

**BİR YÜKSEK GERİLİM LABORATUVARININ ÖLÇÜM
BELİRSİZLİĞİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Mustafa ÜNAL
(504971310)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Eylül 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 22 Kasım 2006

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ
Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. Kevork MARDİKYAN (İ.T.Ü.)
Prof. Dr. Oruç BİLGİÇ (Y.T.Ü.)

KASIM 2006

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması sırasında değerli fikirleri, ilgi ve anlayışıyla bana kılavuzluk eden tez danışmanım değerli hocam Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye, çalışmakta olduğum AREVA T&D Yüksek Gerilim Laboratuvarı çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Kasım 2006

Mustafa Ünal

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi

1. GİRİŞ	1
2. GENEL METROLOJİ VE ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ	3
2.1. Metroloji Nedir?	3
2.2. Metre Uzlaşması	3
2.3. SI Temel Birimleri	4
2.3.1. Kilogram (kg)	4
2.3.2. Metre (m)	4
2.3.3. Saniye (s)	4
2.3.4. Amper (A)	5
2.3.5. Kandela (cd)	5
2.3.6. Kelvin (K)	5
2.3.7. Mol (mol)	5
2.4. Türetilmiş Birimler	5
2.5. Metrolojinin Sınıflandırılması	7
2.5.1. Bilimsel Metroloji	7
2.5.2. Endüstriyel Metroloji	7
2.5.3. Yasal Metroloji	8
2.6. Türkiye’de Metroloji	9
2.7. İzlenebilirlik	9
2.8. Standartlar Hiyerarşisi	11
2.8.1. Ulusal Standart	11
2.8.2. Referans Standart	11
2.8.3. Transfer Standardı	11
2.8.4. Çalışma Standardı	11
2.9. Ölçüm Belirsizliği	12
2.10. Belirsizlik Hesaplamaları	13
2.10.1. A-tipi Belirsizlik	13
2.10.1.1. Student Dağılımı ($1 < n \leq 10$)	13
2.10.1.2. Normal Dağılım ($n > 10$)	14
2.10.2. B-tipi Belirsizlik	14
2.10.3. Bileşik Belirsizlik	16

2.10.4. Genişletilmiş Belirsizlik	17
2.11. Yüksek Gerilim Metrolojisi	18
2.11.1. Yüksek Doğru Gerilimde İzlenebilirlik	18
2.11.2. Yüksek Alternatif Gerilimde İzlenebilirlik	20
2.11.3. Yüksek Darbe Geriliminde İzlenebilirlik	21
2.12. Akreditasyon Nedir?	22
2.13. Laboratuvar Akreditasyonu	22
3. YÜKSEK GERİLİM LABORATUVARI VE ÖLÇÜM SİSTEMİ	24
3.1. Giriş	24
3.2. Yüksek Alternatif Gerilim Ölçüm Sistemi	25
3.3. Yıldırım ve Anahtarlama Darbe Gerilimi Ölçüm Sistemi	27
3.3.1. Yıldırım Darbe Gerilimi	27
3.3.2. Anahtarlama Darbe Gerilimi	28
4. YÜKSEK ALTERNATİF GERİLİM ÖLÇÜM SİSTEMİNİN BELİRSİZLİĞİ	31
4.1. Giriş	31
4.2. Sistemin Çevirme Oranından Kaynaklanan Belirsizlik	31
4.3. Sıcaklık etkisinden kaynaklanan Belirsizlik	34
4.4. Tepe Değer Ölçü Voltmetresinin Çözünürlüğünden Kaynaklanan Belirsizlik	35
4.5. Referans Ölçüm Sisteminin Belirsizliği	35
4.6. Kısa Dönem Kararlılığı	35
4.7. Belirsizlik Bütçesi	36
5. DARBE GERİLİM ÖLÇÜM SİSTEMİNİN BELİRSİZLİĞİ	38
5.1. Giriş	38
5.2. Yıldırım Darbe Gerilimi Ölçüm Belirsizliği	39
5.2.1. Genlik Büyüklüğünün Belirsizliği	39
5.2.1.1. Sistemin Yıldırım Darbe Çevirme Oranından Kaynaklanan Belirsizlik	40
5.2.1.2. Sıcaklık Etkisinden Kaynaklanan Belirsizlik	43
5.2.1.3. Dijital Kayıt Cihazının Çözünürlüğünden Kaynaklanan Belirsizlik	43
5.2.1.4. Referans Ölçüm Sisteminin Genlik Büyüklüğünün Belirsizliği	44
5.2.1.5. Kısa Dönem Kararlılığı	44
5.2.1.6. Belirsizlik Bütçesi	44
5.2.2. Zaman Büyüklüğünün Belirsizliği	46
5.2.2.1. T1 ve T2 Zaman Büyüklüklerinin Belirsizliği	46
5.2.2.2. Dijital Kayıt Cihazının Çözünürlüğünden Kaynaklanan Belirsizlik	48
5.2.2.3. Referans Ölçüm Sisteminin Zaman Büyüklüğü Belirsizliği	49

5.2.2.4.Belirsizlik Bütçesi	49
5.3. Anahtarlama Darbe Gerilimi Ölçüm Belirsizliği	50
5.3.1. Genlik Büyüklüğünün Belirsizliği	51
5.3.1.1.Sistemin Anahtarlama Darbe Çevirme Oranından Kaynaklanan Belirsizlik	51
5.3.1.2.Kısa Dönem Karalılığı	53
5.3.1.3.Belirsizlik Bütçesi	53
5.3.2. Zaman Büyüklüğünün Belirsizliği	54
5.3.2.1.T1, T2 ve Td zaman Büyüklüklerinin Belirsizliği	54
5.3.2.2.Dijital Kayıt Cihazının Çözünürlüğünden Kaynaklanan Belirsizlik	57
5.3.2.3.Belirsizlik Bütçesi	57
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	59
KAYNAKLAR	61
EK A KAPASİTİF ÖLÇME SİSTEMİNİN TEORİK ÇEVİRME ORANININ HESABI	63
ÖZGEÇMİŞ	65

KISALTMALAR

CIPM	: Comite International des Poids et Mesures
BIPM	: Bureau International des Poids et Mesures
DA	: Doğru Akım
AA	: Alternatif Akım
LI	: Lightning Impulse
SI	: Switching Impulse
ISO	: International Organization for Standardization
AQAP	: Allied Quality Assurance Publications
EN	: European Norm
IEC	: International Electrotechnical Commission
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
UME	: Ulusal Metroloji Enstitüsü
HV	: High Voltage
LV	: Low Voltage
JAB	: The Japan Accreditation Board for Conformity Assessment

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 Yedi temel SI biriminden türetilmiş bazı büyüklükler.....	6
Tablo 2.2 Student ve normal dağılım katsayıları.....	14
Tablo 2.3 Güvenilirlik düzeyleri ve kapsam faktörleri.....	17
Tablo 3.1 Alternatif gerilim ölçüm sistemini oluşturan alet ve donanımlar.....	26
Tablo 3.2 Darbe gerilimi ölçüm sistemini oluşturan cihaz ve donanımlar.....	30
Tablo 4.1 Yüksek alternatif gerilim ölçüm sisteminin çevirme oranından kaynaklanan belirsizliğin belirlenmesinde kullanılan alet ve donanımlar.....	32
Tablo 4.2 Ölçüm sisteminin çevirme oranından kaynaklanan belirsizliğin belirlenmesi ölçüm sonuçları.....	33
Tablo 4.3 Alternatif gerilim belirsizlik bütçesi.....	37
Tablo 5.1 Yıldırım darbe gerilimi çevirme oranından kaynaklanan belirsizliğin belirlenmesinde kullanılan alet ve donanımlar....	41
Tablo 5.2 Yıldırım darbe gerilimi çevirme oranından kaynaklanan belirsizliğin belirlenmesi ölçüm sonuçları.....	42
Tablo 5.3 Yıldırım darbe gerilimi genlik büyüklüğü belirsizlik bütçesi....	45
Tablo 5.4 Referans darbe gerilimi ölçüm sistemi ve laboratuvar darbe gerilimi ölçüm sistemi ölçüm sonuçları (T1).....	47
Tablo 5.5 Referans darbe gerilimi ölçüm sistemi ve laboratuvar darbe gerilimi ölçüm sistemi ölçüm sonuçları (T2).....	47
Tablo 5.6 Yıldırım darbe gerilimi zaman büyüklüğü belirsizlik bütçesi.....	50
Tablo 5.7 Anahtarlama darbe gerilimi çevirme oranından kaynaklanan belirsizliğin belirlenmesi ölçüm sonuçları.....	52
Tablo 5.8 Anahtarlama darbe gerilimi genlik büyüklüğü belirsizlik bütçesi.....	54
Tablo 5.9 Referans darbe gerilimi ölçüm sistemi ve laboratuvar darbe gerilimi ölçüm sistemi anahtarlama darbe gerilimi ölçüm sonuçları (T1).....	55
Tablo 5.10 Referans darbe gerilimi ölçüm sistemi ve laboratuvar darbe gerilimi ölçüm sistemi anahtarlama darbe gerilimi ölçüm sonuçları (Td).....	56
Tablo 5.11 Referans darbe gerilimi ölçüm sistemi ve laboratuvar darbe gerilimi ölçüm sistemi anahtarlama darbe gerilimi ölçüm sonuçları (T2).....	56
Tablo 5.12 Anahtarlama darbe gerilimi zaman büyüklüğü belirsizlik bütçesi.....	58

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Yedi temel SI birimi.....	6
Şekil 2.2 : İzlenebilirlik zinciri.....	10
Şekil 2.3 : Dikdörtgen dağılım.....	15
Şekil 2.4 : Üçgen dağılım.....	16
Şekil 2.5 : Josephson gerilim standardı.....	19
Şekil 3.1 : Yüksek gerilim laboratuvarı.....	24
Şekil 3.2 : Alternatif gerilim ölçüm sistemi.....	25
Şekil 3.3 : Alternatif gerilim ölçüm sisteminin temel devre şeması.....	26
Şekil 3.4 : Yıldırım darbe geriliminin dalga şekli.....	27
Şekil 3.5 : Anahtarlama darbe geriliminin dalga şekli.....	28
Şekil 3.6 : Darbe gerilimi ölçüm sistemi.....	29
Şekil 3.7 : Darbe gerilimi ölçüm sistemi temel devre şeması.....	29
Şekil 4.1 : Yüksek alternatif gerilim ölçüm sisteminin çevirme oranından kaynaklanan belirsizliğinin belirlenmesi ölçüm düzeneği.....	33
Şekil 5.1 : Bir tam dalga (FW) yıldırım darbe (LI) gerilimi eğrisi.....	38
Şekil 5.2 : Bir anahtarlama darbe (SI) gerilimi eğrisi.....	39
Şekil 5.3 : Yıldırım darbe gerilimi çevirme oranından kaynaklanan belirsizliğin belirlenmesi için ölçüm düzeneği.....	41
Şekil A.1 : Kapasitif ölçme sisteminin temel devre şeması.....	64

SEMBOL LİSTESİ

u_A	: A tipi belirsizlik bileşeni
u_B	: B tipi belirsizlik bileşeni
k	: Güvenilirlik düzeyi kapsam faktörü
C_{HV}	: Gerilim bölücü yüksek gerilim kapasitesi
C_{LV}	: Gerilim bölücü alçak gerilim kapasitesi
C_C	: Ölçüm kablosunun kapasitesi
F_A, F_D	: Gerilim bölücünün teorik çevirme oranları
$\delta V, \delta U_p,$	: Gerilim ölçümünden kaynaklanan bağıl hatalar
$\delta T_1, \delta T_2, \delta T_d$	: Zaman büyüklüklerinin ölçümünden kaynaklanan bağıl hatalar
u_T, u_{LT}, u_{ST}	: Ölçüm sisteminin çevirme oranından kaynaklanan belirsizlik bileşenleri
$u_S, u_{LS},$	: Sıcaklık etkisinden kaynaklanan belirsizlik bileşeni
u_C, u_{LC}	: Ölçü cihazlarının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik bileşenleri
$u_R,$	: Alternatif gerilim referans ölçüm sisteminin belirsizliği
u_{TR}	: Darbe gerilimi referans ölçüm sisteminin zaman büyüklüğü belirsizliği
u_K, u_{LK}, u_{SK}	: Ölçüm sisteminin kısa dönem kararlılık bileşenleri
u_{T1L}, u_{T2L}	: Yıldırım darbe zaman büyüklüğünün belirsizlik bileşenleri
$u_{T1S}, u_{TdS}, u_{T2S}$	: Anahtarlama darbe zaman büyüklüğünün belirsizlik bileşenleri
u_{LR}	: Darbe gerilimi referans ölçüm sisteminin genlik büyüklüğünün belirsizliği
u_{T1C}, u_{T2C}	: Ölçü cihazlarının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik bileşenleri
u_{T1}, u_{Td}, u_{T2}	: Ölçü cihazlarının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik bileşenleri
U_A	: Alternatif gerilim ölçüm sisteminin genişletilmiş belirsizliği
U_L	: Yıldırım darbe genlik büyüklüğünün genişletilmiş belirsizliği
U_{TL}	: Yıldırım darbe zaman büyüklüğü genişletilmiş belirsizliği
U_S	: Anahtarlama darbe genlik büyüklüğünün genişletilmiş belirsizliği
U_{TS}	: Anahtarlama darbe zaman büyüklüğünün genişletilmiş belirsizliği
T_1	: Darbe gerilimi cephe süresi
T_2	: Darbe gerilimi sırt yarı değer süresi
T_d	: Darbe geriliminin yüzde doksanı üzerinde kaldığı süre

BİR YÜKSEK GERİLİM LABORATUVARININ ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Yüksek alternatif gerilimler ve darbe gerilimleri bilinen geleneksel ölçme sistemleri ile ölçülemezler. Bir yüksek gerilim ölçme sistemi, gerilim bölücü veya ölçü transformatörü gibi dönüştürücü elemanlardan, ölçü kabloları gibi iletim elemanlarından ve dijital kaydediciler ve tepe değer voltmetreleri gibi cihazlardan oluşur. Yüksek gerilimin genliği gerilim bölücü ile ölçülebilir düzeye düşürüldükten sonra tepe değer voltmetresi ve dijital kaydedici tarafından kaydedilirler. Darbe gerilimlerin zaman büyüklükleri de dijital kaydedici cihazlar tarafından ölçülür.

Yüksek gerilim ölçmelerindeki ölçüm belirsizliğine etki eden birçok bileşen bulunmaktadır. Bunlar gerilim bölücü ve ölçüm kablosundan oluşan sistemin gerilim çevirme oranından kaynaklanan belirsizlik, sıcaklıktan kaynaklanan belirsizlik, tepe değer voltmetresi ve dijital kaydedicilerinden kaynaklanan belirsizlik bileşenleridir.

Bu çalışmada, bir yüksek gerilim laboratuvarının ölçüm belirsizliği belirlenmiştir. Bu amaçla, ölçüm belirsizliğinin nedenleri ortaya konulmuş, belirsizlik tipleri ve belirsizlik hesaplama yöntemleri incelenmiştir.

