

84312

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ\*FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**10 V JOSEPHSON DİZİSİ GERİLİM STANDARDI VE  
KARŞILAŞTIRMA ÖLÇÜMLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Saliha SELÇİK**

**Anabilim Dalı: Elektronik Haberleşme Mühendisliği**

**Danışman: Doç. Dr. Hüseyin UĞUR**

**TC. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

84312

**Haziran 1999**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ\*FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**10 V JOSEPHSON DİZİSİ GERİLİM STANDARDI VE  
KARŞILAŞTIRMA ÖLÇÜMLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Saliha SELÇİK**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15 Haziran 1999**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 10 Ağustos 1999**

**Tez Danışmanı**


**Üye**

**Üye**

**Doç.Dr. Hüseyin UĞUR**

**Prof.Dr. Oruç BİLGİÇ**

**Yrd.Doç.Dr. Şule KUŞDOĞAN**

(.....)

(.....)

(.....)

**Haziran 1999**

# 10V JOSEPHSON DİZİSİ GERİLİM STANDARDI VE KARŞILAŞTIRMA ÖLÇÜMLERİ

Saliha SELÇİK

**Anahtar Kelimeler:** Josephson Dizisi Gerilim Standardı, Josephson Etkisi, Josephson Gerilim Adımı, Karşılaştırma Ölçümleri, DC Gerilim Standardı

**Özet:** Metroloji ölçüm bilimi olup, ölçüm ile ilgili her tür tasarım, kalibrasyon, test sonuçların analizi metroloji içinde yer alan faaliyetlerdendir. Uluslararası Birimler Sistemi-SI, değişmez ve sabit birimlere duyulan ihtiyacı karşılayarak, temel oluşturmak üzere oluşturulmuş bir sistemdir. SI sistemi içinde önemli ve çok kullanılan elektriksel birimlerinden biri de, gerilim birimi olan “Volt”tur. SI Volt, amper ve mekaniksel birim olan watt üzerinden tanımlanmaktadır. Ancak, son yıllarda, gerilim birimi, frekans-gerilim çevirici olarak tanımlanabilen süperiletken Josephson eklemi ile elde edilmektedir. Josephson eklem dizisi gerilim standartları bugün birincil seviyede gerilim standardı olarak kabul görmekte ve kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Volt’un gerçekleştirilmesinde kullanılan standartlar ve ulusal birimlerin oluşturulması ve muhafazası ile görevli TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü’nde gerilim birimi “Volt”un gerçekleştirilmesinde kullanılan 10V Josephson Eklem Dizisi Gerilim Standardının (JEDGS) çalışma prensibi, standardın temel bölümleri, çalıştırılma prosedürü anlatılmakta ve bu sistemin karakterizasyonu ile yapılan uluslararası karşılaştırma ölçümlerinin sonuç ve analizleri sunulmaktadır. UME 10V Josephson Dizisi Gerilim Standardı, gerilim birimini fiziksel sabitlere bağlı olarak gerçekleştirmesine rağmen, diğer ülkelerin JEDGS’lerinde da olduğu gibi, diziyi çevreleyen sistemin sebep olduğu bir belirsizlik mevcuttur. Bu belirsizlik değerinin hesaplanması ve Volt’un tekrar gerçekleştirilebilme güvenilirliğinin belirlenmesi amacıyla, metroloji hiyerarşisinin en tepe noktasında bulunan BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) ile karşılaştırma ölçümleri gerçekleştirmiş olan Fransa’nın ulusal metroloji Enstitüsü-BNM/LCIE’nin Josephson Eklem Dizisi Gerilim Standardı ile karşılaştırma ölçümleri yapılmıştır. Karşılaştırma ölçümleri, 4 adet zener-diyot yapılı DC gerilim standardının transfer standardı olarak kullanılması suretiyle gerçekleştirilmiştir. Zener diyot yapılı gerilim standartlarının değerlerinde zamanla değişim gözlemlendiğinden, ölçümler 5 haftalık zaman zarfında gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde standartların değerlerindeki kaymalar belirlenerek ölçüm sonuçları analiz edilmiştir. Standartlar ilk olarak UME laboratuvarında UME Josephson Eklem Dizisi Gerilim Standardı ile ölçülmüş, daha sonra BNM/LCIE’ götürülerek, Fransa’nın gerilim standardı ile karşılaştırılmıştır. Bir hafta süresince gerçekleştirilen ölçümler sonrasında standartlar tekrar UME Gerilim Laboratuvarına getirilmiş, ve bir hafta boyunca tekrar ölçülmüştür. Karşılaştırma ölçümlerinin sonuçları, iki ülke standardı ile gerçekleştirilen ölçümlerin güvenilirliğini kanıtlamış ve iki sistem arasındaki farkı belirlemiştir.

# 10V JOSEPHSON ARRAY VOLTAGE STANDARD AND AN INTERCOMPARISON MEASUREMENT

**Saliha SELÇİK**

**Key words:** Josephson Array Voltage Standard, Josephson Effect, Josephson Voltage Step, Intercomparison, DC Voltage Standard

**Abstract:** Metrology is the science of measurement. Everything related to measurement such as designing, calibration, analyzing the results of a test exists within the metrology realm. The International System of Units, abbreviated SI, has been developed to meet the need in order to have a uniform and consistent set of units. One of the most important and widely used of these units is the Volt. SI Volt is defined in terms of Ampere and Watt, which is mechanical unit. Recently, the Volt has been realized by superconducting Josephson Junction which can be defined as a frequency to voltage converter. Josephson Junction Array Voltage Standards are used as primary voltage standards. The theory of 10V Josephson Array Voltage Standard which is used for realization of the voltage unit “Volt” in TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü-UME (National Metrology Institute) which is responsible for establishment and maintenance of national units, is explained, the main parts of the standard and operating procedure are described and the result of the intercomparison measurements and methods used to analyze the results are given. Although 10V Josephson Array Voltage Standard of UME realizes the voltage unit related to the fundamental constants, it has uncertainty components due to the system surrounding the array. In order to estimate the uncertainty of the system and to determine the reliability of the reproducibility of Volt realization, intercomparison measurements of Josephson Array Voltage Standards have been performed with standard of BNM/LCIE (Bureau International des Poids et Mesures-France), which was intercompared with top point of metrology hierarchy-BIPM (Bureau International des Poids et Mesures). The intercomparison was performed by using 4 zener diode based DC Voltage Standards as transfer standard. Since the output of a zener diode based voltage standard drifts with time, the comparison measurements have been performed in 5 weeks period. So, the measurement results have been analyzed by considering the drifts of the transfer standards. Preliminary measurements have been performed at UME. Then, they have been hand carried to BNM/LCIE and compared to national voltage standard of France. After performing measurements for five-days in France, the standards have been hand carried back to UME Voltage Laboratory and measured during the following week. The result shows a good agreement in sense of reliability and accuracy between two national Josephson Voltage Standards.

## ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Ölçüm bilimi olarak kısaca tanımlanabilen metrolojinin önemi ve gerekliliği pek çoğumuz tarafından fark edilemese de aslında günlük yaşamamızda bile doğrudan etkisini görmemiz mümkündür. Örneğin, pek çok insan evlerindeki ve işyerlerindeki saatlerin aynı zamanı gösterdiğini kabul ederek planlarını yaparlar. Pazardan aldığımız 1 kilo meyve için ödediğimiz para karşılığında gerçekten 1 kilo meyve satın aldığımız düşünürüz. Evlerimizdeki elektrik ve su sayaçlarının doğru değerler ölçtüğünü ve harcadığımız miktar için ödeme yaptığımızı inanırız. Sürücüler, arabalarındaki hız göstergelerine güvenerek yasal hız limitlerine uyarlar. Verilen örnekleri biraz daha büyütürsek; zamanlama hatasının tren ve uçak kalkış-inişlerinde doğuracağı sonuçları veya tartım hatasının bir ilaç fabrikasında sebep olacağı sonuçları düşündüğümüzde, doğru ölçümler, dolayısıyla metroloji olmaksızın hayatın ne kadar karışık ve tehlikeli olacağı ortaya çıkmaktadır.

Elektriksel ölçümlerden gerilim ölçümleri de metrolojinin önemli bir kolu olup DC ve düşük frekans ölçümlerinin de anahtar birimidir. Gerilim birimi Volt'un tanımı gereği elektriksel gücün güç dengesi üzerinden mekanik güç ile karşılaştırılması ile gerçekleştirilir. Ancak yüksek değerdeki belirsizlikten dolayı Volt, tanımından farklı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilir. Bugün Volt'un gerçekleştirilmesindeki en yüksek doğruluk, Josephson Eklem Dizisi Gerilim Standardı kullanılarak elde edilmektedir.

Ülkemizde ulusal Volt, Eylül 1997 yılından beri, Ulusal Metroloji Enstitüsü-UME Gerilim Laboratuvarında mevcut bulunan bu standart üzerinden elde edilmektedir.

UME ile BNM/LCIE (Fransa) Josephson Eklem Dizisi Gerilim Standartlarının karşılaştırmasını anlatan bu çalışma, aynı zamanda UME 10 Volt Josephson Eklem Dizisi Gerilim Standardı'nın tanınması, çalıştırılması ve bu standart kullanılarak elektronik DC gerilim standardı kalibrasyonunun gerçekleştirilebilmesinde referans kaynak olması amacıyla hazırlanmıştır. Tezin bu açıdan kullanıcılara yararlı olmasını dilerim.

Bana bu konuda çalışma imkanı sağlayan ve desteğini eksik etmeyen sayın Doç. Dr. Hüseyin UĞUR'a (UME), UME Josephson Eklem Dizisi Gerilim Standardını oluşturan ve tez çalışmalarımda yardım ve desteğini eksik etmeyen sayın Dr. Peter GUTMANN'a (PTB), frekans ölçümlerindeki bilgi ve deneyimi ile standardın faz-kilitleme modülünün tanınmasında yardımcı olan sayın Dr. Ramiz Gamidov ve Mustafa Çetintaş'a (UME Zaman ve Frekans Lab.), karşılaştırma ölçümlerini gerçekleştirmemde ve sistemin çalıştırılmasında yardımcı olan çalışma arkadaşım Okan YILMAZ'a (UME Gerilim Lab.) ve manevi desteklerini eksik etmeyen ailem ve sevgili arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 1999, İSTANBUL

Saliha SELÇİK

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	ii
ABSTRACT .....	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
TABLolar DİZİNİ .....	xii
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. DC GERİLİM STANDARTLARI.....	8
2.1. Weston Standart Pilleri .....	8
2.2. Elektronik DC Gerilim Standartları .....	10
BÖLÜM 3. JOSEPHSON ETKİSİ ve JOSEPHSON EKLEMİ.....	12
3.1. Süperiletkenlik .....	12
3.2. Tek Parçacık Tünellemesi.....	14
3.3. Josephson Etkisi ve Josephson Eklemi .....	16
3.4. Josephson Eklemının Metrolojide Kullanımı .....	20
BÖLÜM 4. UME 10V JOSEPHSON EKLEM DİZİSİ GERİLİM STANDARDI..	24
4.1. Josephson Eklem Dizisi Entegrasyonu .....	27
4.2. Prob .....	29
4.3 Referans Frekans Standardı ve Faz Kilitleme Modülü .....	35
4.4. Fark Ölçen Voltmetre.....	38
4.5. Josephson Gerilim Adımını Belirleyen Multimetre.....	41
4.6. DC Kaynak.....	41
4.7. Anahtar.....	41
4.8. Sıvı Helyum Tankı.....	43

BÖLÜM 5. UME JEDGS İLE DC GERİLİM STANDARDI KALİBRASYONU.....	44
5.1. Karşılaştırma Yöntemi .....	45
5.2. DC Gerilim Standardı Kalibrasyonu.....	49
BÖLÜM 6. UME-BNM/LCIE 10V JEDGS KARŞILAŞTIRMA ÖLÇÜMLERİ.....	52
6.1. UME Josephson Gerilim Standardı.....	53
6.2. BNM/LCIE Josephson Gerilim Standardı .....	53
6.3. Karşılaştırma .....	54
6.4. Ölçüm Sonuçlarının Analizi.....	54
6.5. Belirsizlikler.....	55
6.6. Karşılaştırma Sonuçları.....	57
SONUÇLAR .....	62
KAYNAKLAR.....	65
EKLER .....	67
EK A. UME JEDGS ÇALIŞTIRILMA PROSEDÜRÜ.....	67
EK B. Josephson Gerilim Standardı Kullanılarak DC Gerilim Standardının Değerinin Hesaplanması.....	84
EK C. EUROMET PROJESİ 469 .....	87
EK D. UME'de Gerçekleştirilen Karşılaştırma Ölçümlerinin Dataları .....	88
EK E. BNM/LCIE'de Gerçekleştirilen Karşılaştırma Ölçümlerinin Dataları .....	94
EK F. Doğrusal En Küçük Kare Uydurma Yöntemi.....	102
EK G. Ölçümlerde Belirsizlik .....	108
EK H. Ağırlıklı Ortalama.....	113
ÖZGEÇMİŞ.....	114

## SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR

BIPM	: Bureau International des Poids et Mesures (Uluslararası Metroloji Merkezi)
BNM/LCIE	: Bureau National de Métrologie-Laboratoire Central des Industries Electriques (Fransa Metroloji Enstitüsü)
CIPM	: Comité International des Poids et Mesures (Uluslararası Metroloji Yönetim Komitesi)
Cu	: Bakır
D.E.K.K.U.Y.	: Doğrusal en küçük kare uydurma yöntemi
DMM	: Sayısal multimetre
DVM	: Sayısal voltmetre
e	: Elektron yükü ( $1.6 \times 10^{19}$ C)
EUROMET	: A European Collaboration on Measurement Standards (Avrupa Metroloji Enstitüleri Birliği)
f	: Frekans
h	: Planck sabiti ( $6.6 \times 10^{-34}$ Js)
He	: Helyum
I	: Akım
$I_c$	: Eklem kritik akımı
JAVS	: Josephson Array Voltage Standard
JEDGS	: Josephson Eklem Dizisi Gerilim Standardı
$K_{J-90}$	: Josephson sabiti (483 597.9 GHz/V)
Lab.	: Laboratuvar
n	: Gerilim adımı sayısı
PLL	: Phase Lock Loop
PTB	: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Alman Metroloji Enstitüsü)
$\bar{q}$	: q rastgele değişkeninin n bağımsız ölçümünün ortalaması
$q_w$	: q rastgele değişkeninin n ölçümünün ağırlıklı ortalama değeri



$s^2(q_k)$	: Deneysel varyans
$s(\bar{q})$	: Gözlem ortalamasının varyansı
SI	: Systéme International d'Unités
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu
$u_A$	: A tipi belirsizlik bileşeni
$u_{A+B}$	: Bileşik belirsizlik
$u(x_i)$	: Standart belirsizlik
UME	: Ulusal Metroloji Enstitüsü
UUT	: Unit under test (Kalibre edilen cihaz)
$X_i$	: Girdi değeri
$x_i$	: Ölçülen değer (tahmini değer)
V	: Gerilim



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Volt için izlenebilirlik şeması.....	3
Şekil 1.2.	Mekanik birimler üzerinden elektriksel temel birim olan Amper'in elde edilişi .....	4
Şekil 2.1.	Doymuş Weston pilinin yapısı .....	8
Şekil 3.1.	İletken, yalıtkan, ve yarıiletkenlerde enerji bant şemaları.....	12
Şekil 3.2.	Cıvanın mutlak sıcaklıktaki direnç değişimi .....	13
Şekil 3.3.	Sabit bir dış manyetik alanda soğutulan süperiletken bir kürede Meissner etkisi.....	14
Şekil 3.4.	Normal metal-yalıtkan-normal metal eklemünde doğrusal akım-gerilim grafiği.....	15
Şekil 3.5.	Süperiletken-yalıtkan-normal metal eklemünde doğrusal akım-gerilim grafiği.....	15
Şekil 3.6.	DC Josephson etkisi .....	17
Şekil 3.7.	Josephson eklemünde oluşan sabit gerilim adımları (Shapiro adımları)..	19
Şekil 3.8.	Çeşitli zayıf eklem tipleri a) Nokta teması b) mikroköprü c) Josephson eklemleri .....	20
Şekil 3.9.	Josephson gerilim standardı sistemi blok diyagramı.....	23
Şekil 4.1	UME 10 Volt Josephson Eklem Dizisi Gerilim Standardı .....	25
Şekil 4.2.	UME JEDGS'ının blok şeması.....	26
Şekil 4.3.	Josephson eklem dizisi entegresi.....	28
Şekil 4.4.	Josephson dizisinin sıvı helyum içinde soğutulmasında kullanılan prob	30
Şekil 4.5.	Prob içinde kullanılan dalga kılavuzu tipleri.....	29
Şekil 4.6.	Josephson eklem dizisinin sisteme bağlantı konfigürasyonu.....	31

Şekil 4.7. Josephson eklem dizisinin sisteme bağlantı şeması.....	32
Şekil 4.8. UME JEDGS’ında kullanılan PTB yapımı prob .....	33
Şekil 4.9. UME JEDGS’ında kullanılan Josephson eklem dizisinin proba bağlantısı.....	34
Şekil 4.10. UME JEDGS faz kilitleme sistemi.....	37
Şekil 4.11. HP 3458A DMM, Keithley 181 nanovoltmetre ve Keithley 182 hassas sayısal voltmetrelerin kararlılık ölçümleri.....	39
Şekil 4.12. Termal emf ölçümleri.....	42
Şekil 5.1. DC gerilim standardının UME JEDGS ile kalibrasyonu .....	44
Şekil 5.2. Pozitif polaritede alınan ölçümler için anahtarın konfigürasyonu ve sistemin bağlantı şeması .....	47
Şekil 5.3. Negatif polaritede alınan ölçümler için anahtarın konfigürasyonu ve sistemin bağlantı şeması .....	48
Şekil 6.1. DC gerilim standardı kalibrasyonunda “lead” ve “leakage” dirençleri...	56
Şekil 6.2. 5610110 seri numaralı Fluke 732B’nin UME ve BNM/LCIE’de gerçekleştirilen ölçüm sonuçları.....	58
Şekil 6.3. 5610210 seri numaralı Fluke 732B’nin UME ve BNM/LCIE’de gerçekleştirilen ölçüm sonuçları.....	59
Şekil 6.4. 5610310 seri numaralı Fluke 732B’nin UME ve BNM/LCIE’de gerçekleştirilen ölçüm sonuçları.....	60
Şekil 6.5. 5610410 seri numaralı Fluke 732B’nin UME ve BNM/LCIE’de gerçekleştirilen ölçüm sonuçları.....	61
Şekil A.1. a) Josephson dizisini ölçüm sistemine bağlayan konektör b) Josephson dizisini ana sisteme bağlayan konektör .....	67
Şekil A.2. Probun sıvı helyum içine daldırılışı.....	68
Şekil A.3. Mikrodalga gücün uygulanmadığı durumda normal I-V karakteristiği ..	69
Şekil A.4. I-V karakteristiğinde manyetik akıların oluşturduğu bozulma.....	69

Şekil A.5. UME Josephson Eklem Dizisinin sisteme bağlantısı .....	71
Şekil A.6. Kritik akımın belirlenmesi.....	73
Şekil A.7. Josephson eklem dizisinin DC karakteristiği .....	74
Şekil A.8. a) Düşük rf b) Orta rf c) Yüksek rf güç seviyelerinde Josephson dizisi I-V karakteristikleri .....	75
Şekil A.9. Yüksek güçte I-V grafiği.....	76
Şekil A.10. Düşük güçte I-V grafiği.....	76
Şekil A.11. İdeal I-V karakteristiği .....	76
Şekil A.12. Osiloskop ekranında görülen Josephson gerilim adımı .....	78
Şekil F.1. Doğrusal en küçük kare uydurma yöntemi ile oluşturulan doğru .....	103
Şekil F.2. $P_2$ noktasının ve diğer noktaların doğruya uzaklığı.....	104
Şekil G.1. Belirsizliği kapsadığı aralık.....	109

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 4.1. UME JEDGS'ında kullanılan 10V Josephson eklem dizisi entegresine ait özellikler .....	27
Tablo 4.2. UME JEDGS'ında kullanılan He tanklarına ait teknik özellikler .....	43
Tablo 6.1. Fluke 732B DC Gerilim Standartlarının ölçüm sonuçları ve $1\sigma$ seviyesindeki A tipi belirsizlikleri.....	55
Tablo 6.2. UME ve BNM/LCIE JEDGS'larının B tipi belirsizlikleri .....	56



## 1. GİRİŞ

Teknolojinin baş döndürücü bir hızla geliştiği günümüzde, bilimsel araştırma, sanayi, ticaret, ulusal savunma, sağlık gibi alanlarda yapılan çalışmaların başarıyla sonuçlandırılması için hassas, güvenilir ve doğru ölçümlere ihtiyaç duyulduğu tartışılmaz bir gerçektir. Bu nedenle, ölçüm bilimi, metroloji, günümüz toplumunda önemli bir rol oynamaktadır.

Bugün toplumun hemen her kesiminin sahip olmayı olağan saydığı telefonda televizyona, ütüden buzdolabına kadar çeşitli elektrikli ürünlerin ekonomik olabilmelerini sağlayan seri üretim, bu ürünleri oluşturan yüzlerce parçanın hassas olarak aynı karakterde yapılabilmesinin sonucudur. Bunun yanısıra giderek artan uluslararası işbölümü, bir ürünü oluşturan parçaların değişik ülkelerde üretilip daha sonra birleştirilmesini kaçınılmaz kılmıştır. Dolayısıyla, ürün kontrolü için ölçülen parametrelerin benzer koşullarda aynı sonuçları vermesi gerekmektedir. Bu ise boyutların, sıcaklığın, ağırlığın, gücün, empedansın, akımın, basıncın ve çeşitli malzeme karakteristiklerinin doğru olarak ölçülebilmesiyle sağlanmaktadır.

Uluslararası alanda ölçüm birliğine duyulan ihtiyaç, 1860'lı yıllarda gelişen uluslararası ticaret ile kendini göstermiştir. Aralarında Osmanlı İmparatorluğu'nun da bulunduğu 17 ülke temsilcisi bu amaçla 1875 yılında biraraya gelerek Metre Konvansiyonu'nu (The convention du Mètre) oluşturmuştur. Konvansiyon tarafından uluslararası standartları oluşturmak, muhafaza etmek ve doğruluklarını yayarak uluslararası karşılaştırmalarda merkez olması amacıyla BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) kurulmuştur. BIPM faaliyetleri, Uluslararası Metroloji Yönetim Komitesi (CIPM-Comité International des Poids et Mesures) tarafından idare edilmektedir. CIPM altında dünya çapında alanlarında uzman kişilerin bir araya geldiği 9 komite yer almaktadır. Bu komitelerin görevleri, BIPM laboratuvarlarında gerçekleştirilen bilimsel faaliyetler konusunda CIPM'e bilgi sunmak, uluslararası karşılaştırma ölçümlerini teşvik etmek ve gerekli konuları CIPM gündeminde

tartışmaya sunmaktır. Elektriksel ölçümlerden sorumlu komite Comité Consultatif d'Electricité (CCE)'dir.

Ölçümlerde uluslararası seviyede ölçü birliğine entegrasyon, ölçümlerin temelini oluşturan standartların her ülkenin ulusal metroloji enstitülerinde oluşturularak muhafaza edilmesi ve uluslararası karşılaştırmalarla uluslararası standartlar ile aralarındaki farkların gözlemlenmesi ile sağlanır.

Metroloji enstitülerinde muhafaza edilen ve zamanla değişimleri yılda “milyonda bir”ler derecesinde olan gerilim standartlarının doğrulukları tüm ölçme ve test cihazlarına “kalibrasyon” aracılığıyla aktarılmaktadır. Ancak bu şekilde üreticilere aktarılan doğruluk düzeyi durağan değildir. Düzenli aralıklarla da kontrol edilmelidir. Böylelikle, daha üretim safhasındaki ürünün gelecekteki kalitesini garanti altına alabilmek mümkün olabilmektedir.

Uluslararası Birimler Sistemi-SI (Système International d'Unités), değişmez ve sabit birimlere duyulan ihtiyacı karşılayarak, uluslararası platformda temel oluşturmak üzere oluşturulmuş bir sistemdir. SI sistemi içinde elektriksel temel birim, kütle birimine bağlı olarak kolay elde edilebilirliğinden dolayı Amper olarak belirlenmiş ve bu şekilde elektriksel birimler ile o tarihlerdeki doğruluğu elektriksel birimlerden daha iyi olan mekanik birimler arasında ilişkilendirme sağlanmıştır. Gerilim birimi “Volt” da sistem içinde önemli ve çok kullanılan elektriksel birimlerden biridir. SI Volt, amper ve mekaniksel birim olan watt üzerinden elde edilmektedir (Şekil 1.1).

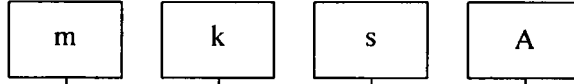
“Amper”, vakum ortam içinde, birbirinden 1 m uzakta, ihmal edilebilir kesitli, sonsuz uzunluktaki iki paralel iletkenin, aralarında  $2 \times 10^{-7}$  Newton/m kuvvet oluşması durumunda geçen sabit akım olarak tanımlanır. Bu şekilde, SI, mekanik ve elektriksel birimleri, amper üzerinden ilişkilendirmektedir.

Amper'in tanımına uygun olarak elde edilmesinin güç oluşunun yanısıra, mekanik birimlere bağlı oluşu, elde edilen belirsizlik değerinin  $15 \times 10^{-6}$ 'lar mertebesinde olmasına sebep olmaktadır. Yüksek belirsizlik değerinin yanısıra, amper tanımı ile ancak en fazla birkaç dakika için sağlanabilmektedir. Şekil 1.2, amperin tanımına uygun gerçekleştirilmede kullanılan sistemi göstermektedir.

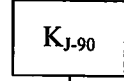
ULUSLARARASI METROLOJİ

Metre Kilogram Saniye Amper

SI Temel Birimleri

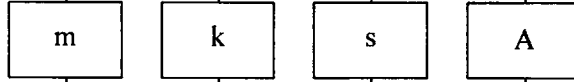


Josephson Sabiti

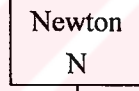


ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ

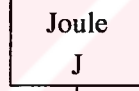
SI Temel Birimlerinin Gerçekleştirilmesi



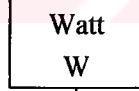
SI Türetilmiş Birimlerinin Gerçekleştirilmesi



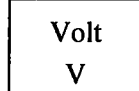
"



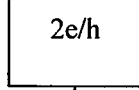
"



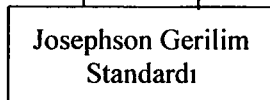
"



Josephson Katsayısı

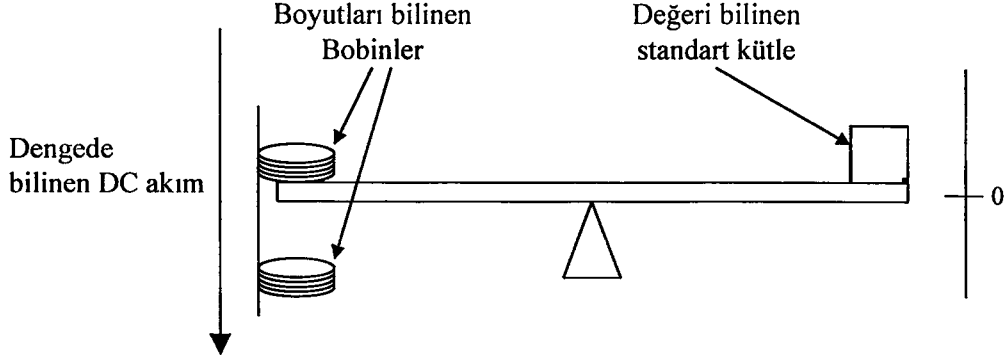


Ulusal Volt



Şekil 1.1 Volt için izlenebilirlik şeması.





**Şekil 1.2** Mekanik birimler üzerinden elektriksel temel birim olan Amper'in elde edilişi.

Terazinin solunda yer alan bobinlerdeki manyetik alan, akım ve sarım sayısı ile orantılı bir çekici kuvvet oluşturur. Oluşan kuvvet, terazinin diğer kolundaki kütle ile dengelenir. Kütle değeri kullanılarak iletken telden geçen akım değeri belirlenir.

Amper, SI temel birimi olmasına rağmen, elde edilişindeki güçlük ve yüksek belirsizlik değerinden dolayı bugün pek çok ulusal laboratuvarında tanımına uygun olarak elde edilmemektedir. Bunun yerine Ohm yasasına uygun olarak Josephson Eklem Dizisi Gerilim Standardı ile elde edilebilen yüksek doğrulukta gerilim ve Quantum Hall sistemi ile sağlanan direncin oranı (  $I=V/R$  ) alınarak elde edilmektedir.

Volt, SI sisteminde, sabit 1 Amper akım taşıyan iletken telin, 1 watt güç harcanan iki nokta arasındaki elektromotor kuvveti olarak tanımlanmaktadır. Bu tanıma göre Volt,

$$V = \frac{W}{A} \quad (1.1)$$

olarak formüle edilebilir. Denklemden W, watt cinsinden gücü, A ise amper cinsinden akımı temsil etmektedir.

$$1 \text{ Watt} = 1 \text{ Joule/sn}, \quad (1.2)$$

$$1 \text{ Joule}=1 \text{ Nt.m,} \quad (1.3)$$

$$1 \text{ Nt}=1 \text{ kg m/sn}^2 \quad (1.4)$$

olduğu dikkate alınarak, 1 Volt, temel SI birimleri cinsinden şu şekilde ifade edilir:

$$1 \text{ V} = \frac{1 \text{ kg.m}}{\text{sn}^2} \cdot \text{m} \cdot \frac{1}{\text{sn}} \cdot \frac{1}{\text{A}} = \text{kg m}^2 \text{ sn}^{-3} \text{ A}^{-1} \quad (1.5)$$

Görüldüğü gibi, türetilmiş bir SI birimi olan "Volt"un doğrudan temel SI birimleri cinsinden gerçekleştirilmesi, uzunluk, kuvvet ve güç mekanik birimlerine bağlı olduğundan dolayı oldukça güçtür. Üstelik, Volt'un tanımına uygun olarak gerçekleştirilmesi ile elde edilebilen en iyi belirsizlik olan  $0.4 \times 10^{-6}$  (ppm) değeri bile, gelişen teknolojinin ve bilim dünyasının yüksek kararlılık ve yüksek doğruluk gibi ihtiyaçlarını sağlamada yeterli kalmamaktadır. Bu durum, birimin tanımından farklı yöntemlerle gerçekleştirilmesi zorunluluğunu gündeme getirmiştir (Petley 1994).

Önceleri Volt, bir grup standart pilin-doymuş Weston pilleri-ortalama emf (elektro motor kuvveti) değeri ile elde edilmiştir (FLUKE Corporation 1994a). Ancak bu ortalama değer zamanla ve sıcaklık, nem, titreşim gibi ortam şartlarına bağlı olarak değişiminin saptanması ve bu özelliği ile laboratuvarlar arası izlenebilirliği aktarılmasında yaşanan problemler nedeniyle yeni arayışlar başlamıştır. Yarıiletken teknolojisinde yaşanan gelişmelere paralel olarak, gerilim birimi, yapısında bir zener diyot bulunan standartlar kullanılarak gerçekleştirilmeye başlanmıştır (FLUKE Corporation 1994b). Ancak, gelişen teknoloji ile daha iyi doğrulukta, kararlı ve tekrarlanabilir standartlara ihtiyaç duyulmuştur. 1962 yılında Brian Josephson tarafından keşfedilmiş olan AC Josephson etkisi, ölçme biliminde hızla kullanıma alınmıştır. Ancak, bu sistem ilk önceleri uzun yıllar e-elektron yükünün, h-Planck sabitine oranının ( $e/h$ ) belirlenmesinde kullanılmıştır (Finnegan, Denenstein ve Langenberg 1971).

Dünyanın çeşitli yerlerinde bu sistem ile gerçekleştirilen  $e/h$  oranı ölçümleri, referans alınan gerilim standartlarının değerleri arasındaki farklardan doğan büyük farklılıklar

göstermiştir. Bu durum, sistemin,  $e/h$  oranı sabit alınarak, gerilim biriminin gerçekleştirilmesinde kullanılmaya başlanması düşüncesini doğurmuştur.

Josephson etkisi kullanılarak gerçekleştirilen ilk gerilim ölçümlerinde de, ülkeler arasında kabul edilen  $e/h$  oranının farklılığından dolayı farklılık gözlenmiştir. Ancak bu sorun, uluslararası metroloji hiyerarşisinin en üst noktasında bulunan organizasyon olan CIPM tarafından  $2e/h$  oranının  $K_{J-90}$  -Josephson sabiti olarak;

$$K_{J-90}=483\,597.9\text{ GHz/V} \quad (1.6)$$

tanımlanmasıyla ortadan kaldırmıştır. 1989 yılında alınan ve 01.01.1990 tarihinde uygulanmaya başlanan bu kararla Volt, dünyanın çeşitli yerlerindeki metroloji laboratuvarlarında, oldukça yüksek tekrarlanabilirlikle, Josephson Eklem Dizisi Gerilim Standardı (JEDGS) ile gerçekleştirilebilmektedir. JEDGS, getirdiği tekrarlanabilirlik özelliği ile elektriksel ölçümlerde şimdiye kadar hiç sağlanmamış dünya çapında benzerlik, eş değerlik getirmiştir.

JEDGS ile, doğrudan fiziksel sabitler üzerinden tanımlanan ve diğer gerilim standartları farklı olarak, güvenilir ve uzun süreli kararlı gerilim değerleri elde edilebilmesine rağmen, dünyadaki Josephson Sistemlerinin karşılaştırılmaları gereklidir. Bu gereklilik, Josephson etkisinin değişkenliği şüphesinden değil, sistemin kalbini çevreleyen ve oda sıcaklığında çalıştırılan kompleks sistemin kontrolü içindir.

