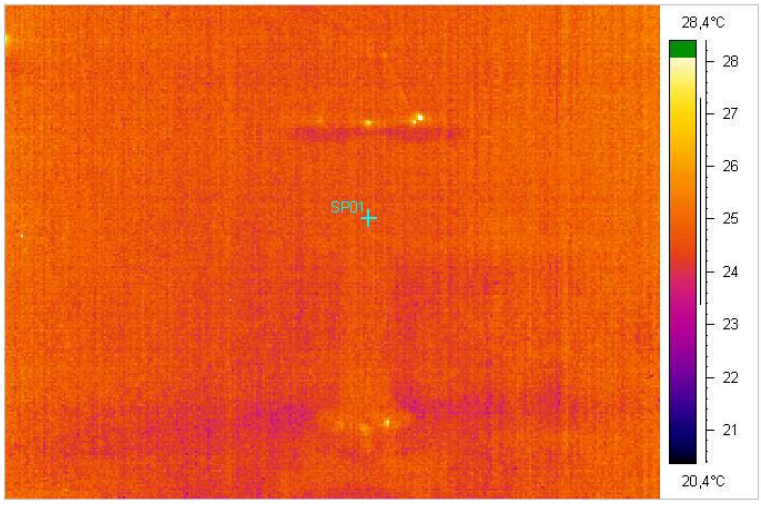
matristir. [K] matrisi simetrik, tekil olmayan ve seyrek bir matristir.

(E.19)'da elde edilen lineer denklem sistemindeki katsayılar matrisinin seyrek bir matris olması nedeniyle, doğrudan matris tersi alma yöntemlerinden yararlanmak hem gereksiz bellek kaybına neden olacak, hem de büyük boyutlu matrislerde bilgisayarın yuvarlatma hatası dolayısıyla hata miktarı artacaktır. Bu nedenle bu gibi bilinmeyen sayısının birkaç yüzü geçtiği durumlarda yinelemeli yöntemler önem kazanır [66].

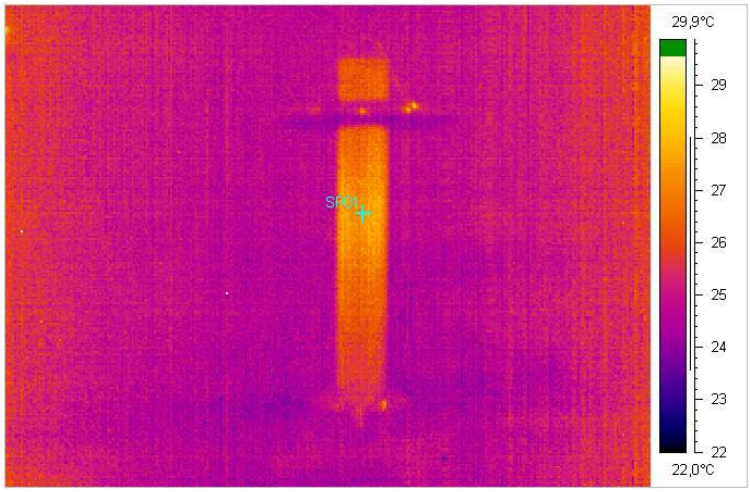
EK F YÜKSEK GERİLİM BÖLÜCÜSÜNÜN ANMA GERİLİMİNDE VE FARKLI ZAMANLARDAKİ SICAKLIK DAĞILIMLARI