Daha sonra, alternatif gerilim, yıldırım darbe gerilimi ve anahtarlama darbe gerilimleri tanımlanmıştır. Ölçümlerin yapıldığı yüksek gerilim laboratuvarı ölçüm sistemi tanımlanmıştır.

Yüksek gerilim laboratuvarının ölçüm belirsizliğinin belirlenmesi amacıyla Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) referans ölçüm sistemi ile eş zamanlı ölçümler yapılmıştır. Belirsizlik bileşenleri kullanılarak alternatif gerilim ölçüm sistemi ve darbe gerilimi ölçüm sistemi için belirsizlik bütçeleri oluşturulmuştur.

Son olarak, yüksek gerilim laboratuvarı alternatif gerilim ölçüm sisteminin genişletilmiş belirsizliği ve darbe gerilim ölçüm sisteminin genlik büyüklüğü ve zaman büyüklüğü genişletilmiş belirsizlikleri %95 güvenilirlik düzeyi ($k = 2$) için belirlenmiştir.

DETERMINATION OF THE MEASUREMENT UNCERTAINTY OF A HIGH VOLTAGE LABORATORY

SUMMARY

The measurement of high level alternating voltages and impulse voltages can not be measured directly with conventional measuring systems. A high voltage measuring system consists of converting devices such as voltage divider or measuring transformer, transmission device like measuring cable and a peak voltmeter or a digital recording device. The voltage divider reduces the amplitude of high voltage to a value, which can be measured by the peak voltmeter or digital recorder. The time parameters of impulse voltages are measured by digital recording device.

The uncertainty of the high voltage measurements is influenced by many factors. These are the uncertainty caused by the voltage ratio defined by the voltage divider and measuring cable, the uncertainty caused by the temperature, the uncertainty caused by the resolution of the peak voltmeter and digital recording device.

In this study, the measurement uncertainty of a high voltage laboratory has been determined. For this aim, sources of measurement uncertainty, types of uncertainty and calculation methods of uncertainty have been examined.

Then, alternating voltage, lightning impulse and switching impulse voltages have been defined. The high voltage laboratory, which the measurements were performed, has been described.

In order to determine the measurement uncertainty of the high voltage laboratory measurements have been performed simultaneously with UME reference measuring system. The uncertainty budgets of alternating measuring system and impulse voltage measuring system have been formed by using the uncertainty components.

Finally the expanded uncertainty of the alternating voltage measurement system and the expanded uncertainties for the voltage and time parameters of impulse measuring system of the high voltage laboratory have been determined with the confidence level of 95% ($k = 2$).

1. GİRİŞ

Üretimde kullanılan cihazların gerektiği şekilde kullanılabilmesi, cihaz kalitesinin saklanabilmesi, cihazların kontrolü ve süreç kontrolü için ölçümlerin yapılması şarttır. Verimli bir üretimde makinaların gerektiği şekilde kullanılması ve bakımı ön koşuldur. Ölçümler olmadan otomasyon mümkün değildir.

Bir ölçümün sonucu rapor edilirken, sonucun kalitesini belirten sayısal bir gösterge olmalıdır ki bu sonucu kullanan kişiler o sonucun güvenilirliğini tayin edebilsinler. Böyle bir gösterge olmaksızın ölçüm sonuçları kendi aralarında, sertifikalarda veya standartlarda verilen değerlerle karşılaştırılmaz. Bu nedenle bir ölçümün kalitesini karakterize eden, hemen uygulanabilir, kolayca anlaşılabilir ve genel olarak kabul gören bir işlemin olması çok önemlidir. Bu da ölçüm sonucunda elde edilen değer belirsizliğini hesaplamak ve ifade etmektir [1].

Ölçümlerdeki hatalar ve hataların analizi ölçüm bilimi veya metrolojide sonuçların değerlendirilmesinde uzun süredir kullanılmaktadır. Günümüzde, hatanın kesin olarak bilinen ve bütün şüphelenilen bileşenleri hesaplanıp gereken bütün düzeltmeler yapıldıktan sonra bile, hala verilen sonucun doğruluğu konusunda belirsizliğin olduğu yaygın bir şekilde kabul edilir. Bu belirsizlik verilen sonucun ölçülen niceliği ne kadar temsil ettiği konusundaki şüphedir [1, 2].

Yüksek alternatif gerilimler ve darbe gerilimleri bilinen geleneksel ölçme sistemleri ile ölçülemezler. Yüksek gerilimin genliği gerilim bölücü ile ölçülebilir düzeye düşürüldükten sonra tepe değer voltmetresi ve dijital kaydediciler gibi ölçü aletleri tarafından kaydedilirler. Yıldırım ve Anahtarlama darbe gerilimlerinin genliği ile birlikte zaman büyüklükleri de dijital kaydedici cihazlar tarafından ölçülür. Yüksek gerilim ölçümlerinde kullanılan gerilim bölücü ve ölçüm kablosu sistemin çevirme oranını oluşturmakta ve yüksek gerilim laboratuvarının belirsizliğine etki etmektedir. Sistemin çevirme oranı, gerilim bölücünün sıcaklıktan etkilenmesi nedeniyle değişim gösterir ve bu nedenle sıcaklığın etkisi bir belirsizlik bileşeni olarak ele alınır. Tepe

değer voltmetresi veya dijital kaydedicilerin çözünürlüklerinden kaynaklanan belirsizlikleri de ölçüm belirsizliğine etki eden önemli bileşenlerdir. Diğer bazı belirsizlik bileşenleri ihmal edilmektedir. Bir yüksek gerilim laboratuvarının ölçüm belirsizliği ancak kendisinden daha yüksek doğruluğa sahip referans bir ölçüm sistemi ile belirlenebilir. Bu çalışmada, referans bir ölçüm sistemi kullanılarak Yüksek Gerilim Laboratuvarının ölçüm belirsizliği çıkarılmıştır.

İkinci bölümde metroloji ve izlenebilirlik kavramları açıklandıktan sonra ölçüm belirsizliğinin olası nedenleri ortaya konulmuştur. Belirsizlik tipleri ele alınmış ve hesaplama yöntemleri anlatılmıştır.

Daha sonra, üçüncü bölümde alternatif gerilim, yıldırım darbe gerilimi ve anahtarlama darbe gerilimleri tanımlanmıştır. Ölçümlerin yapıldığı Yüksek Gerilim Laboratuvarı ölçüm sistemi tanıtılmıştır.

Dördüncü bölümde, Yüksek Gerilim Laboratuvarı yüksek alternatif gerilim ölçüm sisteminin belirsizliğine etki eden belirsizlik bileşenleri ortaya konmuş ve belirsizlik bütçesi oluşturulmuştur. Bu belirsizlik bileşenleri yardımıyla alternatif gerilim ölçüm sisteminin belirsizliği elde edilmiştir.

Son olarak, beşinci bölümde, Yüksek Gerilim Laboratuvarının darbe gerilimi ölçüm sistemine etki eden belirsizlik bileşenleri belirlenmiş ve belirsizlik bütçeleri oluşturulmuştur. Daha sonra laboratuvar ölçüm sisteminin anahtarlama darbe ve yıldırım darbe belirsizlikleri genlik büyüklüğü ve zaman büyüklükleri için elde edilmiştir

2. GENEL METROLOJİ VE ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ

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 [3].

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 yol 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.

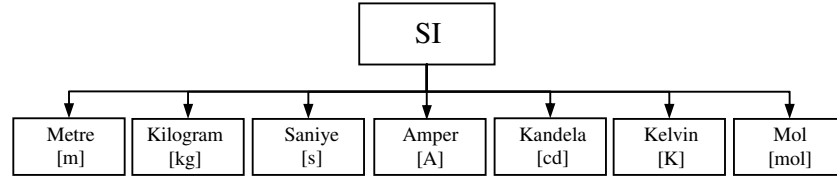
2.3.7 Mol (mol)

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 büyüklükleri göstermektedir [3,4].



Şekil 2.1 Yedi temel SI birimi

Tablo 2.1 Yedi temel SI biriminden türetilmiş bazı büyüklükler [4]

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 çalışma alanları; bilimsel, endüstriyel ve yasal metroloji olarak üç gruba ayrılmaktadır.

2.5.1 Bilimsel Metroloji

Bilimsel metroloji, uluslararası 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 araştırmaları 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 güvence altına alınması için üretim sırasında 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 belgelendirme işlemlerini gerçekleştirmektedirler. Ulusal akreditasyon kurumları tarafından bu laboratuvarların akredite edilmesiyle yapılan işlemlerin hem uluslararası ortamlarda kabul görmesi hem de ülke çapında gerçekleştirilen çalışmaların eşdeğerliği sağlanmaktadır.

2.5.3 Yasal Metroloji

Kamuyu doğrudan ilgilendiren ve ticarete konu olan ölçümlerin denkliğinin ve güvenilirliğinin sağlanması ile ilgili metrolojik çalışmalar yasal metroloji kapsamındadır. Yasal metroloji, ulusal, bölgesel ve uluslararası düzeyde etkili ticareti sağlayan ölçüm güvenilirliği için temel oluşturmaktadır. Bu nedenle devletler yasal metroloji düzenlemelerine gereksinim duymaktadır.

Yasal metroloji, adil ticareti sağlama gereksiniminden 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 çalışmalarını yasal düzenlemeler ve yasalar yoluyla yürütmektedir. Yasal metroloji çalışma 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 ibarettir. Ancak, metrolojik kontrol, izlenebilirlik ve ölçüm birimleri için metrolojik koşulların sağlanması tek tip uygulama gereksinimini doğurmaktadır. Çoğu zaman tek çatı altında toplanmış bir yapı, diğer ulusal

düzeydeki yasal metroloji kuruluşlarının çalışmalarının 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 yasayla ülkemizin metrik sisteminin kurulması zorunlu hale gelmiştir.

İkinci Dünya Savaşı’ndan sonra, Türkiye’de metroloji sisteminin önemi anlaşılarak, 21 Mayıs 1955 tarihinde bu yasa 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.

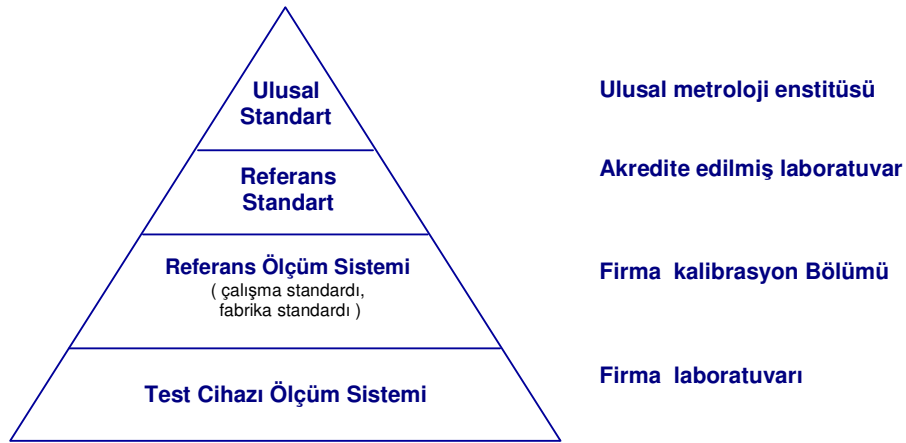
Türkiye’de, Başbakanlık, 80’li yılların başında kamu ve özel sektörün gereksinimlerine topluca yanıt verecek birinci seviyede ve ulusal ölçekte bir metroloji merkezinin kurulmasına karar vermiş ve fizibilite çalışmalarını yürütmek üzere TÜBİTAK’ı görevlendirmiştir. İlk çalışmalar 1982 yılında başlamış, 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 karşılaştırılması 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 oluşturan 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 Ölçüm Belirsizliği

Ölçüm sırasında tüm koşulları kontrol altında tutmak ve bir ölçümü kusursuz bir şekilde gerçekleştirmek olanaksızdır. 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 değer belirlenmesindeki belirsizlik;
- Ölçme yöntemindeki belirsizlik;
- Çevre koşullarının ölçülen değere etkisi ve çevre koşullarının ölçümündeki belirsizlikler;
- Ölçüm cihazlarının okunmasındaki ve kaydedilmesindeki belirsizlik;
- Ölçüm cihazlarının çözünürlüğünün sonlu olması;
- Ölçüm standartlarının ve referans malzemelerin değerlerinin tam olarak bilinmemesi;
- Verilerin değerlendirilmesinde kullanılan ve dış kaynaklardan elde edilen sabit parametrelerin ve diğer parametrelerin değerlerinin tam olarak bilinmemesi;
- Ölçüm yöntemi ve işlemindeki yaklaşımlar veya ekstrapolasyonlar

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 uyuma yakınlığını ifade eden niteleyici bir kavramdır. Doğruluk, belirsizlik gibi sayı ile ifade edilebilir bir kavram değildir.

2.10 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 değerın kesin değerının 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.

2.10.1 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,

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

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.

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

$$u_A = k \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.2)$$

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

Normal Dağılım (n > 10)

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

$$u_A = k \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.3)$$

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.				

2.10.2 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

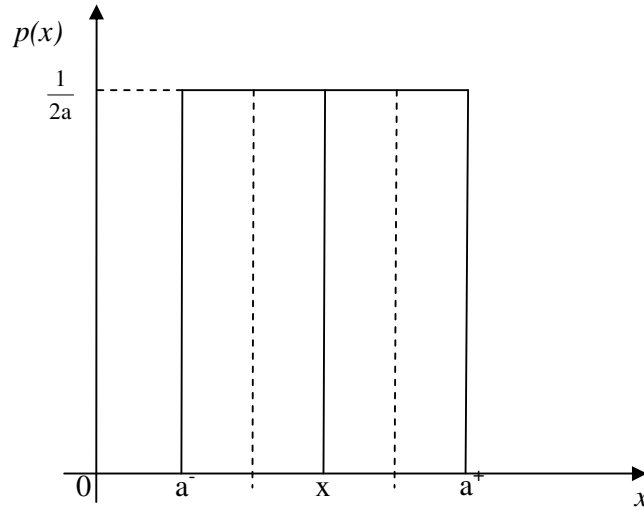
belirsizlikler kullanılabilir. Hata hesaplamasında kullanılan doğruluk ifadeleri cihazın karakteristiklerini meydana getirir. Bu ifadeler kullanılarak, ölçülen değerlerin hatası hesaplanır. Hesaplanan hata belirsizlikle ilişkili olabilir. Çünkü tanıma göre belirsizlik, ölçümdeki olası hatanın bir tahminidir.

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 2.3).



Şekil 2.3 Dikdörtgen dağılım

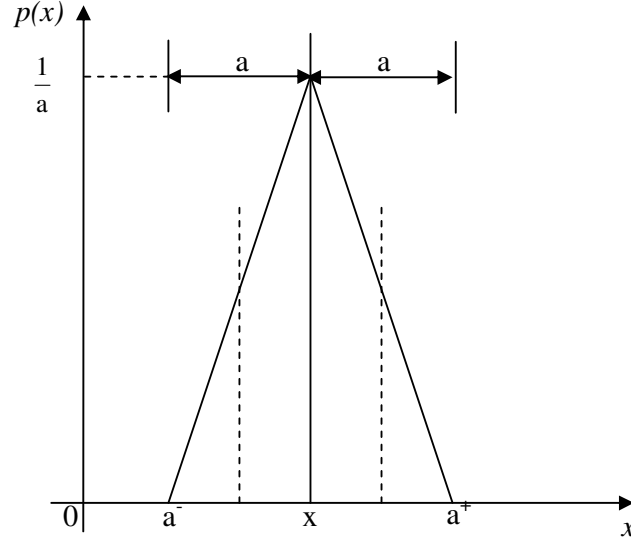
Dikdörtgen dağılım kullanılarak elde edilen belirsizlik bağıntısı,

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

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

bağıntıları ile ifade edilmektedir.