Bu çalışmada, SI gerilim biriminin birincil düzeyde gerçekleştirilmesinde bugüne kadar kullanılan standartlardan kısaca bahsedilirken, bugün dünyada primer [birincil] gerilim standardı olarak kabul edilen Josephson Eklem Dizisi Gerilim Standardı tanıtılmaktadır. Türkiye’de, bu standart sadece, TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Gerilim Laboratuvarında mevcut olup, iki yıldır ulusal Volt’un diğer bir deyişle Türkiye’de doğruluğu en yüksek gerilimlerin gerçekleştirilmesinde ve doğruluğunun ikincil seviye DC gerilim standartlarına aktarılmasında kullanılmaktadır. UME JEDGS, faz kilitleme tekniği dolayısıyla 74.99 GHz değerindeki tek frekansta çalışan bir sistem oluşuyla diğer JEDGS sistemlerinden

farklı bir sistemdir. Kullanılan faz kilitleme tekniği ile Josephson gerilim adımları üzerindeki gürültü seviyesinin diğer sistemlerdeki gürültü seviyesinden düşük olması sağlanmaktadır.

Çalışmada ayrıca UME JEDGS karakteristiği verilerek, doğruluğunun uluslararası platformda tanınması amacıyla, Fransa'nın Ulusal Metroloji Enstitüsü olan BNM/LCIE ile Zener diyot yapılı gerilim standartları kullanılarak gerçekteşirilmiş olan karşılaştırma ölçümlerinin sonuçları sunulmaktadır.

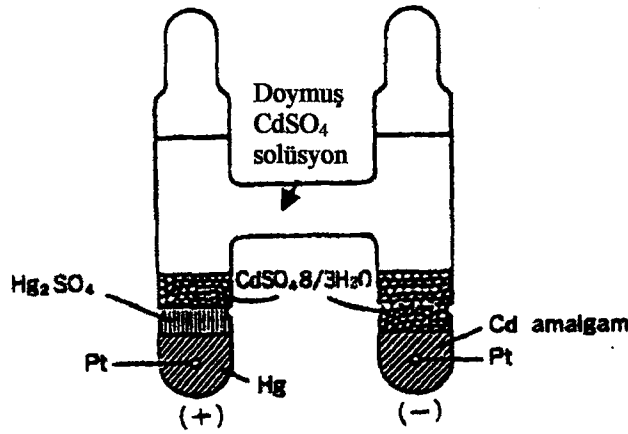


## 2. DC GERİLİM STANDARTLARI

### 2.1. Weston Standart Pilleri

İlk olarak 1892 yılında Dr. Edward Weston tarafından üretilen ve yaratıcısının adıyla anılan doymuş Weston Standart Pilleri (FLUKE Corporation 1994a), 1911 yılında elektriksel ölçümlerde primer gerilim standardı olarak kabul görmüştür. Yüksek doğrulukları ve uzun süreli kararlılıkları ile metroloji dünyasında uzun süre primer gerilim standardı olarak kullanılmış olan doymuş Weston, diğer bir adıyla kadmiyum standart pilleri, gelişen teknoloji ile bu statülerini kaybetmişlerdir. Ancak bugün hala birçok Ulusal Metroloji laboratuvarında gerilim biriminin elde edilmesinde kullanılmaktadırlar.

Bir Weston pili, temel olarak doymuş kadmiyum sülfat ( $\text{CdSO}_4$ ) çözeltisi içinde kadmiyum amalgam bir anot (negatif elektrot) ile cıva/cıva sülfat bir katot (pozitif elektrot) içeren "H" şeklinde cam bir tüpten oluşmaktadır. Pilin çıkış gerilimi, anot ve katot üzerinde iliştilirilmiş platin teller üzerinden alınmaktadır. Weston pilinin yapısı Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Doymuş Weston pilinin yapısı

Doymuş bir Weston pilinin emf değeri 20°C'de ortalama 1.0186 V'tur. Pil emf değerinde yılda 0-10 µV arasında bir değişim gözlenebilmektedir. Pillerin uzun süreli kararlılıkları, temel olarak, yapılarında yer alan elektrolitin pH değeri ile ilişkilidir.

Özel kullanım ve ölçüm teknikleri ile kararlılığı ±0.5 ppm civarında tutulabilen standart piller, bazı dezavantajları dolayısıyla yerlerini, neredeyse pillerle aynı kararlılığa sahip zener diyot yapıları elektronik gerilim standartlarına bırakmışlardır. Değişime sebep olan faktörleri aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

- Standart piller sıcaklığa karşı çok duyarlıdır. 20 °C ortam sıcaklığında pilin sıcaklık katsayısı  $-40 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  'dir. Bu katsayı ortam sıcaklığının artışıyla artma gösterir.  $-40 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , H şeklindeki pilin kol sıcaklık katsayılarının farkıdır; bu katsayılar pozitif kol için  $310 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , negatif kol için  $-350 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  'dir. Bu nedenle iki kolun aynı sıcaklıkta tutulmaları da önemlidir. Ortam sıcaklığındaki  $\pm 0.025$  °C'lik değişim veya iki kol arasındaki  $\pm 0.002$  °C 'lik sıcaklık farkı, pilin değerine  $1 \times 10^{-6}$  değerinde değişime sebep olacaktır.
- Pil üzerinden geçen akımın şiddeti ve akış süresi pilin gerilim değerini değiştirir. Örneğin 0.1 µA değerindeki akım 50 µV 'luk gerilim düşüşüne sebep olur. Gerilim değerindeki bu değişime neden olan etkenler polarizasyon ve pilin 500Ω ile 1000Ω arasında değişen iç direncidir. Standart piller bu özelliklerinden dolayı sadece akım çekmeyen “null-balance” devrelerinde kullanılabilirler.
- Piller, akıma karşı hassasiyetleri dolayısıyla kısa devreden korunmalıdırlar.
- Standart piller titreşime karşı çok duyarlıdır. Elektro kimyasal yapısından dolayı en ufak bir titreşim, pilin gerilim değerinde değişime sebep olabilmektedir.

- Yukarıda verilen özellikleri nedeniyle, standart piller, izlenebilirliğin laboratuvarlar arasında aktarılmasında kullanılan taşınabilir “transfer standart” olarak kullanılmaya uygun değildir.

Bu standartlar, gerilim değerinde gelişigüzel değişimler gözlemlendiğinden dolayı, çoğunlukla laboratuvarlarda, sıcaklığı 30°C’de sabit tutulan ısı koruyucu kaplar içerisinde dörtlü veya sekizli gruplar halinde muhafaza edilmektedirler.

Standart piller hızla yerlerini almaya başlayan zener diyot yapılı elektronik gerilim standartlarına rağmen, bugün hala Josephson eklem sisteminin bulunmadığı pek çok laboratuvar da primer seviyede gerilim standardı olarak kullanılmaktadırlar.

## 2.2. Elektronik DC Gerilim Standartları

Elektronik DC Gerilim standartları, elektro kimyasal yapıya sahip Weston pillerinin kullanımı ve muhafazasında karşılaşılan güçlükler ve dezavantajları nedeniyle gerçekleştirilen arayışların bir sonucudur. Teknolojideki gelişmeler sonucu Volt, kısa dönem kararlılıkları piller kadar iyi, muhafaza edilmeleri oldukça kolay, üstelik pillerin sahip oldukları dezavantajlara sahip olmayan elektronik DC gerilim standartları kullanılarak elde edilmeye başlanmıştır (FLUKE Corporation 1994b).

Bu standartlar, değeri 6V ile 7V arasında değişen bir Zener diyot ve bu diyonu besleyen çevre birimlerden oluşmaktadır. Bu bakımdan standardın kararlılığı referans Zener diyodun kararlılığına bağlı olduğu gibi, diğer elektronik elemanların kararlılığına da bağlıdır.

Zener referans standartlarından, standart pillerden farklı olarak 1V ile 10V arasında istenilen değerlerde gerilim alınabilmektedir. En sık kullanılan gerilim değerleri 1V, 10V ve standart pillerin emf değeri olan 1.018V’dur. Yapılan ölçümler, kararlılığı en iyi olan gerilim değerinin 10V olduğu göstermiştir. Bu nedenle üretimde genel eğilim 10V değerinde standartlar üretmektir.

Kararlılığın 10V değerinde bu derece iyi olmasındaki etken, artık emf değerlerinin 10V çıkışında diğer değerlere nazaran daha az etkili oluşudur. Örneğin 10  $\mu$ V'luk emf değeri 10V için  $1 \times 10^{-6}$ 'e karşılık gelen bir hata iken, aynı emf değeri 1V için  $10 \times 10^{-6}$ 'lik bir hataya karşılık gelmektedir.

Zener referans standartları, pillerle kıyaslandıklarında sahip oldukları gürültüye rağmen, elektronik yapıları dolayısıyla aşağıdaki avantajlara sahiptirler :

- Zener referans standartları şok ve titreşimlere karşı piller gibi duyarlı değildirler. Bu nedenle hareket ettirilmeleri gerilim değerlerinde bir değişime neden olmaz.
- Çıkış uçlarının kısa devre olması standarda zarar vermeyeceği gibi, kısa devrenin kaldırılmasından kısa bir süre sonra standart eski değerine kavuşmaktadır.
- Zener referans standartlarının sıcaklık katsayıları, standart pillerden en az 100 kat daha azdır. Her gerilim değeri için sıcaklık katsayısı  $0.01 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  civarında tutulabilmektedir.

Zener gerilim standartları, şebeke gerilimi yanısıra 10 saate kadar akü beslemesi ile çalıştırılabilmesi özelliği ile de donatılmışlardır. Bu özellikleri dolayısıyla elektronik DC gerilim standartları, laboratuvarlar arasında izlenebilirliğin aktarılmasında taşınabilir transfer standart olarak kullanılabilir özelliktedir.

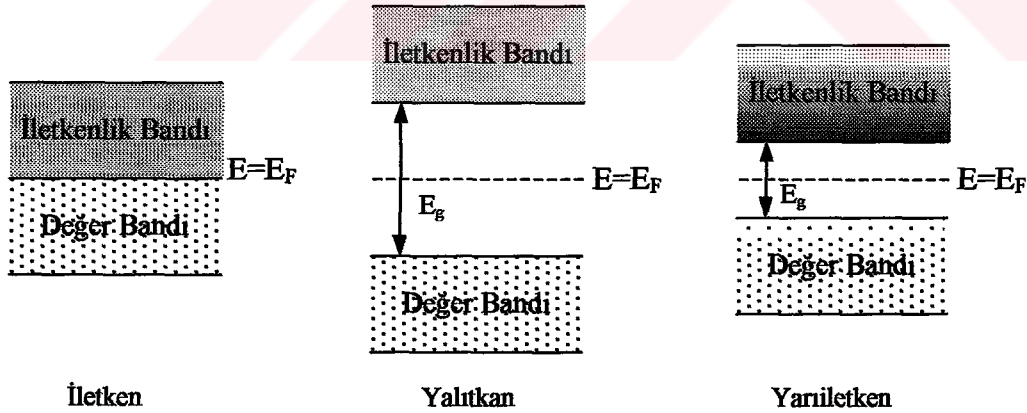


### 3. JOSEPHSON ETKİSİ ve JOSEPHSON EKLEMİ

#### 3.1. Süperiletkenlik

1 K sıcaklıkta saf metalin elektrik özdirenci  $10^{-10}$  ohm-cm kadar küçük olabilirken, iyi bir yalıtkanın özdirenci  $10^{22}$  ohm-cm kadar yüksek olabilmektedir. Bu  $10^{32}$  merteye farkı bir iletkenle bir yalıtkan arasındaki en önemli fiziksel özellik olup, maddeler içindeki elektron dağılımlarının bir sonucudur.

Her katı madde elektronlar içerir. Kristaldeki elektronlar, elektron yörüngelerinin bulunamadığı enerji bölgeleriyle ayrılmış enerji bantları içinde yer alırlar. Enerji aralıkları veya bant aralıkları denilen bu yasak bölgeler iletkenlik elektron dalgalarının kristal iyonları ile etkileşme sonucu oluşur. Bant aralığı ( $E_g$ ), iletkenlik bandının en düşük enerjisi ile değer (valans) bandının en yüksek enerjisi arasındaki enerji farkıdır.

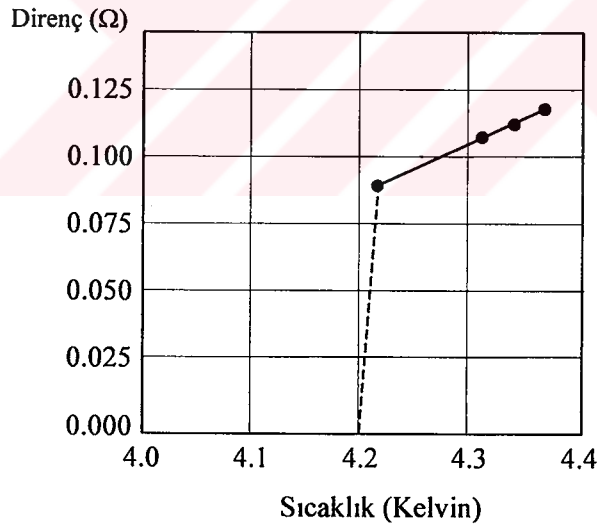


Şekil 3.1 İletken, yalıtkan, ve yarıiletkenlerde enerji bant şemaları

Şekil 3.1, iletken (metal), yalıtkan, ve yarıiletkenlerde enerji bantlarının şemasını vermektedir. Görüldüğü gibi, bir iletkene bir enerji uygulanması durumunda elektronların değer bandından iletkenlik bandına geçişleri oldukça kolaydır.

Yalıtkanlarda ise durum tam tersidir. Değer bandındaki elektronların iletkenlik bandına geçişleri, yüksek bant aralığı ( $\approx 10$  eV) dolayısıyla oldukça güçtür. Bu nedenle bu maddelerde elektriksel iletkenlik düşük olup, direnç fazladır. Yarı iletkenlerde ise, 0 K sıcaklığında tüm elektronlar değer bandında olup, iletkenlik bandında hiç elektron bulunmaz. Ancak, enerji aralığı yalıtkanlarda olduğundan daha düşüktür ( $\approx 1$  eV). Bu nedenle, oda sıcaklığında elektron bandındaki elektronlar ısı enerjisiyle kolaylıkla iletkenlik bandına geçebilmektedir. Dolayısıyla, yarıiletkenler zayıf birer iletkenlerdir.

Metal ve alaşımların bir çoğunda, sıcaklık sıvı helyum sıcaklığı civarına (4 K) düşürüldüğünde, elektrik özdirenci birden sıfıra gider. Süperiletkenlik denilen bu durum 1911 yılında Kamerlingh Onnes tarafından, helyumun sıvılaştırılmasının başarılmasından 3 yıl sonra gözlenebilmiştir. Kritik sıcaklıkta ( $T_c$ ) numune normal elektrik özdirencine sahip bir fazdan süperiletken bir faza geçiş yapmaktadır (Şekil 3.2).

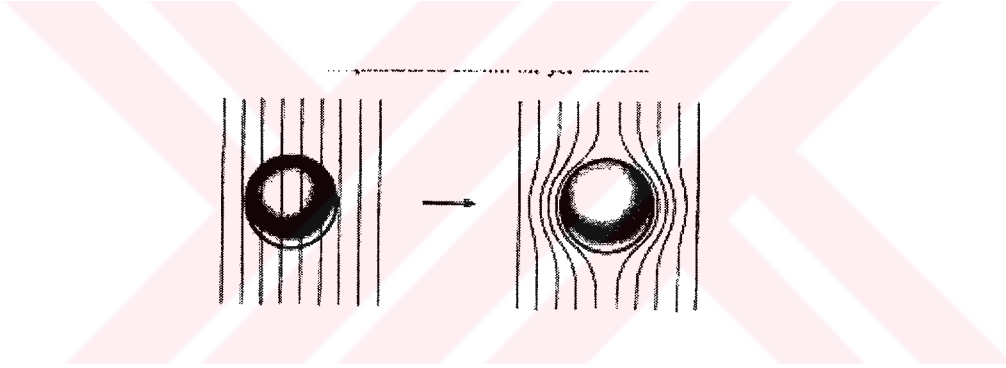


**Şekil 3.2** Civanın mutlak sıcaklıktaki direnç değişimi

Süperiletkenlik, periyodik cetveldeki birçok metalde, alaşımlarda, ara metal bileşiklerde ve katkılı yarıiletkenlerde oluşmaktadır. Süperiletken durum, metaldeki iletkenlik elektronlarının düzenli bir durumu olup, bu düzen, zayıf bağlı elektron çiftlerinden kaynaklanmaktadır; Süperiletken içindeki bazı elektronlar, süperiletkenin geçiş sıcaklığı altında, aralarındaki zayıf çekimden dolayı eşleşerek Cooper çiftleri

olarak adlandırılan elektron çiftlerini oluştururlar. Sıcaklıktaki düşüşle beraber elektronlar arasındaki eşleşme artmakta ve elektron çiftlerinin sayısı artmaktadır. Elektron çiftleri süperiletkende, hiç bir enerji kaybı olmaksızın hareket edebilirken, eşleşmemiş elektronlar ise bir direnç ile karşılaşılırlar. Eğer süperiletkende sadece normal elektronlar bulunsaydı, eklemnin akım gerilim karakteristiği normal bir direncin karakteristiği gibi olurdu.

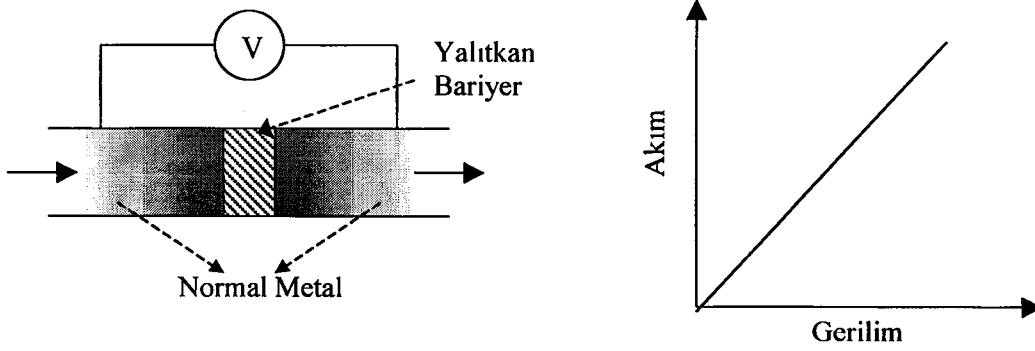
Süperiletkenlerin manyetik özellikleri, en az elektriksel özellikleri kadar önemlidir. Bir süperiletkenin zayıf bir manyetik alanda ideal bir diamagnet gibi davranmaktadır. Bir yarıiletken manyetik alan içine konulup süperiletken durumuna geçiş sıcaklığının ( $T_c$ -kritik sıcaklık) altına kadar soğutulursa, başlangıçta süperiletken içindeki manyetik akı dışarı atılır. Buna Meissner etkisi denir (Serway 1990a). Bu etki Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.3** Sabit bir dış manyetik alanda soğutulan süperiletken bir kürede Meissner etkisi; Kritik sıcaklığının altına inildiğinde B alan çizgileri küreden dışarı atılır.

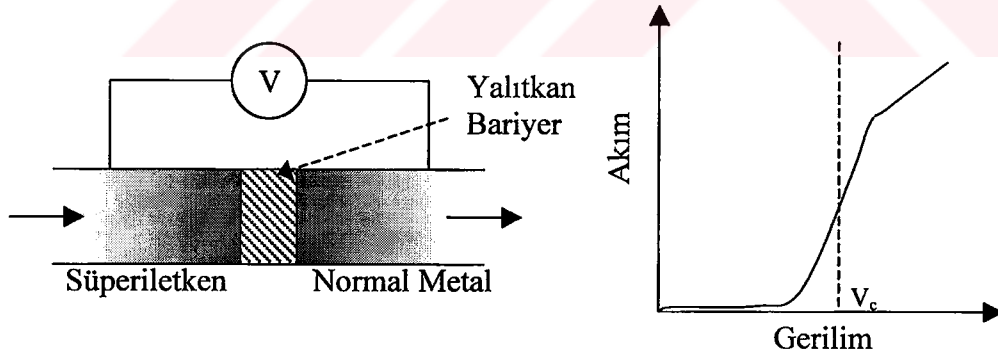
### 3.2. Tek Parçacık Tünellemesi

Şekil 3.4’de görülen bir yalıtkanla ayrılmış iki metal (iletken) sisteminde, yalıtkan tabaka bir metalden diğerine iletkenlik elektronları geçişine bir engel gibi davranır. Bu engel yeterince ince ise ( $< 20 \text{ \AA}$ ), yalıtkan üzerine düşen bir elektronun engeli aşarak bir metalden diğerine geçme olasılığı yüksek olur. Bu elektron geçişi “tunnelling” olarak adlandırılır (Serway 1990b). Ancak elektronların bir metalden diğerine geçişleri için eklemne bir V gerilimin uygulanması gereklidir. Bu durumda eklemnin akım-gerilim karakteristiği Ohm yasasına uygun olarak doğrusaldır.



**Şekil 3.4.** Normal Metal-Yalıtkan- Normal Metal eklemi ve akım-gerilim grafiği

Eklemdeki metallere birinin süperiletken olması (Şekil 3.5.) ve eklem sıcaklığının süperiletkenin kritik sıcaklığının altında olması durumunda, eklem üzerindeki karakteristik tamamen farklı olmaktadır. Eklem üzerine uygulanan  $V$  gerilimi  $E_g/2e$  değerinden büyük olduğu duruma kadar eklem üzerinden akım akmaz. Bu etki ilk olarak 1960 yılında Giaver tarafından yapılan deneylerde gözlenmiştir.



**Şekil 3.5.** Süperiletken-Yalıtkan-Normal Metal eklemi ve akım-gerilim grafiği

### 3.3. Josephson Etkisi ve Josephson Eklemleri

Brian Josephson, kendisine 1972 yılında Nobel ödülünü getirecek olan çalışmalarına, ilk olarak Cambridge Üniversitesinde doktora çalışmalarının bir bölümü olarak başlamıştır. 1962 yılında, aralarında çok ince bir bariyerle-oksit tabakayla ayrılmış iki süperiletken üzerinden geçen akımı formüle ederek, kendi ismi ile anılan etkiyi, Josephson Etkisi'ni bulmuştur (Josephson 1962).

Josephson, elektronların buldukları enerji seviyesinden, diğer iletkende bulunan eş bir enerji seviyesine, hiç bir gerilim uygulamadan, geçiş yapabileceklerini dikkate alarak, iki süperiletken arasındaki yalıtkan bariyerin yeterince ince olması durumunda, elektron çiftlerinin bu bariyerden geçebileceklerini ve bu geçiş nedeniyle eklem üzerinde hiçbir gerilim düşümü oluşturmadan bir akım oluşacağı hipotezini ortaya atmıştır. Bu etki DC Josephson Etkisi olarak adlandırılmış ve ilk olarak Anderson ve Rowell tarafından 1963 yılında gözlenmiştir.

Josephson, süperiletkendeki elektron çiftlerini;

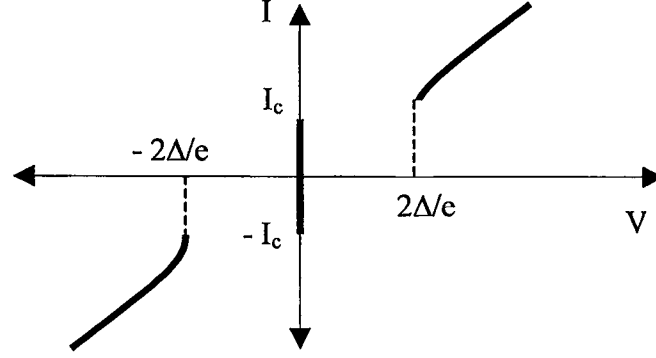
$$\psi = \sqrt{\rho} e^{j\theta} \quad (3.1)$$

şeklinde bir dalga fonksiyonu olarak ifade ederek, yalıtkan içinde herhangi bir noktadaki akım yoğunluğunun;

$$I = I_c \sin \phi \quad (3.2)$$

şeklinde yazılabileceğini göstermiştir. Denklem 3.1'de  $\rho$  elektron yoğunluğudur. Denklem 3.2'de ise  $I$  süperakım,  $I_c$  eklem kritik akımı,  $\phi$  ise bariyerin iki tarafındaki elektron çiftlerinin faz farkıdır ( $\phi_2 - \phi_1$ ). Eklemin kritik akım değeri eklemin inceliğine ve sıcaklığa bağlı bir parametredir.

Eklem üzerine  $I_c$  kritik akımından fazla bir değerde akım uygulandığı durumda, bu akım normal elektronlar tarafından taşınacak ve dolayısıyla eklem üzerinde bir gerilim düşümüne sebep olacaktır. Bu durum Şekil 3.6'da verilen gerilim-akım karakteristiğinde verilmektedir.



Şekil 3.6 DC Josephson etkisi

Yine Josephson'a göre, bir DC gerilim eklem uygulandığında, faz farkının zamanla değişimi nedeniyle, iki süperiletken arasında elektron çiftleri salınımına başlayacak ve eklem üzerinde, gerilim ile doğrudan ilişkili bir de AC süper akım oluşacaktır. Bu etki AC Josephson Etkisi olarak adlandırılır. Josephson, faz farkı değişimi ile DC gerilim arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak şu şekilde ifade etmiştir.

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{4\pi e}{h} V \quad (3.3)$$

Denklemden, e elektron yükü, h Planck sabiti, V eklem üzerindeki DC gerilim,  $\phi$  ise faz farkıdır. Josephson, eklem üzerinden akan süperakımı en genel ifadesiyle, denklem 3.2'in entegralini alarak denklem 3.1'de yerine koymak suretiyle;

$$I = I_c \sin\left(\frac{4\pi e}{h} Vt + \phi_0\right) \quad (3.4)$$

olarak ifade etmiştir.

Görüldüğü gibi,  $V=0$  ise, faz farkı sabit olduğundan eklem üzerinden DC bir akım akacak olup maksimum değeri eklem kritik akımı ( $I_c$ ) kadar olacaktır.  $V$ 'nin sıfırdan farklı olması durumunda ise, genliği  $I_c$  olan bir AC akım akacaktır.  $2e/h$  oranı yaklaşık  $484 \text{ MHz}/\mu\text{V}$  olduğundan, akan süperakımın frekansı düşük gerilimler için bile mikrodalga frekanslarında olacaktır. Denklem 3.3'den de görüleceği gibi, AC süperakım frekansı ve ekleme uygulanan DC gerilim arasındaki ilişki,

$$f = \frac{2e}{h} V \quad (3.5)$$

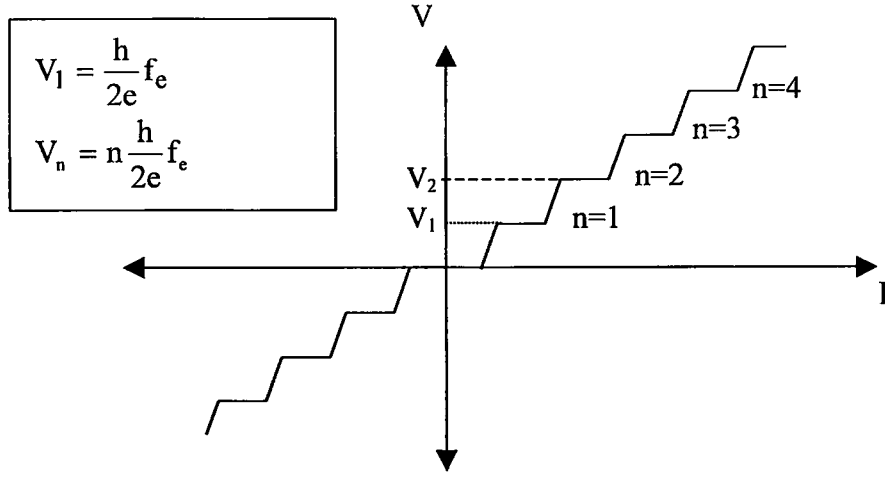
olarak ifade edilir.

Josephson eklemının bir diğer özelliği ise, ekleme,  $f_c$  frekansında bir mikrodalga uygulanması durumunda, eklem salınımının, uygulanan frekansa ve harmoniklerine kilitlenme yönünde eğilim göstermesidir. Bu durumda eklem üzerindeki gerilim, uygulanan frekansa bağlı olarak;

$$V = n \frac{h}{2e} f_c \quad n=1, 2, 3.. \quad (3.6)$$

şeklindedir.

Eklem gerilim-akım eğrisi çizildiğinde, akım genişliği uygulanan AC gerilimin büyüklüğüne bağlı bir “sabit gerilim adım”ları gözlenmektedir (Şekil 3.7). Uygulanan frekansa bağlı olan bu sabit gerilim adımları ilk defa Shapiro tarafından gözlenmiş olduğundan, Shapiro Adımları olarak adlandırılmaktadırlar.



**Şekil 3.7.** Josephson eklemesinde oluşan sabit gerilim adımları (Shapiro adımları)

AC Josephson etkisi,

$$2eV = hf \quad (3.7)$$

olarak ifade edildiğinde, aslında bu etkinin bariyer üzerindeki enerji çevrimi olduğu rahatlıkla görülebilmektedir. Bu eşitlik, Cooper çiftlerinin bir noktadan diğerine geçişi için gerekli  $2eV$  değerindeki enerjinin  $hf$  foton enerjisine dönüştüğünü göstermektedir.

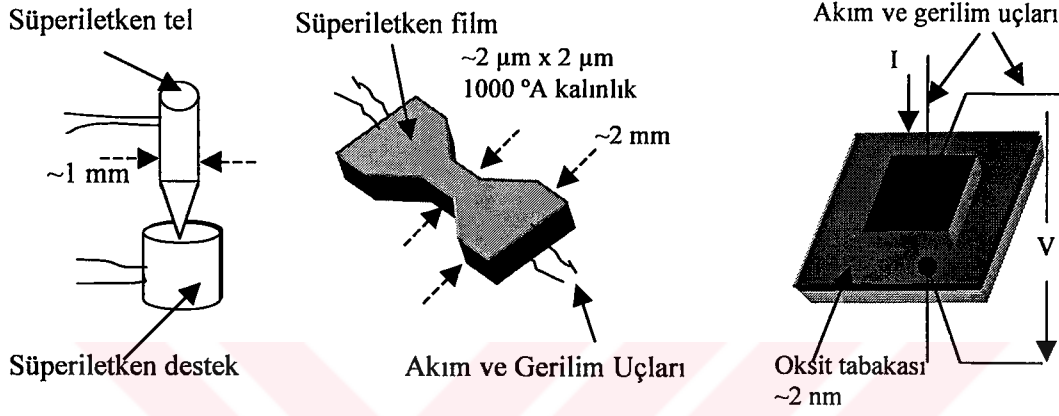
Bu etkinin Josephson'dan önce benzer çalışmaları yapan araştırmacılar tarafından fark edilememesi bir tesadüfe dayanmamaktadır. Josephson'un ders aldığı ve çalışmaları üzerinde tartıştığı hocası P.W. Anderson tarafından yayınlanan bir makalede (Anderson 1970) bu durumun sebepleri şu şekilde özetlemektedir;

“Pek çok araştırmacının daha önceden bu etkiyi gözlemlemiş olduklarını düşünmüştüm, fakat sorun şuydu ki, iki süperiletkeni çok ince bir bariyer ile ayırmak kolay değildi. Biz bu etkiyi üç duruma inanarak görebilmiştik: Birincisi, Josephson'un açıklamalarıyla, ne beklediğimizi biliyorduk. İkincisi, gördüklerimizi



anlayabiliyorduk. Üçüncüsü ise, Rowell'in yetenekleriyle iyi, temiz ve güvenilir bir eklem oluşturabildiğimize güveniyorduk.”

Şekil 3.8'de, iki süperiletkenin ince bir yalıtkan bariyerle ayrılmış olduğu çeşitli eklem tipleri gösterilmektedir.



Şekil 3.8 Çeşitli zayıf eklem tipleri a) Nokta teması b) mikroköprü c) Josephson eklemeleri

### 3.4. Josephson Eklemının Metrolojide Kullanımı

Josephson etkisi, çok kısa bir zaman içerisinde, Quantum fiziğinde önemli rolü olan  $e/h$  oranının belirlenmesi amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Önceleri  $30 \times 10^{-6}$  belirsizlikle ölçülebilen bu oran, referans gerilim standartlarının doğruluğuna bağlı olarak  $1 \times 10^{-6}$  değerindeki belirsizlikle ölçülebilmektedir. Ancak bir zaman sonra hesaplanan oran değerlerinde zamanla bir değişim olduğu belirlenmiştir. Bu değişimin referans gerilim standardı olarak kullanılan Weston Standart Pillerin değerindeki kaymadan kaynaklandığı kısa sürede belirlenmiştir.

1969 yılında BIPM, Josephson etkisini,  $e/h$  oranı sabit alarak, gerilim birimi Volt'un gerçekleştirilmesinde kullanmaya başlamıştır. Çeşitli ülkelerin metroloji laboratuvarları, benzer şekilde Volt'u,  $e/h$  oranını gerçekleştirdikleri ölçümlerle belirledikleri değerini sabit kabul ederek, Josephson etkisi üzerinden gerçekleştirmeye başlamışlardır.