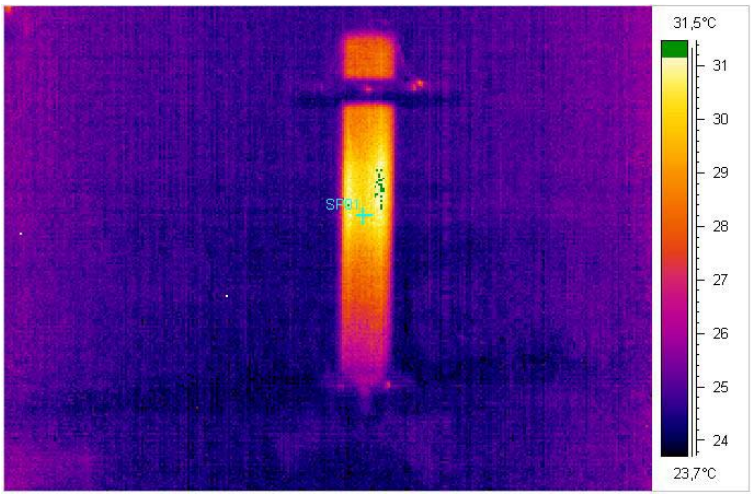
Şekil F.1: UME yüksek gerilim bölücüsü



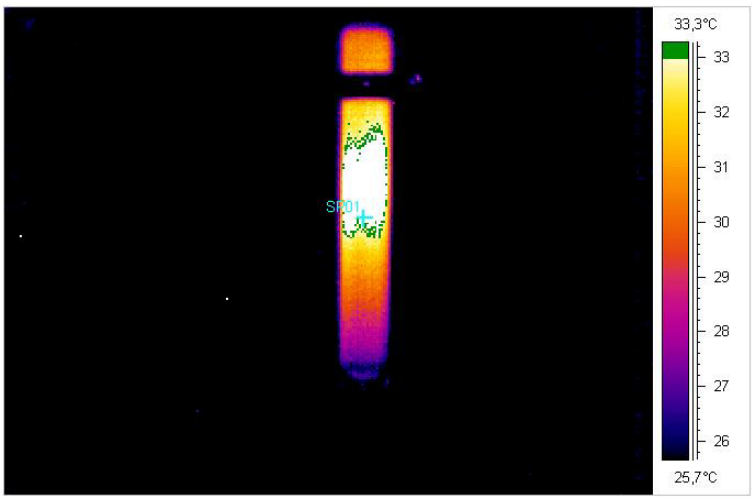
Şekil F.2: Başlangıçtaki sıcaklık dağılım görüntüsü



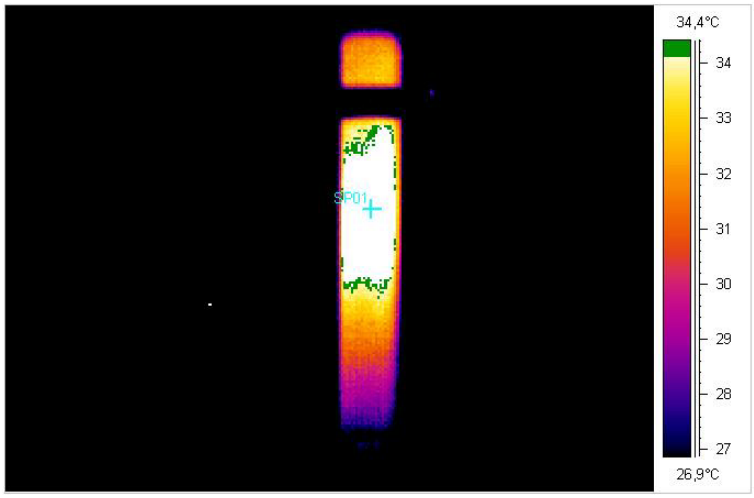
Şekil F.3: Deneyin 15. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü



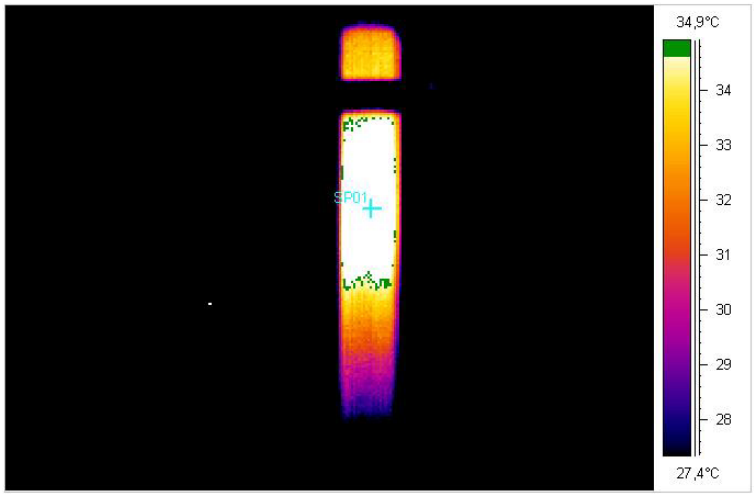
Şekil F.4: Deneyin 30. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü



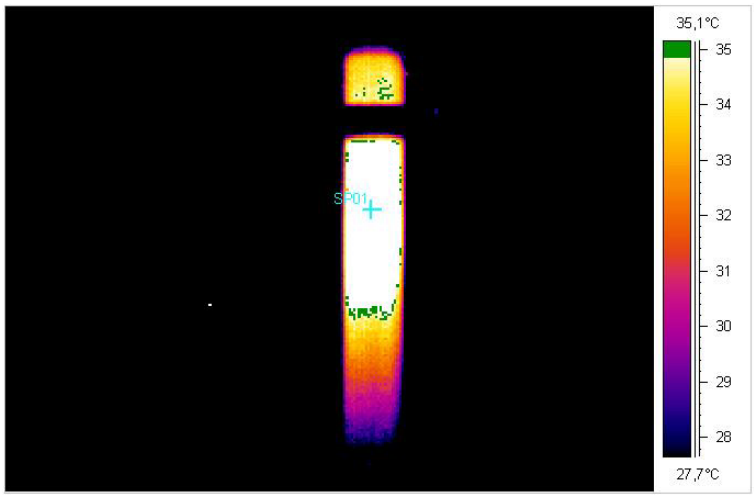
Şekil F.5: Deneyin 45. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü



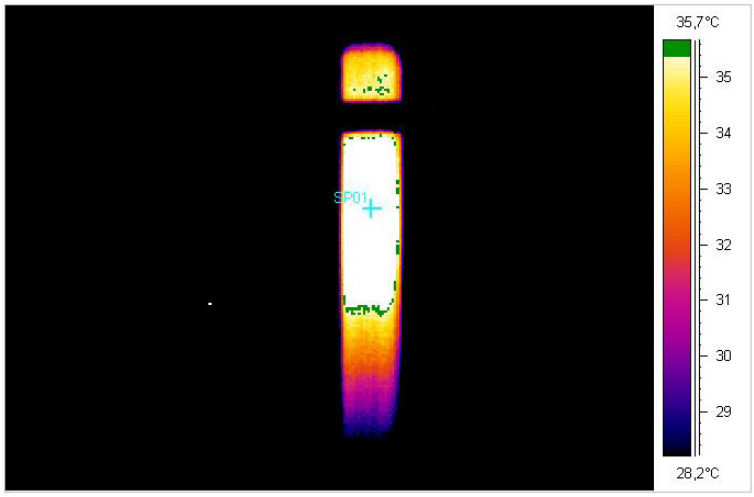
Şekil F.6: Deneyin 60. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü



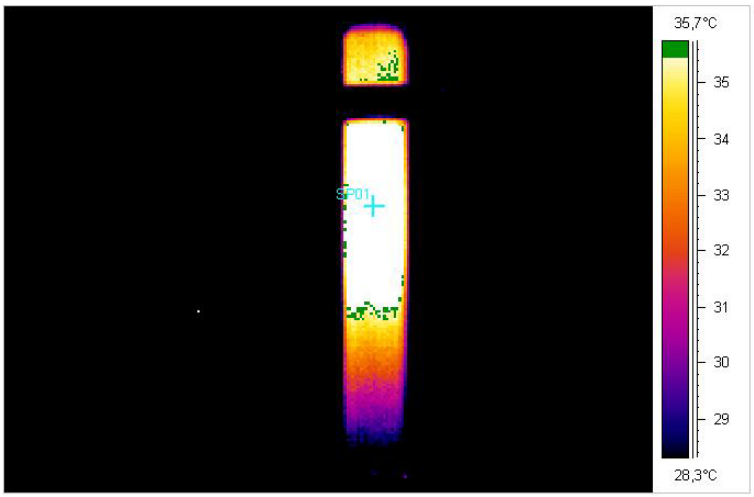
Şekil F.7: Deneyin 75. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü



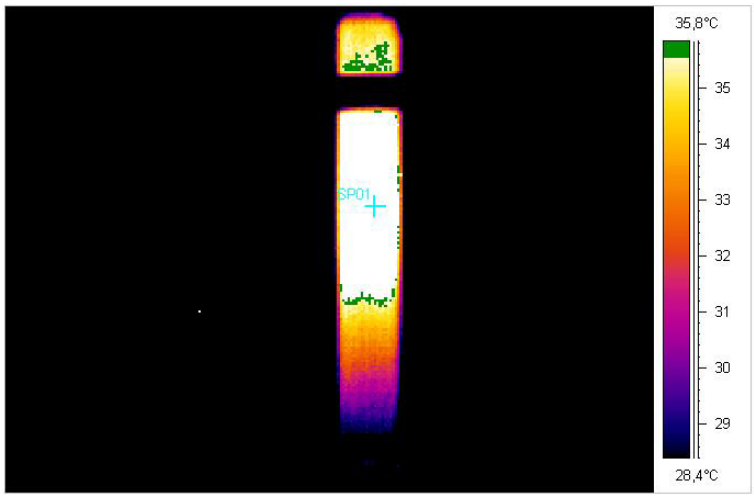
Şekil F.8: Deneyin 90. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü



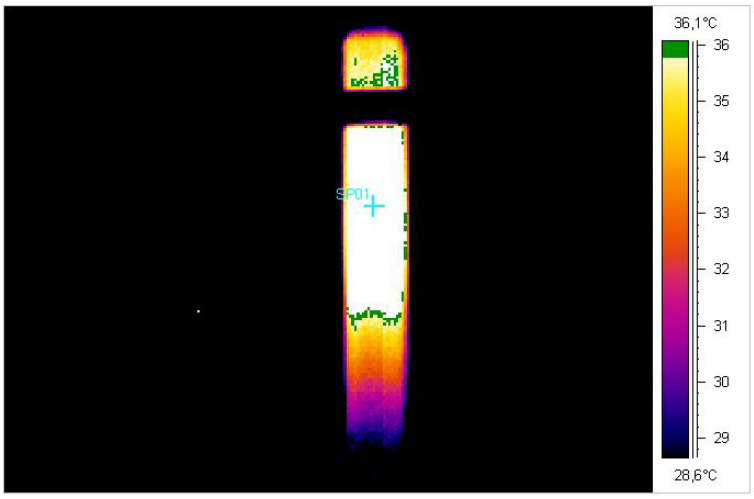
Şekil F.9: Deneyin 105. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü



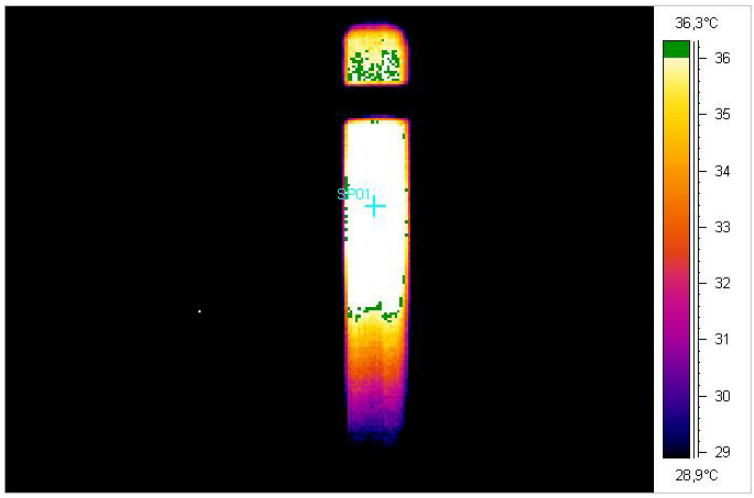
Şekil F.10: Deneyin 120. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü



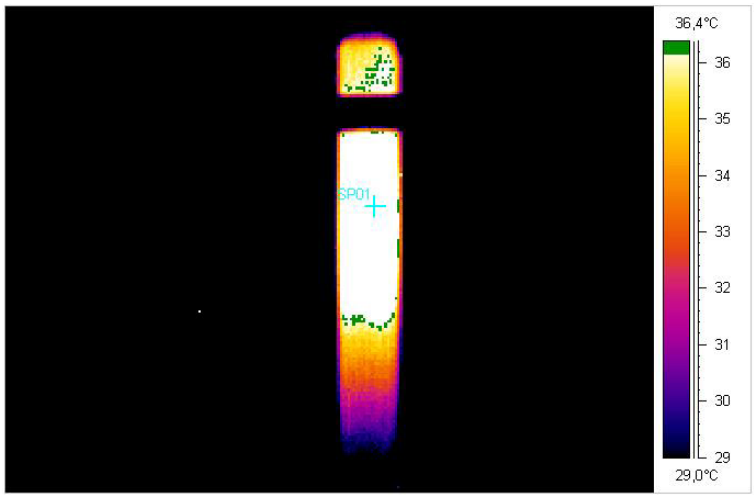
Şekil F.11: Deneyin 135. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü



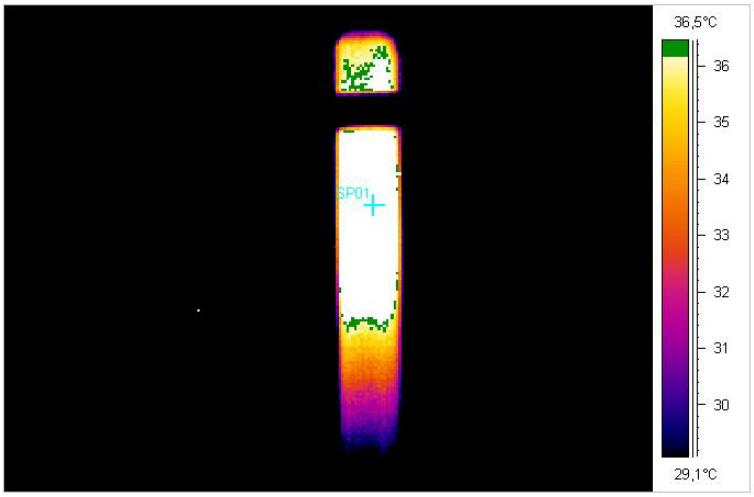
Şekil F.12: Deneyin 150. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü



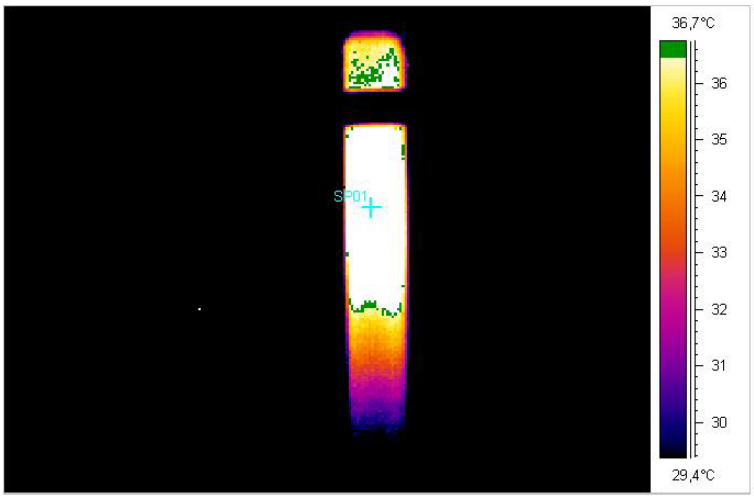
Şekil F.13: Deneyin 165. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü



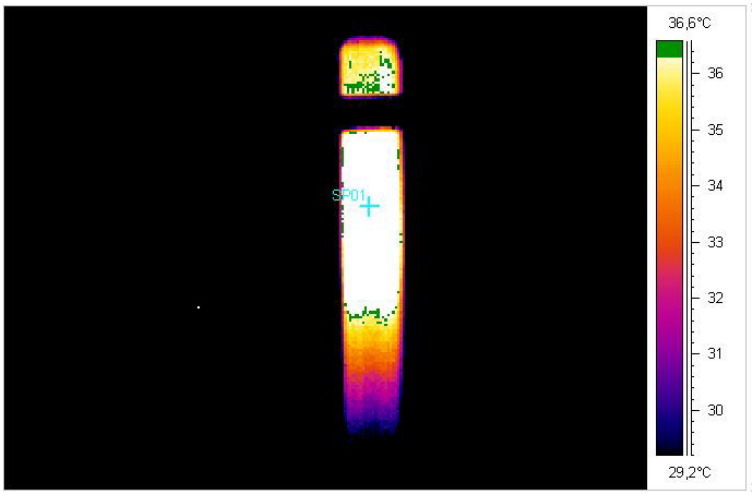
Şekil F.14: Deneyin 180. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü



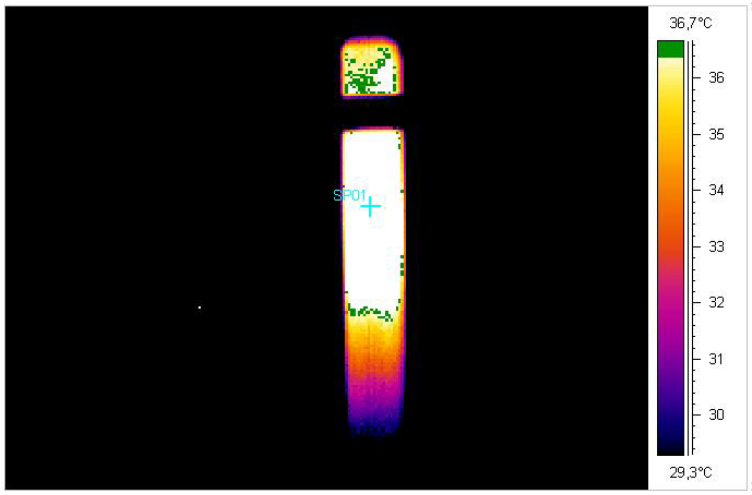
Şekil F.15: Deneyin 195. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü



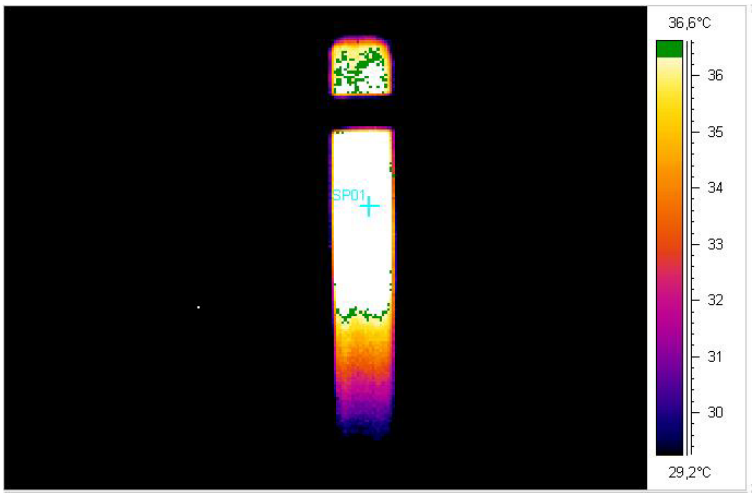
Şekil F.16: Deneyin 210. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü



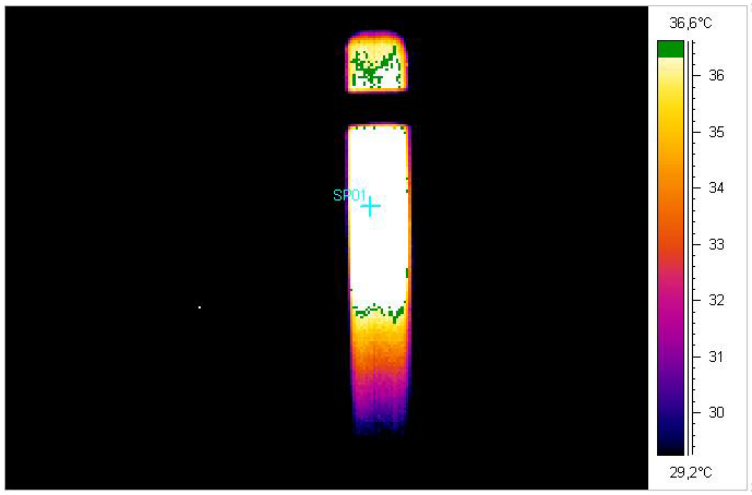
Şekil F.17: Deneyin 225. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü



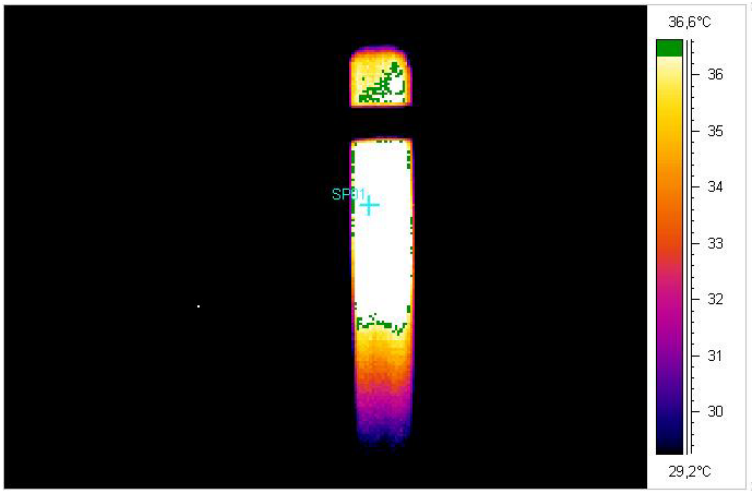
Şekil F.18: Deneyin 240. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü



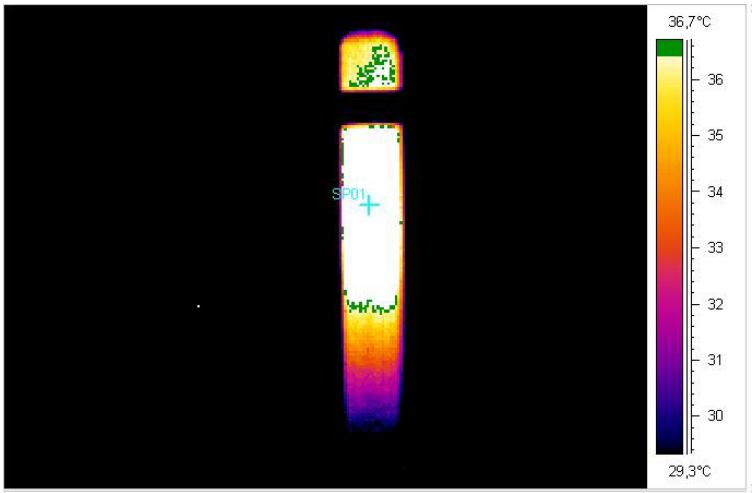
Şekil F.19: Deneyin 255. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü



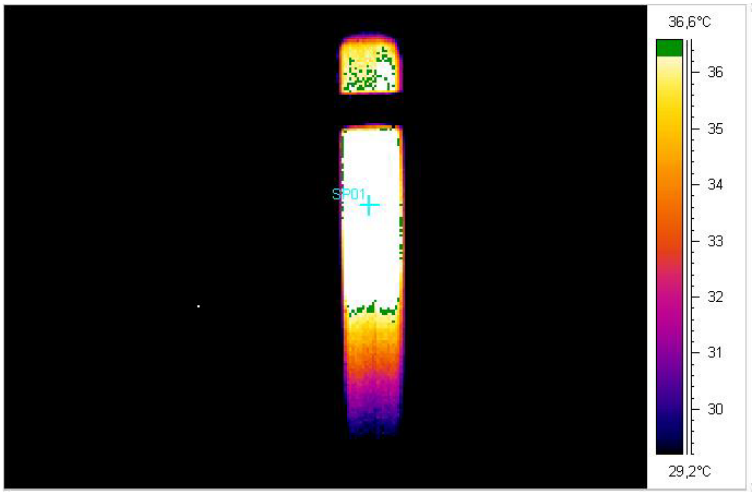
Şekil F.20: Deneyin 270. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü



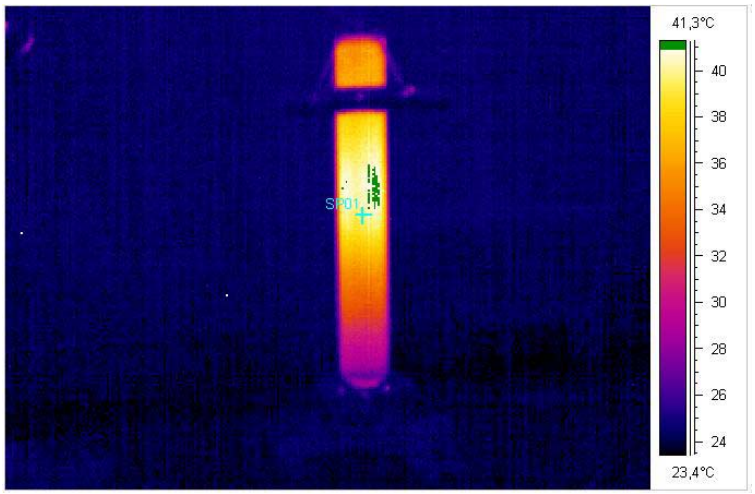
Şekil F.21: Deneyin 285. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü



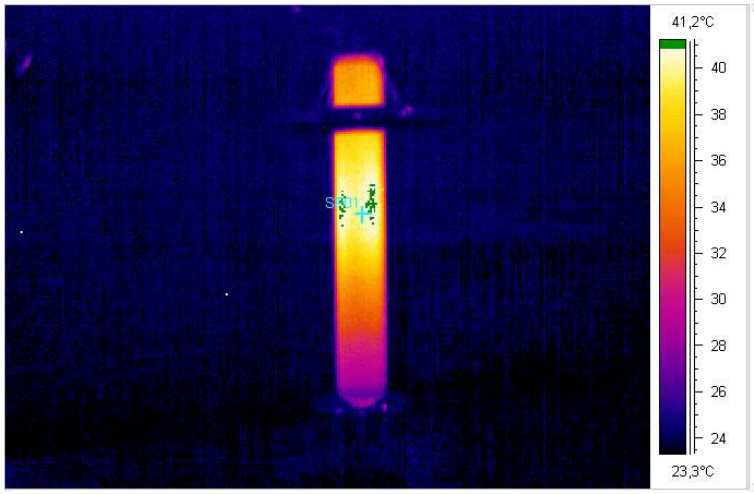
Şekil F.22: Deneyin 300. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü



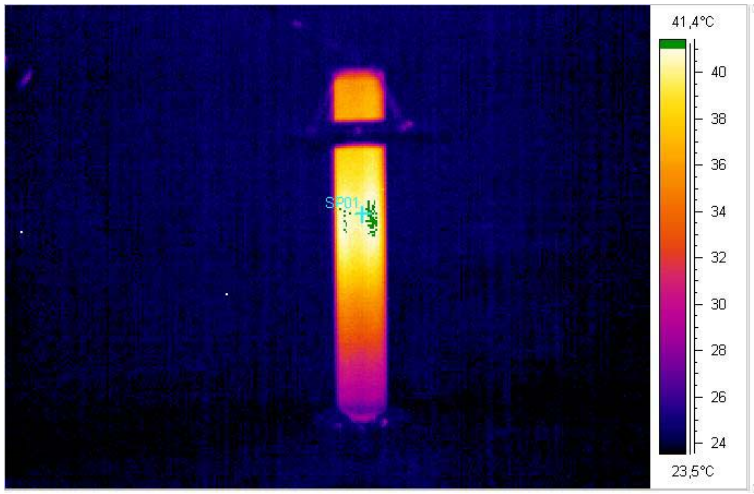
Şekil F.23: Deneyin 315. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü



Şekil F.24: Deneyin 330. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü



Şekil F.25: Deneyin 345. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü



Şekil F.26: Deneyin 360. dakikasındaki sıcaklık dağılım görüntüsü

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet MEREV, 01.01.1974 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini tamamladıktan sonra 1991 yılında İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 1995 yılında mezun olduktan sonra aynı yıl İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programına yüksek lisans eğitimine başladı eğitimini 1999 yılında tamamladı. Doktora eğitimine 2000 yılında İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Elektrik Mühendisliği Programı'nda başladı. 1996-2002 yılları arasında İstanbul Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yaptı. 2002 yılından beri TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda araştırmacı olarak görev yapmaktadır. Ahmet MEREV evli ve bir kız çocuğu babasıdır.