Burada a^+ ve a^- nominal değerden $\pm$ sapma değeridir. Üçgen dağılım, bir büyüklüğün sadece değişim gösterebileceği aralık ve eğilim bilindiği durumda kullanılmaktadır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Üçgen dağılım

Üçgen dağılım kullanılarak elde edilen belirsizlik bağıntısı,

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

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

bağıntıları ile ifade edilmektedir. Burada a^+ ve a^- nominal değerden $\pm$ sapma değeridir.

2.10.3 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,

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

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

2.10.4 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

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (2.9)$$

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

2.11 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 Ölçüm Sistemi ile paralel olarak bağlanarak karşılaştırılan Ölçme Sisteminin 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 [5].

2.11.1 Yüksek Doğru Gerilimde İzlenebilirlik

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

Josephson gerilim standardı, frekans doğruluğunu DA 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.

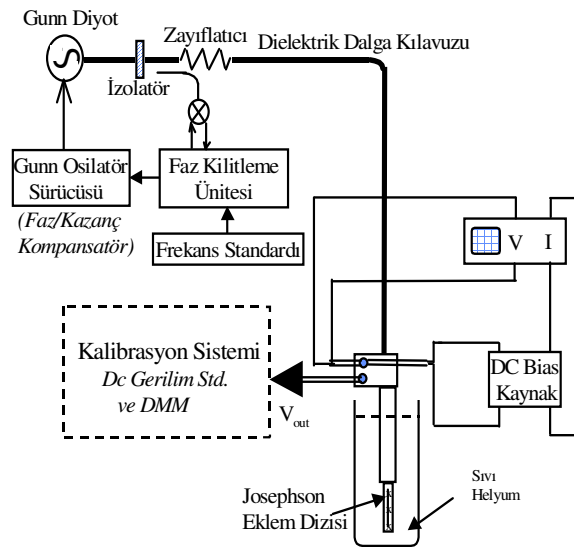
Josephson eklemi, ince yalıtkan bir oksit tabakasıyla ayrılmış iki süperiletken malzemenin zayıfça bir araya getirilmesiyle oluşmaktadır.

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

$$U = N \frac{h.f}{2e} \quad (2.10)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada; $h = 6.63 \times 10^{-34}$ 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 mertebesinde. Daha yüksek gerilim değerleri, çok sayıda Josephson ekleminin seri olarak bir araya getirilmesiyle elde edilmektedir. Bu standart metroloji dünyasında gerilim ölçmeleri için primer standart olarak adlandırılmaktadır ve 0.01 ppm seviyesinde bir belirsizliğe sahiptir. Şekil 2.5'de Josephson gerilim standardı temel yapısı görülmektedir [6].



Şekil 2.5 Josephson gerilim standardı [6]

Yüksek doğru gerilim ölçme sistemi; gerilim bölücüsünden, ölçü aletinden ve kablосundan oluşmaktadır. Yüksek gerilim ölçmelerindeki belirsizliğe en baskın etkiyi, yüksek gerilim bölücülerini yapmaktadır. Yüksek gerilim bölücülerinin ölçüm belirsizliği, uluslararası karşılaştırma sonuçları doğrultusunda 100 kV'a kadar doğru gerilimler için 10 ppm düzeylerindedir [7, 8].

2.11.2 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 ısı dönüştürücü elemanlar kullanılmaktadır. AA/DA ısı 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 ısınnın bir algılayıcı (sensör) aracılığıyla algılanması ve karşılaştırılmasına dayanmaktadır.

Bir direnç üzerinde oluşan sıcaklığı algılamakta en yaygın kullanılan algılayıcılar, ısıçift, 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 ısınnın birbirine eşit olması beklenmektedir. Dolayısıyla ısıçift 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 ısı 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, ısı 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 ısıнын eşit olması beklenmektedir. Ancak bazı etkilerden dolayı bu eşitlik sağlanamamakta ve bir fark oluşmaktadır. Bu fark, transfer farkı olarak adlandırılmakta ve matematiksel olarak

$$\delta = \frac{U_{AA} - U_{DA}}{U_{DA}} \quad (2.11)$$

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 bölücüler, uluslararası karşılaştırmalar sonucunda 100 kV'a kadar 50 Hz frekanslı 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 olanaklı olmaktadır. SF₆ 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 [7, 8].

2.11.3 Yüksek Darbe Geriliminde İzlenebilirlik

Darbe gerilimi ölçümlerinin primer standartlarca izlenebilirliği oldukça karmaşık ve zordur. Dünyada sayılı ulusal standart, yüksek darbe gerilimleri için oluşturulmuştur. Yüksek darbe gerilimi 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 [8].

Darbe gerilim bölücüsünün çevirme oranı, yıldırım darbe (LI) ve anahtarlama darbe (SI) gerilimleri gibi farklı gerilim türleri için belirlenmektedir. Darbe gerilimi ölçme

sisteminin belirsizlik hesaplamaları oldukça karmaşık yapıdadır ve genlik ve zaman parametreleri gibi iki ayrı tip büyüklük için tanımlanmıştır [9, 10].

2.12 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 [11].

2.13 Laboratuvar Akreditasyonu

Üretimin ve kalite kontrolünün en önemli unsurlarından birisi olan ölçüm güvenilirliği, ölçümlerde kullanılan cihaz/standartların kalibre edilmeleri ile sağlanabilmektedir. Cihaz/standartın 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 koşulları yerine getirmesi gerekmektedir. Bu şartlar kısaca şu şekilde gruplandırılabilir;

- Laboratuvar altyapısı (teknik donanım, ortam koşulları, 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 yöntemleri ile gerçekleştirilmelidir.
- Başvuruyu yapan laboratuvar, yeterli deneyim, bilgi ve becerisi (teorik-pratik) olan personele sahip olmalıdır.
- Kalibrasyon laboratuvarını kendi bünyesinde bulunduran sorumlu kuruluş, laboratuvarın kurallara uygun olarak işletilmesi ve bakımı için gerekli mali kaynakları sağlayabilecek durumda ve buna hazır olmalıdır; kalibrasyon çalışmaları dolayısıyla sorumlu olduğu harcamaları karşılayacak durumda olduğunu garanti edebiliyor olmalıdır [11].

3. YÜKSEK GERİLİM LABORATUVARI VE ÖLÇÜM SİSTEMİ

3.1 Giriş

Yüksek gerilim deneylerinde gerilim ve akımın geleneksel ölçüm ve kayıt cihazları ile ölçülmesi mümkün değildir. Ölçme sistemi genellikle bir dönüştürücü bir iletim elemanı ve kayıt cihazından oluşur.

Yüksek gerilim laboratuvarında darbe gerilimlerinin ve alternatif gerilimlerin ölçümleri için iki ayrı ölçüm sistemi kullanılır. Darbe geriliminin tepe değerinin ölçülmesi ve dalga şeklinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Dalga şeklinin değerlendirilmesi için osiloskop veya dijital kayıt cihazı kullanılır. Alternatif gerilim, laboratuvarlarda genellikle tepe değer voltmetresi yardımıyla ölçülmektedir. Şekil 3.1 yüksek gerilim laboratuvarını göstermektedir.



Şekil 3.1: Yüksek gerilim laboratuvarı

3.2 Alternatif Yüksek Gerilim Ölçüm Sistemi

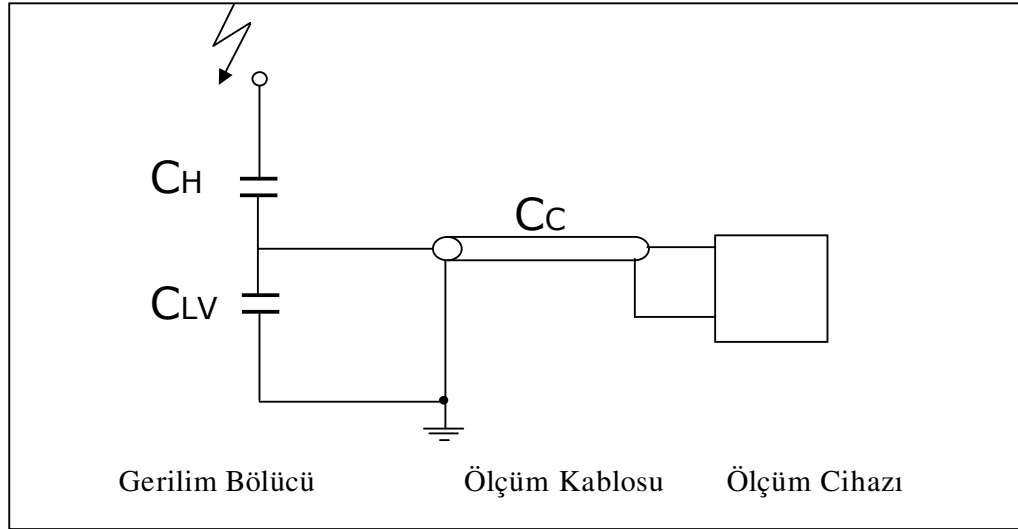
Sinüsoidal alternatif yüksek gerilim deneylerinde deney gerilimi, gerilimin tepe değerinin $\sqrt{2}$ 'ye bölümü olarak tanımlanır. Deney geriliminin frekansı genellikle 45-65 Hz arasında olup, bu frekanslı bir deney gerilimi şebeke (endüstriyel) frekanslı deney gerilimi olarak adlandırılır. Gerilimin şekli olabildiğince sinüsoidal olmalı ve deney gerilimi tepe değerinin etkin (RMS) değerine oranı $\sqrt{2} \pm \%5$ olmalıdır. Deney süresi 60 saniyenin altında ise deney geriliminin değeri $\pm \%1$ 'den, 60 saniyenin üzerinde ise $\pm \%3$ 'den fazla değişim göstermemelidir [10].

Yüksek gerilim laboratuvarında alternatif gerilim ölçüm sisteminde kullanılan cihazlar Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Alternatif gerilim ölçüm sistemi

Gerilimin değeri ($\pm U_{Tepe}$, $\pm U_{Tepe}/\sqrt{2}$, U_{RMS}) ile frekans ve periyot değerleri ölçülür. Ölçme sistemi kapasitif gerilim bölücü, ölçüm kablosu ve tepe değer voltmetresinden oluşur. Ölçme sisteminde kullanılan alternatif gerilim bölücüsünün çevirme oranının tam olarak belirlenmesi ölçüm sisteminin en önemli unsurudur. Çevirme oranı, sistemin toplam çevirme oranı olarak hesaplanır ve kullanılan ölçüm kablolarını da kapsar. Şekil 3.3'te alternatif gerilim ölçüm sisteminin temel devre şeması gösterilmiştir. Alternatif gerilim ölçüm sistemini oluşturan cihaz ve donanımlar Tablo 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.3 Alternatif gerilim ölçüm sisteminin temel devre şeması

Tablo 3.1 Alternatif gerilim ölçüm sistemini oluşturan alet ve donanımlar

Donanım Adı	Marka/Model	Teknik Özellikleri	Kalibrasyon
Yüksek alternatif Gerilim Kaynağı	HIGHVOLT / WRM 1600/400	1600 kVA / 400kV 1 fazlı, 50 Hz	---
Alternatif Gerilim Bölücüsü	HIGHVOLT/ WMCF 2.5/400	0 – 400 kV $C_{HV} = 2,391 \text{ nF}$ $C_{LV} = 3329 \text{ nF}$	UME2006.EY G.030
Tepe Değer Voltmetresi	HIGHVOLT / MU16	1000 V maksimum giriş, çevirme oranı girişli	UME2006.EY G.030
Ölçüm Kablosu	L34/60	50 Ω , 60 m, çift ekranlı N-tipi koaksiyel kablo $C_C = 6,218 \text{ nF}$	UME2006.EY G.030

Alternatif gerilim ölçme sisteminin teorik çevirme oranı

$$F_A = \frac{C_{HV} + C_{LV} + C_C}{C_{HV}} \quad (3.1)$$

ifadesinden $F_A = 1396$ olarak elde edilir.

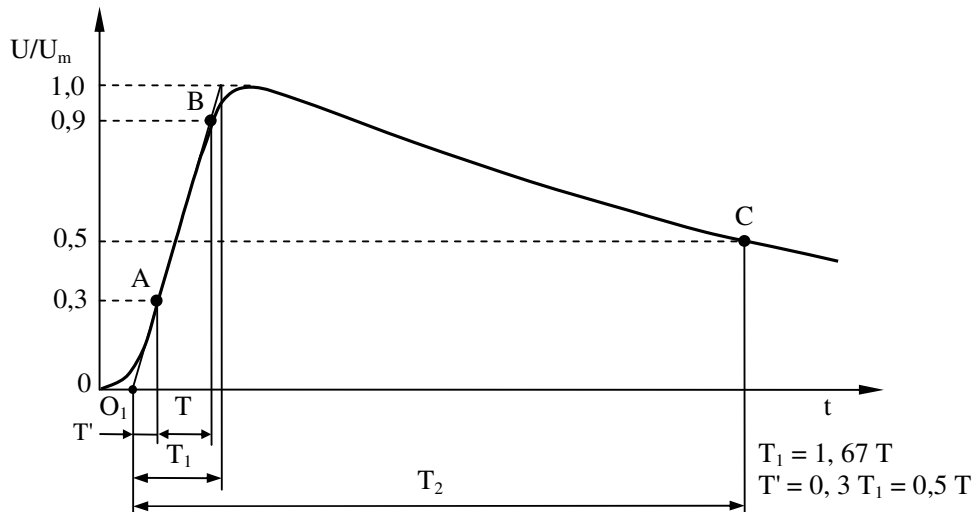
3.3 Yıldırım ve Anahtarlama Darbe Gerilimi Ölçüm Sistemi

3.3.1 Yıldırım Darbe Gerilimi

Darbe gerilimi, laboratuvarında bir “darbe gerilim üretici” tarafından üretilir. Yıldırım darbe gerilimin dalga şekli; U_p , T_1 ve T_2 değerleri ve polarite ile belirtilir. Burada U_p gerilimin tepe değeri, T_1 cephe süresi ve T_2 sırt yarı değer süresi olarak tanımlanır. $T_1 = 1,2 \pm \%30 \mu s$ ve $T_2 = 50 \pm \%20 \mu s$ olmalıdır ve T_1

$$T_1 = 1,67T \quad (3.2)$$

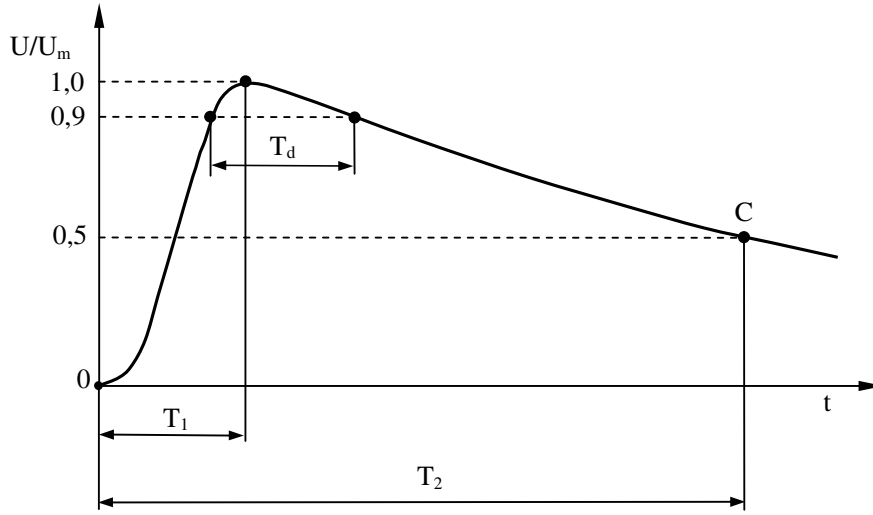
ifadesi ile belirlenir. Yıldırım darbe gerilimin dalga şekli Şekil 3.4’de gösterilmiştir [9].