Ancak, Josephson gerilim doğruluğunun 1.018V değerindeki standart pillere aktarılması için gerçekleştirilen ölçümlerde, Josephson ekleminden elde edilen gerilimin mV'lar mertebesinde olduğundan dolayı gerilim bölücü kullanılması gerekliliği, ölçümlere istenmeyen ve oldukça büyük bir belirsizlik katmakta idi. Dolayısıyla bu ölçümlerde Josephson gerilim doğruluğuna yaklaşamıyordu. Bu sebeple, Josephson eklemelerinin seri bağlanarak bir dizi elde edilmesi ve gerilim değerinin artırılması yönündeki çalışmalara başlanmıştır. Çok kısa bir zaman içinde binlerce eklem serisi bağlanması ile oluşturulan Josephson eklem dizileri kullanılarak "Volt"lar mertebesinde Josephson gerilimi elde edilebilmiştir. Bu gün Josephson eklem dizileri ile 10V'a kadar sabit ve yüksek doğrulukta gerilimler elde etmek mümkündür.

Çeşitli ulusal laboratuvarlarda Josephson eklem dizileri kullanılarak gerçekleştirilen ölçümler arasında hala farklılıklar olduğu belirlenmiştir ve bu farklılığın her laboratuvarında, değişik değerlerdeki e/h oranlarının kullanılmasından kaynaklandığı saptanmıştır. Ölçümlerdeki bu tutarsızlık, CIPM tarafından alınan bir kararla  $2e/h$  oranı Josephson sabiti ( $K_{J-90}$ ) olarak tanımlanması ve değerinin 483 597.9 GHz/V olarak belirlenmesiyle ortadan kaldırılmıştır (Popel 1992).  $K_{J-90}$  değeri, gerçekleştirilen pek çok e/h oran ölçümlerinin analizi ile belirlenmiş bir değerdir (Taylor ve Witt 1989). Bugün tüm dünyada, Josephson Gerilim standardı ile yapılan ölçümlerde bu değer kullanılmakta ve Volt yüksek doğruluk ve tutarlılıkla eşitlik 3.8 kullanılarak elde edilebilmektedir;

$$V_J = n \frac{f}{K_{J-90}} \quad (3.8)$$

Denklem 3.7'den de görüldüğü gibi, Josephson gerilimi  $V_J$ , Josephson eklem tipinden, eklem geometrisinden, kullanılan materyallerden, manyetik alandan ve uygulanan mikrodalganın gücünden bağımsız olup doğrudan uygulanan frekansa bağlıdır.

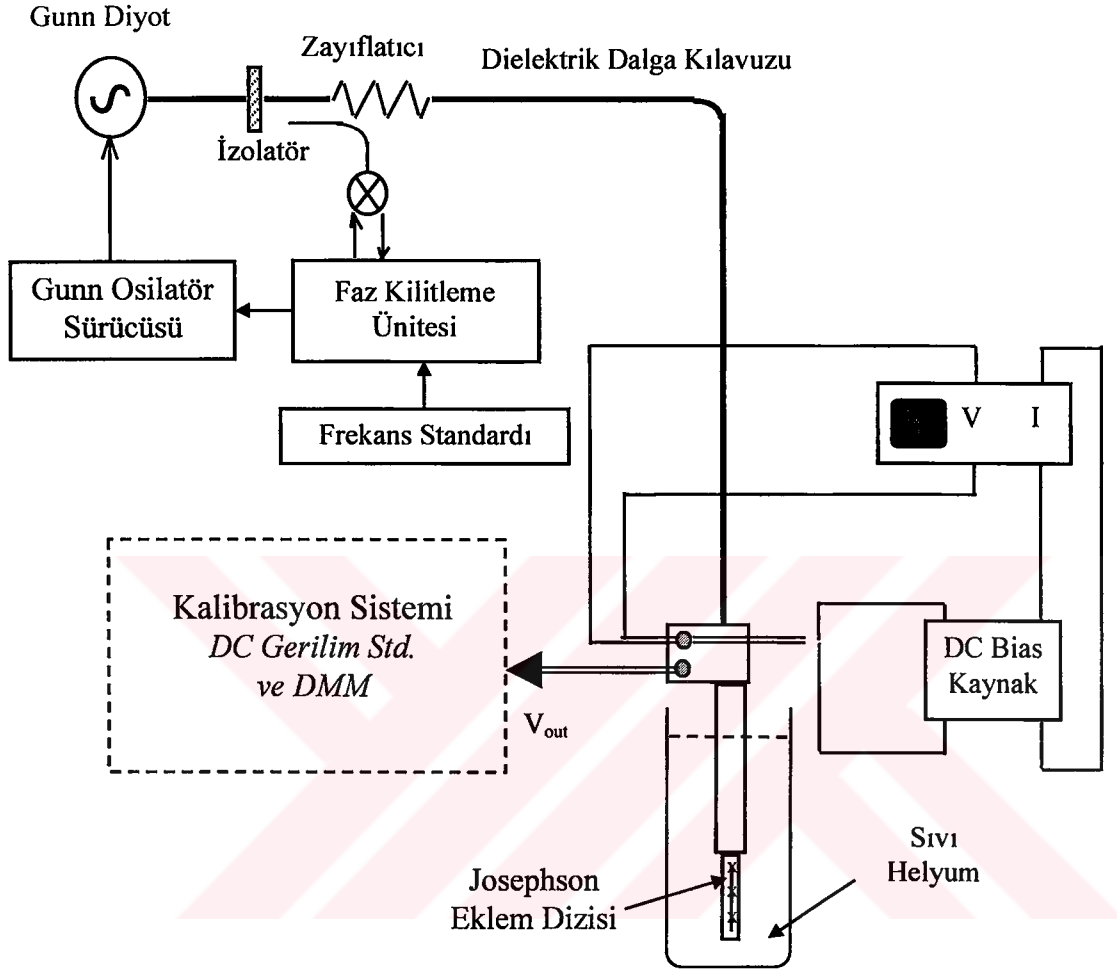
Josephson etkisi, temel fiziksel sabitler aracılığıyla gerilimi frekansa bağlayan fiziksel bir etki olduğundan, Josephson gerilim standardının ideal bir frekans-gerilim dönüştürücü olarak tanımlanması mümkündür.

DC akım ile sürülmüş bir Josephson eklemi bir mikrodalga kaynak ile uyarıldığında, eklem üzerinde, sadece uyarıcı sinyalin frekansı ile orantılı, sabit gerilim adımları oluşmaktadır. Frekans değeri, sezyum saati ile,  $10^{-15}$  doğruluk derecesinde elde edilebildiğinden, Josephson eklem sistemi ile DC gerilimi  $10^{-10}$  doğruluk derecesinde elde etmek mümkün olmaktadır. Bugün dünyada primer gerilim standardı olarak kullanılan, kararlılığı yalnızca mikrodalga kaynağının ürettiği sinyalin frekansına bağlı olan, bu sabit gerilim adımlarıdır.

Standart, Josephson eklem dizisi, dizinin monte edildiği prob, diziye güç uygulayan mikrodalga kaynağı, frekans kontrol ünitesi, adım sayısını belirleyen dc akım kaynağı ve uygun çalışma noktasını gözlemek için kullanılan bir osiloskoptan oluşmaktadır.

Şekil 3.9’da başlıca elemanları içeren JEDGS görülmektedir. Josephson eklem dizisi entegresi manyetik olarak ekranlanmış prob içine yerleştirilmiş ve sıvı helyum içine daldırılmıştır. Eklem dizisine gerekli güç, çalışma frekansı 70-100 GHz arasında olan Gunn diyodu tarafından sağlanır. Kontrol ünitesi Gunn diyot frekansını Rb referansına fazını kilitlet. DC akım kaynağı ve düşük frekanslı üçgen dalga kaynağı entegreye temel akımı sağlar. Osiloskop, bias akımı ile dizi gerilimi karakteristiğini görüntülemekte kullanılır. Bu karakteristik diziye uygulanan optimum gücün ayarlanması için kullanılmaktadır.

Ulusal metroloji enstitülerinde Volt’un gerçekleştirilmesinde kullanılan JEDGS’ları arasındaki en belirgin farklılık, diziye uygulanan mikrodalga frekansın 10 MHz frekansına kilitleme teknikleridir. Pekçok enstitüde EIP firması tarafından üretilmiş olan bir faz kilitlemeli sayıcı kullanılarak, istenen mikrodalga güç sağlanmakta ve çalışma frekansı değiştirilebilmektedir. UME JEDGS’ında ise PTB standardında olduğu gibi iki aşamalı faz kilitleme tekniği kullanılarak, Josephson gerilimi üzerindeki gürültünün daha düşük seviyede olması sağlanmıştır. Ancak bu sistem ile standardın çalışma frekansı 74.99 GHz’de tek bir noktadır. Bölüm 4’de UME Josephson Eklem Dizisi Gerilim standardı anlatılmaktadır.



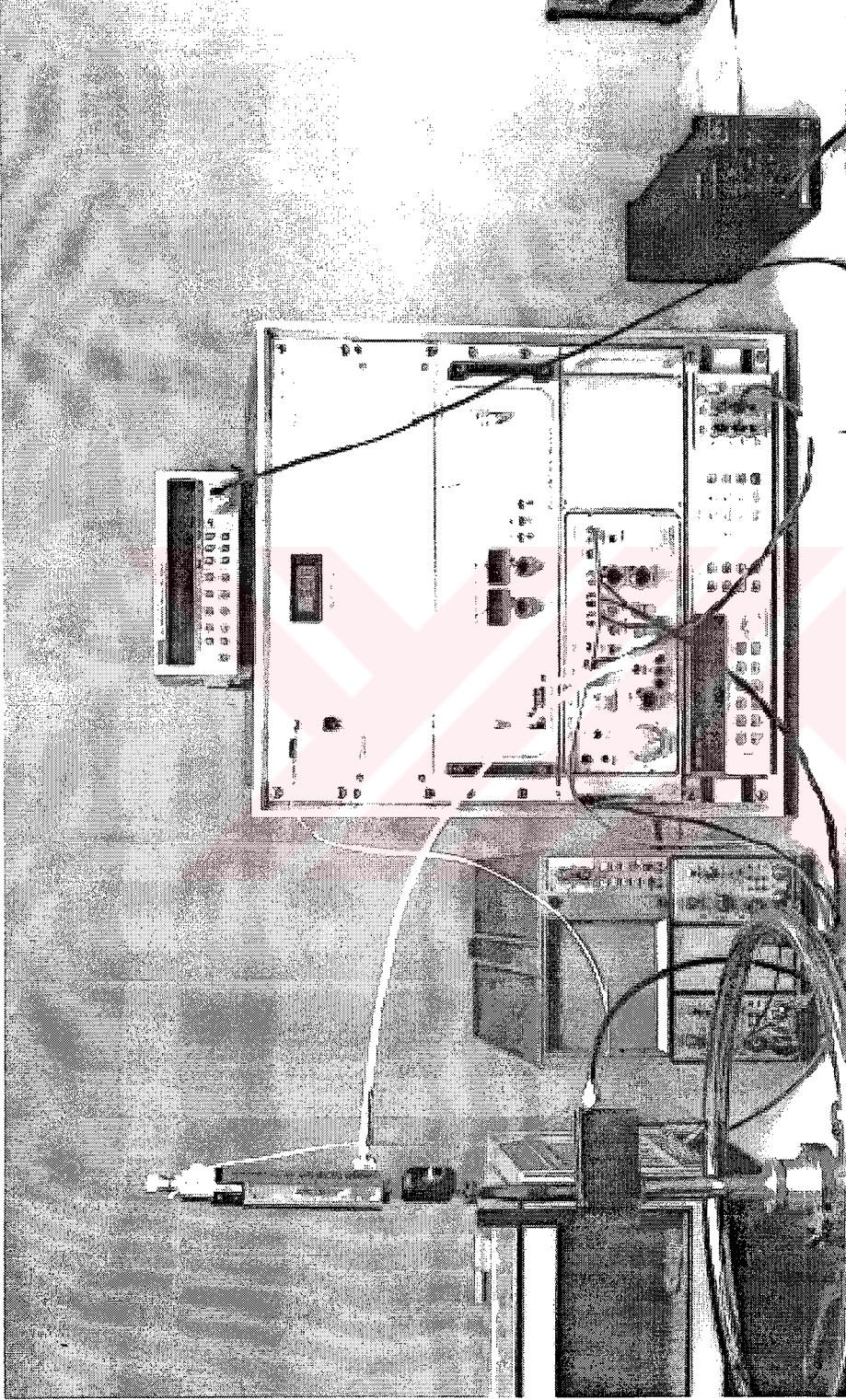
Şekil 3.9. Josephson gerilim standardı sistemi blok diyagramı.

#### 4. UME 10 VOLT JOSEPHSON EKLEM DİZİSİ GERİLİM STANDARDI

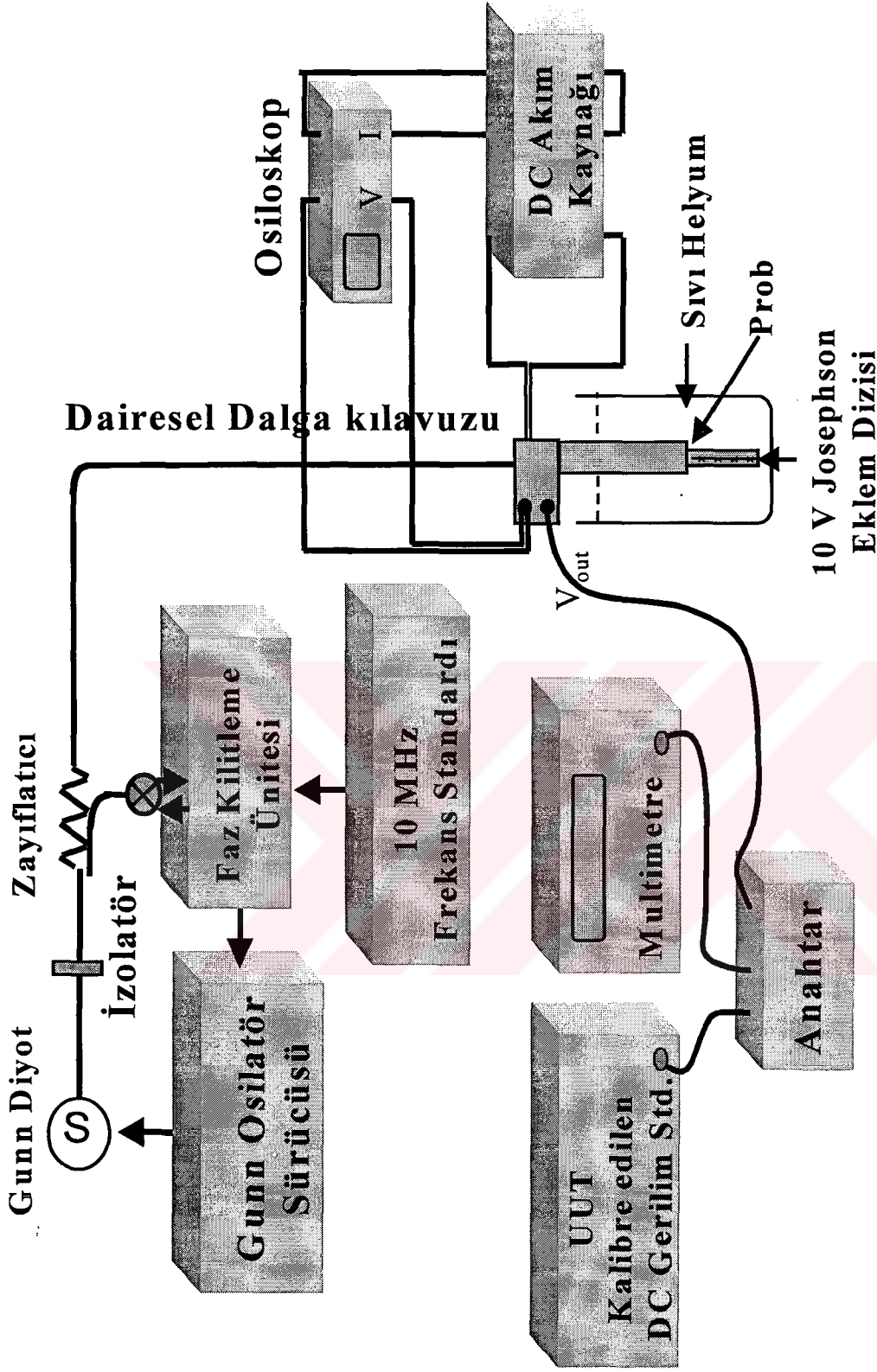
UME Gerilim Laboratuvarında Volt'un gerçekleştirilmesinde kullanılan 10 Volt JEDGS'ı Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Şekil 4.2'de ise standart şema olarak verilmektedir.

Daha öncede belirtildiği gibi diğer Josephson Gerilim Standartlarından farklı olarak UME JEDGS'ı 74.99 GHz frekansında çalışmaktadır. Standartta kullanılan faz kilitleme tekniği ile 75 GHz Gunn osilatörü 10 MHz Rb frekans standardının spektral özelliğine en yakın olacak şekilde kilitlenmekte ve bu şekilde Josephson gerilim adımları üzerindeki gürültü seviyesinin diğer sistemlerdeki gürültü seviyesinden düşük olması sağlanmaktadır. Ancak frekansın 74.99 GHz'de sabit oluşundan dolayı, iki Josephson gerilim adımı arasındaki gerilim farkı  $155.0668438 \mu\text{V}$  değerinde sabit olmakta ve dolayısıyla DC gerilim standartları kalibrasyonu esnasında Josephson gerilimi kalibre edilen standardın değerine tam olarak ayarlanamamaktadır. Ancak kalibre edilen standart ve Josephson gerilimi arasındaki fark  $78 \mu\text{V}$ 'dan küçüktür. Bu aralıkta voltmetrelerin doğrusallık hataları oldukça küçük olduğundan dolayı bu durum sisteme DC gerilim standardı kalibrasyonları için bir dezavantaj getirmemektedir.

UME 10V Josephson Eklem Dizisi Gerilim Standardı, Josephson eklem dizisi entegresi, bu entegreyi sıvı He'a daldırmada ve diziyi sisteme bağlamada kullanılan bir prob, sıvı He tankı, Rb referans frekans standardı, akım kaynağı, faz kilitleme modülü, iki adet voltmetre ve bir anahtardan oluşmaktadır.



**Şekil 4.1. UME 10 Volt Josephson Eklm Dizi Gerilim Standardı**



Şekil 4.2. UME JEDGS'nin blok şeması

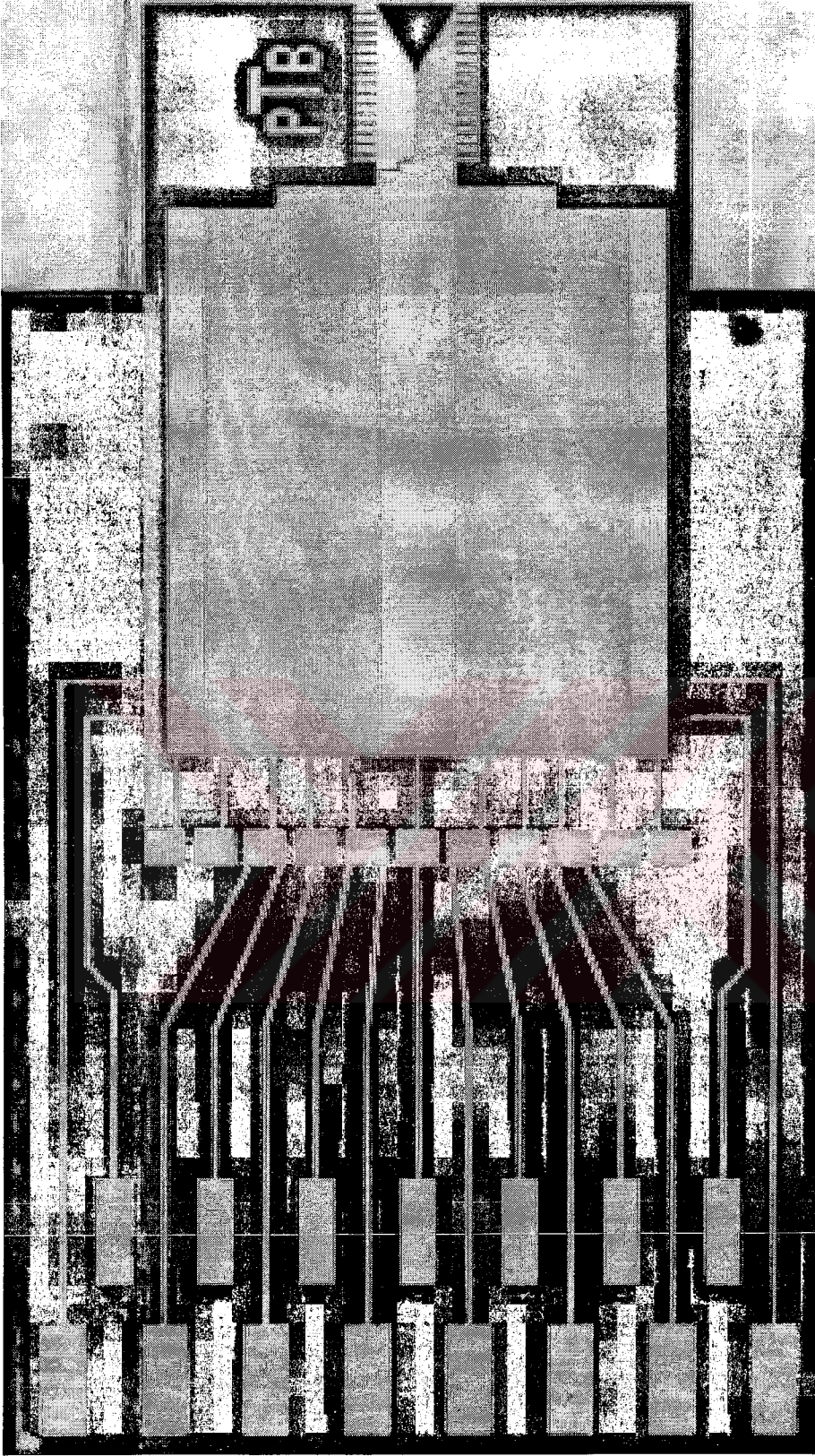
#### 4.1. Josephson Eklem Dizisi Entegresi

UME JEDGS'ında kullanılan Josephson dizisi entegresi (Şekil 4.3.) PTB yapımıdır (Popel 1992). Dizi Niyobyum/Alüminyum oksit/Niyobyum (Nb/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Nb) teknolojisi ile üretilmiş yaklaşık 20,000 Josephson ekleminden oluşmaktadır. Entegreye ait özellikler Tablo 4.1'de verilmektedir.

**Tablo 4.1.** UME JEDGS'ında kullanılan 10V Josephson eklem dizisi entegresine ait özellikler

Özellikler	
Üretici	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Teknoloji	Nb/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Nb
Eklem alanı	(10 x 20) mm
Eklem sayısı	20,000
Taban materyali	FR-4 epoxy glass
RF giriş	WR-12 dalgakılavuzu uyumlu
Çalışma sıcaklığı	< 4.2 K
Kritik Akım (@10V)	270 µA
Oda sıcaklığında dizi direnci	93 kΩ
Eldeedilebilir maksimum adım genişliği	50 µA





Şekil 4.3 Josephson eklem dizisi entegresi

## 4.2. Prob

Şekil 4.4’de Josephson dizisini sıvı He içine daldırılmasında (soğutulmasında) ve rf ve manyetik alanlardan korunmasında kullanılan probun yapısı gösterilmektedir. Probun üst bölümüne Gunn osilatör, çifleyici, karıştırıcı ve zayıflatıcı sistemi monte edilmekte ve bu sistemden uygulanan mikrodalga güç düşük-ısı ve düşük-mikrodalga kayıplarına sahip dalgakılavuzu üzerinden Josephson dizi entegresine uygulanmaktadır.

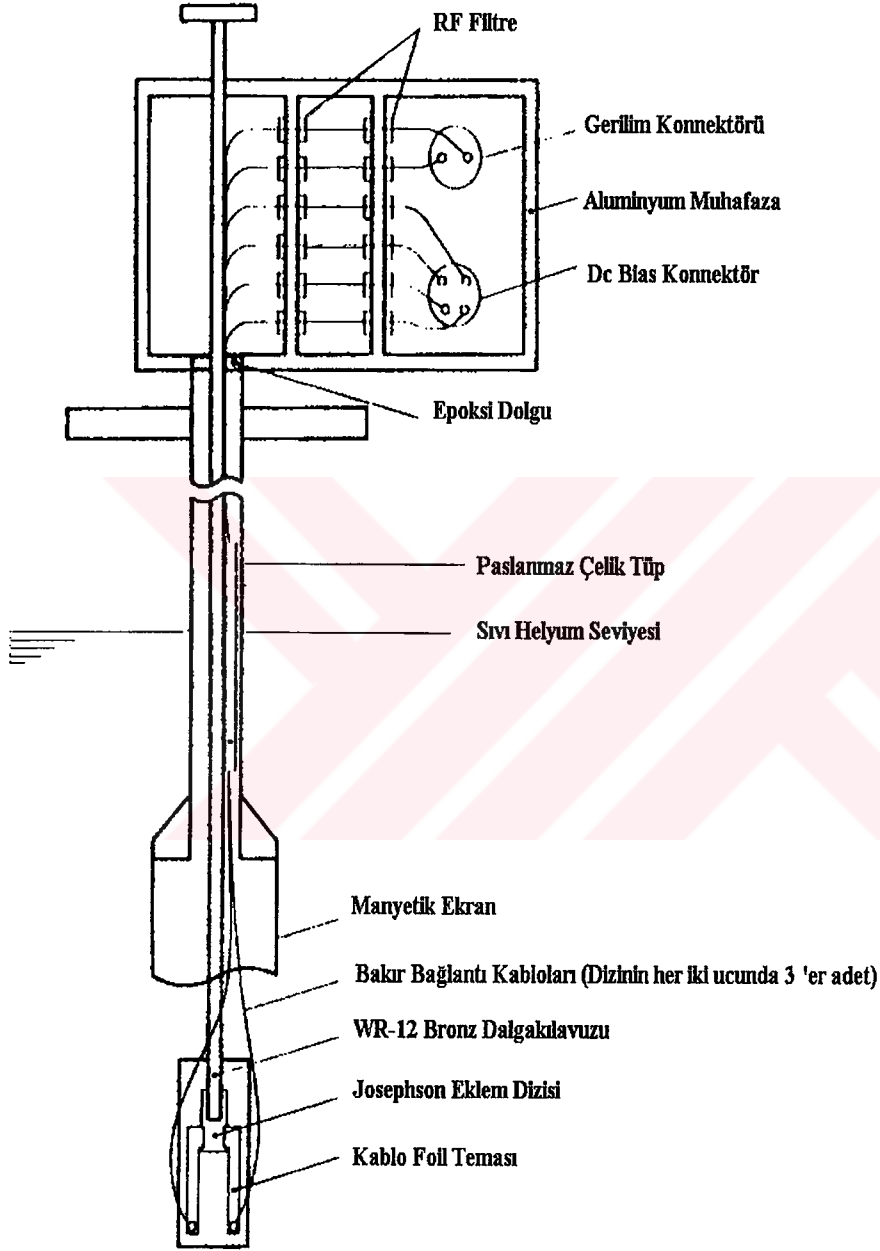
Prob içinde kullanılan dalgakılavuzunun mikrodalga kaybı 1V entegresi için 6 dB, 10V entegresi için ise 4 dB’den düşük olmalıdır. Bu amaçla prob yapımında çeşitli dalgakılavuzları kullanılmakta olup, özellikleri Şekil 4.5’de verilmektedir.



Şekil 4.5. Prob içinde kullanılan dalgakılavuzu tipleri

Bu üç tip dalgakılavuzu kullanılarak gerçekleştirilen ölçümler, dalgakılavuzlarındaki kaybın dikdörtgenel tip için 6-9 dB/m, dielektrik tipi için 2-3 dB/m, dairesel tip için ise 1.6-1.8 dB/m olduğunu göstermektedir. Bu kayıp değerleri, dalgakılavuzunda ve dalgakılavuzunu sisteme bağlayan ve kılavuzun iki ucunda yer alan arabirimlerdeki kayıpların toplamıdır.

En çok kullanılan dalgakılavuzu tipi, uygun fiyatı dolayısıyla dikdörtgenel dalgakılavuzudur. Daha sonra dielektrik dalgakılavuzları kullanılmakta olup, son yıllarda düşük kayıp değerleri dikkate alınarak dairesel dalgakılavuzu kullanımına başlanmıştır.

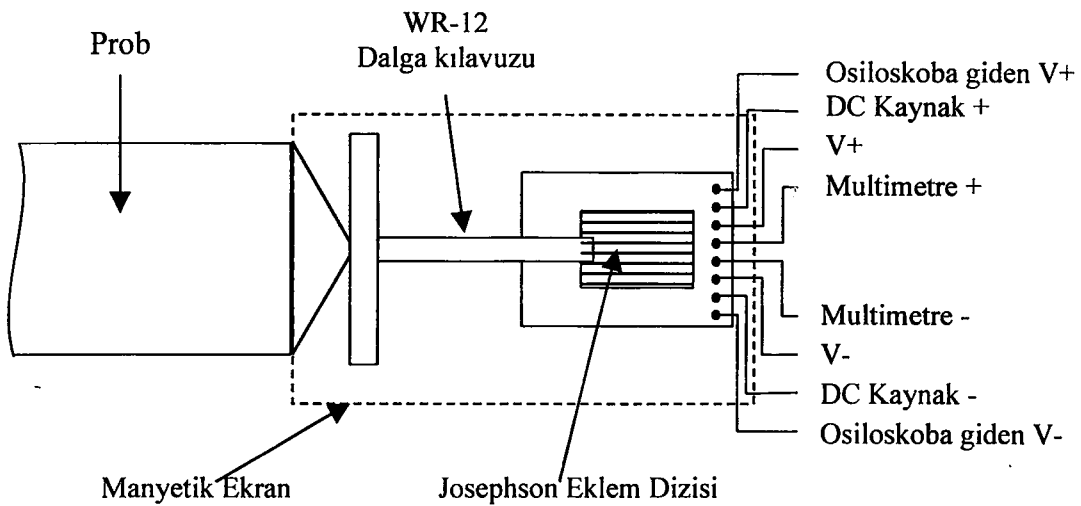


Şekil 4.4. Josephson dizisinin sıvı helyum içinde soğutulmasında kullanılan prob

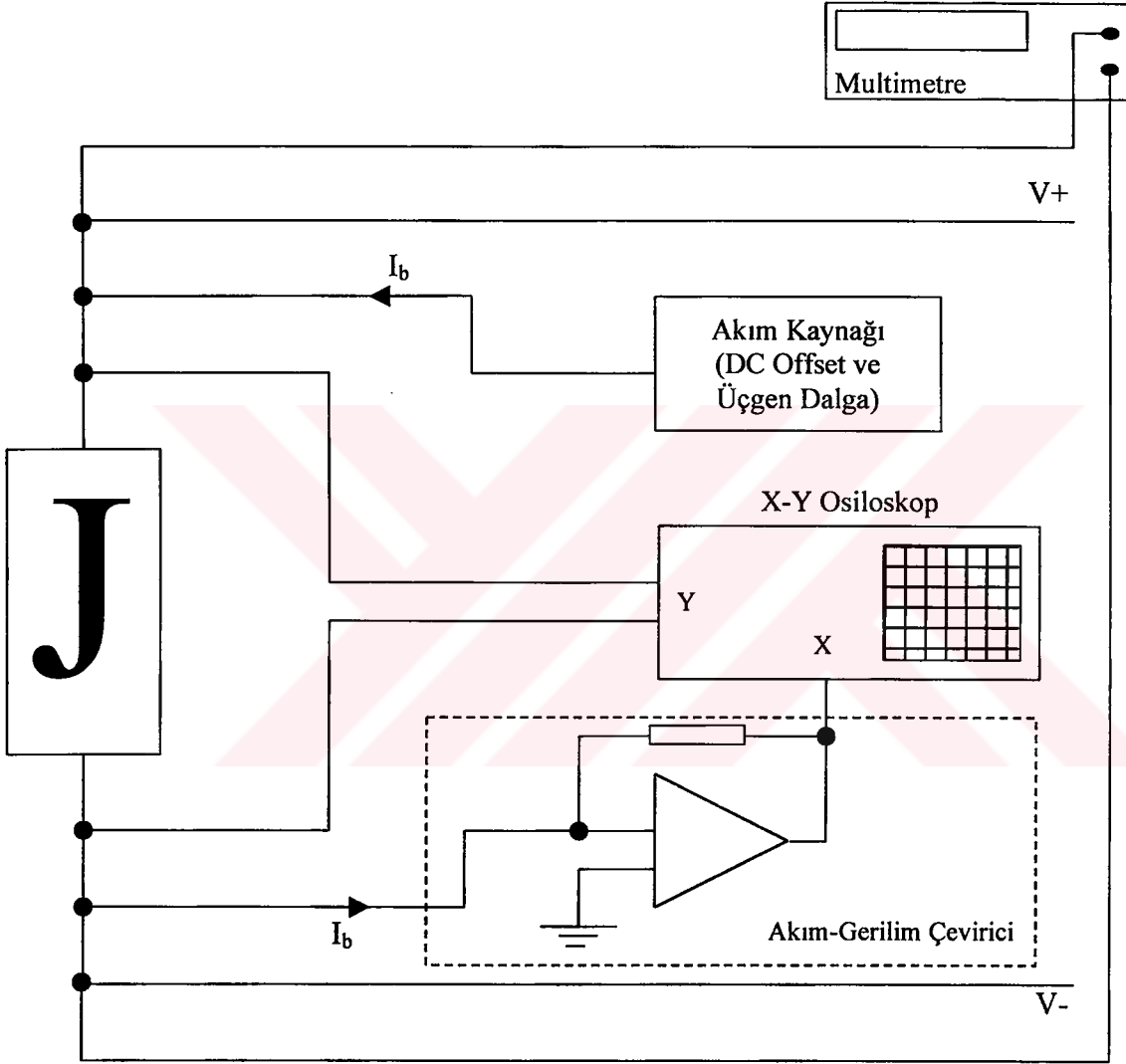
UME 10V Josephson Eklem Dizisi Gerilim Standardı'nda kullanılan Prob PTB yapımı olup, genliği zayıflatılarak diziye uygulanan mikrodalga, prob içinde yer alan dairesel dalgakılavuzu ile dizi üzerine gönderilmektedir. Dalga kılavuzundaki kayıp 1 dB/m iken, kılavuzu sisteme bağlayan arabirimlerdeki kayıp 0.3 dB'dir. Gunn osilatör, çiftleyici, karıştırıcı ve zayıflatıcı sistemi, probun üst kısmına monte edilmektedir.