Şekil 3.4 Yıldırım darbe geriliminin dalga şekli [9]

3.3.2 Anahtarlama Darbe Gerilimi

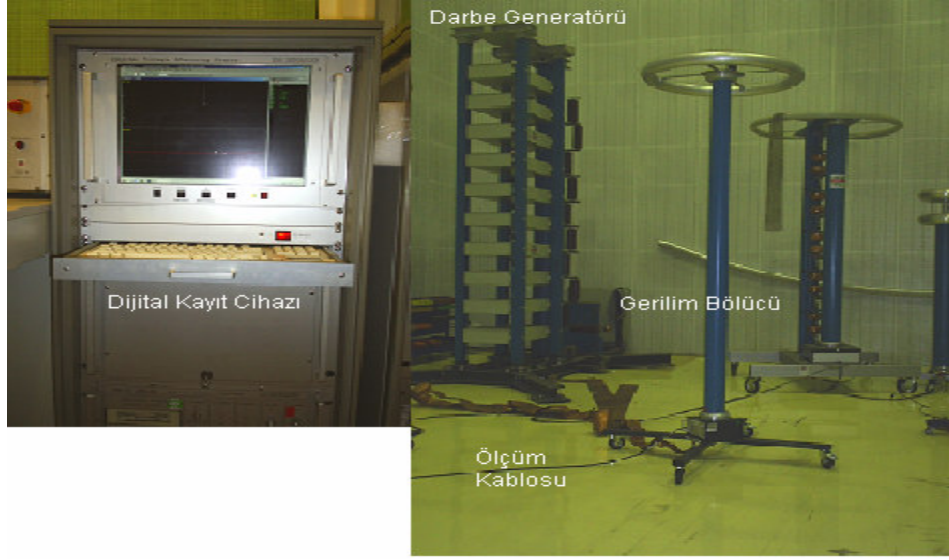
Anahtarlama darbe geriliminin dalga şekli U_p , T_1 , T_d ve T_2 değerleri ve polarite ile belirtilir. Burada U_p gerilimin tepe değeri, T_1 cephe süresi, T_d eğrinin $0,9U_p$ üzerinde kaldığı süre ve T_2 sırt yarı değer süresi olarak tanımlanır. T_1 (3.2) bağıntısı ile hesaplanır ve $T_1 > 100 \mu s$, $T_d > 200 \mu s$ ve $T_2 > 1000 \mu s$ olmalıdır. Anahtarlama darbe gerilimin dalga şekli Şekil 3.5’de gösterilmiştir [9].



Şekil 3.5 Anahtarlama darbe geriliminin dalga şekli [9]

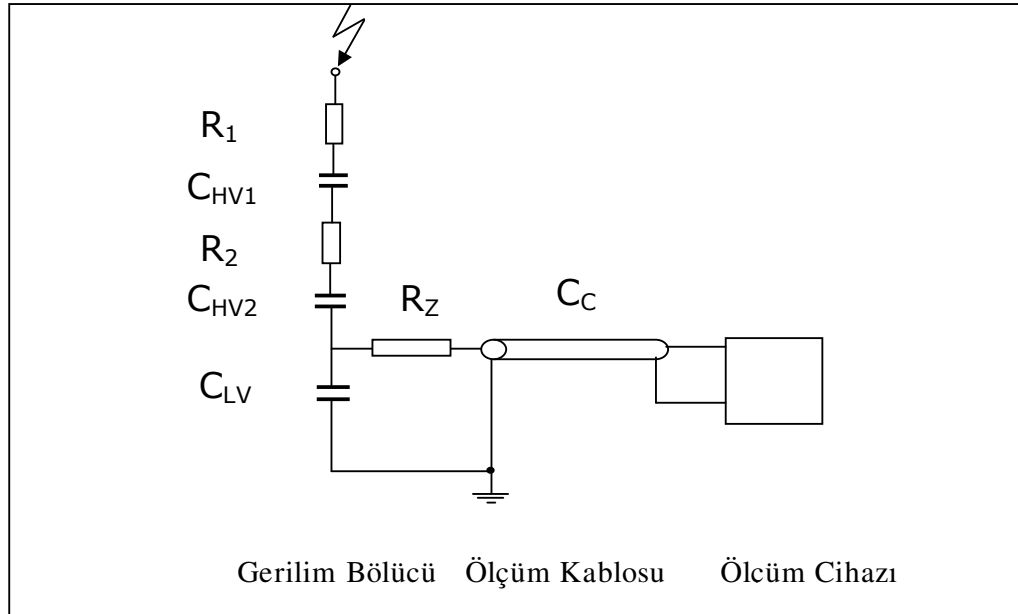
3.3.3 Darbe Gerilimi Ölçüm Sistemi

Darbe gerilimi dalga şeklini, zaman parametrelerinin ve gerilimin ölçülmesi ve şeklin değerlendirilebilmesi için kayıt edilmektedir. Ölçüm sistemi gerilim bölücü, ölçüm kablosu ve dijital kayıt cihazından oluşmaktadır. Yüksek gerilim laboratuvarında darbe gerilimi ölçüm sisteminde kullanılan cihazlar Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Darbe gerilimi ölçüm sistemi

Darbe gerilimi ölçüm sisteminin temel devre şeması Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Darbe gerilimi ölçüm sistemini oluşturan cihaz ve donanımlar Tablo 3.2’ de verilmiştir.



Şekil 3.7 Darbe gerilimi ölçüm sistemi temel devre şeması

Tablo 3.2 Darbe gerilimi ölçüm sistemini oluşturan cihaz ve donanımlar

Donanım Adı	Marka/Model	Teknik Özellikleri	Kalibrasyon
Darbe Üretici	HIGHVOLT / IPL100/1000Ms p	100kJ / 1000kV	---
Darbe Gerilim Bölücüsü	HIGHVOLT / SMCF 800/1000	0 – 1000 kV $C_{HV1} = 1,318 \text{ nF}$ $C_{HV2} = 2,122 \text{ nF}$ $C_{LV} = 1010,4 \text{ nF}$	UME2006.EY G.031
Dijital Kayıt Cihazı	DR. Strauss / TR-AS 200-12/2	Maks.giriş 1600 V, 2 ölçüm kanalı, 12 bit çözünürlük	UME2006.EY G.031
Ölçüm Kablosu	L35/50	50 Ω , 50 m, çift ekranlı N-tipi koaksiyel kablo $C_C = 6,218 \text{ nF}$	UME2006.EY G.031

Darbe gerilimi ölçüm sisteminde kullanılan gerilim bölücünün teorik çevirme oranı

$$F_D = \frac{C_{HV} + C_{LV} + C_C}{C_{HV}} \quad (3.3)$$

$F_D = 1250$ olarak elde edilir. Gerilim bölücünün uygulamada kullanılan çevirme oranı, yıldırım ve anahtarlama darbe gerilimleri için BS EN 60060-2: 1994 standardında belirtildiği gibi ayrı ayrı hesaplanır.

4. YÜKSEK ALTERNATİF GERİLİM ÖLÇÜM SİSTEMİNİN BELİRSİZLİĞİ

4.1 Giriş

Alternatif gerilim ölçüm sisteminin belirsizliği 2. Bölümde belirtilen yöntemler doğrultusunda elde edilecektir. Bu bölümde alternatif gerilim ölçüm sisteminin belirsizliğine etki eden temel bileşenler kullanılarak belirsizlik bütçesi oluşturulacak ve sistemin genişletilmiş belirsizliği elde edilecektir. Yüksek gerilim laboratuvarında alternatif gerilim ölçüm sisteminin belirsizlik bileşenleri,

- Sistemin çevirme oranından kaynaklanan belirsizlik,
- Sıcaklık etkisinden kaynaklanan belirsizlik,
- Tepe değer voltmetresinin çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik,
- Referans ölçüm sisteminin belirsizliği
- Kısa dönem kararlılığıdır.

4.2 Sistemin Çevirme Oranından Kaynaklanan Belirsizlik

Yüksek gerilimlerin bilinen yöntemlerle ölçülememesi sebebiyle, yüksek genlikli gerilimleri ölçülebilir düzeye indiren dönüştürücü elemanlar kullanılır. Ölçülebilir düzeye indirilmiş gerilimler, bilinen ve çok kullanılan duyarlı multimetreler veya tepe değer voltmetreleri ile ölçülür. Ölçülen gerilim değeri sistemin çevirme oranı kullanılarak belirlenir. Sistemin teorik çevirme oranının belirlenmesine 3. Bölümde yer verilmişti. Ancak bu çevirme oranının değerindeki belirsizlik, tüm yüksek gerilim ölçüm sisteminin belirsizliğine etki etmektedir. Sistemin çevirme oranından kaynaklanan belirsizliğin elde edilmesi amacıyla referans bir alternatif yüksek gerilim

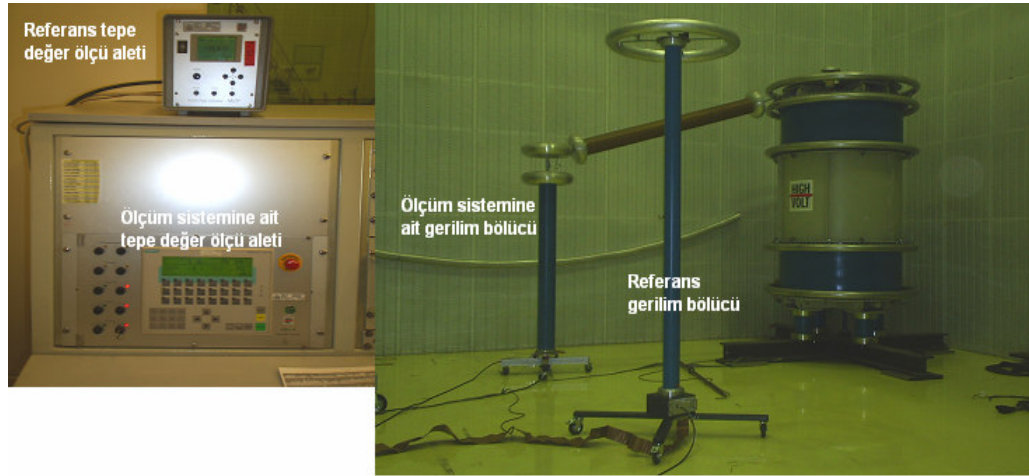
ölçüm sistemi kullanılır. Referans ölçüm sisteminin bileşik belirsizliği $\pm \%1$ 'den küçük olmalıdır [10, 12].

Çevirme oranından kaynaklanan belirsizliğin belirlenmesi amacıyla UME Yüksek Gerilim Laboratuvarı yüksek alternatif gerilim ölçüm sistemi referans ölçüm sistemi olarak kullanılmıştır. Bu referans ölçüm sisteminin bileşik belirsizliği $\pm \%0,2$ 'dir.

Yüksek alternatif gerilim ölçüm sisteminin çevirme oranından kaynaklanan belirsizliğinin elde edilmesi amacıyla, UME referans ölçüm sistemi ile karşılaştırmalı ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümlerde kullanılan alet ve donanımlar Tablo 4.1'de belirtilmiştir. Deney düzeneği Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1 Yüksek alternatif gerilim ölçüm sisteminin çevirme oranından kaynaklanan belirsizliğinin belirlenmesinde kullanılan alet ve donanımlar

Donanım Adı	Marka/Model	Teknik Özellikleri	Kalibrasyon
Yüksek alternatif gerilim kaynağı	HIGHVOLT / WRM 1600/400	1600 kVA / 400kV 1 fazlı, 50 Hz	---
Referans yüksek alternatif gerilim bölücüsü	HIGHVOLT/ SMCF 800/1000	1 – 1000 kV	UME, EYG.013
Referans tepe değer voltmetresi	HIGHVOLT / MU17	1000 V maksimum giriş, çevirme oranı girişli	UME, EYG.013
Referans sisteme ait ölçüm kablosu	L34/15	50 Ω , 15 m, çift ekranlı, N-tipi koaksiyel kablo	UME, EYG.013
Ölçüm sistemine ait yüksek alternatif gerilim bölücüsü	HIGHVOLT/ WMCF 2.5/400	0 – 400 kV	UME2006.E YG.030
Ölçüm sistemine ait tepe değer voltmetresi	HIGHVOLT / MU16	1000 V maksimum giriş, çevirme oranı girişli	UME2006.E YG.030
Ölçüm sistemine ait ölçüm kablosu	L34/60	50 Ω , 60 m, çift ekranlı N-tipi koaksiyel kablo	UME2006.E YG.030



Şekil 4.1 Yüksek alternatif gerilim ölçüm sisteminin çevirme oranından kaynaklanan belirsizliğinin belirlenmesi ölçüm düzeneği

Her iki ölçüm sistemi paralel bağlanarak 50 Hz şebeke frekanslı 200 kV alternatif gerilim altında eş zamanlı ölçümler yapılmıştır. Ölçü aletlerinden okunan değerler sürekli salınımlar yaptığından 10'ar anlık ölçümler alınmıştır. Tablo 4.2 ölçüm sonuçlarını ve ölçüm sonuçlarına karşılık gelen bağıl hataları göstermektedir.

Tablo 4.2 Ölçüm sisteminin çevirme oranından kaynaklanan belirsizliğinin belirlenmesi ölçüm sonuçları

Referans Ölçüm Sisteminde Ölçülen Gerilim V_{iref} (kV)	Ölçüm Sisteminde Ölçülen Gerilim V_i (kV)	Bağıl Hata δV_i (%)
195,3	195,2	-0,05
196,6	196,6	0,00
196,4	196,0	-0,20
195,0	194,8	-0,10
200,0	200,1	0,05
200,7	200,8	0,05
199,8	199,5	-0,15
200,2	200,4	0,10
204,5	204,3	-0,10
204,2	204,6	0,20

Yapılan anlık ölçüm değerlerinden bağıl hata

$$\partial V_i = \frac{V_i - V_{iref}}{V_{iref}} \times 100\% \quad (4.1)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanmıştır. Bağıl hataların ortalama değeri δV_m olarak ifade edilirse, standart sapma

$$s_T = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\partial V_i - \partial V_m)^2} \quad (4.2)$$

bağıntısı yardımıyla, $s_T = \pm \%0,123$ olarak hesaplanır. Belirsizlik standart sapmaya bağlı olarak

$$u_T = \frac{s_T}{\sqrt{n}} \quad (4.3)$$

bağıntısı yardımıyla, $u_T = \pm \%0,039$ olarak elde edilir.

4.3 Sıcaklık Etkisinden Kaynaklanan Belirsizlik

Alternatif yüksek gerilim ölçümlerindeki en önemli koşullardan biri, gerilim bölücünün çevirme oranının değerinin sıcaklık değişimlerinden en az etkilenmesidir. Sıcaklık değişiminin gerilim bölücünün çevirme oranına olan etkisi üretici firma tarafından belirlenmiştir.

Sıcaklık değişiminin gerilim bölücünün yüksek gerilim kapasitesine olan etkisi $\alpha_{HV} = -\%0,02 / K$ ve alçak gerilim kapasitesine olan etkisi $\alpha_{LV} = -\%0,025 / K$ olarak verilmiştir. Sıcaklık değişiminin gerilim bölücünün çevirme oranı etkisi

$$\alpha_S = \alpha_{LV} - \alpha_{HV} \quad (4.4)$$

bağıntısı yardımıyla, $\alpha_S = -\%0,005 / K$ olarak hesaplanmıştır [13].

Laboratuvar ortamı için gözlemlenen sıcaklık değişimi $\pm 10K$ sınırları içinde kaldığından sıcaklık etkisinden kaynaklanan belirsizlik $u_s = \pm 0,05$ olarak elde edilir.

4.4 Tepe Değer Voltmetresinin Çözünürlüğünden Kaynaklanan Belirsizlik

Yüksek gerilim laboratuvarında gerilim bölücü vasıtasıyla ölçülebilir düzeye indirilen gerilimler tepe değer voltmetresi ile ölçülür. Tepe değer voltmetresinin sonlu çözünürlüğü ölçüm sisteminin belirsizliğine etki etmektedir. Son dijitin yarısının ölçülen gerilime bölümü belirsizlik bileşeni olarak değerlendirilmektedir. Tepe değer voltmetresinin çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik $u_c = \pm 0,025$ olarak elde edilir.

4.5 Referans Ölçüm Sisteminin Belirsizliği

Yüksek gerilim laboratuvarı alternatif gerilim ölçüm sistemi UME Yüksek Gerilim Laboratuvarı referans ölçüm sistemine paralel bağlanmış ve Bölüm 4.2’de belirtilen karşılaştırmalı ölçümler yapılmıştır. UME yüksek gerilim referans ölçüm sisteminin belirsizliği bu ölçüm sonuçlarına etki etmektedir. Referans ölçüm sisteminin belirsizliği $u_R = \pm 0,2$ olarak verilmiştir.

4.6 Kısa Dönem Kararlılığı

Yüksek gerilim laboratuvarı alternatif gerilim ölçüm sistemi ve UME referans ölçüm sisteminin paralel bağlanması ile bir yıl aralıkla yapılan iki ölçüm sonucunda 200 kV gerilimde sistemin çevirme oranları belirlenmiştir. Çevirme oranları arasındaki farkın, anma çevirme oranına olan oranı, kısa dönem kararlılığını bağıl olarak vermekte ve bu değer belirsizlik bileşeni olarak değerlendirilmektedir. Bölücünün kısa dönem kararlılığı $u_K = \pm 0,29$ olarak elde edilmiştir.

4.7 Belirsizlik Bütçesi

Yüksek gerilim laboratuvarı alternatif gerilim ölçüm sisteminin belirsizlik bileşenlerini, sistemin çevirme oranından kaynaklanan belirsizlik (u_T , dikdörtgen dağılım ve $k = \sqrt{3}$), sıcaklık etkisinden kaynaklanan belirsizlik (u_S , dikdörtgen dağılım ve $k = \sqrt{3}$), tepe değer voltmetresinin çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik (u_C , dikdörtgen dağılım ve $k=\sqrt{3}$), referans ölçüm sisteminin belirsizliği (u_R , normal dağılım ve $k = 2$) ve kısa dönem kararlılığı (u_K , dikdörtgen dağılım ve $k = \sqrt{3}$) oluşturmaktadır. Tüm belirsizlik bileşenleri $k = 1$ kapsam faktöründe normal dağılıma dönüştürüldükten sonra bileşik belirsizlik hesaplanmıştır.

$$U_x = \sqrt{\sum_i u_i^2} \quad (4.5)$$

bağıntısı kullanılarak bileşik belirsizlik elde edilir. Belirsizlik bütçesi Tablo 4.3’de verilmiştir. Genişletilmiş belirsizlik, $k = 1$ kapsam faktöründe hesaplanan bileşik belirsizliğin $k = 2$ katsayısı ile genişletilmesi ve %95 güvenilirlik düzeyine çekilmesi ile (4.6) bağıntısı kullanılarak elde edilmiştir.

$$U_x = 2.u_x \quad (4.6)$$

Alternatif gerilim bölücüsü, tepe değer ölçü voltmetresi ve ölçüm kablosundan oluşan Yüksek gerilim laboratuvarı alternatif gerilim ölçüm sisteminin %95 güvenilirlik düzeyi ($k = 2$) için ölçüm belirsizliği, $U_A = \pm\%0,4$ olarak belirlenmiştir.

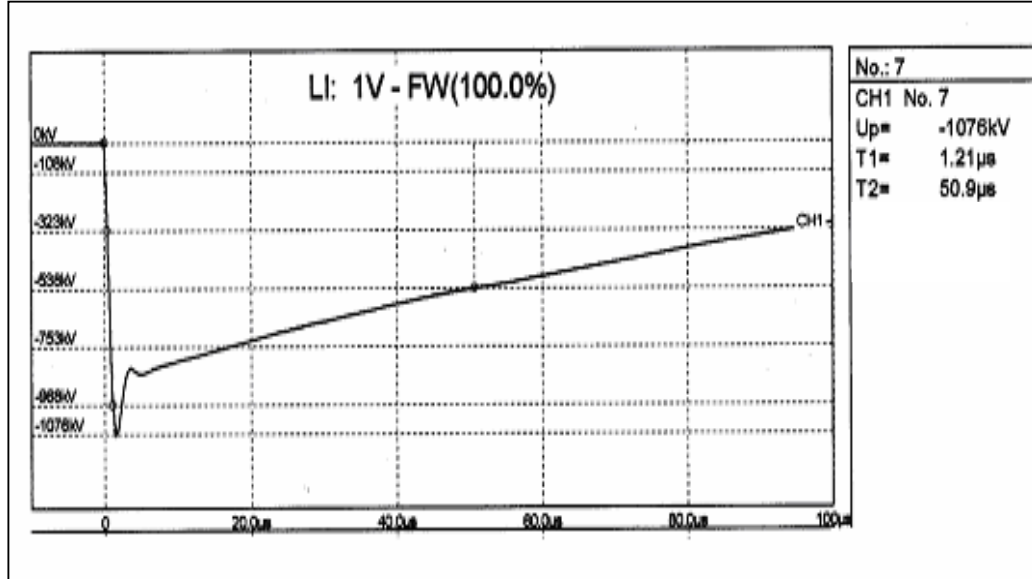
Tablo 4.3 Alternatif gerilim belirsizlik bütçesi

Belirsizlik Kaynağı	Belirsizlik Bileşenleri u_i (%)	Dağılım
Sistemin çevirme oranından kaynaklanan belirsizlik	$u_T = 0,039$	Normal ($k = 1$)
Sıcaklık etkisinden kaynaklanan belirsizlik	$u_S = 0,05$	Dikdörtgen ($k = \sqrt{3}$)
Tepe değer voltmetresinin çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik	$u_C = 0,025$	Dikdörtgen ($k = \sqrt{3}$)
Referans ölçüm sisteminin belirsizliği	$u_R = 0,20$	Dikdörtgen ($k=2$)
Kısa dönem kararlılığı	$u_K = 0,29$	Dikdörtgen ($k = \sqrt{3}$)
Bileşik belirsizlik	$u_A = 0,20$	$k = 1$
Genişletilmiş belirsizlik	$U_A = 0,40$	$k = 2$

5. DARBE GERİLİM ÖLÇÜM SİSTEMİNİN BELİRSİZLİĞİ

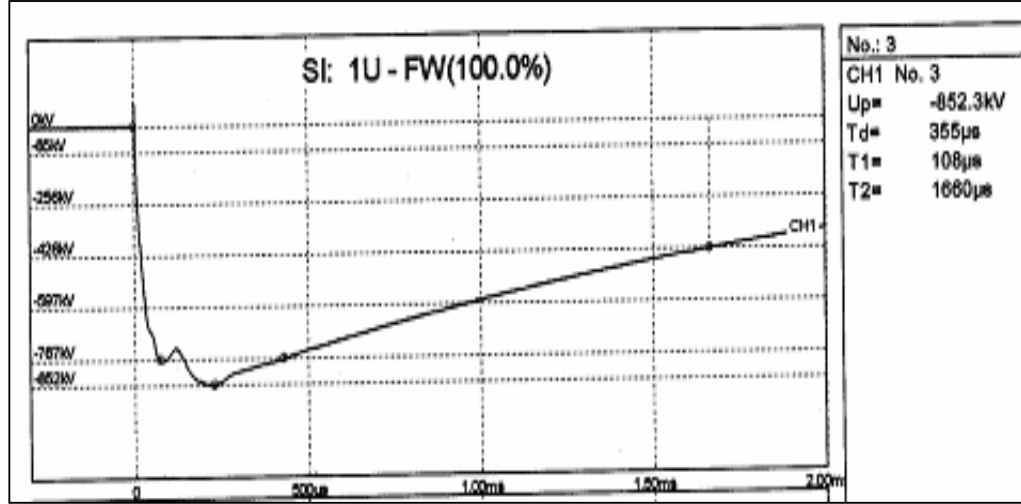
5.1 Giriş

Yüksek gerilim laboratuvarında darbe gerilimi ölçüm sistemi kapasitif gerilim bölücü, ölçüm kablosu ve dijital kayıt cihazından oluşmaktadır. Yıldırım darbe ve anahtarlama darbe gerilimi, gerilim bölücü ile ölçülebilir seviyeye düşürüldükten sonra dijital kayıt cihazı tarafından kayıt edilir. Yıldırım darbe gerilim eğrisi; gerilimin tepe değeri U_p , cephe süresi T_1 ve sırt yarı değer süresi T_2 ile birlikte gösterilir. Dijital kayıt cihazı tarafından kayıt edilen bir yıldırım darbe gerilimi dalga eğrisi Şekil 5.1’de gösterilmektedir.



Şekil 5.1 Bir tam dalga (FW) yıldırım darbe (LI) gerilimi eğrisi

Anahtarlama darbe gerilim eğrisi; gerilimin tepe değeri U_p , cephe süresi T_1 , sırt yarı değer süresi T_2 ve eğrinin $0,9U_p$ değerinin üzerinde kaldığı süre T_d ile birlikte gösterilir. Dijital kayıt cihazı tarafından kayıt edilen bir anahtarlama darbe gerilimi eğrisi Şekil 5.2’ de gösterilmektedir.



Şekil 5.2 Bir anahtarlama darbe (SI) gerilimi eğrisi

Darbe gerilimi ölçüm sisteminde, yıldırım ve anahtarlama darbe gerilimlerini karakterize eden parametrelerin ve sistemin çevirme oranlarının da birbirlerinden farklı olması sebebiyle, sistemin ölçüm belirsizliği her ikisi için ayrı olarak elde edilir [10]. Bu bölümde darbe gerilimi ölçüm sisteminin belirsizliğine etki eden temel bileşenler kullanılarak belirsizlik bütçesi oluşturulacak ve ölçüm sisteminin genişletilmiş belirsizliği elde edilecektir.

5.2 Yıldırım Darbe Gerilimi Ölçüm Belirsizliği

Yüksek gerilim laboratuvarında darbe gerilimi ölçüm sisteminin yıldırım darbe gerilimi ölçüm belirsizliği genlik ve zaman parametreleri gibi iki ayrı tip büyüklük için tanımlanır. Belirsizliği elde edilmek istenen darbe gerilimi ölçüm sistemine paralel bağlanan referans ölçüm sisteminin genlik büyüklüğü genişletilmiş belirsizliği $\pm \%1$ den ve zaman büyüklüğü genişletilmiş belirsizliği $\pm \%5$ den küçük olmalıdır [10, 12].

5.2.1 Genlik Büyüklüğünün Belirsizliği

Darbe gerilimi ölçüm sisteminin yıldırım darbe genlik büyüklüğü belirsizliğinde kullanılan belirsizlik bileşenleri,

- Sistemin yıldırım darbe gerilimi çevirme oranından kaynaklanan belirsizlik,
- Sıcaklık etkisinden kaynaklanan belirsizlik,

- Dijital kayıt cihazının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik,
- Referans ölçüm sisteminin genlik büyüklüğü belirsizliği
- Kısa dönem kararlılığıdır.

5.2.1.1 Sistemin Yıldırım Darbe Çevirme Oranından Kaynaklanan Belirsizlik

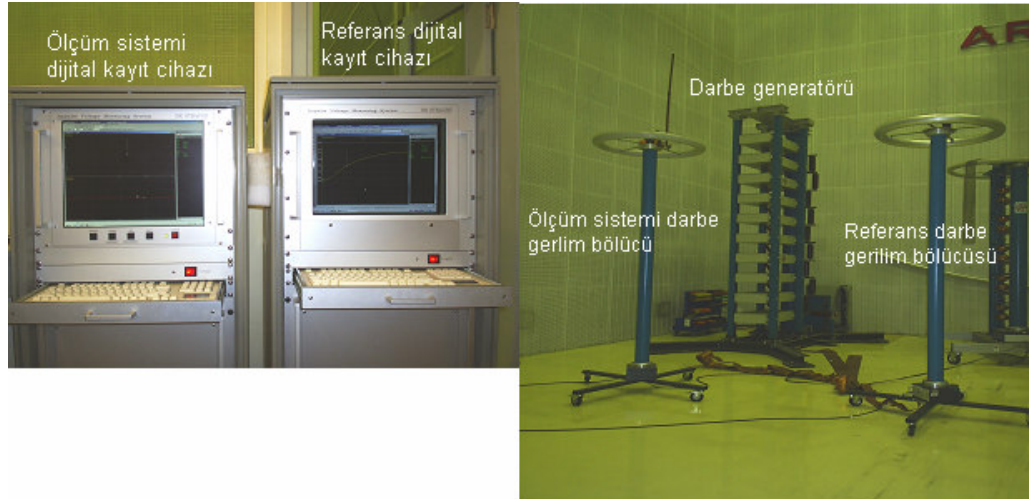
Yıldırım darbe gerilimlerinin bilinen yöntemlerle ölçülememesi sebebiyle, yüksek genlikli gerilimleri ölçülebilir düzeye indiren dönüştürücü elemanlar kullanılır. Ölçülebilir düzeye indirilmiş gerilimlerin eğrileri değerlendirilebilmeleri için kayıt cihazları tarafından kayıt edilirler. Ölçülen gerilimin genliği sistemin yıldırım darbe çevirme oranı kullanılarak belirlenir. Bu çevirme oranının değerindeki belirsizlik, sistemin yıldırım darbe ölçüm belirsizliğine etki etmektedir. Sistemin yıldırım darbe çevirme oranından kaynaklanan belirsizliğin elde edilmesi amacıyla referans bir darbe gerilimi ölçüm sistemi kullanılır.