Prob içinde dizi ve diziye giden tüm bağlantı kabloları tamamen ekranlanmıştır. Sabit gerilim adımları arasında gürültü nedeniyle oluşan atlamaların önlenmesi amacıyla diziye giden tüm bağlantılar prob girişinde filtrelenmektedir. Ayrıca istenmeyen toprak döngüsünün önlenmesi için mikrodalga kaynak ve mikser probdan izole edilmiştir.

Isıl gerilim hatalarının minimize edilmesi için prob içinde bakır ısıçift kablosu kullanılmıştır. Prob içinde her iki yönde 4 kablo olmak üzere 8 adet kablo kullanılmıştır. Bu 8 kablonun 6'sı diziye bias akımının uygulanması, Josephson gerilimini voltmetre ile ölçülmesi ve I-V grafiğinin osiloskopta gözlenmesi amacıyla kullanılmakta olup tek bir konnektöre bağlıdır. Diğer 2 kablo ise dizi gerilim çıkışları için olup ayrı bir konnektör üzerindedir. Probun sisteme bağlantı konfigürasyonları Şekil 4.6 ve 4.7'de gösterilmektedir.

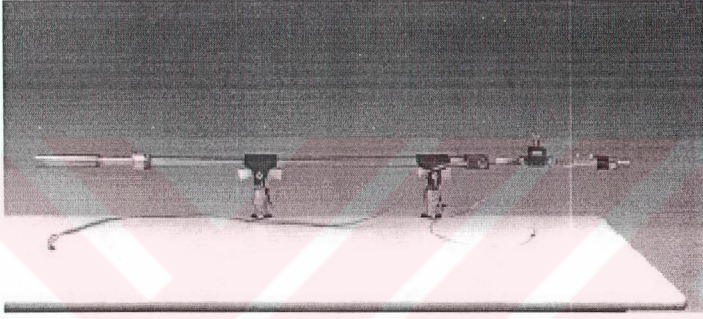


Şekil 4.6. Josephson Eklem Dizisinin sisteme bağlantı konfigürasyonu

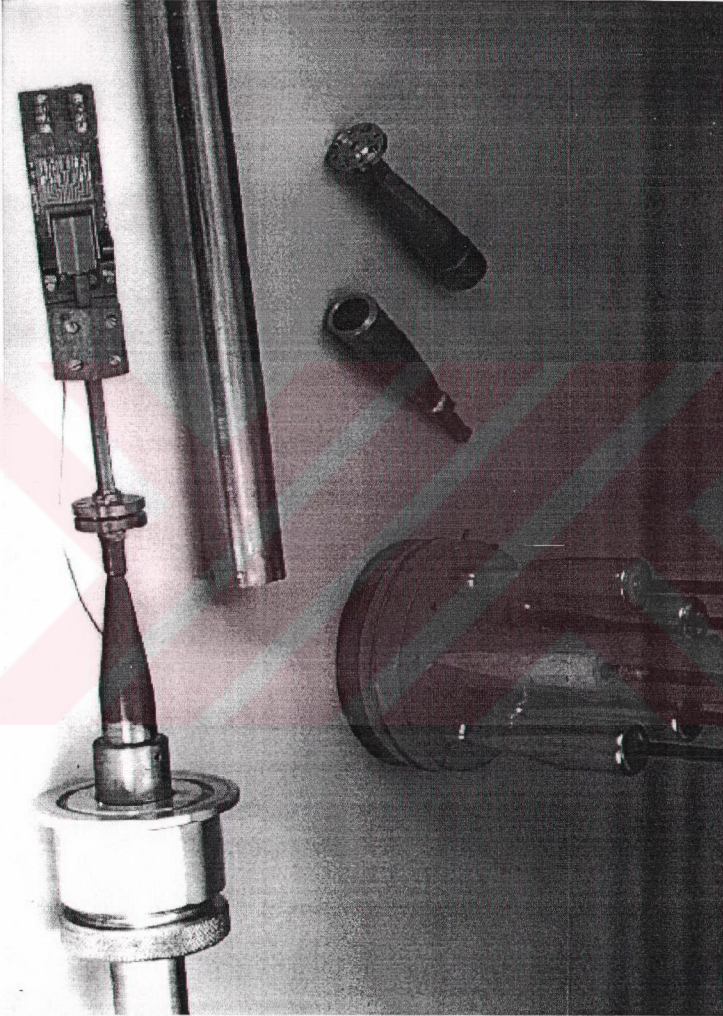


Şekil 4.7. Josephson Eklem Dizisinin sisteme bağlantı şeması

UME JEDGS'ında dizinin monte edilerek sıvı He'a daldırılmasında kullanılan prob, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da gösterilmektedir. Probu He içinde kalan ve Josephson eklem dizisi entegresini koruyan alt bölümü, manyetik alan etkisinin en aza indirilmesi amacıyla  $\mu$ -metalden yapılmıştır. Probu yüksekliği 120 cm olup, en geniş çap genişliği 38 mm'dir.



**Şekil 4.8.** UME JEDGS'nda kullanılan PTB yapımı prob



Şekil 4.9. UME JEDGS'nda kullanılan Josephson Eklem Dizisi'nin proba bağlantısı

### 4.3. Referans Frekans Standardı ve Faz Kilitleme Modülü

Josephson gerilim standartlarında kullanılan mikrodalga güç kaynağı 70-100 GHz arasında 60-100 mW güç sağlayan Gunn diyottur. Gunn osilatörden uygulanan güç bir zayıflatıcı (attenuator) kullanılarak kontrol edilmekte ve dizinin optimum çalışma noktası belirlenmektedir.

Josephson etkisinin matematiksel ifadesinde de görüldüğü gibi, dizi geriliminin doğruluğu doğrudan frekans doğruluğuna bağlıdır. Aynı zamanda oluşan gerilim adımlarının kararlılığı, uygulanan mikrodalğanın gürültüsü ile de orantılıdır. Bu nedenle Gunn diyodun frekansı, kolay ölçülebilir ve frekans gürültüsü düşük-yüksek spektral özellikte 10 MHz Rb frekans standardının frekansına kilitlenmek suretiyle frekans yeterli doğruluk ve hassasiyette kontrol edilmektedir.

Bu amaçla kullanılan çeşitli teknikler mevcut olup, yapılan ölçümler, frekans gürültüsünün en düşük olduğu tekniğin faz kilitleme tekniği (Phase Lock Loop-PLL) olduğunu göstermektedir (Andreone ve Godone 1997). UME JEDGS'ında frekans gürültüsünden kaynaklanan Josephson geriliminin standart sapmasının  $10^{-12}$ 'er mertebesinde ölçüldüğü faz kilitleme tekniği kullanılmaktadır. Sistemde kullanılan 75 GHz Gunn osilatörün bandgenişliği 2 kHz olup, bu değer faz kilitleme kontrol modülünü bandgenişliğinden oldukça küçüktür.

UME JEDGS, sadece 74.99 GHz'de çalışan bir sistemdir. Sistemin tek frekansta çalışması dizinin sadece bu frekansta çalışabileceği şeklinde algılanmamalıdır. Bu durum, dizinin çalışma frekansı ile ilgili olmayıp, sadece sistemde kullanılan 75 GHz Gunn diyodun fazını 10 MHz Rb referans standardına kilitleyen faz kilitleme modülünden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, faz kilitleme modülünün değiştirilmesi ile, JEDGS değişik frekanslarda da çalışabilir özelliktedir.

Çalışma frekansının 74.99 GHz olması dolayısıyla UME JEDGS'ından elde edilen Josephson gerilim değerleri;



$$V_J(n) = n \frac{f}{K_J} = n \frac{74.99\text{GHz}}{483579.9\text{GHz/V}} = n \times 155.0668438 \mu\text{V} \quad (4.1)$$

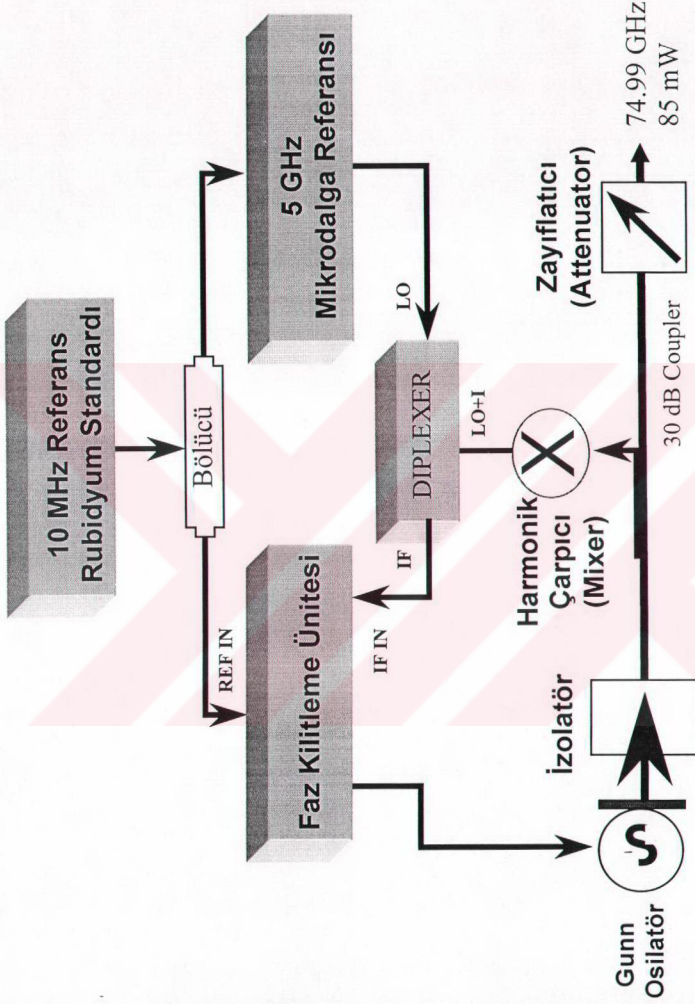
denklemleri ile ifade edilebilmektedir. Adım sayısı  $n$ 'in belirlenmesi ile Josephson gerilim değeri Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanır. Gözlemlendiği gibi UME JEDGS ile elde edilen iki ardışık Josephson gerilim adımı arasındaki gerilim farkı  $155.0668438 \mu\text{V}$ 'dir.

Sistemde kullanılan referans frekans standardı, Quartzlock Instrument tarafından üretilmiş olan Model 10A Rubidyum Atomik Frekans Standardıdır. Standartın nominal frekansı, +8 dBm ( $\pm 2$  dBm) genliğinde 10 MHz olup, frekans kararlılığı  $1 \times 10^{-11}$ 'dir.

UME 10 Volt JEDGS'ında kullanılan faz kilitleme modülü ise, Farran Technology Limited tarafından üretilen PLO-12-100-75E model PLL'dir.

Faz kilitleme modülü, Gunn osilatörü yüksek spektral saflıkta ve kullanımı kolay düşük frekans standardının harmoniğine kilitleyen gerekli devrelerden oluşmaktadır. Modül, aynı zamanda Gunn osilatörün çalışma noktasını belirleyen, diğer bir değişle osilatöre güç sağlayan güç kaynağı devresini de içermektedir. Osilatöre bu kaynaktan uygulanan gerilim, 5.7 V-6.1 V arasında değiştirilebilmektedir.

Şekil 4.10'da faz kilitleme sistemi sisteminin blok şeması verilmiştir. 5 GHz mikrodalga referansı, 10 MHz Rubidyum referansı ile kilitlenerek sistemin referansını oluşturur. Sistem, Gunn osilatörün bu referansın 15. harmoniği ile 10 MHz farkına kilitlenmesi suretiyle 74.99 GHz'de çıkış frekansı oluşturmaktadır. Bu durumda 74.99 GHz frekansının doğruluğu, Rubidyum referansının doğruluğuna eşittir. Zayıflatıcı çıkışında ölçülen maksimum güç  $85 \text{ mW}$ 'dir.



Şekil 4.10 UME JEDGS Faz kilitleme sistemi

#### 4.4. Fark Ölçen Voltmetre

Josephson gerilimi ile kalibre edilen standardın gerilim farkını ölçen voltmetre, kazanç hatası ve gürültü seviyesi düşük, çözünürlüğü  $10 \text{ nV}$ 'dan iyi, kaçak direnç  $10^{11}$ 'den yüksek olan bir voltmetre olmalıdır. UME JEDGS'ında bu amaçla kullanılan voltmetre, özellikle düşük gerilim ölçümleri için üretilmiş olan Keithley 182 hassas sayısal voltmetredir.

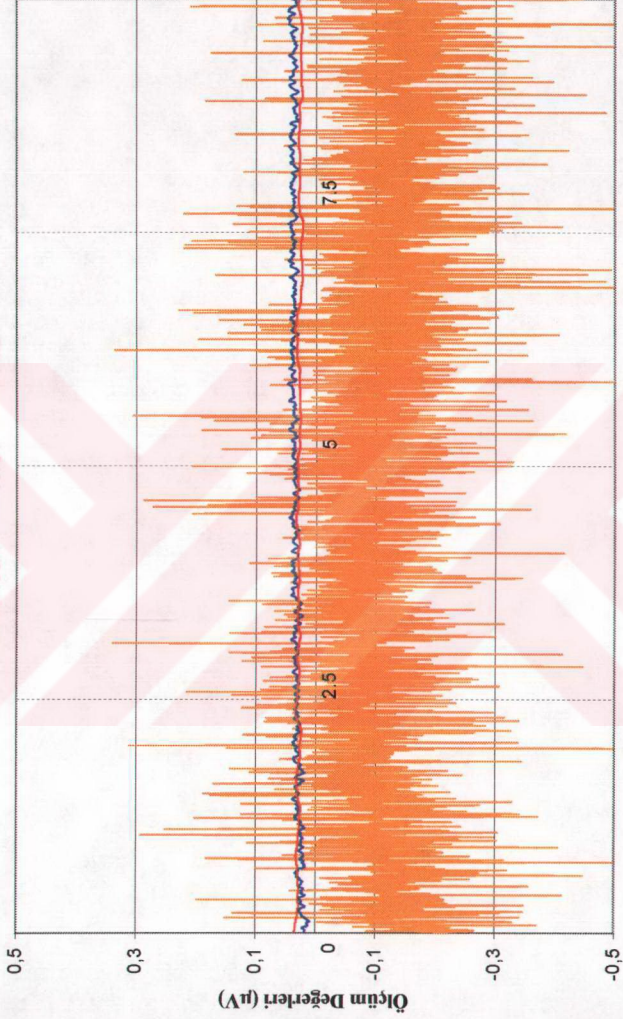
Keithley 182 Voltmetre bu özelliklerini yanısıra, artık pek çok multimetrede bulunan bir dizi ölçüm olarak ölçüm sonuçlarını içindeki CPU ile analiz etme ve IEEE-488 iletişim sistemi ile kontrol edilebilme özelliğine de sahiptir. Bu özelliği ile bir dizi ölçümün ortalama değerini almak ve standart sapmayı görmek suretiyle ölçüm güvenilirliğini arttırmak mümkündür. Voltmetre ölçümler esnasında en düşük ölçüm bölgesi olan  $3 \text{ mV}$  ölçüm bölgesinde kullanılmaktadır.

Laboratuvarda mevcut 3 farklı voltmetre (HP 3458A, Keithley 181, Keithley 182) girişleri kısa devre edilerek, JEDGS ile kalibrasyon için gerekli süre olan 10 dakika süresince sıfır kararlılıkları test edilmiştir. Ölçümler sırasında "integration time" tüm voltmetreler için  $20 \text{ ms}$  olarak alınmıştır. Ölçümler sonucunda sıfır değişimlerinin HP 3458A için  $1 \mu\text{V}_{p-p}$ , Keithley 181 için  $38 \text{ nV}_{p-p}$ , Keithley 182 için ise  $13 \text{ nV}_{p-p}$  olarak ölçülmüştür. Ölçümlerde aynı kısa devre bağlantısı kullanılmış olup, kısa devre bağlantısı ortam şartlarındaki ani değişimlerden etkilenmesinin en aza indirilmesi amacıyla bir muhafaza içinde korumaya alınmıştır. Tüm ölçümler yarım saat içinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.11'de görüldüğü gibi en iyi ölçümler Keithley 182 ile alınmıştır.

JEDGS ile gerçekleştirilen ölçümlerde, Josephson gerilimi ile kalibre edilen standardın değeri tam olarak eşit olmadığından gerilim farkını ölçen voltmetrenin kazanç ve doğrusallık hatası da ölçümlerde önemli bir etkendir.

### MULTİMETRELERİN KARARLILIK ÖLÇÜMLERİ

— 3458A — K181 — K182



Ölçüm zamanı (dakika)

Şekil 4.11. HP 3458A DMM ve Keithley 181 nanovoltmetre ve Keithley 182 hassas sayısal voltmetrenin kararlılık ölçümleri

Voltmetrenin bağıl kazanç hatası, kazancın 1'den farklı olabileceği dikkate alınarak;

$$E = (G - 1) \frac{V_{DVM}}{V_R} \quad (4.2)$$

denklemleri ile belirlenir. Denklikte G voltmetrenin kazancı,  $V_{DVM}$  ölçülen gerilim,  $V_R$  ise referansın nominal değeridir. Örneğin, UME sisteminde kullanılan Keithley 182 voltmetrenin kazancı kalibrasyon yoluyla 0.9999908 olarak belirlenmiş olsun. 10V referans kalibrasyonunda voltmetre ile ölçülen fark gerilimi 30  $\mu V$  ise ölçümdeki voltmetre hatası;

$$E = (0.9999908 - 1) \frac{30 \times 10^{-6}}{10} = -0.03 \times 10^{-9} \quad (4.3)$$

olarak hesaplanır.

Voltmetrenin kazancı ise;

$$G = \frac{V_{ölçülen} - V_0}{V_{range}} \quad (4.4)$$

denklemleri ile belirlenir. Denklemde  $V_{ölçülen}$  voltmetreye ölçüm bölgesinde maksimum gerilimi uygulanması durumunda ölçülen değer,  $V_0$  sıfır gerilimde ölçülen değer,  $V_{range}$  ise voltmetrenin ölçüm bölgesidir. Keithley 182'nin 3 mV ölçüm bölgesinde kazancının belirlenmesi amacıyla yapılan ölçümlerde uygulanan Josephson gerilimi 2.946270 mV iken voltmetre ile bu gerilim değeri 2.946255 mV olarak ölçülmüştür. 0 giriş geriliminde ise ölçülen gerilim 0.000012 mV'dur. Bu durumda voltmetrenin kazancı

$$G = \frac{2.946255 - 0.000012}{2.946270} = 0.9999908 \quad (4.5)$$

olarak bulunur.

#### 4.5. Josephson Gerilim Adımını Belirleyen Multimetre

UME JEDGS sisteminde Josephson gerilim adımının değeri, Josephson eklem dizisine doğrudan filtre sistemi üzerinden bağlı HP 3458A multimetre kullanılarak belirlenebilmektedir.

Doğruluğunun Josephson geriliminin doğruluğundan daha iyi olması beklenemeyen multimetrenin ölçüm doğruluğunun, iki Josephson gerilim adımı arasındaki farkın yarısından, yani  $75 \mu\text{V}$ 'dan iyi olması Josephson gerilim değerinin belirlenebilmesi için yeterli şarttır. HP 3458A multimetre ise  $10 \text{ V}$ 'da yıllık kayması  $40 \mu\text{V}$  oluşu sebebiyle bu şartı sağlayan bir multimetredir. Multimetrenin kalibrasyonu UME gerilim laboratuvarında 6 aylık periyotlarla gerçekleştirilmekte olup doğruluğu kontrol altında tutulmaktadır.

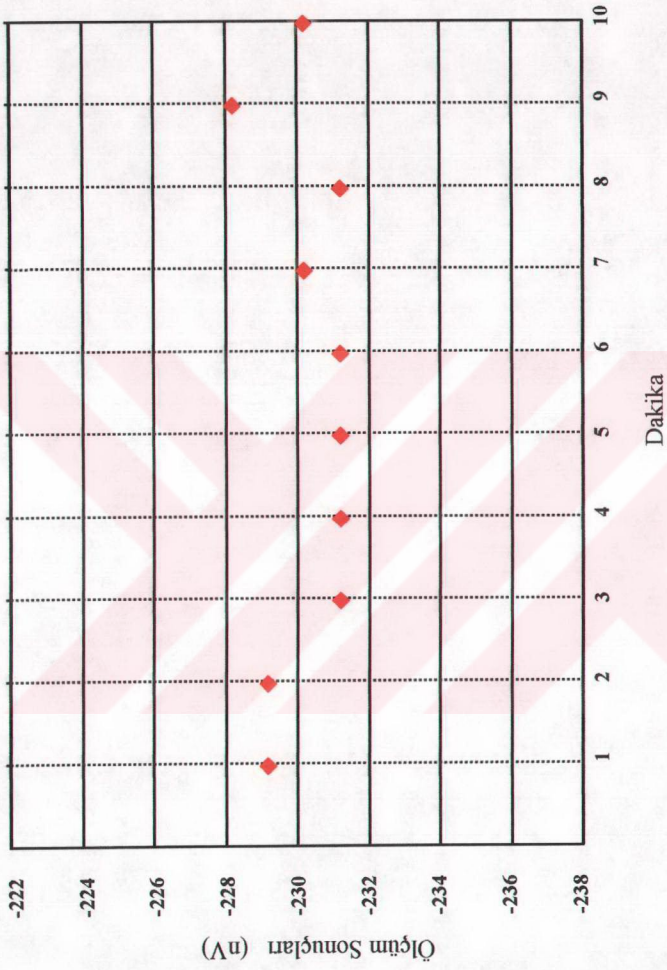
#### 4.6. DC Kaynak

İstenilen gerilim adımının elde edilmesi için çalışma noktasını belirleyen DC kaynak Josephson eklem dizisine,  $\pm 10\text{V}$ 'a kadar DC ofset ve Josephson adımının osiloskop ile gözlemlenmesi için  $0.5 \text{ Hz}$ - $100 \text{ Hz}$  aralığında frekansı ayarlanabilir tüçgen akım sağlamaktadır. DC ofset oldukça kararlı ve ayarlanabildir. PTB yapımı olan akım kaynağı, gürültü faktörü göz önüne alınarak şebeke gerilim yerine 22 adet  $1.2 \text{ V}$  NiCd pil ile beslenmektedir.

#### 4.7. Anahtar

Standartların bağlantılarını tersleyen anahtar bakır plakalardan oluşturulmuştur. Bir ucu bakır diğer ucu ısı iletimi oldukça düşük bir malzemenen yapılmış çubuklar kullanılarak bu bakır plakalar kısa devre edilmekte ve istenilen bağlantı konfigürasyonu sağlanmaktadır. Sistemden anahtara gelen kablolar da bakırdır. Bu şekilde termal emf hataları en aza indirilmiştir. Bilindiği gibi Cu/Cu bağlantısının termal emf değeri  $0.02 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  olup elde edilebilecek en küçük değerdir.

UME JEDGS'ı 0 Josephson adımında iken sistemdeki termal emf değerlerindeki değişimi test edilmiştir. Diziden anahtara kadar olan tüm bağlantılardan kaynaklanan termal emf bir ölçüm süresinin 10 dakika olduğu göz önüne alınarak ölçülmüş ve değişiminin  $2 \text{ nV}$ 'dan düşük olduğu saptanmıştır (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Termal emf ölçümleri

#### 4.8. Sıvı Helyum Tankı

UME Gerilim Laboratuvarında, probun He içinde muhafazası için, elektromanyetik ekranlama özelliğine sahip iki farklı sıvı helyum tankı kullanılmaktadır. Tanklarda biri 38 litre diğeri ise 60 litre kapasitede olup, sistemde kullanılan probun çapının 38 mm oluşu sebebiyle, 50 mm çapında boyun genişliğine sahiptirler.

Tank içindeki sıvı He, zamanla sıcaklık etkisi ile gaz hale geçmektedir. Oluşan He gazı, UME He geridönüşüm sistemine gönderilmektedir. Ancak, gazın bir kısmı, prob ve flanşlardaki kaçaqlardan havaya karışmaktadır. Bu nedenlerle, proplar içinde kullanılabilir He seviyesi belirli bir süre için tankta mevcuttur. Bu süre 38 litrelik tank için yaklaşık 9 gün, 60 litrelik tank için de 20 gün civarındadır.

Laboratuvarda kullanılan tankların özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

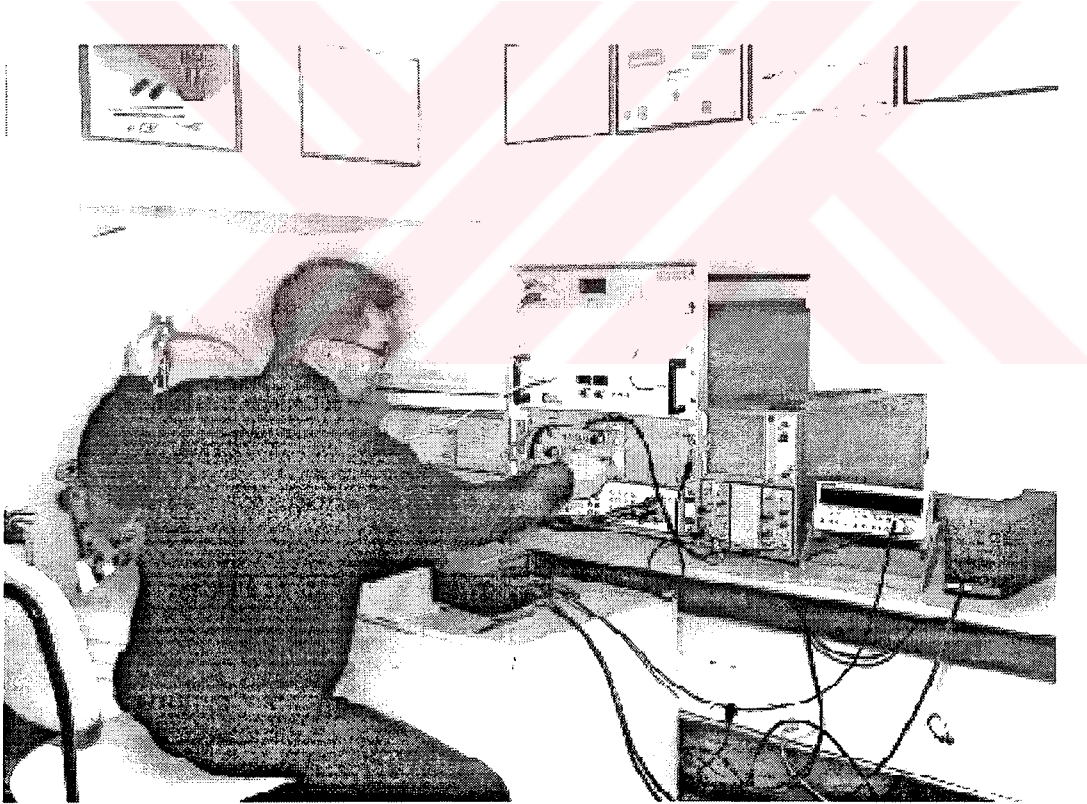
**Tablo 4.2.** UME JEDGS’ında kullanılan He tanklarına ait teknik özellikler

Özellikler	38 lt	60 lt
Üretici Firma	L’air Liquide	Wessington Cryogenic Limited
Model No	RH 38	CH 60
Kapasite	38 lt	60 lt
Günlük He kaybı	1.9 %	2.7 %
Boş ağırlık	23 kg	79 kg
Dolu ağırlık	27.5 kg	87 kg
Boyun Genişliği	50 mm	50 mm
Dış çap	460 mm	540 mm
Yükseklik	920 mm	1260 mm



## 5. UME JEDGS İLE DC GERİLİM STANDARDI KALİBRASYONU

Bir DC gerilim standardının Josephson Eklem Dizisi Gerilim Standardı ile kalibrasyonu (Şekil 5.1), gerilim ölçümlerinde en yüksek doğruluk sağlayan karşılaştırma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilir. Josephson gerilimi ve DC gerilim standardı çıkışı, anahtar üzerinde ters polaritede seri bağlanır ve aralarındaki mikrovoltlar mertebesindeki gerilim farkı ölçülür. Termal emf etkisinin ölçüm sonucunun etkisinin belirlenebilmesi için ölçümler her iki polaritede de alınır. Kalibre edilen gerilim standardının çıkış gerilimi, termal emf etkisinin belirlenmesi ve ölçüm sonucunun düzeltilmesi suretiyle belirlenmektedir.



Şekil 5.1. DC gerilim standardının UME JEDGS ile kalibrasyonu.

Kalibrasyon öncesinde JEDGS çalıştırılarak kalibre edilen gerilim standardının sisteme bağlantısı gerçekleştirilerek JEDGS çalıştırılır. Sistemin çalıştırılması,

Josephson Eklem dizisinin uygun olarak soğutulması, diziye uygun rf gücün uygulanması ve istenen Josephson gerilimi için adımın elde edilmesi aşamalarıyla gerçekleştirilmektedir. Ek A'da, sistemin çalıştırılması öncesi prob üzerinden, Josephson Eklem Dizisini sisteme bağlayan kabloların kontrolü ve probun sıvı He'a daldırılışından, sistemin kapatılarak probun sıvı He tankından çıkarılışına kadar olan evrelerden bahsedilmekte ve DC Gerilim Standardı kalibrasyonu için hazırlanmış ayrıntılı kalibrasyon prosedürü verilmektedir.

### 5.1. Karşılaştırma Yöntemi

Bu yöntemde, JEDGS ile UUT ters polaritede seri bağlanarak aralarındaki gerilim farkı bir voltmetre ile ölçülmek suretiyle belirlenmektedir. Voltmetre ile ölçülen gerilim idealde aşağıdaki gibidir;

$$\Delta V_{DVM} = V_J - V_{UUT} \quad (5.1)$$

Denklemden  $V_J$  değeri bilinen Josephson gerilimi,  $V_{UUT}$  ise kalibre edilen gerilim standardının gerilim değeri,  $V_{DVM}$  ise voltmetre ile ölçülen gerilim farkıdır. Gerçekte ise voltmetrede okunan değer, kablo ve kontak dirençlerinden kaynaklanan sabit artırı gerilimini de içermektedir. Bu gerilim değeri, iki farklı anahtar bağlantısı ile gerçekleştirilen ölçümlerin ortalaması alınmak suretiyle ölçüm sonucundan uzaklaştırmaktadır.

Şekil 5.2'de pozitif polarite ölçümü için +Josephson Gerilimi ile UUT'nin anahtar üzerindeki bağlantı konfigürasyonu gösterilirken, şekil 5.3'de negatif polarite ölçümü için -Josephson Gerilimi ile UUT'nin anahtar üzerindeki bağlantı konfigürasyonu gösterilmektedir.