Belirsizliğin belirlenmesi amacıyla UME Yüksek Gerilim Laboratuvarı darbe ölçüm sistemi referans ölçüm sistemi olarak kullanılmıştır. Bu referans ölçüm sisteminin genlik büyüklüğü bileşik belirsizliği $\pm \%0,6$ 'dır.

Yıldırım darbe gerilimi çevirme oranından kaynaklanan belirsizliğin elde edilmesi amacıyla, UME referans darbe ölçüm sistemi ile karşılaştırmalı ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümlerde kullanılan alet ve donanımlar Tablo 5.1'de belirtilmiştir. Deney düzeneği Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

Tablo 5.1 Yıldırım darbe gerilimi çevirme oranından kaynaklanan belirsizliğin belirlenmesinde kullanılan alet ve donanımlar

Donanım Adı	Marka/Model	Teknik Özellikleri	Kalibrasyon
Darbe üretici	HIGHVOLT / IPL100/1000Msp	100 kJ / 1000 kV	---
Referans darbe gerilim bölücüsü	HIGHVOLT/ SMCF 800/1000	0 – 1000 kV	PTB, 3188.04
Referans dijital kayıt cihazı	DR. Strauss / TR-AS 200-12	Maksimum giriş 1600 V, 12 bit çözünürlük	PTB, 3188.04
Referans sisteme ait ölçüm kablosu	L34/15	50 Ω , 15 m, çift ekranlı, N-tipi koaksiyel kablo	PTB, 3188.04
Ölçüm sistemine ait darbe gerilim bölücüsü	HIGHVOLT / SMCF 800/1000	0 – 1000 kV	UME2006.E YG.031
Ölçüm sistemine ait dijital kayıt cihazı	DR. Strauss / TR-AS 200-12/2	Maksimum giriş 1600 V, 2 ölçüm kanalı, 12 bit çözünürlük	UME2006.E YG.031
Ölçüm sistemine ait ölçüm kablosu	L35/50	50 Ω , 60 m, çift ekranlı N-tipi koaksiyel kablo	UME2006.E YG.031



Şekil 5.3 Yıldırım darbe gerilimi çevirme oranından kaynaklanan belirsizliğin belirlenmesi için ölçüm düzeneği

Her iki ölçüm sistemi paralel bağlanarak eş zamanlı ölçümler yapılmıştır. Darbe üretici tarafından üretilen $U_p = 600$ kV değerinde, (-) ve (+) polariteye sahip beşer adet yıldırım darbe gerilimi eğrisi her iki dijital kayıt cihazı tarafından kayıt edilmiştir. Tablo 5.2 ölçüm sonucunda elde edilen gerilimlerinin tepe değerlerini ve bağıl hataları göstermektedir.

Tablo 5.2 Yıldırım darbe gerilimi çevirme oranından kaynaklanan belirsizliğin belirlenmesi ölçüm sonuçları

Referans Ölçüm Sisteminde Ölçülen Gerilim $U_{p_{ref}}$ (kV)	Ölçüm Sisteminde Ölçülen Gerilim U_p (kV)	Bağıl Hata (δU_p) (%)
601,39	601,27	-0,02
602,49	602,54	0,01
601,92	602,54	0,10
601,92	601,27	-0,11
602,73	602,54	-0,03
-600,56	-600,00	-0,09
-600,18	-600,00	-0,03
-600,60	-601,27	0,11
-600,46	-601,27	0,13
-600,25	-600,00	-0,04

Elde edilen ölçüm değerlerinden bağıl hata

$$\partial U_{p_i} = \frac{U_{p_i} - U_{p_{iref}}}{U_{p_{iref}}} \times 100\% \quad (5.1)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanmıştır. Bağıl hataların ortalama değeri δU_{p_m} olarak ifade edilirse, standart sapma

$$s_{LT} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\partial U_{p_i} - \partial U_{p_m})^2} \quad (5.2)$$

bağıntısı yardımıyla, $s_{LT} = \pm\%0,085$ olarak hesaplanır. Belirsizlik standart sapmaya bağlı olarak

$$u_{LT} = \frac{s_{LT}}{\sqrt{n}} \quad (5.3)$$

bağıntısı yardımıyla, $u_{LT} = \pm\%0,027$ olarak elde edilir.

5.2.1.2 Sıcaklık Etkisinden Kaynaklanan Belirsizlik

Darbe gerilimi ölçüm sisteminde, gerilim bölücünün yıldırım darbe gerilimi çevirme oranı sıcaklık değişimlerinden etkilenmektedir. Sıcaklık değişiminin gerilim bölücünün çevirme oranına olan etkisi üretici firma tarafından belirlenmiştir.

Sıcaklık değişiminin gerilim bölücünün yüksek gerilim kapasitesine olan etkisi $\alpha_{HV} = +\%0,012 / K$ ve alçak gerilim kapasitesine olan etkisi $\alpha_{LV} = -\%0,036 / K$ olarak verilmiştir. Sıcaklık değişiminin gerilim bölücünün oranına olan etkisi

$$\alpha_s = \alpha_{LV} - \alpha_{HV} \quad (5.4)$$

bağıntısı yardımıyla, $\alpha_s = -\%0,048 / K$ olarak hesaplanmıştır [15].

Laboratuvar ortamı için gözlemlenen sıcaklık değişimi $\pm 10K$ sınırları içinde kaldığından sıcaklık etkisinden kaynaklanan belirsizlik $u_{LS} = \pm\%0,48$ olarak elde edilir.

5.2.1.3 Dijital Kayıt Cihazın Çözünürlüğünden Kaynaklanan Belirsizlik

Yüksek gerilim laboratuvarında gerilim bölücü ile ölçülebilir düzeye indirilen darbe gerilimleri dijital kayıt cihazı tarafından kayıt edilir. Son dijitin yarısının ölçülen gerilimin tepe değerine bölümü belirsizlik bileşeni olarak değerlendirilmektedir. Dijital kayıt cihazının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik $U_{LC} = \pm\%0,0008$ olarak elde edilir. Dijital kayıt cihazının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik diğer belirsizlik bileşenlerinin yanında çok küçüktür.

5.2.1.4 Referans Ölçüm Sistemin Genlik Büyüklüğünün Belirsizliği

Yüksek gerilim laboratuvarı darbe gerilimi ölçüm sistemi UME Yüksek Gerilim Laboratuvarı referans darbe ölçüm sistemine paralel bağlanmış ve Bölüm 5.2.1.1’de belirtilen karşılaştırmalı ölçümler yapılmıştır. UME darbe gerilimi referans ölçüm sisteminin genlik büyüklüğünün belirsizliği bu ölçüm sonuçlarına etki etmektedir. Referans ölçüm sisteminin genlik büyüklüğü belirsizliği $u_{LR} = \pm\%0,6$ olarak verilmiştir.

5.2.1.5 Kısa Dönem Kararlılığı

Yüksek gerilim laboratuvarı darbe gerilimi ölçüm sistemi ve UME referans darbe gerilim ölçüm sisteminin paralel bağlanması ile 1 yıl aralıkla yapılan iki ölçüm sonucunda 600 kV darbe geriliminde sistemin çevirme oranları belirlenmiştir. Çevirme oranları arasındaki farkın, anma çevirme oranına olan oranı, kısa dönem kararlılığını bağl olarak vermekte ve bu değer belirsizlik bileşeni olarak değerlendirilmektedir. Bölücünün kısa dönem kararlılığı $u_{LK} = \pm\%0,079$ olarak elde edilmiştir.

5.2.1.6 Belirsizlik Bütçesi

Yüksek gerilim laboratuvarı darbe gerilimi ölçüm sisteminin belirsizlik bileşenlerini, sistemin yıldırım darbe gerilimi çevirme oranından kaynaklanan belirsizlik (u_{LT} , normal dağılım ve $k = 1$), sıcaklık etkisinden kaynaklanan belirsizlik (u_{LS} , dikdörtgen dağılım ve $k = \sqrt{3}$), dijital kayıt cihazının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik (u_{LC} , dikdörtgen dağılım ve $k = \sqrt{3}$), referans ölçüm sisteminin belirsizliği (u_{LR} , normal dağılım ve $k = 2$) ve kısa dönem kararlılığı (u_{LK} , dikdörtgen dağılım ve $k = \sqrt{3}$) oluşturmaktadır. Tüm belirsizlik bileşenleri $k = 1$ kapsam faktöründe normal dağılıma dönüştürüldükten sonra bileşik belirsizlik hesaplanmıştır.

$$u_x = \sqrt{\sum_i u_i^2} \quad (5.5)$$

bağıntısı kullanılarak bileşik belirsizlik elde edilir. Belirsizlik bütçesi Tablo 5.3’de verilmiştir. Genişletilmiş belirsizlik, $k = 1$ kapsam faktöründe hesaplanan bileşik

belirsizliğin $k = 2$ katsayısı ile genişletilmesi ve %95 güvenilirlik düzeyine çekilmesi ile (5.6) bağıntısı kullanılarak elde edilmiştir.

$$U_x = 2.u_x \quad (5.6)$$

Darbe gerilimi bölücüsü, dijital kayıt cihazı ve ölçüm kablosundan oluşan Yüksek Gerilim Laboratuvarı darbe gerilimi ölçüm sisteminin yıldırım darbe genlik büyüklüğü için genişletilmiş belirsizliği %95 güvenilirlik düzeyi ($k = 2$) için $U_L = \pm 0,8$ olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.3 Yıldırım Darbe Gerilimi Genlik Büyüklüğü Belirsizlik Bütçesi

Belirsizlik Kaynağı	Belirsizlik Bileşenleri u_i (%)	Dağılım
Sistemin gerilim çevirme oranından kaynaklanan belirsizlik	$u_{LT} = \pm 0,027$	Normal ($k = 1$)
Sıcaklık etkisinden kaynaklanan belirsizlik	$u_{LS} = \pm 0,48$	Dikdörtgen ($k = \sqrt{3}$)
Dijital ölçü cihazın çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik	$U_{LC} = \pm 0,0008$	Dikdörtgen ($k = \sqrt{3}$)
Referans ölçüm sisteminin genlik büyüklüğü belirsizliği	$u_{LR} = \pm 0,6$	Normal ($k = 2$)
Kısa dönem kararlılığı	$u_{LK} = \pm 0,079$	Dikdörtgen ($k = \sqrt{3}$)
Bileşik belirsizlik	$u_L = \pm 0,41$	$k = 1$
Genişletilmiş belirsizlik	$U_L = \pm 0,82$	$k = 2$

5.2.2 Zaman Büyüklüğünün Belirsizliği

Darbe gerilimi ölçüm sisteminin yıldırım darbe zaman büyüklüklerinin belirsizliğinde kullanılan belirsizlik bileşenleri; T1 ve T2 zaman büyüklüklerin ölçümündeki belirsizlik, dijital ölçüm cihazının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik ve referans darbe ölçüm sisteminin zaman büyüklüğünün belirsizliğidir. Dijital ölçüm cihazının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik T1 ve T2 zaman büyüklükleri için ayrı olarak hesaplanır.

5.2.2.1 T1 ve T2 Zaman Büyüklüklerinin Belirsizliği

Yıldırım darbe geriliminin cephe süresi T1 ve sırt yarı değer süresi T2 dijital kayıt cihazı tarafından kayıt edilen gerilim eğrisi üzerinde ölçülür. Zaman büyüklüklerinin ölçüm değerlerindeki belirsizlik referans ölçüm sistemi kullanarak belirlenir. Bu belirsizliğin belirlenmesi amacıyla UME Yüksek Gerilim Laboratuvarı darbe ölçüm sistemi referans ölçüm sistemi olarak kullanılmıştır. Bu referans ölçüm sisteminin zaman büyüklüklerinin belirsizliği $\pm \%1,5$ 'dir.

Yıldırım darbe gerilimi zaman büyüklüklerinin belirsizliğinin elde edilmesi amacıyla, UME referans darbe ölçüm sistemi ile karşılaştırmalı ölçümler yapılmıştır. Ölçümlerde kullanılan alet ve donanımlar Tablo 5.1'de belirtilmiş ve deney düzeneği Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

Her iki ölçüm sistemi paralel bağlanarak eş zamanlı ölçümler yapılmıştır. Darbe üretici tarafından üretilen $T1 = 0,94 \mu s$ ve $T2 = 58 \mu s$ zaman büyüklüklerinde toplam 10 adet yıldırım darbe gerilimi eğrisi her iki dijital kayıt cihazı tarafından kayıt edilmiştir. Tablo 5.4'te ölçüm sonucunda elde edilen gerilimlerinin cephe süreleri (T1) ve bağıl hataları gösterilmektedir. Tablo 5.5'te ise sırt yarı değer süreleri (T2) ve bağıl hataları gösterilmektedir.

Tablo 5.4 Referans darbe gerilimi ölçüm sistemi ve laboratuvar darbe gerilimi ölçüm sistemi ölçüm sonuçları (T1)

Referans Ölçüm Değeri T_{1ref} (μs)	Ölçüm Sisteminde Ölçülen Değer T_1 (μs)	Bağıl Hata (δT_1) (%)
0,94	0,92	-2,1
0,94	0,92	-2,1
0,94	0,92	-2,1
0,94	0,92	-2,1
0,94	0,92	-2,1
0,94	0,92	-2,1
0,94	0,92	-2,1
0,94	0,92	-2,1
0,94	0,92	-2,1
0,93	0,92	-1,1
0,94	0,92	-2,1

Tablo 5.5 Referans darbe gerilimi ölçüm sistemi ve laboratuvar darbe gerilimi ölçüm sistemi ölçüm sonuçları (T2)

Referans Ölçüm Değeri T_{2ref} (μs)	Ölçüm Sisteminde ölçülen değer T_2 (μs)	Bağıl Hata (δT_2) (%)
58,26	58,4	0,24
58,28	58,4	0,21
58,27	58,4	0,22
58,21	58,4	0,33
58,36	58,5	0,24
57,76	58,1	0,59
57,86	58,0	0,24
57,90	58,1	0,35
57,87	58,0	0,22
57,84	58,1	0,45

Zaman büyüklüklerinin bağıl hataları T1 ve T2 değerleri için

$$\partial T_i = \frac{T_i - T_{iref}}{T_{iref}} \times 100\% \quad (5.7)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanmıştır. Bağıl hataların ortalama değeri δT_m olarak ifade edilirse, standart sapma

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\partial T_i - \partial T_m)^2} \quad (5.8)$$

bağıntısı yardımıyla, $s_{T1L} = \pm\%0,33$ ve $s_{T2L} = \pm\%0,12$ olarak hesaplanır. Belirsizlik standart sapmaya bağlı olarak

$$u_T = \frac{s_T}{\sqrt{n}} \quad (5.9)$$

bağıntısı kullanılarak, T1 zaman büyüklüğünün ölçülmesindeki belirsizlik $u_{T1L} = \pm\%0,11$ ve T2 zaman büyüklüğünün ölçülmesindeki belirsizlik $u_{T2L} = \pm\%0,04$ olarak elde edilir.

5.2.2.2 Dijital Kayıt Cihazının Çözünürlüğünden Kaynaklanan Belirsizlik

Yüksek gerilim laboratuvarında darbe gerilim eğrisi T1 ve T2 değerleri dijital kayıt cihazı tarafından ölçülüp kayıt edilmektedir. Son dijitin yarısının ölçülen zaman büyüklüğünün değerine bölümü belirsizlik bileşeni olarak değerlendirilmektedir. Dijital kayıt cihazının çözünürlüğü her iki zaman büyüklüğü için ayrı olarak ifade edilir. Dijital kayıt cihazının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik, T1 zaman büyüklüğü için $u_{T1C} = \pm\%0,54$ ve T2 zaman büyüklüğü için $u_{T2C} = \pm\%0,09$ olarak elde edilir.

5.2.2.3 Referans Darbe Ölçüm Sisteminin Zaman Büyüklüğünün Belirsizliği

Laboratuvar darbe gerilimi ölçüm sistemi UME Yüksek Gerilim Laboratuvarı referans darbe ölçüm sistemine paralel bağlanmış ve Bölüm 5.2.2.1’de belirtilen karşılaştırmalı ölçümler yapılmıştır. Referans ölçüm sisteminin genlik büyüklüğünün belirsizliği bu ölçüm sonuçlarına etki etmektedir. UME darbe gerilimi referans ölçüm sisteminin zaman büyüklüğünün belirsizliği $u_{TR} = \pm\%1,5$ olarak verilmiştir.

5.2.2.4 Belirsizlik Bütçesi

Yüksek gerilim laboratuvarı darbe gerilimi ölçüm sisteminin zaman büyüklüğünün belirsizlik bileşenlerini, T1 ve T2 zaman büyüklüklerinin ölçümünden kaynaklanan belirsizlik (u_{T1L} ve u_{T2L} , normal dağılım ve $k = 1$), dijital kayıt cihazının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik (u_{T1C} ve u_{T2C} , dikdörtgen dağılım ve $k = \sqrt{3}$), referans ölçüm sisteminin zaman büyüklüğünün belirsizliği (u_{TR} , normal dağılım ve $k = 2$) oluşturmaktadır. Yıldırım darbe gerilimi zaman büyüklüğünün bileşik belirsizliği u_{TL} , tüm belirsizlik bileşenleri $k = 1$ kapsam faktöründe normal dağılıma dönüştürüldükten sonra (5.5) bağıntısı kullanılarak elde edilmiştir.

Belirsizlik bütçesi Tablo 5.6’da verilmiştir. Genişletilmiş belirsizlik U_{TL} , $k = 1$ kapsam faktöründe hesaplanan bileşik belirsizliğin $k = 2$ katsayısı ile genişletilmesi ve %95 güvenilirlik düzeyine çekilmesi ile (5.6) bağıntısı kullanılarak elde edilmiştir. Yüksek gerilim Laboratuvarı darbe gerilimi ölçüm sisteminin yıldırım darbe gerilimi zaman büyüklüğü genişletilmiş belirsizliği %95 güvenilirlik düzeyi ($k = 2$) için $U_{TL} = \pm\%1,7$ olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.6 Yıldırım Darbe Gerilimi Zaman Büyüklüğü Belirsizlik Bütçesi

Belirsizlik Kaynağı	Belirsizlik Bileşenleri u_i (%)	Dağılım
T1 zaman büyüklüğünün ölçümünden kaynaklanan belirsizlik	$u_{T1L} = \pm\%0,11$	Normal (k = 1)
T2 zaman büyüklüğünün ölçümünden kaynaklanan belirsizlik	$u_{T2L} = \pm\%0,04$	Normal (k = 1)
T1 zaman büyüklüğünün ölçümünde dijital kayıt cihazının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik	$u_{T1C} = \pm\%0,54$	Dikdörtgen (k = $\sqrt{3}$)
T2 zaman büyüklüğünün ölçümünde dijital kayıt cihazının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik	$u_{T2C} = \pm\%0,09$	Dikdörtgen (k = $\sqrt{3}$)
Referans ölçüm sisteminin zaman büyüklüğü belirsizliği	$u_{TR} = \pm\%1,5$	Normal (k = 2)
Bileşik belirsizlik	$u_{TL} = \pm\%0,83$	k = 1
Geniştirilmiş belirsizlik	$U_{TL} = \pm\%1,66$	k = 2

5.3 Anahtarlama Darbe Gerilimi Ölçüm Belirsizliği

Yüksek gerilim laboratuvarında darbe gerilimi ölçüm sisteminin anahtarlama darbe gerilimi ölçüm belirsizliği genlik ve zaman parametreleri gibi iki ayrı tip büyüklük için tanımlanır. Belirsizliği elde edilmek istenen darbe gerilimi ölçüm sistemine paralel bağlanan referans ölçüm sisteminin genlik büyüklüğü genişletilmiş belirsizliği $\pm \%1$ den ve zaman büyüklüğü genişletilmiş belirsizliği $\pm \%5$ 'den küçük olmalıdır [10, 12].

5.3.1 Genlik Büyüklüğünün Belirsizliği

Darbe ölçüm sisteminin anahtarlama darbe genlik büyüklüğü belirsizliğinde kullanılan belirsizlik bileşenleri, yıldırım darbe gerilimi genlik büyüklüğü bileşenleri ile aynı olup

- Sistemin anahtarlama çevirme oranından kaynaklanan belirsizlik,
- Sıcaklık etkisinden kaynaklanan belirsizlik,
- Dijital kayıt cihazının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik,
- Referans ölçüm sisteminin genlik büyüklüğü belirsizliği
- Kısa dönem kararlılığıdır.

Sistemin çevirme oranından kaynaklanan belirsizlik, sıcaklık etkisinden kaynaklanan belirsizlik ve referans ölçüm sisteminin genlik büyüklüğü belirsizliği yıldırım darbe ve anahtarlama darbe ölçümleri için aynıdır. Bu belirsizlik bileşenlerinden sıcaklık etkisinden kaynaklanan belirsizlik, sıcaklık değişiminin gerilim bölücünün çevirme oranına etkisi olarak ifade edilir ve Bölüm 5.2.1.2’de belirsizlik değeri $u_{LS} = \pm\%0,48$ olarak elde edilmiştir. Anahtarlama darbe belirsizliğinin belirlenmesi ölçümlerinde tepe değeri $U_p = 600$ kV olan darbe gerilimleri ölçülmüştür. Dijital ölçüm cihazının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik Bölüm 5.2.1.3’de $U_p = 600$ kV için $U_{LC} = \pm\%0,0008$ olarak elde edilmiştir. UME Yüksek Gerilim Laboratuvarı’nın yıldırım ve anahtarlama darbe genlik büyüklüğü belirsizliği $u_{LR} = \pm\%0,6$ olarak Bölüm 5.2.1.4’de verilmiştir.

5.3.1.1 Sistemin Anahtarlama Darbe Çevirme Oranından Kaynaklanan Belirsizlik

Anahtarlama darbe gerilimlerin bilinen yöntemlerle ölçülememesi sebebiyle, yüksek genlikli gerilimleri ölçülebilir düzeye indiren dönüştürücü elemanlar kullanılır. Ölçülebilir düzeye indirilmiş gerilimlerin eğrileri değerlendirilebilmeleri için kayıt cihazları tarafından kayıt edilirler. Ölçülen gerilimin genliği sistemin anahtarlama darbe çevirme oranı kullanılarak belirlenir. Bu çevirme oranının değerindeki belirsizlik, sistemin anahtarlama darbe ölçüm belirsizliğine etki etmektedir. Sistemin

anahtarlama darbe çevirme oranından kaynaklanan belirsizliğin elde edilmesi amacıyla Bölüm 5.2.1.1’de yıldırım darbe çevirme oranından kaynaklanan belirsizliğin belirlenmesi deneyinde kullanılan alet ve donanımlar ve ölçüm düzeneği kullanılmıştır.

Anahtarlama darbe çevirme oranından kaynaklanan belirsizliğin elde edilmesi amacıyla, UME referans darbe ölçüm sistemi kullanılmış ve her iki ölçüm sistemi paralel bağlanarak eş zamanlı ölçümler yapılmıştır. Darbe üretici tarafından üretilen $U_p = 600$ kV değerinde, (-) ve (+) polariteye sahip beşer adet anahtarlama darbe gerilimi dalga şekli her iki dijital kayıt cihazı tarafından kayıt edilmiştir. Tablo 5.7 ölçüm sonucunda elde edilen gerilimlerinin tepe değerlerini ve (5.1) bağıntısı yardımıyla hesaplanan bağıl hataları göstermektedir.

Tablo 5.7 Anahtarlama darbe gerilimi çevirme oranından kaynaklanan belirsizliğin belirlenmesi ölçüm sonuçları

Referans Ölçüm Sisteminde Ölçülen Gerilim U_{pref} (kV)	Ölçüm Sisteminde Ölçülen Gerilim U_p (kV)	Bağıl Hata δU_p (%)
599,98	599,99	0,002
602,62	602,48	-0,02
602,34	602,48	0,02
602,18	602,48	0,05
601,35	601,24	-0,02
-604,70	-604,97	0,04
-604,95	-604,97	0,003
-602,90	-602,48	-0,07
-605,11	-604,97	-0,02
-603,53	-603,73	0,03

Standart sapma s_{ST} , (5.2) bağıntısı yardımıyla $s_{ST} = \pm\%0,037$ olarak hesaplanır. Belirsizlik standart sapmaya bağlı olarak (5.3) bağıntısı ile $u_{ST} = \pm\%0,012$ olarak elde edilir.

5.3.1.2 Kısa Dönem Kararlılığı

Yüksek gerilim laboratuvarı darbe gerilimi ölçüm sistemi ve UME referans darbe gerilimi ölçüm sisteminin paralel bağlanması ile bir yıl aralıkla yapılan iki ölçüm sonucunda sistemin çevirme oranları belirlenmiştir. Çevirme oranları arasındaki farkın, anma çevirme oranına olan oranı, kısa dönem kararlılığını bağl olarak vermekte ve bu değer belirsizlik bileşeni olarak değerlendirilmektedir. Bölücünün kısa dönem kararlılığı $u_{SK} = \pm\%0,24$ olarak elde edilmiştir.

5.3.1.3 Belirsizlik Bütçesi

Yüksek gerilim laboratuvarı darbe gerilimi ölçüm sisteminin anahtarlama darbe genlik büyüklüğü belirsizlik bileşenlerini, sistemin anahtarlama darbe gerilimi çevirme oranından kaynaklanan belirsizlik (u_{ST} , normal dağılım ve $k = 1$), sıcaklık etkisinden kaynaklanan belirsizlik (u_{LS} , dikdörtgen dağılım ve $k = \sqrt{3}$), dijital kayıt cihazının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik (u_{LC} , dikdörtgen dağılım ve $k = \sqrt{3}$), referans ölçüm sisteminin belirsizliği (u_{LR} , normal dağılım ve $k = 2$) ve kısa dönem kararlılığı (u_{SK} , dikdörtgen dağılım ve $k = \sqrt{3}$) oluşturmaktadır. Tüm belirsizlik bileşenleri $k = 1$ kapsam faktöründe normal dağılıma dönüştürüldükten sonra bileşik belirsizlik (5.5) bağıntısı yardımıyla hesaplanmıştır.

Anahtarlama darbe gerilimi genlik büyüklüğü belirsizlik bütçesi Tablo 5.8’de verilmiştir. Genişletilmiş belirsizlik, $k = 1$ kapsam faktöründe hesaplanan bileşik belirsizliğin $k = 2$ katsayısı ile genişletilmesi ve %95 güvenilirlik düzeyine çekilmesi ile (5.6) bağıntısı kullanılarak elde edilmiştir.

Darbe gerilim bölücüsü, dijital kayıt cihazı ve ölçüm kablосundan oluşan yüksek gerilim laboratuvarı darbe gerilim ölçüm sisteminin anahtarlama darbe genlik büyüklüğü için genişletilmiş belirsizliği %95 güvenilirlik düzeyi ($k = 2$) için $U_s = \pm\%0,9$ olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.8 Anahtarlama Darbe Genlik Büyüklüğü Belirsizlik Bütçesi

Belirsizlik Kaynağı	Belirsizlik Bileşenleri u_i (%)	Dağılım
Sistemin çevirme oranından kaynaklanan belirsizlik	$u_{ST} = \pm 0,012$	Normal ($k = 1$)
Sıcaklık etkisinden kaynaklanan belirsizlik	$u_{LS} = \pm 0,48$	Dikdörtgen ($k = \sqrt{3}$)
Dijital ölçü cihazının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik	$U_{LC} = \pm 0,0008$	Dikdörtgen ($k = \sqrt{3}$)
Referans ölçüm sisteminin genlik büyüklüğü belirsizliği	$u_{LR} = \pm 0,6$	Normal ($k = 2$)
Kısa dönem kararlılığı	$u_{SK} = \pm 0,24$	Dikdörtgen ($k = \sqrt{3}$)
Bileşik belirsizlik	$u_s = \pm 0,43$	$k = 1$
Geniştirilmiş belirsizlik	$U_s = \pm 0,86$	$k = 2$

5.3.2 Zaman Büyüklüğünün Belirsizliği

Darbe ölçüm sisteminin anahtarlama darbe zaman büyüklüklerinin belirsizliğinde kullanılan belirsizlik bileşenleri; T1, T2 ve Td zaman büyüklüklerin ölçümündeki belirsizlik, dijital ölçüm cihazının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik ve referans darbe ölçüm sisteminin zaman büyüklüğünün belirsizliğidir. UME Yüksek Gerilim laboratuvarının darbe gerilimi zaman büyüklüğünün belirsizliği $u_{TR} = \pm 1,5$ olarak Bölüm 5.2.2.3'te verilmiştir. Dijital ölçüm cihazının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik T1, T2 ve Td zaman büyüklükleri için ayrı olarak hesaplanır.

5.3.2.1 T1, T2 ve Td Zaman Büyüklüklerinin Belirsizliği

Anahtarlama darbe geriliminin cephe süresi T1, gerilim dalgasının $0,9U_p$ üzerinde kaldığı süre Td ve sırt yarı değer süresi T2 dijital kayıt cihazı tarafından kayıt edilen

gerilim eğrisi üzerinde ölçülür. Anahtarlama darbe gerilimi zaman büyüklüklerinin belirsizliğinin elde edilmesi amacıyla, UME referans darbe gerilimi ölçüm sistemi ile karşılaştırmalı ölçümler yapılmıştır. Ölçümlerde kullanılan alet ve donanımlar Tablo 5.1’ de belirtilmiş ve deney düzeneği Şekil 5.3’te gösterilmiştir.