$\Delta V_{DVM+}$  ve  $\Delta V_{DVM-}$  değerleri birinci ve ikinci ölçümlerde okunan gerilim değerleri olup matematiksel olarak ;

$$\Delta V_{DVM+} = V_J - V_{UUT} - (V_1 + V_2) \quad (5.2)$$

$$\Delta V_{DVM-} = V_{UUT} - V_J - (V_1 + V_2) \quad (5.3)$$

şeklinde ifade edilebilirler. İki ölçüm sonunda okunan gerilim değerlerinin toplamı bize artık emf değerini verirken, farkları da artık emf değerinden bağımsız olarak Josephson gerilimi ve kalibre edilen gerilim standardının çıkış gerilimi arasındaki gerilim farkını vermektedir;

$$\Delta V_{DVM+} + \Delta V_{DVM-} = -2 (V_1 + V_2) \quad (5.4)$$

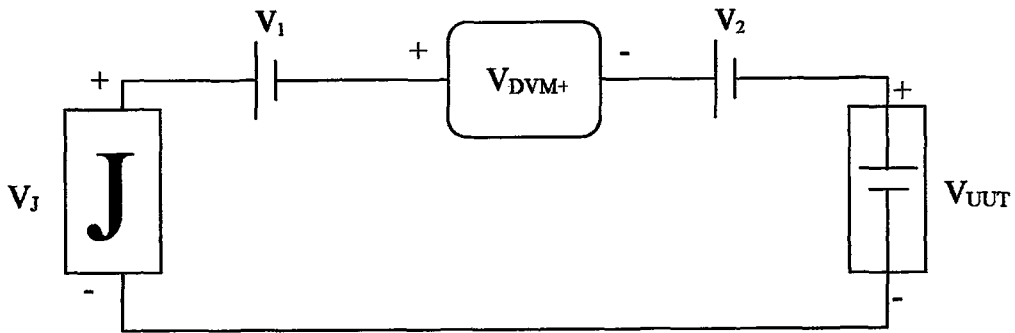
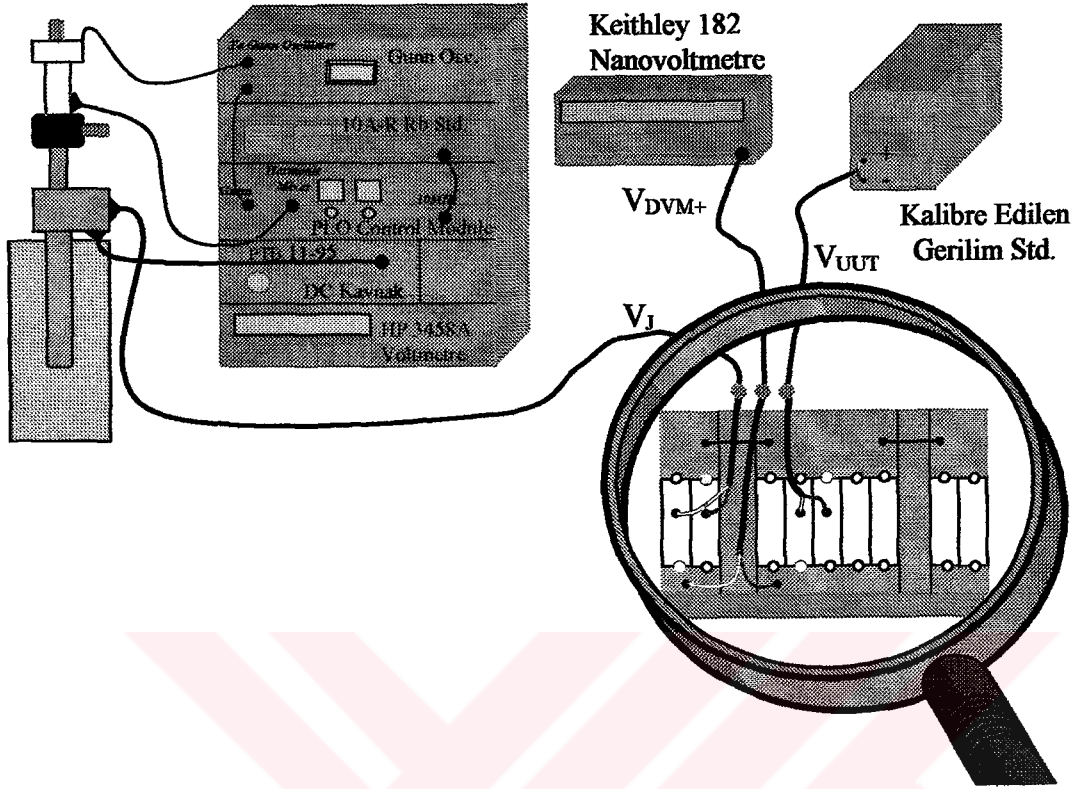
$$\Delta V_{DVM+} - \Delta V_{DVM-} = 2 (V_J - V_{UUT}) \quad (5.5)$$

Denklem 5.5 düzenlendiğinde kalibre edilen gerilim standardının değeri;

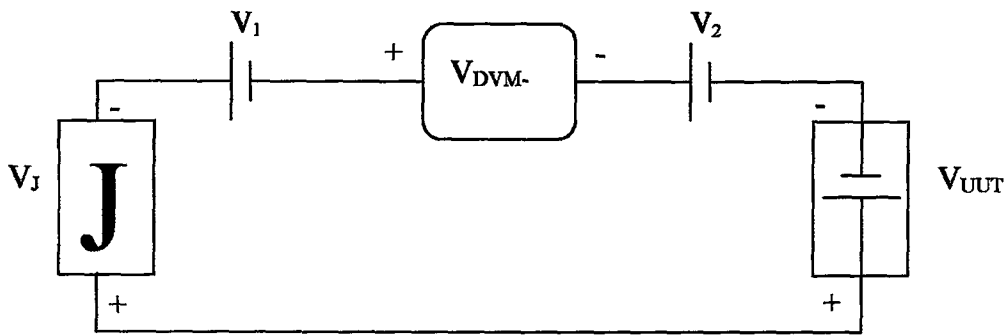
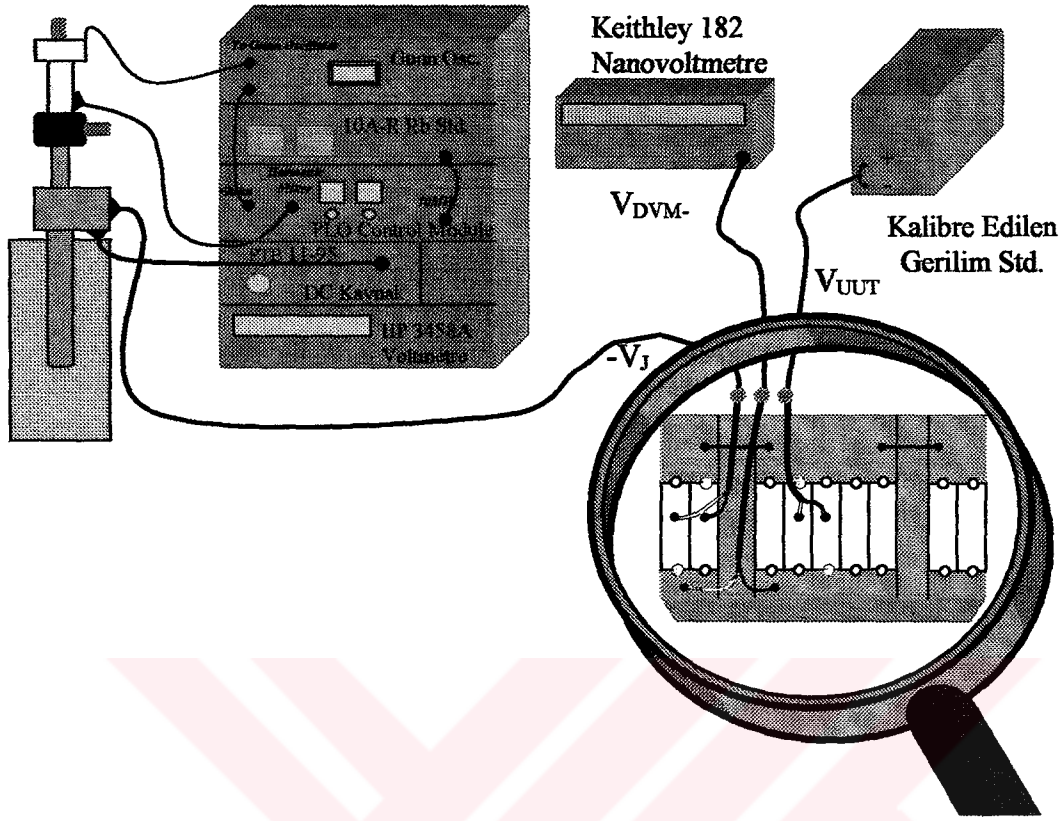
$$V_{UUT} = V_J - V_{DVM} \quad (5.6)$$

olarak belirlenmektedir. Denklem 5.6'da  $V_{DVM}$ , pozitif ve negatif polaritede voltmetre ile ölçülen gerilimler arasındaki farkın yarısıdır;

$$V_{DVM} = \frac{V_{DVM+} - V_{DVM-}}{2} \quad (5.7)$$



**Şekil 5.2.** Pozitif polaritede alınan ölçümler için anahtarın konfigürasyonu ve sistemin bağlantı şeması



**Şekil 5.3.** Negatif polaritede alınan ölçümler için anahtarın konfigürasyonu ve sistemin bağlantı şeması

## 5.2. DC Gerilim Standardı Kalibrasyonu

DC Gerilim standardı kalibrasyonu, Josephson Eklem Dizisi Gerilim Standardı kullanılarak aşağıda verilen kalibrasyon prosedürü ile gerçekleştirilir;

1. Josephson standardı ve kalibre edilecek gerilim standardı pozitif yönde ölçüm için anahtara bağlanır.
2. Keithley 182 multimetre ile en küçük fark gerilimi ölçülünceye kadar “voltage fine” ve “manual sweep” ayarlanmaları yapılarak, değeri kalibre edilen standardın değerine en yakın Josephson gerilim adımı yakalanır.
3. İstenen adımda iken, Keithley 182 voltmetre ile ölçülen fark değeri  $V_{DVM+}$  olarak kaydedilir.
4. Anahtar üzerindeki gerilim standardı bağlantıları kısa devrenin kaldırılmasıyla iptal edilir.
5.  $U_{ref}$  anahtarı “ $+U_{ref}$ ” pozisyonundan “ $-U_{ref}$ ” pozisyonuna alınır.
6.  $-10V$  gerilim adımı elde edilinceye kadar “Josephson Gerilim Adımının Yakalanması” prosedüründe anlatıldığı gibi gerekli ayarlamalar yapılır.
7. Ters polarite ölçümü için anahtar uygun konuma alınır.
8. Keithley 182 multimetre ile en küçük fark gerilimi ölçülünceye kadar “voltage fine” ve “manual sweep” ayarlanmaları yapılarak, değeri kalibre edilen standardın değerine en yakın Josephson gerilim adımı yakalanır.
9. İstenen adımda iken, Keithley 182 voltmetre ile ölçülen değer  $V_{DVM-}$  olarak kaydedilir.
10. Anahtar üzerindeki gerilim standardı bağlantıları iptal edilir.

11. Ölçüm esnasında, Josephson Gerilimini değeri, kalibre edilen standardın yaklaşık bilinen değeri kullanılarak hesaplanabileceği gibi, sistemdeki HP 3458A multimetre kullanılarak doğrudan ölçülmek suretiyle de belirlenebilir. HP 3458A multimetre sistemde kullanıldığında gürültü kaynağı oluşu sebebiyle hassas ölçümlerde Josephson gerilim adımının kalibre edilen standardın değeri kullanılarak belirlenmesi daha uygundur. Kalibre edilen gerilim standardının bilinen yaklaşık değeri ( $V_{std.}$ ) kullanılarak Josephson gerilim adımı ve Josephson gerilim değeri aşağıda verilen metodla hesaplanır;

- ◆ İki polaritede alınan ölçümlerin farkı ( $V_{DVM+} - V_{DVM-}$ ) ikiye bölünür;

$$\bar{V}_{DVM} = \frac{V_{DVM+} - V_{DVM-}}{2} \quad (5.8)$$

- ◆ Anahtarın HI girişine Josephson Gerilimi bağlı olduğundan, ölçülen fark gerilimi, Josephson gerilimi ( $V_J$ ) ile kalibre edilen standardın gerilim değerinin farkıdır ( $V_{std.}$ ). Dolayısıyla Josephson geriliminin yaklaşık değeri;

$$V_J = V_{std.} + \bar{V}_{DVM} \quad (5.9)$$

denklemleri ile hesaplanır.

- ◆ 
$$\frac{f}{K_{J-90}} = \frac{74.99 \text{ GHz}}{483597.9 \text{ GHz/V}} = 155.0668438 \times 10^{-6} \quad (5.10)$$

olduğundan, n adım sayısı Denklem 5.11 kullanılarak hesaplanır. Bölüm değeri en yakın tam sayıya yuvarlanarak n sayısı belirlenir.

$$n = \text{Yuvarlat} \left[ \frac{V_J}{155.0668438 \times 10^{-6}} \right] \quad (5.11)$$

- ◆ n adım sayısı kullanılarak Josephson Geriliminin gerçek değeri hesaplanır;

$$V_J(n) = n \times 155.0668438 \times 10^{-6} \quad (5.12)$$

12. Hesaplanan Josephson gerilimi kullanılarak, kalibre edilen standardın gerilim değeri ( $V_{UUT}$ ) şu şekilde belirlenir:

$$V_{UUT} = V_J(n) - \bar{V}_{DVM} \quad (5.13)$$

### **ÖNEMLİ BİLGİ**

İki Josephson gerilim adımı arasındaki fark yaklaşık  $155 \mu V$  olduğundan, kalibre edilen standardın değeri en fazla  $77 \mu V$ 'luk hata ile biliniyor olmalıdır.

Bir gerilim standardının kalibrasyonu için hesaplama örnekleri EK B'de verilmektedir.



## 6. UME-BNM/LCIE 10V JEDGS KARŞILAŞTIRMA ÖLÇÜMLERİ

Ulusal metroloji enstitülerinde birinci seviye standart olarak kullanılan Josephson eklem dizisi gerilim standartları gerilimi doğrudan fiziksel sabitler üzerinden tanımlamalarına rağmen, uluslararası ölçüm birliğine entegrasyon amacıyla karşılaştırılmaları gereklidir. Bu gereklilik, Josephson etkisinin değişkenliği şüphesinden kaynaklanmayıp, sistemin kalbini oluşturan Josephson eklem dizisini çevreleyen ve laboratuvar sıcaklığında bulunan kompleks sistemin kontrolü içindir. Bununla birlikte, gerçekleştirilen kalibrasyonların uluslararası alanda tanınmasının sağlanması için de JEDGS'lerinin karşılaştırılmaları gereklidir (Reyman ve Witt 1993).

Eylül'1997 tarihinde UME'de kullanıma alınan 10 Volt JEDGS'nin doğruluğunun uluslararası platformda tanınması amacıyla, Fransa'nın ulusal metroloji enstitüsü olan BNM/LCIE ile EUROMET (A European Collaboration on Measurement Standards) projesi olarak karşılaştırma ölçümleri gerçekleştirilmiştir (EK C). BNM/LCIE'e ait 10V JEDGS, BIPM'e ait JEDGS ile doğrudan ve transfer standart kullanılarak karşılaştırılmış ve doğruluğu uluslararası platformda teyid edilmiştir (Lo-Hive 1995).

UME-BNM/LCIE karşılaştırma ölçümleri, Nisan ve Mayıs ayları boyunca, gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma, doğrudan olmayan metodla, transfer standart kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Transfer standart olarak kullanılan Zener DC gerilim standartların zamanla değişim göstermeleri ve farklı sıcaklık, basınç karakteristiklerine sahip olmaları nedeniyle, ölçümlerde güvenilirliğin artırılması amacıyla 4 adet transfer standart kullanılmıştır. Ölçümlerde kullanılan transfer standartlar UME'ye ait dört adet Fluke 732B DC Referans Standartlarıdır.

## 6.1. UME Josephson Gerilim Standardı

UME JEDGS Bölüm 4'de anlatılmıştır. Standart, normal laboratuvar koşullarında,  $(45\pm 10)\%$  nem ve  $(23\pm 1)^\circ\text{C}$  sıcaklıkta çalışmakta olup standart için özel bir elektromanyetik ekranlama yapılmamıştır.

Karşılaştırma ölçümleri öncesinde, sistemde kullanılan multimetreler kalibre edilmiştir. Multimetrelerin ayar kalibrasyonu ve performans testleri, doğruluğun artırılması amacıyla 10V'a kadar JEDGS kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Multimetrelerin 10V'un üzerindeki değerlerinin kalibrasyonu ise DATRON 4808 kalibratör kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Ölçümler sırasında fark gerilimi ölçen multimetre en küçük ölçüm bölgesi olan 3 mV bölgesinde kullanılmış olup, her polaritede alınan ölçümler 50 ölçümün ortalama değeri alınarak kayıtlara geçilmiştir. 50 ölçüm ortalama değeri Keithley 182 voltmetrenin istatistik hesaplama özelliği kullanılarak belirlenmiştir. Aynı zamanda 50 ölçümün standart sapması gözlenerek, Josephson adımının kararlılığı ve ölçümün güvenilirliği gözlenmiştir; Bir polaritede alınan 50 ölçümün standart sapması 200 nV'dan düşük olmasının normal olduğu kabul edilerek, sapması bu değerden düşük olan ölçüm sonuçları karşılaştırma ölçüm sonucu olarak değerlendirmeye alınmıştır.

## 6.2. BNM/LCIE Josephson Gerilim Standardı

BNM/LCIE 10Volt JEDGS çeşitli açılardan UME sisteminden farklıdır; Sistem ekranlanmış bir alan içinde kullanılmaktadır. Ölçümler, bilgisayar kontrolü ile operatör müdahalesi gerekmeden alınabilmektedir. Gunn diyot frekansı, EIP firması tarafından üretilen faz kilitlemeli frekans sayıcı kullanılarak istenen frekansta otomatik olarak kilitlenmekte olup, diziye uygulanan akım ve frekans bilgisayar kontrolü ile değiştirilmek suretiyle Josephson gerilim adımı seçilmektedir. Josephson gerilim adımı elde edildikten sonra ölçümler esnasında akım kaynağı diziden ayrılmakta ve adım atlamalarının azaltılması amaçlanmaktadır.

### 6.3. Karşılaştırma

Karşılaştırma UME'ye ait 4 adet Fluke 732B zener referans standartları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma, her bir laboratuvarında, zener referans standartlarının kalibrasyonları için kullanılan kalibrasyon prosedürleri kullanılarak, Fluke 732B'lerin 10V çıkışlarının ölçülmesi suretiyle yapılmıştır.

732B'lerin aküleri, standartların transferi ve ölçümleri esnasında problem yaşanmaması amacıyla ölçümlerin başlanmasından önce UME'de değiştirilmiştir.

İlk olarak 732B'ler UME 10 Volt JEDGS ile iki hafta boyunca UME'de ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları EK D'de sunulmaktadır. İki hafta sonunda standartların Fransa'ya, BNM/LCIE'e, akü ömrünün elverdiği süre içinde nakli gerçekleştirilmiştir. Nakil standartlar kargoya verilmeden, mekanik şoklar veya önemli sıcaklık değişimlerinden etkilenme riskini en aza indirmek amacıyla, bir kişi nezaretinde hava yolu ile gerçekleştirilmiştir. BNM/LCIE'de standartlar, akülerin şarjı ve standartların iç sıcaklıklarının kararlı hale gelmesi amacıyla bir günlük beklemeden sonra, beş gün süreyle ölçülmüşlerdir. Fransa'da gerçekleştirilen ölçüm sonuçları EK E'de sunulmaktadır. Standartlar yine hava yolu ile UME'ye getirilmiş ve bir hafta süreyle ölçümleri tekrarlanmıştır. Ölçümler, Fluke 732B'ler ana şebekeden ve aküden beslenirken alınmıştır.

732B'lerin değerleri her iki laboratuvarında da karşılaştırma metodu kullanılarak belirlenmiştir. Bu yöntem kullanılarak standart değerleri, iki polaritede ölçümlerin alınarak, voltmetre ve bağlantılardan kaynaklanan ofset ve termal emf hatalarının belirlenmesi ve ölçüm sonuçlarından çıkarılması suretiyle belirlenmiştir.

### 6.4. Ölçüm Sonuçlarının Analizi

Karşılaştırma sonuçları, doğrusal en küçük kare uydurma yöntemi (Linear Least Square Fit) kullanılarak analiz edilmiştir. Bu yöntem ile ilgili ayrıntılı bilgi EK F'de verilmektedir. Her 732B'nin zamanla değişim sabitleri "a" ve "b", sadece UME'de gerçekleştirilen ölçüm sonuçları kullanılarak, doğrusal en küçük kare uydurma yöntemi ile belirlenmiştir.

$$V_{732B} = a + bt \quad (6.1)$$

Standartların, Fransa’da ölçümlerinin gerçekleştirildiği tarih ve saatlerde ölçümlerinin UME’de gerçekleştirilmiş olması durumunda ölçülebilecek tahmini gerilim değerleri Formül 6.1 kullanılarak hesaplanmış ve aynı saatte BNM/LCIE’de ölçülen değerleri ile farkları belirlenmiştir. Karşılaştırma ölçüm sonucu her ölçülen standart için, bu farkların ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

Herbir 732B referans standardı için ölçüm değerleri ve  $1\sigma$  seviyesindeki A tipi belirsizlik (EK G) değerleri Tablo 6.1’de verilmiştir. Tablodaki  $V_{UME}-V_{BNM/LCIE}$  fark değeri iki enstitünün 10V Josephson Gerilim Standartları arasındaki gerilim farkını göstermektedir.

**Tablo 6.1.** Fluke 732B DC Gerilim Standartları’nın ölçüm sonuçları ve  $1\sigma$  seviyesinde A tipi belirsizlikleri.

Fluke 732B DC Gerilim Standartları	$V_{UME}-V_{BNM/LCIE}$ ( $\mu V$ )	$\sigma_A$ ( $\mu V$ )
Ref.1 (S/N: 5610110)	+0.10	0.14
Ref.2 (S/N: 5610210)	-0.24	0.41
Ref.3 (S/N: 5610310)	+0.35	0.22
Ref.4 (S/N: 5610410)	-0.04	0.20

## 6.5. Belirsizlikler

Sistemdeki B tipi belirsizlik (EK H) kaynakları, frekans doğruluğu, voltmetre etkileri ve kaçak akımlardan gelen hatalardır.

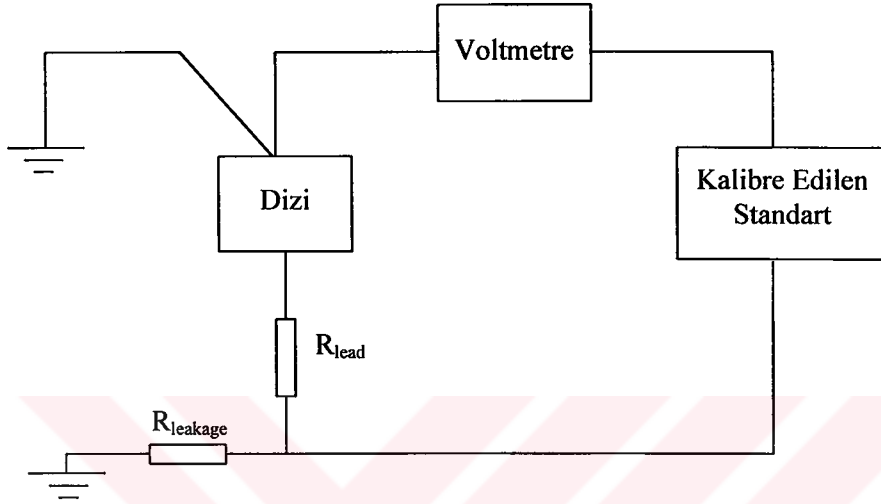
Karşılaştırma ölçümleri öncesinde UME JEDGS’ında kaçak akımlardan kaynaklanan belirsizlik değeri “lead” ve “leakage” direçlerinin ölçülmesi suretiyle belirlenmiştir. Şekil 6.1’de ölçüm sistemindeki “lead” ve “leakage” direçler gösterilmektedir. UME ölçüm sistemindeki bu direnç değerleri,  $3.5 \Omega$  ve  $1.5 \times 10^{10} \Omega$  olarak belirlenmiştir.

Dolayısıyla bu dirençlerden kaynaklanan kaçak akım belirsizliği

**LC YÜKSEKÖĞRETİM KURULU**  
**DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

$$\frac{\partial V}{V} = -\frac{R_{\text{lead}}}{R_{\text{leakage}}}$$

eşitliği kullanılarak  $0.2 \times 10^{-9}$  (2 nV) olarak belirlenmiştir. Eşitlikteki – ifadesi kaçak akımın her zaman dizi gerilimini azaltacak yönde etki ettiğini ifade etmektedir.



**Şekil 6.1.** DC gerilim standardı kalibrasyonunda “lead” ve “leakage” dirençleri

Ölçümlerdeki diğer sistematik hata bileşenleri Tablo 6.2’de verilmiştir.

**Tablo 6.2.** UME ve BNM/LCIE JEDGS’larının B tipi belirsizlik bileşenleri

	Belirsizlik (nV)	
	UME	BNM/LCIE
Frekans	0.4	0.1
Voltmetre	1.0	1.0
Kaçak Akım	2.0	1.0
Termal emf	1.0	1.0
Toplam*	2.5	1.8

Toplam\* : Tüm bileşenlerin karelerinin toplamının karekökü

## 6.6. Karşılaştırma Sonuçları

Şekil 6.2, 6.3, 6.4 ve 6.5’de grafik üzerinde gösterilen sonuçlar incelendiğinde Ref.2’nin ölçümlerindeki standart sapmanın yüksek olduğu, dolayısıyla Ref.2’nin 10V geriliminin gürültü seviyesinin diğerlerine oranla daha fazla olduğu görülmektedir. Ref.3’ün ölçümlerinde ise, diğer standartların kalibrasyonunda kullanılan aynı ölçüm metodu ve aynı bağlantıların kullanılmasına rağmen UME ve BNM/LCIE’de gerçekleştirilen ölçümleri arasında yaklaşık 350 nV değerinde bir ofset gerilimi gözlenmiştir. Bu fark, zener referans standartlarının farklı sıcaklık, nem ve basınç katsayılarına sahip olmalarından kaynaklandığı tahmin edilmektedir (Witt, Reyman ve Avrons 1995, Witt 1997, Witt 1998).

Ölçüm sonuçları 732B’lerin ölçümlerinin standart sapmaları dikkate alınarak ağırlıklı ortalama değerlerinin alınması ile hesaplanmıştır. Buna göre,  $1\sigma$  seviyesindeki A tipi ( $u_A$ ) ve bileşik belirsizlikle ( $u_{A+B}$ ) UME ve BNM/LCIE 10Volt Josephson Eklem Dizisi Gerilim Standartları arasındaki farklılık ( $V_{UME}-V_{BNM/LCIE}$ );

$$V_{UME}-V_{BNM/LCIE} = +90 \text{ nV}$$

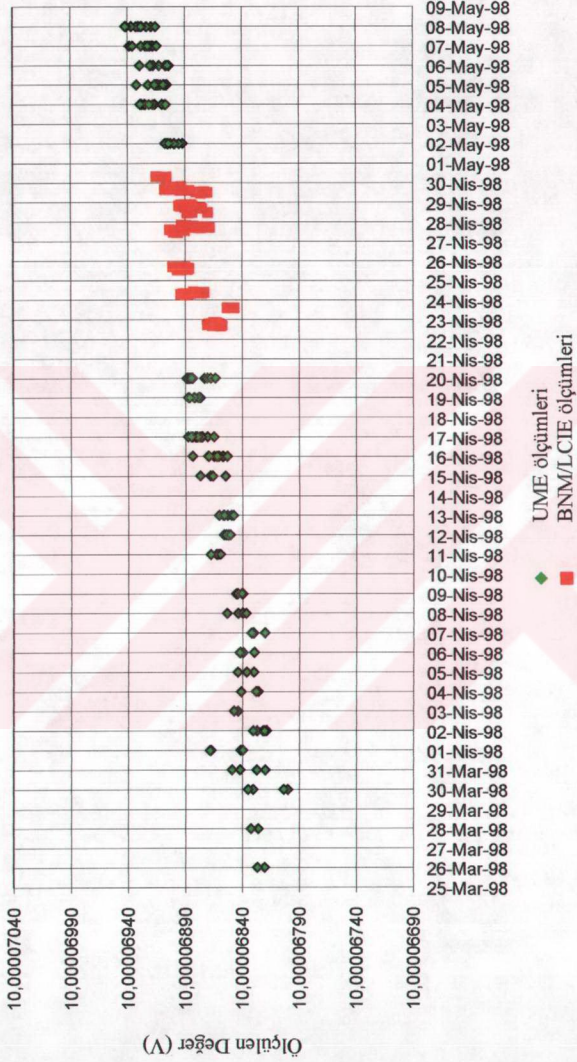
$$u_A = 90 \text{ nV}$$

$$u_{A+B} = 90 \text{ nV}$$

olarak belirlenmiştir.

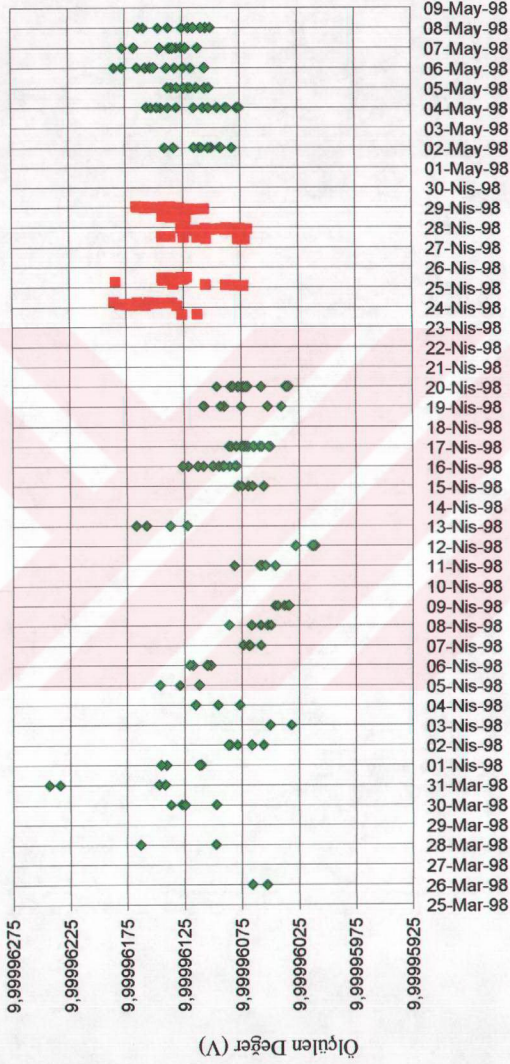
Ölçülen 90 nV gerilim farkı, transfer standartlar kullanılarak gerçekleştirilen karşılaştırma ölçümleri için oldukça iyi bir değerdir; 90 nV’luk bileşik belirsizlik büyük oranda zener referans standartların kararsızlığından ve gürültüden kaynaklanmakta olduğundan UME ve BNM/LCIE JEDGS’lerinin doğrulukları iki enstitü tarafından karşılıklı tanınmıştır.

Fluke 732B  
(S/N: 5610110)



Şekil 6.2. 5610110 seri numaralı Fluke 732B'nin UME-BNMM/LCIE-UME ölçüm sonuçları

Fluke 732B  
(S/N: 5610210)

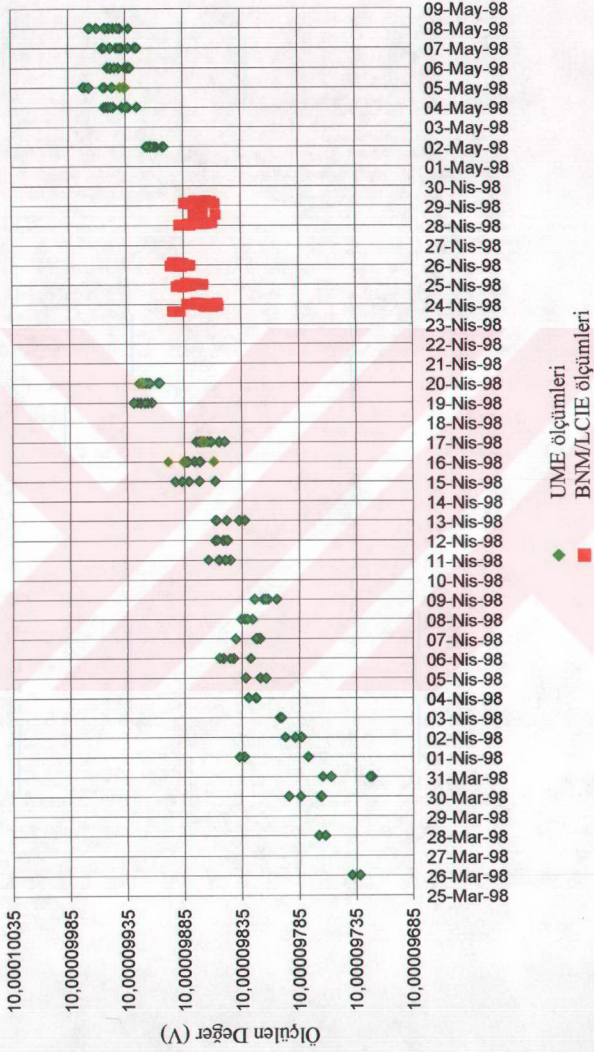


◆ UME ölçümleri  
■ BNM/LCIE ölçümleri

Şekil 6.3. 5610210 seri numaralı Fluke 732B'nin UME-BNM/LCIE-UME ölçüm sonuçları

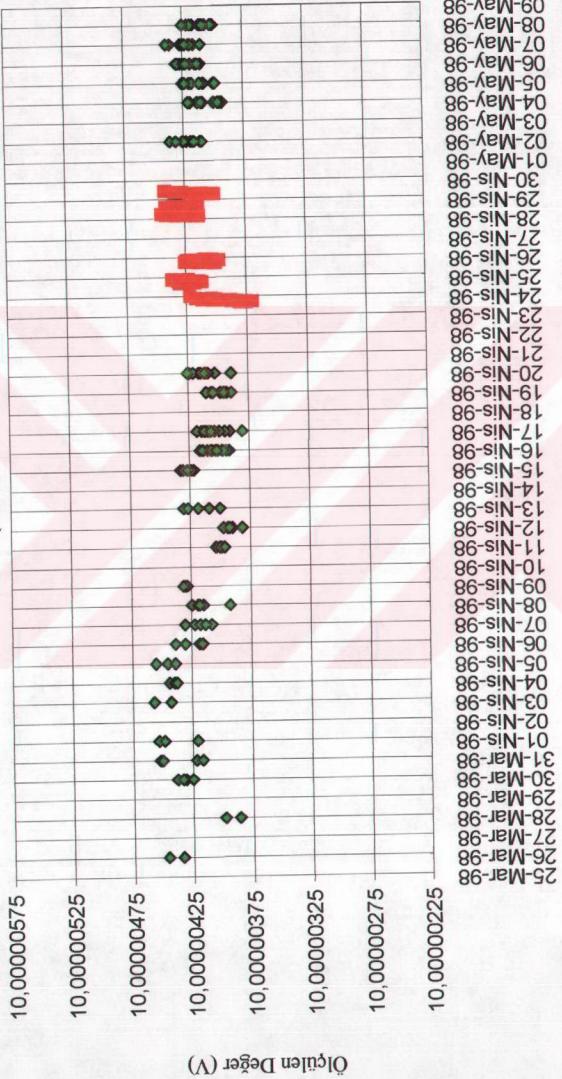


Fluke 732B  
(S/N: 5610310)



Şekil 6.4. 5610310 seri numaralı Fluke 732B'nin UME-BNNM/LCIE-UME ölçüm sonuçları

Fluke 732B  
(S/N: 5610410)



◆ UME ölçümleri  
■ BNM/LCIE ölçümleri

Şekil 6.5. 5610410 seri numaralı Fluke 732B'nin UME-BNMN/LCIE-UME ölçüm sonuçları

## SONUÇLAR

Dünya çapında “Volt” için izlenebilirlik, ulusal metroloji enstitülerindeki mevcut Josephson eklem dizisi gerilim standartları kullanılarak AC Josephson etkisi üzerinden sağlanmaktadır. Bu standartlar kullanılarak gerilim

$$V = n \frac{h}{2e} f_c$$

denkliği ile doğruluğunu frekans doğruluğundan almaktadır.

JEDGS ile, doğrudan fiziksel sabitler üzerinden tanımlanan güvenilir ve uzun süreli kararlı gerilim değerleri elde edilebilmesine rağmen, dünyadaki Josephson Sistemlerinin karşılaştırılmaları gereklidir. Bu gereklilik, Josephson etkisinin değişkenliği şüphesinden değil, sistemin kalbini çevreleyen kompleks sistemin kontrolü için gereklidir.

Türkiye’de gerilim birimi Volt, TÜBİTAK bünyesinde bulunan Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Gerilim Laboratuvarında 1997’den beri AC Josephson etkisi üzerinden gerçekleştirilmektedir. UME Josephson Eklem Dizisi Gerilim Standardı’nın temelini PTB (Alman Metroloji Enstitüsü) yapımı 10 Volt Josephson Eklem Dizisi oluşturmaktadır. Standardın doğruluğunu aldığı frekans standardı 10 MHz Rb frekans standardı olup, JEDGS’nin çalışma frekansı olan 74.99 GHz mikrodalga frekansı, 75 GHz Gunn osilatörün Rb standardının fazına kilitlenmesi ile elde edilmektedir. Standart kullanılarak ikinci seviyede DC gerilim standartları olan Weston Standart pillerinin ve Zener gerilim standartlarının kalibrasyonun yanısıra, voltmetrelerin doğrusallık testleri de gerçekleştirilebilmektedir.

UME JEDGS tamamen bir operatör kontrolünde kullanılan bir standarttır. Ancak sistem, DC akım kaynağının IEEE kontrollü bir kaynak ile değiştirilmesi ve

frekansın ve mikrodalga gücün bilgisayar ile kontrol edilebilmesi durumunda otomatik kalibrasyon gerçekleştirebilecek niteliktedir.

UME, 10 Volt JEDGS'nın doğruluğunun uluslararası platformda tanınması amacıyla, Fransa'nın Ulusal Metroloji Enstitüsü olan BNM/LCIE ile EUROMET Projesi-469 olarak karşılaştırma ölçümleri gerçekleştirilmiştir. BNM/LCIE'e ait 10V JEDGS, BIPM'e ait JEDGS ile doğrudan ve transfer standart kullanılarak karşılaştırılmıştır. Kullanılan transfer standartların gürültüsünden kaynaklanan 90 nV'luk belirsizlikle iki ülke standardı arasındaki gerilim farkı 90 nV olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların uluslararası alanda duyurulması amacıyla BNM/LCIE ile ortak makale yazımına başlanmıştır. BNM/LCIE tarafından ilgili bölümlerin tamamlanması ile makale Metrologia dergisinde yayınlanmak üzere dergi komitesine gönderilecektir.

Gerçekleştirilen bu proje ile, UME JEDGS'inin doğruluğu uluslararası alanda tanınması sağlanmıştır. Ancak, UME ve BNM/LCIE JEDGS'ların karşılaştırılmalarında ölçümlerdeki belirsizlik, büyük oranda transfer standartların kısa dönem gürültülerinden kaynaklanan belirsizlik bileşenlerinden dolayı 90 nV olarak saptanmıştır. UME JEDGS'inin sistematik hatalarının dominant olacağı belirsizliğinin saptanması amacıyla, diğer bir deyişle, UME JEDGS'inin doğruluğunun daha yüksek güvenilirlikle teyidi amacıyla, BIPM'e ait JEDGS ile doğrudan karşılaştırılması amaçlanmakta olup bu yöndeki girişimlere başlanmıştır.

Tez çalışması için gerçekleştirilen karşılaştırma ölçümleri, UME Gerilim Laboratuvarı'nda dolayısıyla Türkiye'de primer ulusal gerilim standartları bazında gerçekleştirilen ilk karşılaştırma ölçümleridir. Bu karşılaştırma bir EUROMET projesi olarak gerçekleştirilerek, yapılan karşılaştırmanın Avrupa metroloji enstitüleri ve BIPM tarafından tanınması hedeflenmiştir. Laboratuvar ayrıca bu karşılaştırma ölçümleri ile bir EUROMET Projesinde ilk defa yer almıştır. Projede ilgili kişi (contact person) olarak görev alarak, bir EUROMET projesini açılması, devamı ve sonlandırılması konusunda deneyim elde edilmiştir.

Bu çalışma ayrıca, UME 10V JEDGS'na ait herhangi bir yazılı dokümanın bulunmayışı dikkate alınarak, UME 10V JEDGS'nın bölümleri, çalıştırılması ve bir DC gerilim standardının kalibrasyonuna dair yazılı tek doküman olma özelliğine de sahiptir.

Halen UME Gerilim Laboratuvarı'nda JEDGS ile DC gerilim standartlarının kalibrasyonu ve 8 ½ dijital multimetrelerin ve nanovoltmetrelerin kalibrasyonları ve doğruluk testleri tamamen operatör kontrolü ile gerçekleştirilmektedir. Sistemin zayıf noktaları ve karakteristiği hakkında elde edilen deneyimler ışığında, JEDGS'nın bilgisayar kontrolü ile çalıştırılabilmesi için çalışmalara başlanmıştır. Bu bağlamda, kullanılan DC akım kaynağı, IEEE-488 iletişim sistemi üzerinden kontrol edilebilen bir akım kaynağı ile değiştirilmesi hedeflenmiştir. Diğer taraftan, frekans doğruluğu ile doğrudan ilişkili olan standardın doğruluğunun artırılabilmesi amacıyla, ki bu artış ancak doğrudan karşılaştırma ölçümlerinde gözlenebilir, frekans doğruluğu ve kararlılığının artırılması yönündeki çalışmalar sürdürülecektir. Bu amaçla, sistemde kullanılan Rb frekans standardının kararlılığı daha iyi olan, UME'de mevcut bir Cs frekans standardı ile değiştirilmesi, 74.99 GHz frekansının kararlılığının ölçülebilmesi için bir sayıcı (Counter) alınarak frekans kararlılığının belirlenmesi ve 74.99 GHz çalışma frekansının, bir sentezleyici (synthesizer) kullanılarak değişebilir olmasının sağlanması hedeflenmiş olup çalışmalar bu yönde devam etmektedir.

## KAYNAKLAR

1. PETLEY, B.W., 1994. Electrical Units. *Metrologia*, vol. 32, 495-502.
2. FLUKE Corporation, 1994a. Calibration: Philosophy in Practice. 2.nd edition, 7-12;7-15, Amerika Birleşik Devletleri.
3. FLUKE Corporation, 1994b. Calibration: Philosophy in Practice. 2.nd edition, 7-8;7-12, Amerika Birleşik Devletleri.
4. FINNEGAN, T.F., DENENSTEIN. A. and LANGENBERG, D.N., 1971. AC-Josephson Effect Determination of  $e/h$ : A Standard of Electrochemical Potential Based on Macroscopic Quantum Phase Coherence in Superconductors. *Physical Reviews*, vol. 4, no. 5, 1487-1522.
5. SERWAY, R. A., 1990a. Physics for Scientists & Engineers, Saunders College Publishing, 1294-1295.
6. SERWAY, R. A., 1990b. Physics for Scientists & Engineers, Saunders College Publishing, 1308-1309.
7. JOSEPHSON, B. D., 1962. Possible New Effects in Superconductive Tunneling. *Physics Letters*, vol. 1, no. 7, 251-253.
8. ANDERSON, P. W., November 1970. How Josephson Discovered His Effect. *Physics Today*, 23-29.
9. POPEL, P. R., 1992. The Josephson Effect and Voltage Standards. *Metrologia*, vol. 29, 153-174.
10. TAYLOR, B. N., WITT, T.J., 1989. New International Electrical Reference Standards Based on the Josephson and Quantum Hall Effects. *Metrologia*, vol. 26, 47-62.
11. ANDREONE, D., GODONE, A., 1997. Noise Analyses on Josephson Junction Array Voltage Standards. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 46, 246-249.
12. REYMANN, D., WITT, T.J., 1993. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* vol. 42, 596-599.

13. LO-HIVE, J. P., 1995. Comparisons of 10 V JAVS's between the BNM-LCIE and the BIPM. IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 44, no. 2, 230-233.
14. WITT, T.J., REYMANN, D., AVRONS, D., 1995. IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 44, 226-229.
15. WITT, T.J., 1997. BEMC'97 Conference Digest, 23-1 to 23-4.
16. WITT, T.J., 1998. CPEM'98 Conference Digest, 305-306.
17. DIETRICH, C.F., 1991. Uncertainty, Calibration and Probability. 2.nd Edition, Adam Hilger, 288-372.
18. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. 1.st Edition, International Organization for Standardization, İsviçre.

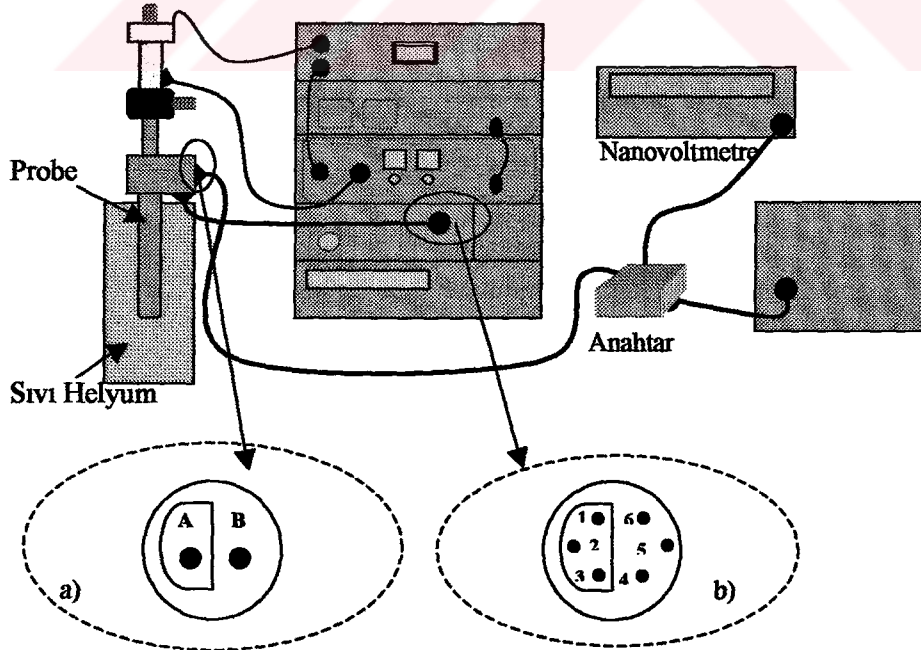


## UME JEDGS ÇALIŞTIRILMA PROSEDÜRÜ

Sistemin çalıştırılması, Josephson Eklem dizisinin uygun olarak soğutulması, diziye uygun rf gücün uygulanması ve istenen Josephson gerilimi için adımın elde edilmesi aşamalarıyla gerçekleştirilmektedir. Bu bölümde, sistemin çalıştırılması öncesi prob üzerinden, Josephson Eklem Dizisini sisteme bağlayan kabloların kontrolü ve probun sıvı He' a daldırılışından, sistemin kapatılarak probun sıvı He tankından çıkarılışına kadar olan evrelerden bahsedilmekte ve sistem kullanılarak gerçekleştirilen bir DC Gerilim Standardı kalibrasyonu için kalibrasyon prosedürü verilmektedir.

### A.1. Josephson Dizisinin Kontrolü

Dizi He içine daldırılmadan önce, dizi bağlantıları olası bir probleme karşı kontrol edilirler. Diziye giden bağlantılar, probu sisteme bağlayan kablo üzerinde bulunan konnektör ile filtre kutusu üzerinde bulunan konnektör arasındaki hatlar üzerinden kontrol edilir: Konnektörlerin ve pin numaraları Şekil A.1'de gösterilmiştir.



**Şekil A.1.** a) Josephson dizisini ölçüm (kalibrasyon) sistemine bağlayan konnektör  
b) Josephson dizisini ana sisteme bağlayan konnektör



UME JEDGS'da dizi bağlantıları kontrolleri, aşağıda verilen prosedür izlenerek gerçekleştirilmektedir.

- ◆ Konnektör üzerindeki 1, 2 ve 3 nolu bağlantılar Josephson dizisinin bir ucunda, 4, 5 ve 6 numaralı bağlantılar ise diğer ucunda kısa devre durumundadırlar. Bu nedenle bu pinler arasında kısa devre direnci (  $<5 \Omega$  ) ölçülmelidir. Kısa devrenin görülmemesi, diziye giden bağlantılarda problem olduğunu göstermektedir.
- ◆ 1, 2, 3 nolu pinler ile 4, 5, 6 nolu pinler arasında Josephson dizisi bulunmaktadır. Bu nedenle bu pinler arasındaki direnç, UME dizisinin oda sıcaklığındaki direnç değeri olan  $93 \text{ k}\Omega$  olarak ölçülmelidir. Aksi takdirde dizi zarar görmüştür.
- ◆ A pini ile 1, 2, 3; B pini ile 4, 5, 6 pinleri kısa devre olmalıdırlar.

## A.2. Soğutma

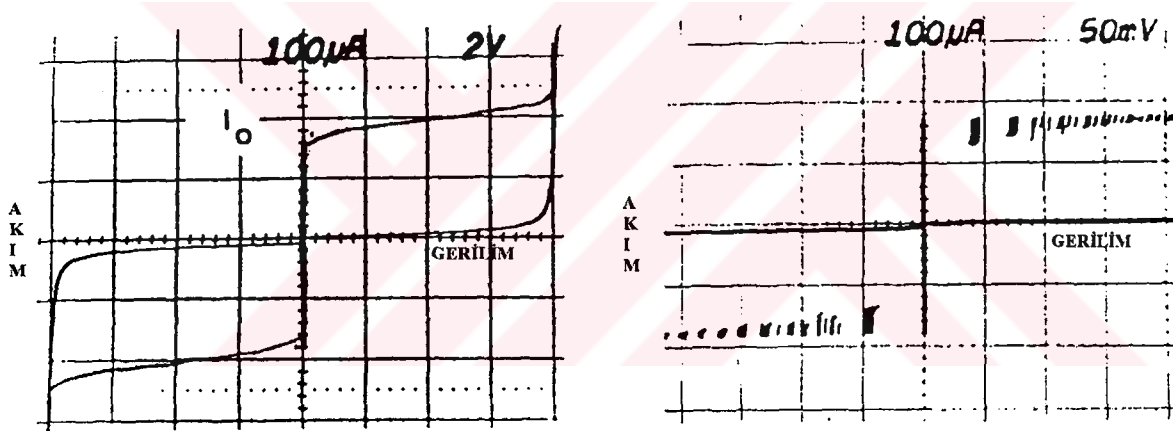
Soğutma işlemi kısaca, probun sıvı helyum tankı içine daldırılması sürecidir (Şekil A.2). Bu işlem, dizinin laboratuvar sıcaklığı olan  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den sıvı He sıcaklığı olan  $4.2 \text{ K}$  ( $-269 \text{ }^\circ\text{C}$ )'e kadar, yaklaşık olarak  $292 \text{ }^\circ\text{C}$ 'lik sıcaklık değişimine maruz kalmasından dolayı oldukça yavaş gerçekleştirilmesi gereken bir işlemdir. Aksi takdirde, dizinin ve diziyi sisteme bağlayan ince hatların zarar görmesi olasıdır.



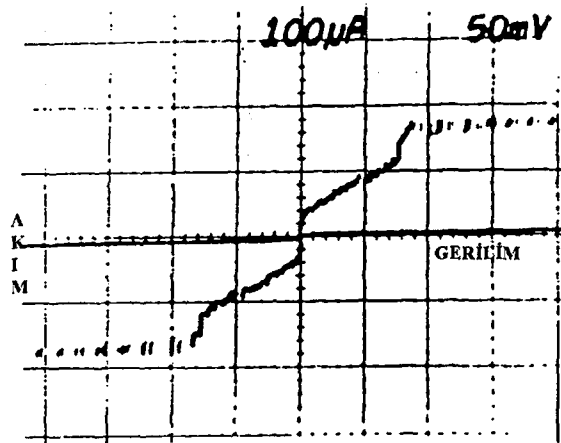
Şekil A.2. Probun sıvı helyum içine daldırılışı

Bu işlem sırasında prob-sistem bağlantıları çıkarılmış olmalıdır. Dizinin helyum içine hızlı daldırılması dizide manyetik akı etkileşimi oluşmasına, dolayısıyla sistem performansının düşüşüne sebep olacaktır. Bu nedenle daldırma-soğutma işleminden sonra dizinin I-V grafiği gözlenir. Şekil A.3, sisteme mikrodalga gücün uygulanmadığı durumda, osiloskopta iki değişik gerilim ölçeğinde gözlenen normal dizi karakteristiğini, Şekil A.4 ise, dizinin sıvı helyum içine hızla daldırılmasından oluşan manyetik akı etkisinin sebep olduğu bozulmayı göstermektedir.

Bu durumda prob helyum içinden çıkarılmalı ve dizi dikkatlice ısıtılmalıdır. Entegredeki herhangi bir hızlı yoğunlaşma-nemlenme diziye zarar verebileceğinden dolayı prob helyum içinden çıkarıldıktan sonra 10 dakika kadar kurutulmalıdır. Entegrenin nemli ortamda tutulması da aynı şekilde diziye zarar verebilir.



Şekil A.3. Mikrodalga gücün uygulanmadığı durumda normal I-V karakteristiği



Şekil A.4. I-V karakteristiğinde manyetik akıların oluşturduğu bozulma

Helyum içine daldırılan probun ve He tankının ısıl iletkenliği dolayısıyla, tank içindeki He seviyesi zamanla azalmaktadır. Bu nedenle dizi soğutulmadan önce, tank içindeki sıvı helyum seviyesi kontrol edilmeli ve gerektiğinde helyum takviyesi yapılmalıdır.

Sıvı helyum seviyesinin saptanmasında iki ayrı yöntem kullanılmaktadır.

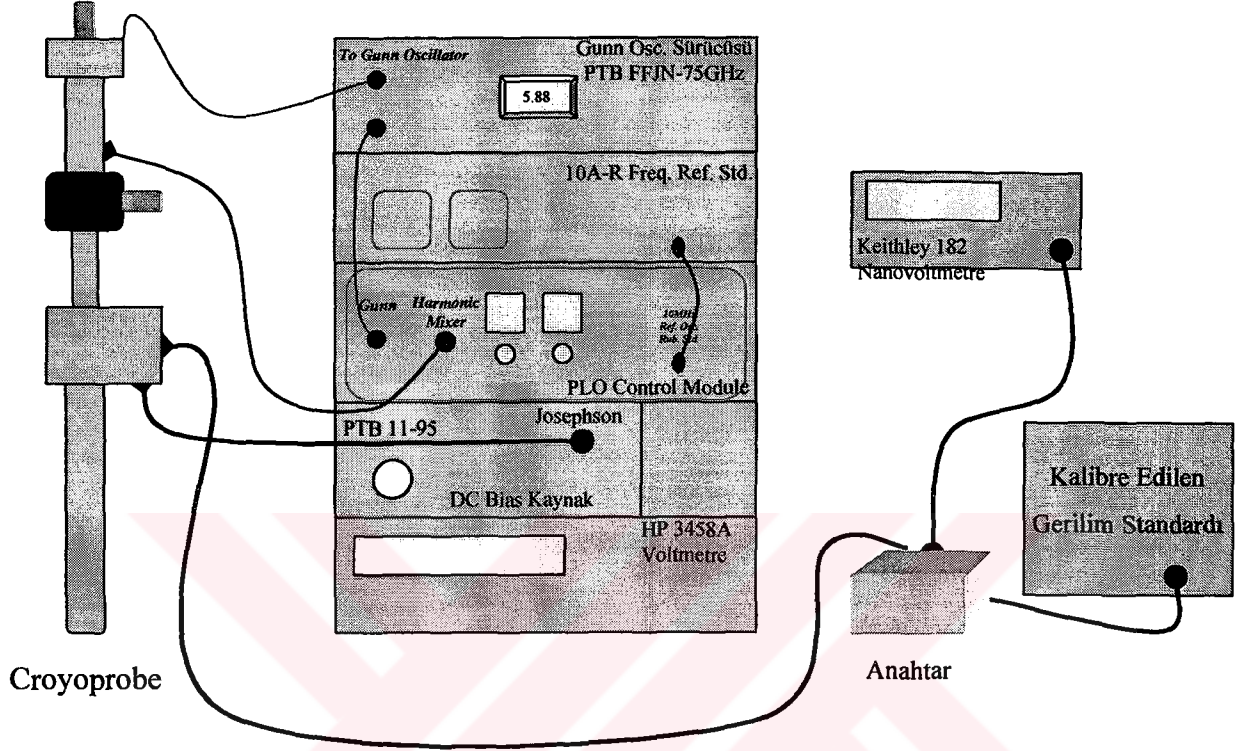
1. Tartma metodu: Bu yöntemde helyum seviyesi tartılarak hesaplanır. Sıvı helyum ağırlığı yaklaşık 0.3 kg/litre' dir.
2. Daldırma tüp ölçek metodu: Bu yöntemde, bir ucu açık, öbür ucu çok ince bir bakır veya basıncı iletecek bir madde ile sonlandırılmış çelik tüp kullanılarak helyum seviyesi şu şekilde tespit edilir: İşaret parmağı ile bakır adaptör bastırılarak tutulur ve tüp yavaş yavaş sıvı helyum içine daldırılır. Tüp dipteyken parmak ucunda titreşim hissedilir ve tüp üzerinde pozisyonu işaretlenir. Tüp yukarı doğru çekilir, tüpün ucu sıvı helyum seviyesinden geçerken titreşimler şiddetlenir. Bu seviye de tüp üzerinde işaretlenir. İki işaret arasındaki fark, kalan sıvı helyum seviyesini gösterir.

### **A.3. Josephson Eklem Dizisinin Sisteme Bağlanması**

Probu, helyum tankına daldırılmasından sonra, prob ve sistem bağlantıları gerçekleştirilir. Eklem dizisinin sisteme bağlanması ve sistem bağlantı konfigürasyonu Şekil A.5'de gösterilmiştir. Bağlanış prosedürü şu şekildedir:

1. Gunn osilatör sürücü devresi üzerindeki BNC girişi, PLO Kontrol Modül üzerindeki "Gunn" çıkışına bağlanır.
2. 10A-R Frequency Reference Unit üzerindeki çıkış, özel kısa kablosu ile PLO Control Module üzerinde yer alan "10 MHz Ref. Osc. Rb. Std." girişine bağlanır.
3. Gunn osilatör üzerinde sabit bulunan kablo Gunn osilatör sürücü devresi üzerinde yer alan "To Gunn Oscillator" çıkışına bağlanır.

4. PLO Control Module üzerindeki “Harmonic Mixer” çıkışı, düşük kayıplı utiflex kablo kullanılarak cryoprobe üzerindeki mixer girişine bağlanır.



Şekil A.5. UME Josephson Eklem Dizisinin sisteme bağlantısı

#### A.4. Sistemin Çalıştırılması

Sistem bağlantıları gerçekleştirildikten sonra, UME Josephson Eklem Dizisi Gerilim Standardı aşağıda verilen prosedür izlenerek çalıştırılır;

1. PLO Control Module üzerindeki “ON/Osc” anahtarı “Osc” konumuna alınır.
2. PLO Control Module üzerindeki “ON/Sweep” anahtarı “Sweep” konumuna alınır.
3. PLO Control Module üzerindeki “ON/IF Mon.” anahtarı “IF Mon.” konumuna alınır.

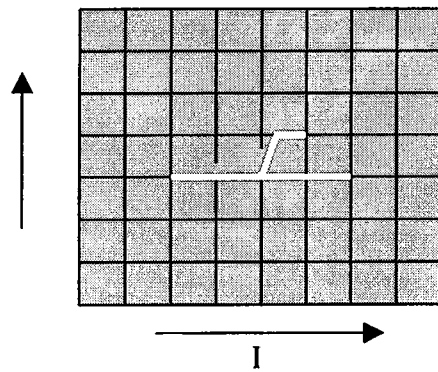
4. DC bias kaynak üzerinde bulunan “12V/60V” anahtarı 12V’a alınır.
5. DC bias kaynak üzerinde bulunan akım ayar düğmeleri ile bias akım değerleri sıfırlanır.
6. DC bias kaynak üzerindeki  $U_{ref}$  “null” pozisyonuna alınır.
7. DC bias kaynak üzerindeki “Zero On” anahtarı yukarı pozisyona alınarak Josephson dizisine giden bütün uçlar kısa devre edilir. Bu şekilde dizinin korunması sağlanır.
8. Akü modunda çalışan DC bias kaynak “battery off” konumuna alınır.
9. DC bias kaynağının aküleri kontrol edilir. Akü değerleri 13.5V üzerinde olmalıdır. Düşük gerilim ölçüldüğü durumda aküler şarja bırakılır.
10. Croyoprobe üzerinde bulunan zayıflatıcı saat yönünde çevrilmek suretiyle “0” konumuna alınır. Bu şekilde, sistemin ilk açılışında diziye rf gücün uygulanmaması sağlanır.
11. Sistemin arkasında bulunan ana şalter “ON” konumuna alınarak şebeke gerilimi bağlantısı sağlanır.
12. Arka panelde, sistemde mevcut cihazları şebeke gerilimine bağlayan anahtarların hepsi (3 adet) “ON” konumuna alınır.
13. PLO Control Module üzerindeki “ON/Osc” anahtarı “ON” konumuna alınarak modül çalıştırılır.
14. HP 3458A Multimetre “on” konumuna alınır.
15. Keithley 182 Nanovoltmetre “on” konumuna alınır.
16. DC akım kaynağı üzerindeki anahtar “batt. on” konumuna alınır.

Yukarıda bahsedilen aşamalar sonrasında sistem, kullanıma hazırdır. Ancak, dizinin tüm eklemlerinin sağlam olup olmadığının kontrolü ve diziden alınabilecek en yüksek gerilim değerinin saptanabilmesi için dizinin DC gerilim karakteristiğinin incelenmesi gereklidir.

#### A.5. Dizinin DC Karakteristiğinin İncelenmesi

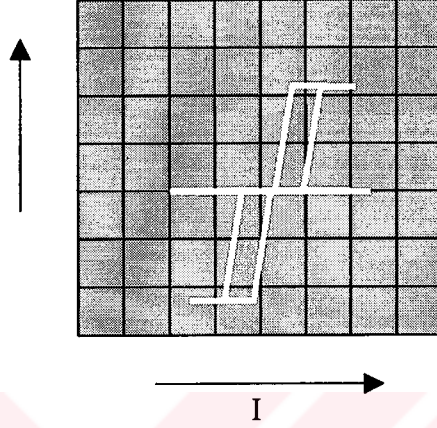
UME Josephson eklem dizisinin DC karakteristik incelemesi şu şekilde gerçekleştirilmektedir:

1. DC bias kaynak üzerinde bulunana DVM anahtarı “DVM OFF” konumuna alınır.
2. DC bias kaynak üzerinde bulunan  $U_{ref}$  anahtarı “null” pozisyonuna alınır.
3. DC bias kaynak üzerinde bulunan “manual/autom” anahtarı “autom” konumuna alınır.
4. Osiloskop DC modda 2 mV, 50 mV bölgesine ayarlanır.
5. “mA” akımı yavaş yavaş artırılarak Şekil A.6’da verilen dc karakteristiğinin osiloskop ekranında ilk görüldüğü durumdaki akım değeri kaydedilir. Bu değer minimum kritik akım olup değeri her dizi için farklıdır. UME dizisinin minimum kritik akım değeri yaklaşık 270  $\mu A$ ’dir.



Şekil A.6. Kritik akımın belirlenmesi

6. Osiloskop 5 V, 50 mV ölçüm bölgesine alınır.
7. Şekil A.7.'de verilen simetrik karakteristik eğrisi gözlenen kadar "mA" akımı artırılmaya devam edilir. (Bu durumda akım değeri yaklaşık 430  $\mu$ A'dir.)



Şekil A.7. Josephson Eklem Dizisinin DC karakteristiği

8. DC karakteristik eğrisinden gerilim değeri ölçülür. Bu değer 10V 'dan büyük bir değer olmalıdır.
9. Diziden alınabilecek en büyük gerilim değerinin saptanması için osiloskobun başlangıç eksenini aşağıya çekilerek 2V, 50 mV ölçüm bölgesine alınır.
10. Zayıflatıcı ayarlanmak suretiyle sisteme güç uygulanmaya başlanır. Bu arada karakteristik eğrisinde gerilim adımları görülmeye başlanır. Diziden 10V alınabilmesi için adımlar 5. kareye kadar çıkmalıdır.

#### A.6. Optimum Güç Ayarlaması

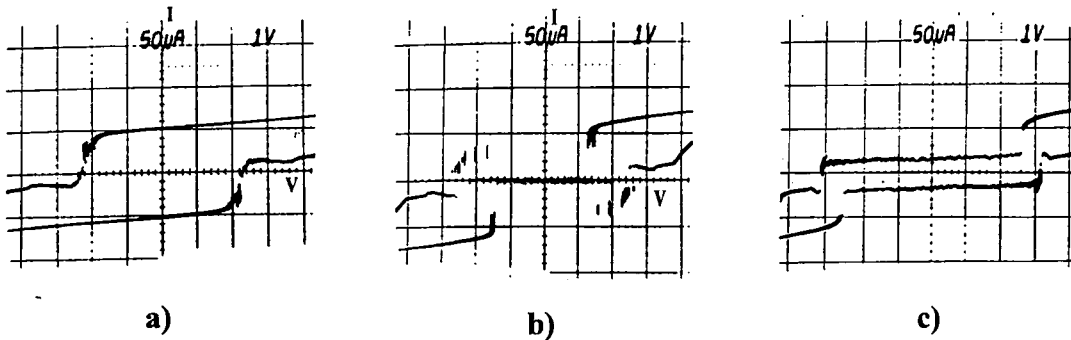
UME 10V Josephson Eklem Dizisi gerilim Standardının çalıştırılması sırasında, rf gücün ayarlamasında dikkat edilecek iki nokta vardır:

1) Dizinin I-V grafiğinde gerilim eksenini, istenen çalışma geriliminde (örneğin 10V) kesilmelidir.

2) Grafikte alt ve üst kollar arasında kalan alan olabildiğince düzgün olmalıdır.

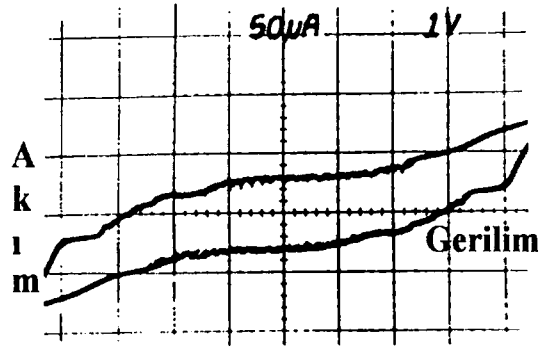
Gerilim ekseninin kesim noktası, diziden alınabilecek maksimum kararlı gerilim değerini verir. Şekil A.8, diziyeye uygulanan gücün artırılması durumunda gözlemlenen I-V grafiklerini göstermektedir. Verilen örnekte görüldüğü gibi, düşük güç değerinde 2V'a kadar sabit gerilim adımları elde edilirken, orta güçte bu değer 2.5V'a, yüksek güç değerinde ise elde edilebilecek maksimum sabit gerilim adımı 3V'a çıkmıştır.

Diziyeye mikrodalga gücün çok fazla uygulanması durumunda, oluşan gerilim adımları oldukça küçük ve kararsızdır. Şekil A.9, bu durumdaki bir dizinin gözlenen I-V karakteristiğini göstermektedir. Diziyeye çok az gücün verilmesi durumunda ise diziden istenilen kararlı gerilim adımları elde edilemez. Şekil A.10'da, düşük gücün uygulandığı bir dizinin I-V grafiği gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, bu durumda diziden elde edilebilecek maksimum kararlı gerilim değeri istenen değerden küçüktür (örnekte 0.5 voltur). Sonuç olarak her iki durum için de sistemden beklenen performans sağlanamaz. Bu nedenle diziyeye optimum güç ve frekans uygulanmalıdır.