Her iki ölçüm sistemi paralel bağlanarak eş zamanlı ölçümler yapılmıştır. Darbe üretici tarafından üretilen $T1 = 125 \mu s$, $Td = 175 \mu s$ ve $T2 = 1950 \mu s$ zaman büyüklüklerinde toplam 10 adet anahtarlama darbe gerilimi dalga şekli her iki dijital kayıt cihazı tarafından kayıt edilmiştir. Ölçüm sonucunda elde edilen T1 değerleri ve bağıl hataları Tablo 5.9’da, Td değerleri ve bağıl hataları Tablo 5.10’da ve T2 değerleri ve bağıl hataları Tablo 5.11’de gösterilmektedir.

Tablo 5.9 Referans darbe gerilimi ölçüm sistemi ve laboratuvar darbe gerilimi ölçüm sistemi anahtarlama darbe gerilimi ölçüm sonuçları (T1)

Referans Ölçüm Değeri $T1_{ref} (\mu s)$	Ölçüm Sisteminde Ölçülen Değer $T1 (\mu s)$	Bağıl Hata $\delta T1 (\%)$
126,0	127	0,8
126,2	127	0,6
126,7	127	0,2
126,9	127	0,1
126,2	126	-0,2
124,1	125	0,7
124,1	125	0,7
124,1	124	-0,1
124,1	125	0,7
124,1	124	-0,1

Tablo 5.10 Referans darbe ölçüm sistemi ve laboratuvar darbe ölçüm sistemi anahtarlama darbe ölçüm sonuçları (Td)

Referans Ölçüm Değeri $T_{d_{ref}}$ (μs)	Ölçüm Sisteminde ölçülen değer Td (μs)	Bağıl Hata (δT_d) (%)
177,28	175	-1,29
175,99	177	0,57
174,24	178	2,16
175,83	175	-0,47
177,74	179	0,71
173,70	173	-0,40
173,41	175	0,92
174,10	172	-1,21
174,47	174	-0,27
173,10	177	2,25

Tablo 5.11 Referans darbe ölçüm sistemi ve laboratuvar darbe ölçüm sistemi anahtarlama darbe ölçüm sonuçları (T2)

Referans Ölçüm Değeri $T_{2_{ref}}$ (μs)	Ölçüm Sisteminde ölçülen değer T2 (μs)	Bağıl Hata (δT_2) (%)
1957,1	1960	0,15
1958,7	1963	0,22
1960,2	1967	0,35
1956,8	1963	0,32
1958,3	1963	0,24
1949,9	1955	0,26
1948,6	1951	0,12
1947,2	1950	0,14
1949,1	1954	0,25
1947,2	1952	0,25

Zaman büyüklüklerinin bağıl hataları δT_1 , δT_d ve δT_2 , (5.7) bağıntısı yardımıyla hesaplanmıştır.

Standart sapmalar, (5.8) bağıntısı yardımıyla $s_{T_{1S}} = \pm\%0,40$, $s_{T_{dS}} = \pm\%1,25$ ve $s_{T_{2S}} = \pm\%0,074$ olarak hesaplanır.

Belirsizlik değerleri standart sapmaya bağlı olarak, (5.9) bağıntısı yardımıyla $u_{T_{1S}} = \pm\%0,13$, $u_{T_{dS}} = \pm\%0,40$ ve $u_{T_{2S}} = \pm\%0,023$ olarak hesaplanır.

5.3.2.2 Dijital Kayıt Cihazının Çözünürlüğünden Kaynaklanan Belirsizlik

Yüksek gerilim laboratuvarında darbe gerilim eğrisi T_1 , T_d ve T_2 değerleri dijital kayıt cihazı tarafından ölçülüp kayıt edilmektedir. Son dijitin yarısının ölçülen zaman büyüklüğünün değerine bölümü belirsizlik bileşeni olarak değerlendirilmektedir. Dijital kayıt cihazının çözünürlüğü her üç zaman büyüklüğü için ayrı olarak ifade edilir. Dijital kayıt cihazının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik, T_1 zaman büyüklüğü için $u_{T_1} = \pm\%0,40$, T_d zaman büyüklüğü için $u_{T_d} = \pm\%0,29$ ve $u_{T_2} = \pm\%0,026$ olarak elde edilir.

5.3.2.3 Belirsizlik Bütçesi

Yüksek gerilim laboratuvarı darbe gerilimi ölçüm sisteminin anahtarlama darbe gerilimi zaman büyüklüğünün belirsizlik bileşenlerini, T_1 , T_d ve T_2 zaman büyüklüklerinin ölçümünden kaynaklanan belirsizlik ($u_{T_{1S}}$, $u_{T_{dS}}$ ve $u_{T_{2S}}$, normal dağılım ve $k = 1$), dijital kayıt cihazının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik (u_{T_1} , u_{T_d} ve u_{T_2} , dikdörtgen dağılım ve $k = \sqrt{3}$), referans ölçüm sisteminin zaman büyüklüğünün belirsizliği (u_{TR} , normal dağılım ve $k = 2$) oluşturmaktadır. Anahtarlama darbe gerilimi zaman büyüklüğünün bileşik belirsizliği u_{TS} , tüm belirsizlik bileşenleri $k = 1$ kapsam faktöründe normal dağılıma dönüştürüldükten sonra (5.5) bağıntısı kullanılarak elde edilmiştir.

Belirsizlik bütçesi Tablo 5.12’de verilmiştir. Genişletilmiş belirsizlik U_{TS} , $k = 1$ kapsam faktöründe hesaplanan bileşik belirsizliğin $k = 2$ katsayısı ile genişletilmesi ve %95 güvenilirlik düzeyine çekilmesi ile (5.6) bağıntısı kullanılarak elde edilmiştir. Yüksek Gerilim Laboratuvarı darbe gerilim ölçüm sisteminin anahtarlama darbe

gerilimi zaman büyüklüğü genişletilmiş belirsizliği %95 güvenilirlik düzeyi ($k = 2$) için $U_{TS} = \pm\%1,8$ olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.12 Anahtarlama darbe gerilimi zaman büyüklüğü belirsizlik bütçesi

Belirsizlik Kaynağı	Belirsizlik Bileşenleri u_i (%)	Dağılım
T1 zaman büyüklüğünün ölçümünden kaynaklanan belirsizlik	$u_{T1S} = \pm\%0,13$	Normal ($k = 1$)
Td zaman büyüklüğünün ölçümünden kaynaklanan belirsizlik	$u_{TdS} = \pm\%0,40$	Normal ($k = 1$)
T2 zaman büyüklüğünün ölçümünden kaynaklanan belirsizlik	$u_{T2S} = \pm\%0,023$	Normal ($k = 1$)
T1 zaman büyüklüğünün ölçümünde dijital kayıt cihazının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik	$u_{T1} = \pm\%0,40$	Dikdörtgen ($k = \sqrt{3}$)
Td zaman büyüklüğünün ölçümünde dijital kayıt cihazının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik	$u_{Td} = \pm\%0,29$	Dikdörtgen ($k = \sqrt{3}$)
T2 zaman büyüklüğünün ölçümünde dijital kayıt cihazının çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik	$u_{T2} = \pm\%0,026$	Dikdörtgen ($k = \sqrt{3}$)
Referans ölçüm sisteminin genlik büyüklüğü belirsizliği	$u_{TR} = \pm\%1,5$	Normal ($k = 2$)
Bileşik belirsizlik	$u_{TS} = \pm\%0,91$	$k = 1$
Genişletilmiş belirsizlik	$U_{TS} = \pm\%1,82$	$k = 2$

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada bir Yüksek Gerilim Laboratuvarının alternatif gerilim ve darbe gerilimi ölçmeleri için ölçüm belirsizliği çıkarılmıştır. Bu amaçla ölçüm sisteminin alternatif gerilim ve darbe gerilimi belirsizlik bileşenleri belirlenmiş, referans bir ölçüm sistemi ile karşılaştırmalı ölçümler yapılmış ve belirsizlik bütçeleri oluşturulmuştur.

Laboratuvar alternatif gerilim ölçüm sistemi ve UME referans ölçüm sistemi paralel bağlanarak eşzamanlı ölçümler yapılmıştır. Bu ölçüm sonuçları ve diğer belirsizlik bileşenleri kullanılarak alternatif gerilim ölçüm sisteminin gerilimin tepe değerini ölçmedeki belirsizliği elde edilmiştir.

Darbe gerilimi ölçüm sistemi ile UME referans ölçüm sistemi ile paralel bağlanarak darbe gerilimleri ölçülmüştür. Bu ölçüm sonuçları ve diğer belirsizlik bileşenleri kullanılarak yıldırım darbe ve anahtarlama darbe ölçmeleri genlik ve zaman büyüklüklerinin belirsizlikleri hesaplanmıştır.

Bu çalışma sonucunda; Yüksek Gerilim Laboratuvarı alternatif gerilim ölçüm sisteminin belirsizliği $U_A = \pm 0,4\%$; darbe gerilimi ölçüm sisteminin yıldırım darbe gerilimi genlik büyüklüğü belirsizliği $U_L = \pm 0,8\%$ ve zaman büyüklükleri belirsizliği $U_{TL} = \pm 1,7\%$; darbe gerilimi ölçüm sisteminin anahtarlama darbe gerilimi genlik büyüklüğü belirsizliği $U_S = \pm 0,9\%$ ve zaman büyüklükleri belirsizliği $U_{TS} = \pm 1,8\%$ olarak %95 güvenilirlik düzeyi ($k = 2$) için belirlenmiştir.

BS EN 60060-2: 1994 standardında bir ölçüm sisteminin kabul edilebilir bir ölçüm sistemi olabilmesi koşulları belirtilmiştir. Bu çalışmada incelenen Yüksek Gerilim Laboratuvarı, bu standartta belirtilen alternatif gerilim ölçüm sisteminin ölçüm belirsizliğinin $\pm 3\%$, darbe gerilimi ölçüm sisteminin yıldırım ve

anahtarlama gerilimleri genlik büyüklüğü belirsizliğinin $\pm \%3$ ve zaman büyüklüğü belirsizliğinin $\pm \%10$ olması koşullarını sağladığı belirlenmiştir.

Referans Ölçüm Sisteminin belirsizliği, Yüksek Gerilim Laboratuvarının ölçüm belirsizliğine en baskın etkiyi yaptığı görülmüştür. Belirsizliği daha düşük olan referans bir ölçüm sistemi ile yapılacak ölçümler, Yüksek Gerilim Laboratuvarının belirsizliğini de düşürecektir. Ölçümlerde daha yüksek çözünürlüğe sahip ölçü cihazlarının kullanılması ve sistemin çevirme oranının sıcaklıktan etkilenmesi nedeniyle laboratuvar ortam sıcaklığının değişiminin en aza indirilmesi toplam belirsizliği azaltacak yönde etki yapacaktır.

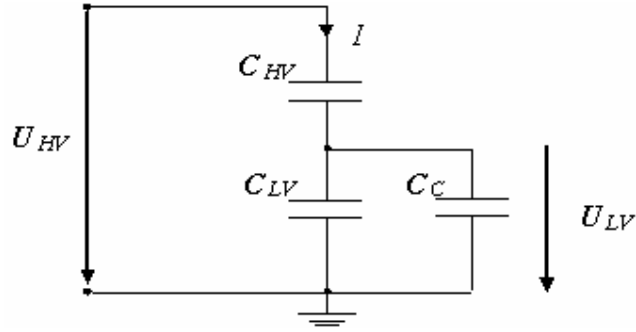
KAYNAKLAR

- [1] **ISO**, 1993. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ISO Tech.
- [2] **EA**, 1999. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, European co-operation for Accreditation.
- [3] **Pastacı, H.**, 2003. Elektrik ve Elektronik Ölçmeleri, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- [4] **BIPM**, 1998. The International System of Units (SI), *Organization Intergouvernementale de la Convention du Metre*, Paris.
- [5] **Kuffel, E. and Abdullah, M.**, (Çev.: Özkaya, M., Tüfekçi, T. ve Ergan, N.) 1986. Yüksek Gerilim Tekniği, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.
- [6] **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.
- [7] **Merev, A.**, 2006. Yüksek Doğruluğa Sahip 100 kV Yüksek Doğru Gerilim Bölücüsü, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul..
- [8] **Ryan, H.M.**, 1994. High Voltage Engineering and Testing, Peter Peregrinus Ltd, Institute of Electrical Engineers, Londra, İngiltere.
- [9] **IEC 60060-1**, 1989. High-Voltage Test Techniques, Part 1: General Definitions and Test Requirements, International Electrotechnical Commission
- [10] **IEC 60060-2**, 1994. High-Voltage Test Techniques, Part 2: Measuring Systems, International Electrotechnical Commission.
- [11] **BS EN ISO/IEC 17025**, 2005. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, International Electrotechnical Commission.

- [12] **Haushild, W., Shon, K., Sklenicka, V., Popa, D.,** 1996. High Voltage Measurements and Calibration, ERA Technical Report, 96-0532, Milan.
- [13] **HIGHVOLT,** 2002. HV AC Series Resonant Test System WRM 1600/400, HIGHVOLT Prüftechnik, Dresden, Germany.
- [14] **IEC 60060-2 AMENDEMENT 1,** 1996. High-Voltage Test Techniques, Part:2 Measuring Systems, International Electrotechnical Commission.
- [15] **HIGHVOLT,** 2002. Impulse Voltage Test System IPL 100/1000 Msp, HIGHVOLT Prüftechnik, Dresden, Germany.
- [16] **IEEE Std 4,** 1995. IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing, IEEE Standards.
- [17] **JAB,** 2003. Estimation of Measurement Uncertainty, Electrical Testing / High Voltage Testing, The Japan Accreditation Board for Conformity Assessment, Japan.

**EK A KAPASİTİF ÖLÇME SİSTEMİNİN TEORİK ÇEVİRME ORANININ
HESABI**

Kapasitif ölçme sisteminin temel devre şeması Şekil A.1’de gösterilmektedir.



Şekil A.1 Kapasitif ölçme sisteminin temel devre şeması

$$X_{HV} = \frac{1}{\omega C_{HV}} \quad (\text{A.1})$$

$$X_{LV} = \frac{1}{\omega(C_{LV} + C_C)} \quad (\text{A.2})$$

$$I = \frac{U_{HV}}{X_{HV} + X_{LV}} \quad (\text{A.3})$$

bağıntıları yardımıyla, kapasitif ölçme sisteminin çevirme oranı F

$$U_{LV} = X_{LV} \times I = \frac{1}{\omega(C_{LV} + C_C)} \times \frac{U_{HV}}{\frac{1}{\omega C_{HV}} + \frac{1}{\omega(C_{LV} + C_C)}}$$

$$F = \frac{U_{HV}}{U_{LV}} = \frac{C_{HV} + C_{LV} + C_C}{C_{HV}} \quad (\text{A.4})$$

olarak elde edilir.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Ünal, 1975 yılında Almanya-Ingolstadt’da doğdu. İlköğrenimini Sinop Gerze Gazi Mustafa Kemal İlkokulu, orta ve lise öğrenimini Sinop Gerze Lisesi’nde tamamladı. 1993 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nde başladığı lisans eğitimini 1997 yılında tamamladı ve aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Programında yüksek lisans yapmaya hak kazandı. Halen AREVA T&D Yüksek Gerilim Laboratuvarında Test Mühendisi olarak görev yapmaktadır.