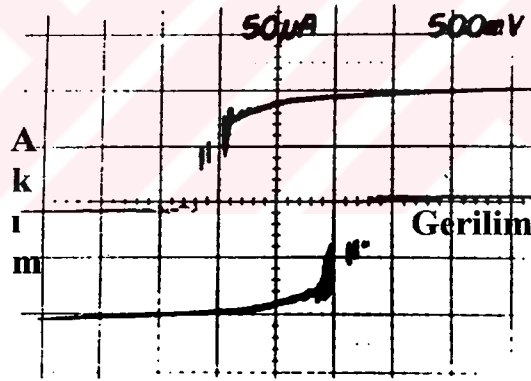
**Şekil A.8.** a) Düşük rf  
b) Orta rf  
c) Yüksek rf güç seviyelerinde Josephson dizisi I-V karakteristikleri



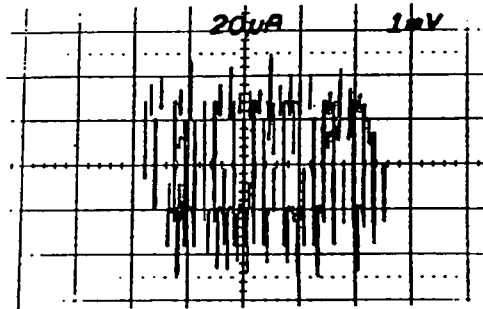


Şekil A.9 Yüksek güçte I-V grafiği

Optimum güç ayarlaması için uygulanacak en iyi yöntem, Şekil A.10'daki grafik elde edilinceye kadar güç ayarlaması yaptıktan sonra istenen gerilim değeri gerilim eksenini kesinceye kadar dc akım ayarlaması yapmaktır. Gerekirse daha sonra güç üzerinde tekrar ince ayar yapılır. İyi bir güç ayarlaması sonucu gözlemlenen I-V karakteristiği Şekil A.11'de verilmiştir.



Şekil A.10. Düşük güçte I-V grafiği



Şekil A.11. İdeal I-V karakteristiği

## A.7. Uygun Josephson Gerilim Adımının Seçimi

Josephson Gerilim Standardı ikincil seviye bir gerilim standardı kalibrasyonunda kullanıldığında, Josephson geriliminin kalibre edilecek standardın gerilim değerine olabildiğince yakın olarak elde edilmesi gerekmektedir. Bu ise  $V = n \frac{hf}{2e}$  denkliğinde görüldüğü gibi uygun f ve n değerlerinin seçilmesi ile mümkündür.

İstenen Josephson gerilimi şu şekilde elde edilir: Öncelikle dizi için optimum güç sisteme uygulanır. Daha sonra istenen gerilim adımının seçimi için akım kaynağından sağlanan akım ayarlanır. Ancak istenen adımın yakalanması olasılığı düşük olduğundan bu işlem oldukça uğraş gerektirmektedir.

Josephson adımının yakalanması için aşağıda verilen prosedür takip edilir:

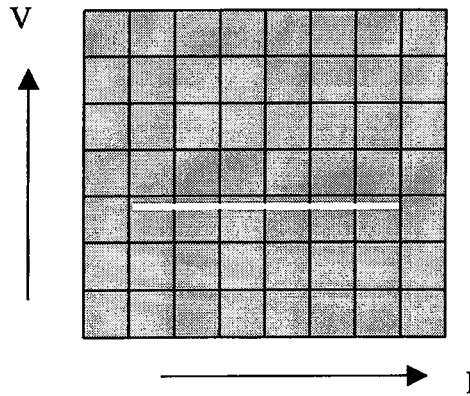
1. Osiloskobun Y eksenini modülü (sol modül) AC mod ve 500  $\mu$ V ölçüm bölgesine, X eksenini modülü ise DC mod ve 5 mV ölçüm bölgesine ayarlanır.
2. DC bias kaynak üzerinde yer alan, HP 3458A multimetreyi diziye bağlayan DVM anahtarı "ON" konumuna alınır.
3. Bias akımları sıfırlanır.
4. DC bias kaynak üzerinde bulunan "manual/autom" anahtarı "manual" konumuna alınır.
5. "mA" bias akımı biraz artırılır. (200  $\mu$ A)
6. -  $U_{ref}$  "null" pozisyonundan " +  $U_{ref}$ " pozisyonuna alınarak diziye offset gerilim uygulanır.
7. " $\mu$ A" bias akımı artırılarak adım genişliği artırılır.

8. İstenen gerilim adımının yaklaşık değeri 3458A ile ölçülünceye kadar “course”, “fine” ve “manual sweep” ayarlamaları yapılır.
9. Faz kilitlemesi kontrol edilir. Kilitlenme sağlandığı durumda PLO Control Module üzerinde bulunan kırmızı LED yanmaktadır.
10. LED yanmıyorsa, modül üzerinden  $V_{LG}$  ve  $V_{OP}$  gerilimleri ayarlanır. Bu gerilimler kilitlenme durumunda yaklaşık olarak şu değerlerdedirler:

$V_{LG}$	1.70-1.90
$V_{OP}$	2.10-2.40

Bu durumda, sürücü devre üzerindeki göstergeden okunan gerilim değeri yaklaşık olarak 5.85'dir.

11. Faz kilitlemesi sağlandıktan sonra, zayıflatıcı ayarlanarak diziye rf güç verilmeye başlanır. Uygulanan güç artırılırken “step” tuşuna basılarak osiloskop ekranında gerilim adımı gözlenir. Osiloskop ekranında görülmesi beklenen Şekil A.12'de verilmiştir.



Şekil A.12. Osiloskop ekranında görülen Josephson gerilim adımı

12. Eğer adım yakalanamıyorsa adım genişliği “ $\mu A$ ” akımının azaltılmasıyla daraltılır.

13. Diziye uygulanan rf güç üzerinde tekrar ayarlamalar yapılır. Uygulanan güç ayarlanırken “step” tuşuna basılarak osiloskop ekranında gerilim adımı gözlenir.

Bu şekilde istenen gerilim değerine en yakın gerilim adımına bir kaç tekrarlama ile ulaşılabilmektedir.

#### **A.8. DC Gerilim Standardı Kalibrasyonu**

Bir DC gerilim standardının Josephson Eklem Dizisi Gerilim Standardı ile kalibrasyonu, karşılaştırma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilir. Josephson gerilimi ve DC gerilim standardı çıkışı, anahtar üzerinde ters polaritede seri bağlanır ve aralarındaki mikrovoltlar mertebesindeki gerilim farkı ölçülür. Termal emf etkisinin ölçüm sonucunun etkisinin belirlenebilmesi için ölçümler her iki polaritede de alınır.

DC Gerilim standardı kalibrasyonu, Josephson Eklem Dizisi Gerilim Standardı kullanılarak aşağıda verilen kalibrasyon prosedürü ile gerçekleştirilir;

1. Josephson standardı ve kalibre edilecek gerilim standardı pozitif yönde ölçüm için anahtara bağlanır.
2. Keithley 182 multimetre ile en küçük fark gerilimi ölçülünceye kadar “voltage fine” ve “manual sweep” ayarlanmaları yapılarak, değeri kalibre edilen standardın değerine en yakın Josephson gerilim adımı yakalanır.
3. İstenen adımda iken, Keithley 182 voltmetre ile ölçülen fark değeri  $V_{DVM+}$  olarak kaydedilir.
4. Anahtar üzerindeki gerilim standardı bağlantıları kısa devrenin kaldırılmasıyla iptal edilir.
5.  $U_{ref}$  anahtarı “ $+U_{ref}$ ” pozisyonundan “ $-U_{ref}$ ” pozisyonuna alınır.

6. –10V gerilim adımı elde edilinceye kadar “Josephson Gerilim Adımının Yakalanması” prosedüründe anlatıldığı gibi gerekli ayarlamalar yapılır.
7. Ters polarite ölçümü için anahtar uygun konuma alınır.
8. Keithley 182 multimetre ile en küçük fark gerilimi ölçülünceye kadar “voltage fine” ve “manual sweep” ayarlanmaları yapılarak, değeri kalibre edilen standardın değerine en yakın Josephson gerilim adımı yakalanır.
9. İstenen adımda iken, Keithley 182 voltmetre ile ölçülen değer  $V_{DVM-}$  olarak kaydedilir.
10. Anahtar üzerindeki gerilim standardı bağlantıları iptal edilir.
11. Ölçüm esnasında, Josephson Gerilimini değeri, kalibre edilen standardın yaklaşık bilinen değeri kullanılarak hesaplanabileceği gibi, sistemdeki HP 3458A multimetre kullanılarak doğrudan ölçülmek suretiyle de belirlenebilir. HP 3458A multimetre sistemde kullanıldığında gürültü kaynağı oluşu sebebiyle hassas ölçümlerde Josephson gerilim adımının kalibre edilen standardın değeri kullanılarak belirlenmesi daha uygundur. Kalibre edilen gerilim standardının bilinen yaklaşık değeri ( $V_{std.}$ ) kullanılarak Josephson gerilim adımı ve Josephson gerilim değeri aşağıda verilen metodla hesaplanır;

- ◆ İki polaritede alınan ölçümlerin farkı ( $V_{DVM+} - V_{DVM-}$ ) ikiye bölünür;

$$\bar{V}_{DVM} = \frac{V_{DVM+} - V_{DVM-}}{2} \quad (A.1)$$

- ◆ Anahtarın HI girişine Josephson Gerilimi bağlı olduğundan, ölçülen fark gerilimi, Josephson gerilimi ( $V_J$ ) ile kalibre edilen standardın gerilim değerinin farkıdır ( $V_{std.}$ ). Dolayısıyla Josephson geriliminin yaklaşık değeri;

$$V_J = V_{std.} + \bar{V}_{DVM} \quad (A.2)$$

denklemleri ile hesaplanır.

$$\diamond \frac{f}{K_{J-90}} = \frac{74.99 \text{ GHz}}{483597.9 \text{ GHz/V}} = 155.0668438 \times 10^{-6} \quad (A.3)$$

olduğundan, n adım sayısı aşağıdaki bölüm değerinin en yakın tam sayıya yuvarlanması suretiyle belirlenir.

$$n = \text{Yuvarlat} \left[ \frac{V_J}{155.0668438 \times 10^{-6}} \right] \quad (A.4)$$

- ◆ n adım sayısı kullanılarak Josephson Geriliminin gerçek değeri hesaplanır;

$$V_J(n) = n \times 155.0668438 \times 10^{-6} \quad (A.5)$$

12. Hesaplanan Josephson gerilimi kullanılarak, kalibre edilen standardın gerilim değeri ( $V_{UUT}$ ) şu şekilde belirlenir:

$$V_{UUT} = V_J(n) - \bar{V}_{DVM} \quad (A.6)$$

### ÖNEMLİ BİLGİ

İki Josephson gerilim adımı arasındaki fark yaklaşık 155  $\mu\text{V}$  olduğundan, kalibre edilen standardın değeri en fazla 77  $\mu\text{V}$ 'luk hata ile biliniyor olmalıdır.

Bir gerilim standardının kalibrasyonu için hesaplama örnekleri EK B'de verilmektedir.

## A.9. Sistemin Kapatılması

UME 10V JEDGS sistemi, aşağıda verilen prosedür takip edilerek kapatılır.

1. Croyoprobe üzerinde bulunan zayıflatıcı (attenuator) “0” konumuna alınır. Bu şekilde, diziye rf gücün uygulanmaması sağlanır.
2. DC bias kaynak üzerinde bulunan akım ayar düğmeleri ile bias akım değerleri sıfırlanır.
3. DC bias kaynak üzerindeki  $U_{ref}$  “null” pozisyonuna alınarak, kaynak bağlantısı diziden ayrılır.
4. DC bias kaynak üzerindeki “Zero On” anahtarı yukarı pozisyona alınarak Josephson dizisine giden bütün uçlar kısa devre edilir. Bu şekilde dizinin korunması sağlanır.
5. Akü modunda çalışan DC bias kaynak “battery off” konumuna alınarak kapatılır.
6. PLO Control Module üzerindeki “ON/Osc” anahtarı “Osc” konumuna alınır.
7. PLO Control Module üzerindeki “ON/Sweep” anahtarı “Sweep” konumuna alınır.
8. PLO Control Module üzerindeki “ON/IF Mon.” anahtarı “IF Mon.” konumuna alınır.
9. HP 3458A “OF” konumuna alınır.
- 10: Keithley 182 “OF” konumuna alınır.
11. Arka panelde, sistemde mevcut cihazları şebeke gerilimine bağlayan anahtarların hepsi “OF” konumuna alınır.

12. Sistemin arkasında bulunan ana şalter “OF” konumuna alınır.

#### **A.10. Dizinin He İçinden Çıkarılması**

Sıvı He içinden çıkarılırken dizi  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  ortam sıcaklığına alınmaktadır. Bu büyük sıcaklık değişimi diziyeye zarar verebileceğinden, bu işlem sırasında aşağıda belirtilen noktalara dikkat edilmelidir.

- ◆ Croyoprobe üzerindeki bütün bağlantılar çıkarılmış olmalıdır.
- ◆ Gunn osilatör eğer dalga kılavuzundan ayrılmış durumda ise, dalga kılavuzunun ağzı özel kapağı ile kapatılarak dalga kılavuzundan He çıkışı önlenmelidir.
- ◆ Dizi He'dan çok yavaş çıkarılmalıdır. Her hareket sonrası sıcaklık dengesinin sağlanması için yeterli bir süre beklenmelidir.



**JOSEPHSON GERİLİM STANDARDI KULLANILARAK  
DC GERİLİM STANDARDININ DEĞERİNİN HESAPLANMASI****Örnek 1**

Bir DC gerilim standardının 3 ay önceki değeri 10.000003 Volt olarak ölçülmüş olsun. Standardın UME 10V Josephson Eklem Dizisi Gerilim standardı ile kalibrasyonu sonucu voltmetrede ölçülen fark gerilimleri;

$$V_{DVM+} = -53.415 \mu V$$

$$V_{DVM-} = +53.148 \mu V$$

olarak ölçülmüş ise, standardın anlık gerilim değerinin belirlenmesi için hesaplamaları adım adım gerçekleştirelim;

1.  $V_{DVM+}$  ve  $V_{DVM-}$  ölçüm sonuçlarının farklarının yarısı;

$$\bar{V}_{DVM} = \frac{V_{DVM+} - V_{DVM-}}{2} = \frac{-53.415 - (+53.148)}{2} = -53.282 \mu V$$

olarak belirlenir.

2. Josephson geriliminin yaklaşık değeri, standardın bilinen değeri kullanılarak;

$$V_J = V_{std.} + \bar{V}_{DVM} = 10.000003 + (-53.282 \times 10^{-6}) = 9.999949718 \text{ V}$$

olarak bulunur.

3. Josephson geriliminin yaklaşık değeri kullanılarak adım sayısı hesaplanır;

$$n = \text{Yuvarlat} \left[ \frac{V_J}{155.0668438 \times 10^{-6}} \right] = \text{Yuvarlat} \left[ \frac{9.999949718}{155.0668438 \times 10^{-6}} \right]$$

$$n = \text{Yuvarlat}[6448799] = 6448$$

4. n adım sayısı kullanılarak Josephson Geriliminin gerçek değeri hesaplanır;

$$V_J (64488) = 64488 \times 155.0668438 \times 10^{-6} = 9.999950623 \text{ V}$$

5. Hesaplanan gerçek Josephson gerilim değeri kullanılarak, kalibre edilen standardın gerilim değeri ( $V_{UUT}$ ) belirlenir:

$$V_{UUT} = V_J(n) - \bar{V}_{DVM} = 9.999950623 - (-53.282 \times 10^{-6}) = 10.00000391 \text{ V}$$

## Örnek 2

DC gerilim standardının kalibrasyonu esnasında, Josephson Geriliminin değeri HP 3458A multimetre ile 9.999938 Volt olarak ölçülmüş olsun. Standardın UME 10V Josephson Eklem Dizisi Gerilim standardı ile kalibrasyonu sonucu voltmetrede ölçülen fark gerilimleri ise;

$$V_{DVM+} = -53.689 \mu\text{V}$$

$$V_{DVM-} = +53.210 \mu\text{V}$$

olarak ölçülmüş ise, standardın anlık gerilim değerinin belirlenmesi için hesaplamaları adım adım gerçekleştirelim;

1. Josephson geriliminin adım sayısı, HP 3458A multimetre ile ölçülen değeri kullanılarak hesaplanır;

$$n = \text{Yuvarlat} \left[ \frac{V_J}{155.066843 \times 10^{-6}} \right] = \text{Yuvarlat} \left[ \frac{9.999938}{155.066843 \times 10^{-6}} \right]$$

$$n = \text{Yuvarlat} [ 64487.92 ] = 64488$$

2. n adım sayısı kullanılarak Josephson Geriliminin gerçek değeri hesaplanır;

$$V_J(64488) = 64488 \times 155.066843 \times 10^{-6} = 9.999950623 \text{ V}$$

3.  $V_{DVM+}$  ve  $V_{DVM-}$  ölçüm sonuçlarının farklarının yarısı;

$$\bar{V}_{DVM} = \frac{V_{DVM+} - V_{DVM-}}{2} = \frac{-53.689 - (+53.210)}{2} = -53.450 \text{ } \mu\text{V}$$

olarak belirlenir.

4. Hesaplanan gerçek Josephson gerilim değeri kullanılarak, kalibre edilen standardın gerilim değeri ( $V_{UUT}$ ) belirlenir:

$$V_{UUT} = V_J(n) - \bar{V}_{DVM} = 9.999950623 - (-53.450 \times 10^{-6}) = 10.00000407 \text{ V}$$

## EUROMET PROJECT 469

<b>AGREED EUROMET PROJECT</b>		
1. Ref. No.: 469	2. Subject Field : Electricity	
3. Type of collaboration: Intercomparison of measurement standards		
4A. Partners	UME, BNM-LCIE	4B. CEC funded? No
5 Participating countries: TR, FR		
6. Title: Bilateral indirect comparison of 10 V Josephson array voltage standards		
7. Description  UME and BNM-LCIE will compare their 10 V Josephson array voltage standards in order to determine the agreement between both laboratories.  Four Fluke 732B Zener references will be used as travelling standards.		
8. Additional remarks:		
9. Coordinator's name: Saliha SELÇİK  Address: TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Pk. 21 41470 Gebze-Kocaeli TURKEY  Telephone: +90 262 646 63 55      Telefax: +90 262 646 59 14      E-mail: saliha@umel.mam.gov.tr		
10. Date project agreed: April 1998 Ref. No. of proposal:	11. Starting date: April 1998	12. Expected completion date: December 1998
13. Coordinator's signature:		14. Date: 27/04/1998

**EK D****UME'DE GERÇEKLEŞTİRİLEN KARŞILAŞTIRMA  
ÖLÇÜMLERİNİN DATALARI**

Not: Tüm gerilim ölçümleri için birim voltur.

Tarih	Fluke 732B (S/N: 5610110)	Fluke 732B (S/N: 5610210)	Fluke 732B (S/N: 5610310)	Fluke 732B (S/N: 5610410)
26.03.1998	10.000068207	9.999960659	10.000097318	10.000004459
26.03.1998	10.000068270	9.999960531	10.000097390	10.000004336
28.03.1998	10.000068262	9.999960976	10.000097680	10.000003980
28.03.1998	10.000068326	9.999961633	10.000097624	10.000003859
30.03.1998	10.000068003	9.999961274	10.000097839	10.000004307
30.03.1998	10.000068038	9.999961246	10.000097942	10.000004379
30.03.1998	10.000068306	9.999960973	10.000097665	10.000004334
30.03.1998	10.000068352	9.999961369	10.000097655	10.000004249
31.03.1998	10.000068494	9.999961471	10.000097213	10.000004217
31.03.1998	10.000068422	9.999961420	10.000097231	10.000004166
01.04.1998	10.000068678	9.999961404	10.000098331	10.000004532
01.04.1998	10.000068687	9.999961454	10.000098373	10.000004485
01.04.1998	10.000068417	9.999961105	10.000097773	10.000004207
03.04.1998	10.000068441	9.999960318	10.000098020	10.000004427
03.04.1998	10.000068476	9.999960504	10.000098006	10.000004570
04.04.1998	10.000068262	9.999960767	10.000098231	10.000004437
04.04.1998	10.000068414	9.999961153	10.000098294	10.000004397
04.04.1998	10.000068281	9.999960958	10.000098225	10.000004377
05.04.1998	10.000068444	9.999961292	10.000098192	10.000004551
05.04.1998	10.000068301	9.999961122	10.000098319	10.000004455
05.04.1998	10.000068364	9.999961464	10.000098141	10.000004389
06.04.1998	10.000068424	9.999961177	10.000098513	10.000004155
06.04.1998	10.000068419	9.999961206	10.000098424	10.000004184
06.04.1998	10.000068297	9.999961047	10.000098455	10.000004304
06.04.1998	10.000068396	9.999961021	10.000098275	10.000004384

<b>Tarih</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610110)</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610210)</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610310)</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610410)</b>
06.04.1998	10.000068427	9.999961054	10.000098545	10.000004161
07.04.1998	10.000068322	9.999960585	10.000098218	10.000004303
07.04.1998	10.000068306	9.999960680	10.000098192	10.000004221
07.04.1998	10.000068204	9.999960738	10.000098406	10.000004177
07.04.1998	10.000068303	9.999960691	10.000098200	10.000004078
07.04.1998	10.000068323	9.999960677	10.000098229	10.000004133
08.04.1998	10.000068398	9.999960860	10.000098305	10.000003926
08.04.1998	10.000068441	9.999960585	10.000098357	10.000004147
08.04.1998	10.000068402	9.999960522	10.000098327	10.000004244
08.04.1998	10.000068539	9.999960665	10.000098260	10.000004195
08.04.1998	10.000068370	9.999960496	10.000098305	10.000004178
09.04.1998	10.000068446	9.999960460	10.000098123	10.000004297
09.04.1998	10.000068398	9.999960351	10.000098241	10.000004307
09.04.1998	10.000068458	9.999960436	10.000098166	10.000004292
09.04.1998	10.000068446	9.999960378	10.000098048	10.000004281
09.04.1998	10.000068407	9.999960338	10.000098145	10.000004315
11.04.1998	10.000068613	9.999960814	10.000098452	10.000004006
11.04.1998	10.000068632	9.999960458	10.000098644	10.000004035
11.04.1998	10.000068630	9.999960579	10.000098549	10.000003991
11.04.1998	10.000068598	9.999960591	10.000098497	10.000004004
11.04.1998	10.000068682	9.999960545	10.000098553	10.000003966
12.04.1998	10.000068531	9.999960119	10.000098582	10.000003935
12.04.1998	10.000068566	9.999960111	10.000098511	10.000003973
12.04.1998	10.000068525	9.999960141	10.000098474	10.000003899
12.04.1998	10.000068547	9.999960128	10.000098481	10.000003923
12.04.1998	10.000068510	9.999960281	10.000098566	10.000003817
13.04.1998	10.000068534	9.999961226	10.000098579	10.000003999
13.04.1998	10.000068501	9.999961373	10.000098570	10.000004305
13.04.1998	10.000068609	9.999961671	10.000098376	10.000004269
13.04.1998	10.000068571	9.999961580	10.000098484	10.000004182
13.04.1998	10.000068565	9.999961669	10.000098325	10.000004092
15.04.1998	10.000068551	9.999960694	10.000098583	10.000004326

<b>Tarih</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610110)</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610210)</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610310)</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610410)</b>
15.04.1998	10.000068665	9.999960781	10.000098810	10.000004306
15.04.1998	10.000068684	9.999960657	10.000098930	10.000004214
15.04.1998	10.000068663	9.999960560	10.000098871	10.000004234
15.04.1998	10.000068773	9.999960749	10.000098720	10.000004269
16.04.1998	10.000068702	9.999960906	10.000098715	10.000004160
16.04.1998	10.000068611	9.999961132	10.000098712	10.000004059
16.04.1998	10.000068570	9.999961083	10.000098841	10.000004012
16.04.1998	10.000068625	9.999961216	10.000098760	10.000004030
16.04.1998	10.000068535	9.999961265	10.000098830	10.000003976
16.04.1998	10.000068840	9.999960915	10.000098841	10.000004065
16.04.1998	10.000068652	9.999960856	10.000098818	10.000004134
16.04.1998	10.000068578	9.999961000	10.000098717	10.000004098
16.04.1998	10.000068630	9.999960948	10.000098824	10.000003916
16.04.1998	10.000068609	9.999960906	10.000098855	10.000004141
16.04.1998	10.000068626	9.999960804	10.000098991	10.000003940
16.04.1998	10.000068537	9.999960794	10.000098858	10.000003968
16.04.1998	10.000068696	9.999960809	10.000098594	10.000004067
17.04.1998	10.000068814	9.999960591	10.000098685	10.000004090
17.04.1998	10.000068752	9.999960642	10.000098707	10.000004076
17.04.1998	10.000068841	9.999960574	10.000098648	10.000004146
17.04.1998	10.000068801	9.999960694	10.000098623	10.000004184
17.04.1998	10.000068880	9.999960736	10.000098745	10.000003910
17.04.1998	10.000068707	9.999960860	10.000098549	10.000004114
17.04.1998	10.000068816	9.999960843	10.000098545	10.000004092
17.04.1998	10.000068776	9.999960715	10.000098498	10.000003951
17.04.1998	10.000068762	9.999960731	10.000098623	10.000003997
17.04.1998	10.000068811	9.999960753	10.000098615	10.000004123
17.04.1998	10.000068795	9.999960798	10.000098718	10.000004037
17.04.1998	10.000068653	9.999960649	10.000098696	10.000004067
17.04.1998	10.000068854	9.999960499	10.000098672	10.000003806
19.04.1998	10.000068782	9.999960903	10.000099192	10.000003981
19.04.1998	10.000068770	9.999961074	10.000099131	10.000004057

<b>Tarih</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610110)</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610210)</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610310)</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610410)</b>
19.04.1998	10.000068822	9.999961084	10.000099230	10.000003928
19.04.1998	10.000068779	9.999960933	10.000099166	10.000003985
19.04.1998	10.000068876	9.999960751	10.000099230	10.000003950
19.04.1998	10.000068791	9.999960522	10.000099258	10.000003892
19.04.1998	10.000068827	9.999960402	10.000099289	10.000004044
19.04.1998	10.000068867	9.999960523	10.000099190	10.000003957
20.04.1998	10.000068841	9.999960338	10.000099075	10.000004242
20.04.1998	10.000068875	9.999960578	10.000099177	10.000004162
20.04.1998	10.000068890	9.999960750	10.000099164	10.000004208
20.04.1998	10.000068884	9.999960695	10.000099184	10.000004025
20.04.1998	10.000068868	9.999960966	10.000099069	10.000003889
20.04.1998	10.000068859	9.999960842	10.000099210	10.000004082
20.04.1998	10.000068734	9.999960734	10.000099165	10.000004142
20.04.1998	10.000068850	9.999960780	10.000099213	10.000003891
20.04.1998	10.000068838	9.999960826	10.000099061	10.000004103
20.04.1998	10.000068850	9.999960712	10.000099148	10.000004256
20.04.1998	10.000068710	9.999960355	10.000099216	10.000004117
02.05.1998	10.000068992	9.999961002	10.000099171	10.000004362
02.05.1998	10.000069027	9.999960925	10.000099026	10.000004227
02.05.1998	10.000068923	9.999961104	10.000099013	10.000004191
02.05.1998	10.000069060	9.999960918	10.000099098	10.000004170
02.05.1998	10.000069048	9.999961151	10.000099132	10.000004256
02.05.1998	10.000068955	9.999961088	10.000099154	10.000004112
02.05.1998	10.000069000	9.999961407	10.000099079	10.000004249
02.05.1998	10.000069051	9.999961329	10.000099105	10.000004314
02.05.1998	10.000069075	9.999961027	10.000099127	10.000004098
02.05.1998	10.000069045	9.999960823	10.000099171	10.000004162
04.05.1998	10.000069253	9.999960775	10.000099250	10.000003935
04.05.1998	10.000069255	9.999960945	10.000099331	10.000004087
04.05.1998	10.000069280	9.999960879	10.000099378	10.000004130
04.05.1998	10.000069075	9.999961151	10.000099379	10.000003926
04.05.1998	10.000069277	9.999961070	10.000099538	10.000004192



<b>Tarih</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610110)</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610210)</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610310)</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610410)</b>
04.05.1998	10.000069164	9.999960874	10.000099522	10.000004102
04.05.1998	10.000069181	9.999961439	10.000099501	10.000004207
04.05.1998	10.000069248	9.999960759	10.000099457	10.000003952
04.05.1998	10.000069291	9.999961376	10.000099478	10.000003994
04.05.1998	10.000069101	9.999961564	10.000099345	10.000003961
05.05.1998	10.000069059	9.999961199	10.000099704	10.000004109
05.05.1998	10.000069112	9.999961345	10.000099722	10.000004199
05.05.1998	10.000069061	9.999961239	10.000099533	10.000004074
05.05.1998	10.000069321	9.999961297	10.000099546	10.000004178
05.05.1998	10.000069132	9.999961379	10.000099463	10.000004255
05.05.1998	10.000069076	9.999961129	10.000099672	10.000003995
05.05.1998	10.000069222	9.999961179	10.000099468	10.000003982
05.05.1998	10.000069155	9.999961057	10.000099396	10.000004083
05.05.1998	10.000069088	9.999961021	10.000099366	10.000004111
05.05.1998	10.000069167	9.999961021	10.000099354	10.000004234
06.05.1998	10.000069053	9.999961056	10.000099321	10.000004305
06.05.1998	10.000069040	9.999961178	10.000099409	10.000004145
06.05.1998	10.000069125	9.999961243	10.000099350	10.000004267
06.05.1998	10.000069070	9.999961386	10.000099334	10.000004103
06.05.1998	10.000069179	9.999961316	10.000099483	10.000004289
06.05.1998	10.000069176	9.999961572	10.000099411	10.000004187
06.05.1998	10.000069054	9.999961643	10.000099312	10.000004298
06.05.1998	10.000069295	9.999961646	10.000099508	10.000004243
06.05.1998	10.000069200	9.999961847	10.000099479	10.000004129
06.05.1998	10.000069205	9.999961778	10.000099446	10.000004225
07.05.1998	10.000069245	9.999961775	10.000099551	10.000004357
07.05.1998	10.000069192	9.999961355	10.000099483	10.000004267
07.05.1998	10.000069209	9.999961444	10.000099327	10.000004389
07.05.1998	10.000069284	9.999961259	10.000099248	10.000004197
07.05.1998	10.000069383	9.999961673	10.000099267	10.000004159
07.05.1998	10.000069179	9.999961303	10.000099253	10.000004251
07.05.1998	10.000069228	9.999961365	10.000099382	10.000004099

<b>Tarih</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610110)</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610210)</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610310)</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610410)</b>
07.05.1998	10.000069150	9.999961119	10.000099428	10.000004238
07.05.1998	10.000069146	9.999961335	10.000099536	10.000004188
07.05.1998	10.000069357	9.999961224	10.000099402	10.000004231
08.05.1998	10.000069196	9.999961197	10.000099457	10.000004095
08.05.1998	10.000069159	9.999961048	10.000099522	10.000004165
08.05.1998	10.000069237	9.999961254	10.000099602	10.000004212
08.05.1998	10.000069305	9.999961007	10.000099399	10.000003997
08.05.1998	10.000069279	9.999961088	10.000099325	10.000004061
08.05.1998	10.000069325	9.999961155	10.000099658	10.000004106
08.05.1998	10.000069369	9.999961458	10.000099671	10.000004015
08.05.1998	10.000069412	9.999961588	10.000099495	10.000004084
08.05.1998	10.000069284	9.999961632	10.000099532	10.000004189
08.05.1998	10.000069422	9.999961371	10.000099419	10.000004249

**BNM/LCIE'DE GERÇEKLEŞTİRİLEN KARŞILAŞTIRMA  
ÖLÇÜMLERİNİN DATALARI**

Not: Tüm gerilim ölçümleri için birim voltur.

<b>Tarih</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610110)</b>	<b>Tarih</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610210)</b>
22.04.1998	10.000068595	23.04.1998	9.999961131
22.04.1998	10.000068661	23.04.1998	9.999961264
22.04.1998	10.000068577	24.04.1998	9.999961304
22.04.1998	10.000068706	24.04.1998	9.999961581
22.04.1998	10.000068705	24.04.1998	9.999961690
22.04.1998	10.000068617	24.04.1998	9.999961656
22.04.1998	10.000068652	24.04.1998	9.999961685
22.04.1998	10.000068682	24.04.1998	9.999961594
22.04.1998	10.000068693	24.04.1998	9.999961604
22.04.1998	10.000068604	24.04.1998	9.999961749
22.04.1998	10.000068604	24.04.1998	9.999961697
22.04.1998	10.000068633	24.04.1998	9.999961581
22.04.1998	10.000068633	24.04.1998	9.999961808
22.04.1998	10.000068620	24.04.1998	9.999961722
22.04.1998	10.000068644	24.04.1998	9.999961556
22.04.1998	10.000068651	24.04.1998	9.999961549
23.04.1998	10.000068467	24.04.1998	9.999961488
23.04.1998	10.000068533	24.04.1998	9.999961481
24.04.1998	10.000068896	24.04.1998	9.999961346
24.04.1998	10.000068907	24.04.1998	9.999961420
24.04.1998	10.000068937	24.04.1998	9.999961500
24.04.1998	10.000068879	24.04.1998	9.999961650
24.04.1998	10.000068927	24.04.1998	9.999961547
24.04.1998	10.000068908	24.04.1998	9.999961860
24.04.1998	10.000068920	25.04.1998	9.999960802
24.04.1998	10.000068917	25.04.1998	9.999961245

<b>Tarih</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610110)</b>	<b>Tarih</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610210)</b>
24.04.1998	10.000068856	25.04.1998	9.999961221
24.04.1998	10.000068794	25.04.1998	9.999961340
24.04.1998	10.000068753	25.04.1998	9.999961260
24.04.1998	10.000068769	25.04.1998	9.999960792
24.04.1998	10.000068817	25.04.1998	9.999961320
24.04.1998	10.000068780	25.04.1998	9.999961387
24.04.1998	10.000068733	25.04.1998	9.999961360
24.04.1998	10.000068784	25.04.1998	9.999961267
24.04.1998	10.000068826	25.04.1998	9.999961395
25.04.1998	10.000068968	25.04.1998	9.999961435
25.04.1998	10.000068917	25.04.1998	9.999961844
25.04.1998	10.000069008	25.04.1998	9.999961395
25.04.1998	10.000068971	25.04.1998	9.999961260
25.04.1998	10.000068883	25.04.1998	9.999961312
25.04.1998	10.000068948	25.04.1998	9.999960729
25.04.1998	10.000068966	25.04.1998	9.999961379
25.04.1998	10.000068964	25.04.1998	9.999960880
25.04.1998	10.000068924	25.04.1998	9.999961055
25.04.1998	10.000068888	25.04.1998	9.999961260
25.04.1998	10.000068973	25.04.1998	9.999961287
25.04.1998	10.000068869	25.04.1998	9.999961247
25.04.1998	10.000068934	25.04.1998	9.999961428
25.04.1998	10.000068912	27.04.1998	9.999960772
25.04.1998	10.000068901	27.04.1998	9.999961052
25.04.1998	10.000068888	27.04.1998	9.999960734
25.04.1998	10.000068958	27.04.1998	9.999961435
25.04.1998	10.000068900	27.04.1998	9.999961360
25.04.1998	10.000068875	27.04.1998	9.999960712
25.04.1998	10.000068931	27.04.1998	9.999961114
25.04.1998	10.000068940	27.04.1998	9.999961125
25.04.1998	10.000068933	27.04.1998	9.999961245
25.04.1998	10.000068990	27.04.1998	9.999960733

<b>Tarih</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610110)</b>	<b>Tarih</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610210)</b>
25.04.1998	10.000068914	27.04.1998	9.999961248
25.04.1998	10.000068874	27.04.1998	9.999961150
27.04.1998	10.000068975	27.04.1998	9.999961143
27.04.1998	10.000068979	27.04.1998	9.999961158
27.04.1998	10.000069012	27.04.1998	9.999961020
27.04.1998	10.000068978	27.04.1998	9.999960884
27.04.1998	10.000068955	27.04.1998	9.999960823
27.04.1998	10.000068904	27.04.1998	9.999960809
27.04.1998	10.000069035	27.04.1998	9.999960995
27.04.1998	10.000069001	27.04.1998	9.999960690
27.04.1998	10.000068966	27.04.1998	9.999960816
27.04.1998	10.000068971	27.04.1998	9.999960925
27.04.1998	10.000068761	27.04.1998	9.999960759
27.04.1998	10.000068778	27.04.1998	9.999961055
27.04.1998	10.000068805	27.04.1998	9.999960860
27.04.1998	10.000068683	27.04.1998	9.999960874
27.04.1998	10.000068811	27.04.1998	9.999961269
27.04.1998	10.000068838	27.04.1998	9.999961231
27.04.1998	10.000068859	28.04.1998	9.999961228
27.04.1998	10.000068799	28.04.1998	9.999961359
27.04.1998	10.000068722	28.04.1998	9.999961434
27.04.1998	10.000068781	28.04.1998	9.999961254
27.04.1998	10.000068860	28.04.1998	9.999961329
27.04.1998	10.000068870	28.04.1998	9.999961255
27.04.1998	10.000068905	28.04.1998	9.999961193
27.04.1998	10.000068826	28.04.1998	9.999961266
27.04.1998	10.000068904	28.04.1998	9.999961340
27.04.1998	10.000068898	28.04.1998	9.999961339
27.04.1998	10.000068886	28.04.1998	9.999961154
27.04.1998	10.000068931	28.04.1998	9.999961195
28.04.1998	10.000068866	28.04.1998	9.999961065
28.04.1998	10.000068839	28.04.1998	9.999961083

<b>Tarih</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610110)</b>	<b>Tarih</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610210)</b>
28.04.1998	10.000068879	28.04.1998	9.999961315
28.04.1998	10.000068699	28.04.1998	9.999961366
28.04.1998	10.000068883	28.04.1998	9.999961375
28.04.1998	10.000068837	28.04.1998	9.999961579
28.04.1998	10.000068752	28.04.1998	9.999961339
28.04.1998	10.000068790	29.04.1998	9.999961280
28.04.1998	10.000068831	29.04.1998	9.999961485
28.04.1998	10.000068772	29.04.1998	9.999961558
28.04.1998	10.000068772	29.04.1998	9.999961649
28.04.1998	10.000068769	29.04.1998	9.999961523
28.04.1998	10.000068901	29.04.1998	9.999961407
28.04.1998	10.000068880	29.04.1998	9.999961357
28.04.1998	10.000068906	29.04.1998	9.999961422
28.04.1998	10.000068906	29.04.1998	9.999961572
28.04.1998	10.000068837	29.04.1998	9.999961657
28.04.1998	10.000068831		
28.04.1998	10.000068882		
28.04.1998	10.000068938		
28.04.1998	10.000068852		
28.04.1998	10.000068955		
28.04.1998	10.000068872		
28.04.1998	10.000068861		
28.04.1998	10.000068843		
28.04.1998	10.000068881		
28.04.1998	10.000068877		
28.04.1998	10.000068935		
28.04.1998	10.000068885		
28.04.1998	10.000068902		
28.04.1998	10.000068854		
29.04.1998	10.000068760		
29.04.1998	10.000068762		
29.04.1998	10.000068702		
29.04.1998	10.000068804		

<b>Tarih</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610110)</b>	<b>Tarih</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610210)</b>
29.04.1998	10.000068728		
29.04.1998	10.000068896		
29.04.1998	10.000068863		
29.04.1998	10.000068942		
29.04.1998	10.000068994		
29.04.1998	10.000069078		
29.04.1998	10.000069055		
29.04.1998	10.000069058		
29.04.1998	10.000068944		
29.04.1998	10.000069020		
29.04.1998	10.000069037		
29.04.1998	10.000069021		
29.04.1998	10.000068973		
29.04.1998	10.000068999		
29.04.1998	10.000068933		
30.04.1998	10.000069064		
30.04.1998	10.000069150		

<b>Tarih</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610310)</b>	<b>Tarih</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610410)</b>
23.04.1998	10.000098880	23.04.1998	10.000003807
23.04.1998	10.000098948	23.04.1998	10.000003797
23.04.1998	10.000098590	23.04.1998	10.000003750
23.04.1998	10.000098653	23.04.1998	10.000003757
23.04.1998	10.000098672	23.04.1998	10.000003703
23.04.1998	10.000098613	23.04.1998	10.000003719
23.04.1998	10.000098549	23.04.1998	10.000003739
23.04.1998	10.000098630	23.04.1998	10.000003748
23.04.1998	10.000098629	23.04.1998	10.000003881
23.04.1998	10.000098669	23.04.1998	10.000003831
23.04.1998	10.000098620	23.04.1998	10.000003860
23.04.1998	10.000098691	23.04.1998	10.000003901
23.04.1998	10.000098664	23.04.1998	10.000004030
23.04.1998	10.000098674	23.04.1998	10.000003952
24.04.1998	10.000098648	23.04.1998	10.000003965
24.04.1998	10.000098736	23.04.1998	10.000003878
24.04.1998	10.000098819	23.04.1998	10.000004123
24.04.1998	10.000098797	23.04.1998	10.000004058
24.04.1998	10.000098719	23.04.1998	10.000004033
24.04.1998	10.000098605	23.04.1998	10.000004088
24.04.1998	10.000098607	23.04.1998	10.000004008
24.04.1998	10.000098555	23.04.1998	10.000004145
24.04.1998	10.000098705	23.04.1998	10.000004176
24.04.1998	10.000098743	23.04.1998	10.000004038
25.04.1998	10.000098809	24.04.1998	10.000004223
26.04.1998	10.000098907	24.04.1998	10.000004226
25.04.1998	10.000098790	24.04.1998	10.000004245
26.04.1998	10.000098872	24.04.1998	10.000004244
26.04.1998	10.000098871	24.04.1998	10.000004227
26.04.1998	10.000098862	24.04.1998	10.000004230
25.04.1998	10.000098886	24.04.1998	10.000004220
25.04.1998	10.000098866	24.04.1998	10.000004310



<b>Tarih</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610310)</b>	<b>Tarih</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610410)</b>
26.04.1998	10.000098875	24.04.1998	10.000004226
26.04.1998	10.000098939	24.04.1998	10.000004177
26.04.1998	10.000098911	24.04.1998	10.000004243
25.04.1998	10.000098867	24.04.1998	10.000004138
26.04.1998	10.000098863	24.04.1998	10.000004264
26.04.1998	10.000098874	24.04.1998	10.000004266
26.04.1998	10.000098946	24.04.1998	10.000004365
25.04.1998	10.000098924	24.04.1998	10.000004165
26.04.1998	10.000098895	24.04.1998	10.000004169
25.04.1998	10.000098966	24.04.1998	10.000004325
26.04.1998	10.000098881	24.04.1998	10.000004118
26.04.1998	10.000098851	24.04.1998	10.000004180
25.04.1998	10.000098823	24.04.1998	10.000004196
25.04.1998	10.000098909	24.04.1998	10.000004203
26.04.1998	10.000098903	24.04.1998	10.000004155
26.04.1998	10.000098930	24.04.1998	10.000004334
26.04.1998	10.000098911	24.04.1998	10.000004370
24.04.1998	10.000098892	25.04.1998	10.000004150
25.04.1998	10.000098792	25.04.1998	10.000004019
24.04.1998	10.000098896	25.04.1998	10.000004049
25.04.1998	10.000098829	25.04.1998	10.000004151
25.04.1998	10.000098730	25.04.1998	10.000004061
24.04.1998	10.000098818	25.04.1998	10.000004129
25.04.1998	10.000098780	25.04.1998	10.000004149
25.04.1998	10.000098820	25.04.1998	10.000004245
24.04.1998	10.000098815	25.04.1998	10.000003974
24.04.1998	10.000098849	25.04.1998	10.000004205
25.04.1998	10.000098780	25.04.1998	10.000004029
24.04.1998	10.000098799	25.04.1998	10.000004212
24.04.1998	10.000098855	25.04.1998	10.000004235
25.04.1998	10.000098814	25.04.1998	10.000004104
24.04.1998	10.000098852	25.04.1998	10.000004100
24.04.1998	10.000098786	25.04.1998	10.000004218

<b>Tarih</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610310)</b>	<b>Tarih</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610410)</b>
24.04.1998	10.000098857	25.04.1998	10.000004120
24.04.1998	10.000098795	25.04.1998	10.000004258
25.04.1998	10.000098754	25.04.1998	10.000004192
25.04.1998	10.000098878	25.04.1998	10.000004214
24.04.1998	10.000098912	25.04.1998	10.000004004
24.04.1998	10.000098839	25.04.1998	10.000004134
24.04.1998	10.000098887	25.04.1998	10.000004075
25.04.1998	10.000098748	25.04.1998	10.000004157
25.04.1998	10.000098679	25.04.1998	10.000004083
28.04.1998	10.000098785	24.04.1998	10.000004258
28.04.1998	10.000098844	28.04.1998	10.000004170
28.04.1998	10.000098888	28.04.1998	10.000004136
28.04.1998	10.000098880	28.04.1998	10.000004177
28.04.1998	10.000098836	28.04.1998	10.000004325
28.04.1998	10.000098857	28.04.1998	10.000004292
28.04.1998	10.000098802	28.04.1998	10.000004412
28.04.1998	10.000098774	28.04.1998	10.000004398
28.04.1998	10.000098792	28.04.1998	10.000004254
28.04.1998	10.000098790	28.04.1998	10.000004252
28.04.1998	10.000098674	28.04.1998	10.000004353
28.04.1998	10.000098659	28.04.1998	10.000004343
28.04.1998	10.000098657	28.04.1998	10.000004243
28.04.1998	10.000098640	28.04.1998	10.000004453
28.04.1998	10.000098736	28.04.1998	10.000004306
28.04.1998	10.000098729	28.04.1998	10.000004303
28.04.1998	10.000098597	28.04.1998	10.000004275
28.04.1998	10.000098642	28.04.1998	10.000004349
28.04.1998	10.000098568	28.04.1998	10.000004415
28.04.1998	10.000098740	28.04.1998	10.000004142
28.04.1998	10.000098677	28.04.1998	10.000004272
28.04.1998	10.000098733	28.04.1998	10.000004179
28.04.1998	10.000098713	28.04.1998	10.000004351
28.04.1998	10.000098761	28.04.1998	10.000004322

<b>Tarih</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610310)</b>	<b>Tarih</b>	<b>Fluke 732B (S/N: 5610410)</b>
29.04.1998	10.000098758	29.04.1998	10.000004006
29.04.1998	10.000098678	29.04.1998	10.000004022
29.04.1998	10.000098806	29.04.1998	10.000004051
29.04.1998	10.000098704	29.04.1998	10.000004112
29.04.1998	10.000098757	29.04.1998	10.000004214
29.04.1998	10.000098575	29.04.1998	10.000004308
29.04.1998	10.000098784	29.04.1998	10.000004337
29.04.1998	10.000098840	29.04.1998	10.000004321
29.04.1998	10.000098812	29.04.1998	10.000004275
29.04.1998	10.000098700	29.04.1998	10.000004328
29.04.1998	10.000098697	29.04.1998	10.000004290
29.04.1998	10.000098606	29.04.1998	10.000004423
29.04.1998	10.000098680	29.04.1998	10.000004414
29.04.1998	10.000098730		
29.04.1998	10.000098669		
29.04.1998	10.000098606		
29.04.1998	10.000098680		
29.04.1998	10.000098711		
29.04.1998	10.000098757		
29.04.1998	10.000098687		
29.04.1998	10.000098646		

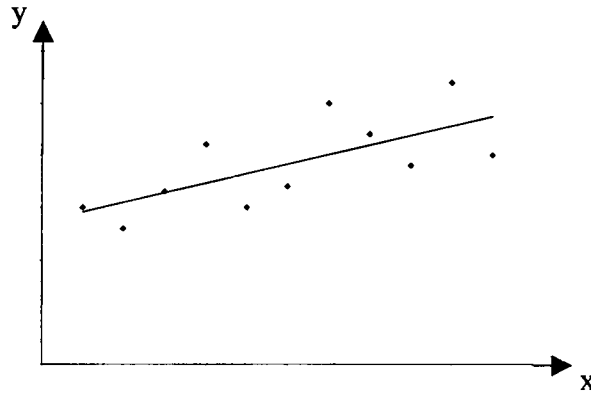
## DOĞRUSAL EN KÜÇÜK KARE UYDURMA YÖNTEMİ

Metrolojide gerçekleştirilen pek çok ölçümde kullanılan doğrusal en küçük kare uydurma yöntemi (D.E.K.K.U.Y.), biri değişken diğeri bağımsız iki parametreyi en doğru şekilde ilişkilendirmede kullanılmaktadır. Yöntemin kullanıldığı ölçümlerden biri de, gerilim değeri zamana bağlı olarak değişen Zener DC gerilim standartlarının değerlerinin tahmin edilmesidir.

Zener gerilim standartlarını zamanla değişimi neredeyse doğrusal bir değişim göstermektedir. Dolayısıyla, eldeki ölçüm sonuçları kullanılarak, standardın zamanla değişimi matematiksel olarak ifade edilebilmek ve gelecekteki değerini tahmin etmek mümkündür. Ancak, standardın değerinin zamanla değişimini doğrusal olarak kabul ederek;

$$V = a + bt \quad (F.1)$$

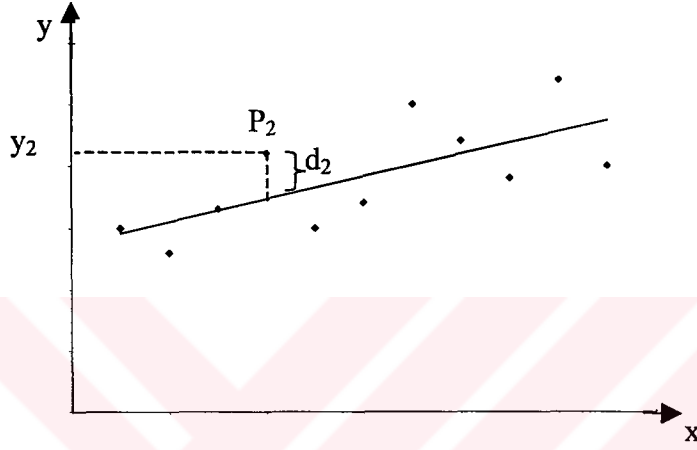
şeklinde ifade ettiğimizde bir problemle karşı karşıya kalırız; Elimizdeki hangi ölçüm değerleri ile a ve b katsayılarını belirlemeliyiz? En doğru sonuca eldeki tüm ölçüm değerlerini kullanarak ulaşacağımız açıktır. Doğrusal en küçük kare uydurma yöntemi, mümkün olduğunca fazla noktadan geçen ve aynı zamanda hiç bir noktalardan uzak olmayan bir doğrunun katsayılarının belirlenmesi yöntemidir. (Şekil F.1)



Şekil F.1. Doğrusal en küçük kare uydurma yöntemi ile oluşturulan doğru

D.E.K.K.U.Y., doğrunun a ve b katsayılarını, doğru üzerindeki noktalar ile ölçülen değerler arasındaki farkların karelerinin toplamını küçük tutmak suretiyle belirlemektedir.

Bir  $P_2 = P(X_2, Y_2)$  noktasını göz önüne alarak D.E.K.K.U.Y. ile a ve b katsayılarını belirleyelim (Şekil F.2);



Şekil F.2.  $P_2$  noktasının ve diğer noktaların doğruya uzaklığı

Şekil F.2'den görüldüğü gibi  $P_2$  noktasının, matematiksel ifadesi

$$y = a + bx \quad (F.2)$$

olan doğruya uzaklığı şu şekilde ifade edilir;

$$d_2 = y_2 - (a + bx_2) \quad (F.3)$$

Doğru katsayıları, a ve b;

$$Q = \sum_{i=1}^{i=n} d_i^2 \quad (F.4)$$

eşitliğini minimum yapacak şekilde seçilirse, noktaların doğru etrafındaki dağılımı da minimum olacaktır.

Bir değişkenin maksimum ve minimum değerleri, turevini sıfıra eşitleyen değerdir. Bu noktadan yola çıkarak, a ve b değişkenlerine bağlı Q'nun a'ya ve b'ye göre birinci turevi alınarak (Denklem F.6 ve F.7) sıfıra eşitlenir ise a ve b katsayıları aşığıda verildiği gibi belirlenir;

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 \quad (F.5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = \sum_{i=1}^n 2(y_i - a - bx_i)(-1) \quad (F.6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial b} = \sum_{i=1}^n 2(y_i - a - bx_i)(-x_i) \quad (F.7)$$

$$\sum_{i=1}^n 2(y_i - \hat{a} - \hat{b}x_i)(-1) = 0 \quad (F.8)$$

$$\sum_{i=1}^n 2(y_i - \hat{a} - \hat{b}x_i)(-x_i) = 0 \quad (F.9)$$

Denklem F.8 ve F.9 kullanılarak aşığıdaki eşitlik elde edilir;

$$\sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n (\hat{a} + \hat{b}x_i) \quad (F.10)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = n\hat{a} + \hat{b} \sum_{i=1}^n x_i \quad (F.11)$$

Denklem F.11'de eşitliğin her iki tarafın n'ye bölüdüğünde, eşitlik řu şekilde yazılabilir;

$$\bar{y} = \hat{a} + \hat{b}\bar{x} \quad (F.12)$$

Denklem F.12'de  $\bar{y}$ ,  $y_i$  değerlerinin ortalaması,  $\bar{x}$  ise  $x_i$  değerlerinin ortalamasıdır.;

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (\text{F.13})$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (\text{F.14})$$

Denklem F.10 kullanılarak, aşağıda verilen eşitlikler (Denklem F.15 ve F.16) elde edilir;

$$\sum_{i=1}^n y_i x_i = \sum_{i=1}^n (\hat{a}x_i + \hat{b}x_i^2) \quad (\text{F.15})$$

$$\sum_{i=1}^n y_i x_i = \hat{a} \sum_{i=1}^n x_i + \hat{b} \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (\text{F.16})$$

Denklem F.11 ve Denklem F.16,  $\hat{a}$ 'nın ortadan kaldırılması için kullanılması durumunda;

$$\sum_{i=1}^n y_i x_i - \bar{y} \sum_{i=1}^n x_i = \hat{b} \left[ \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x} \sum_{i=1}^n x_i \right] \quad (\text{F.17})$$

denkliği elde edilir. Denklem F.17'de gerekli sadeleştirmeler ve düzenlemeler yapıldığında  $\hat{b}$  aşağıda verilen denklemler ile ifade edilir;

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - \bar{y} \sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x} \sum_{i=1}^n x_i} \quad (\text{F.18})$$

veya

$$\hat{b} = \frac{n \sum_{i=1}^n y_i x_i - (\sum_{i=1}^n y_i)(\sum_{i=1}^n x_i)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (\text{F.19})$$

$\hat{a}$  'ın değeri denklem F.16 ve F.19 kullanılarak şu şekilde hesaplanır;

$$\hat{a} = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (\text{F.20})$$

Sonuç olarak, tüm noktaların en yakınından geçen doğrusun katsayıları Denklem F.18-F.19 ve F.20 kullanılarak belirlenir.

Ancak, D.E.K.K.U.Y. kullanılarak hesaplanan doğru parametreleri olan a ve b değerleri, sonlu sayıdaki veriler dikkate alınarak belirlendiğinden hata içermektedirler (Dietrich 1991). Doğrunun eğimindeki hata  $(\bar{x}, \bar{y})$  noktasında 0 iken, x değeri  $\bar{x}$ 'dan uzaklaştıkça artmaktadır. Bu yüzden, eğim kullanılarak yapılan tahminler için bir hata söz konusudur.  $x_j$  noktası için doğru ile belirlenen  $y_j$  değerinin tahmininin standart sapması;

$$\sigma_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_j)^2 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - y_j)}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{n - 2} \times \left( \frac{1}{n} + \frac{(x_j - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right) \quad (\text{F.21})$$

eşitliği ile bulunur.

Denklem F.21'de paydada yer alan ifade yerine, aşağıda verilen eşdeğeri de kullanılabilir;

$$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \quad (\text{F.22})$$



## ÖLÇÜMLERDE BELİRSİZLİK

Ölçülen bir büyüklüğün değeri ölçümden ölçüme farklılık gösterir. Her ölçüm ise mutlaka bir şüphe içerir. Bu nedenle ölçüm değeri ile birlikte değer belirsizliği de verilmelidir. Diğer bir deyişle, ölçülen büyüklüğün gerçek değerinin belirli bir olasılıkla bulunduğu aralık verilmelidir.

Ölçümlerin güvenilirliği, o ölçümde kontrol edilebilir etkenlerin yanısıra, pek çok kontrol edilemez hatta fark edilemeyen faktörlere bağlıdır. Bu faktörlerden bazıları, ölçümü gerçekleştiren kişi, ölçümde kullanılan cihazlar, ölçümün gerçekleştirildiği ortam şartlarıdır.

Ölçümlerde yapılan hatalar, sistematik veya rasgele hatalar olabilir (WECC 1990).

### G.1. Rasgele Hatalar

Rastgele hata, aynı büyüklüğün bir dizi ölçümleri esnasında önceden tahmin edilemeyecek şekilde değişen ölçüm hatası bileşenidir. Bir başka deyişle, pek çok defa tekrarlanan ölçümlerin ölçüm ortalamasından sapmasının göstergesidir. Sapma, ölçümde kullanılan cihazların karakteristiğinden veya ölçümü yapılan niceliğin sabit kalmamasından kaynaklanmaktadır.

### G.2. Sistematik Hatalar

Her bir dizi ölçüm sonuçlarında, ölçümler boyunca sabit kalan ve önceden tahmin edilebilir değişimler gösteren hata bileşenleri vardır. Bu hatalar sabit hatalar veya sistematik hatalar olarak adlandırılır. Sistematik hata değeri bilindiğinde, tüm ölçülen değerlere eklenen bir düzeltme faktörü olarak kullanılabilir.

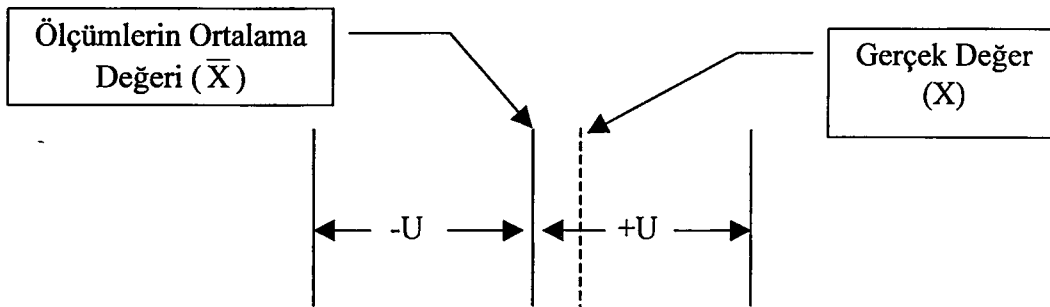
### G.3. Ölçülen Büyüklüğün Genel Belirsizliği

Rastgele hatalar istatistiksel yöntemler kullanılarak belirlenirken, sistematik hatalar istatistiksel olmayan yöntemler ile hesaplanmaktadır. Bu nedenle, bu iki hata tipini bir araya getirerek toplam belirsizliği belirlemek basit değildir. Belirsizlik hesaplamalarında, bu hatalar ayrı ayrı da beyan edilebilirler.

Fakat ölçümlerin çoğunda belirsizliği belirleyen tek bir rakama ihtiyaç vardır. Bu nedenle, tekrar tekrar gerçekleştirilen bir büyüklüğün ölçümünde, rasgele ve sistematik hatalar belli bir yöntem kullanılarak birleştirilir ve belirsizliği tanımlayan tek bir rakam elde edilir.

Bilimsel çevrelerde, toplam belirsizliğin belirlenmesi için belli bir kural olmadığı için, toplam belirsizlik keyfi olarak belirlenir. Bu yüzden belirsizlik verilirken, belirleme yöntemi de mutlaka ifade edilmelidir. Örneğin belirsizlik tüm hata bileşenlerinin basit toplamı alınarak oluşturulabilir. Bu durumda güvenilirlik düzeyi %99'dur. Veya, tüm hataların aynı yönlerde bulunamayacağı düşünülerek, hata bileşenlerinde bazı kısaltmalar yapılabilir. Güvenilirlik düzeyi %95 olan bu yöntemde, tüm hataların karelerinin toplamının karekökü alınarak belirsizlik değeri hesaplanır.

Her iki yöntemde de, ölçülen parametrenin verilen kapsamı için hata sınırını gösterir. Kapsam değeri, ölçülen parametrenin gerçek değerinin ( $X$ ) en uygun değer ( $\bar{X}$ ) artı veya eksi belirsizlik değeri ( $U$ ) ile belirlenen aralıkta bulunmasının beklendiği aralığı tanımlamaktadır (Şekil G.1).



Şekil G.1. Belirsizliğin kapsadığı aralık

Karelerin toplamının karekökü (Root Sum Square-RSS) yöntemi rasgele ve sistematik hataların birleştirilmesinde en sık kullanılan yöntemdir.

#### G.4. Standart Belirsizliğin A-Tipi Hesaplanması

Çoğu kez, rasgele değişken ( $q$ ) için  $n$  tane bağımsız gözlem sonucunda aynı gözlem koşullarında elde edilen en iyi çıkarım,  $n$  tane gözlemin aritmetik ortalaması alınarak elde edilir.

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (G.1)$$

Her gözlem, ortam koşullarındaki rasgele değişimlerden ve etki faktörlerinin rasgele değişimlerinden dolayı farklılık gösterir. Gözlemlerin deneysel varyansının değeri, aynı zamanda  $q$ 'nun dağılımının varyansı;

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (G.2)$$

denklemini kullanarak hesaplanır. Gözlemler ortalamasının varyansının en iyi kestirimi ise;

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (G.3)$$

denklemini ile belirlenir.

$n$  kere tekrarlanan bağımsız gözlemler sonunda, girdi değeri  $X_i$  için kestirilen değer,  $x_i \doteq \bar{X}_i$  için standart belirsizlik ;

$$u(x_i) = s(\bar{X}_i) \quad (G.4)$$

olarak belirlenir.

### G.5. Standart Belirsizliğin B-Tipi Hesaplanması

Girdi değeri  $X_i$  için kestirilen değer olan  $x_i$  tekrarlanmış ölçümler sonucunda elde edilmiyorsa, kestirilmiş varyans  $u^2(x_i)$  veya standart belirsizlik  $u(x_i)$ ,  $X_i$ 'in olabilecek bütün farklı değerleri göz önüne alınmak suretiyle bütün elde edilen bilgiler kullanılarak bilimsel yolla yargıya varılır. Eldeki bilgiler;

- Daha önce yapılan ölçümde elde edilen veriler
- Kullanılan cihazlar konusundaki deneyim ve edinilmiş bilgiler
- Cihaz üreticilerinin belirttiği özellikler
- Cihazların kalibrasyon bilgilerine ilişkin belirsizliklerdir.

Bu şekilde hesaplanan  $u^2(x_i)$  ve  $u(x_i)$ , kolaylık açısından B-tipi varyans ve B-tipi standart belirsizlik olarak adlandırılır.

Eğer kestirim  $x_i$  başka bir kaynaktan alınmış ve bu kaynakta belirsizlik standart sapmanın belli bir çarpanı olarak veriliyorsa, standart belirsizlik  $u(x_i)$  basitçe, verilen değer bu çarpana bölümü, kestirilen varyans  $u^2(x_i)$  ise bölme işlemi sonunda elde edilen değer karesine eşittir.

Herhangi bir kaynaktan belirtilen belirsizlik değeri  $x_i$ , %90, %95, %99 güvenilirlik seviyelerinde verilebilmektedir. Farklı şekilde belirtilmemişse, dağılım normal dağılım kabul edilerek bu güvenilirlik seviyelerine karşılık gelen faktörler sırasıyla 1.64, 1.96 ve 2.58'dir. Bu durumda standart belirsizlik, verilen belirsizliğin güvenilirlik seviyesine uygun faktöre bölünerek hesaplanır.

### G.6. Bileşik Belirsizliğin Hesaplanması

Birbirinden bağımsız girdi değerleri için bileşik standart belirsizlik, denklem G.5 olarak verilen bileşik standart varyansın pozitif karekökü olarak tanımlanır;

$$u_c^2(y) = \sum_{k=1}^n c_k^2 u^2(x_k) \quad (G.5)$$

Görüldüğü gibi, eğer ölçülen büyüklük ile, girdi büyüklükleri arasında doğrusal bir bağıntı varsa ( $Y=c_1x_1+c_2x_2+\dots+c_nx_n$ ) ve sabitleri 1 veya -1 değerlerinde ise, ölçülen büyüklük Y'nin kestirilen değerinin bileşik belirsizliği;

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{k=1}^n u^2(x_k)} \quad (G.6)$$

denklemleri ile hesaplanır.

### G.7. Genişletilmiş Belirsizlik

Bileşik belirsizlik ölçümlerdeki belirsizliği tanımlamasına rağmen, ölçülen büyüklüğün dağılımını gösterdiğinde güvenilirlik düzeyi sadece % 68.27'dir. Diğer bir deyişle, aynı büyüklük herhangi bir şart altında ölçülürse sonuç %68.27'lik olasılıkla standart belirsizlikle belirlenen alanda olacaktır. Endüstriyel uygulamalarda ise daha fazla güvenilirlik düzeyine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumda ölçümlerdeki belirsizliği tanımlamak için genişletilmiş belirsizlik olarak adlandırılan terim kullanılır. Genişletilmiş belirsizlik U, bileşik standart belirsizlik  $u_c(y)$  ile kapsam faktörü k ile çarpımını sonucu elde edilir.

$$U=k u_c(y) \quad (G.7)$$

Kapsam faktörü k, genel olarak 2 ile 3 aralığındadır. Ancak metroloji dünyasında kapsam faktörü %95 güvenilirlik seviyesi için 2 olarak alınırken, %99 güvenilirlik seviyesi için ise 3 olarak alınmaktadır.

## AĞIRLIKLI ORTALAMA

Bir büyüklük değişik metodlarla ölçüldüğünde çoğu zaman değişik standart sapmalar ile değişik ölçüm değerleri elde edilir. Bu durumda en iyi ölçüm değeri olarak hangi değer alınması gerektiği bir sorudur.

Bir büyüklüğün ( $x$ ),  $n$  kere ölçüldüğü ve ölçüm sonuçları ve ölçümlerin standart sapma değerlerinin  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ve  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$  olduğunu düşünelim. Bu ölçümlerin ağırlıklı ortalama değeri, diğer bir deyişle en olası değeri;

$$q_w = \frac{\sum_{r=1}^n \frac{x_r}{\sigma_r^2}}{\sum_{r=1}^n \frac{1}{\sigma_r^2}} \quad (\text{H.1})$$

veya

$$q_w = \frac{\sum_{r=1}^n w_r x_r}{\sum_{r=1}^n w_r} \quad (\text{H.2})$$

$$w_r = \frac{k^2}{\sigma_r^2} \quad (\text{H.3})$$

olarak hesaplanır.

Bu durumda standart sapma Denklem H.4 kullanılarak hesaplanır;

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{\sum_{r=1}^n \frac{1}{\sigma_r^2}}} \quad (\text{H.4})$$

## ÖZGEÇMİŞ

1970 yılında İzmit'te doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İzmit'te tamamladı. 1987 yılında girdiği Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden 1992 yılında mezun oldu. 1996 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik-Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans çalışmalarına başlamıştır.

1993 yılından beri Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), Ulusal Metroloji Enstitüsü Gerilim Laboratuvarı'nda araştırmacı ve laboratuvar sorumlusu olarak görev yapmaktadır. Kendisi ayrıca ikinci seviye kalibrasyon laboratuvarlarını değerlendirilmesi (akreditasyonu) amacıyla kurulmuş olan Türk Kalibrasyon Servisi'nde baş değerlendirici olarak görev almaktadır.

İZMİR  
DOKTORA  
YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
MERKEZİ