T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI

ELEKTRONİK ÖLÇÜM CİHAZLARININ BİLGİSAYAR DESTEKLİ KALİBRASYONU

Hazırlayan

Osman TORUNOĞLU

Danışman

Doç.Dr.Nurhan KARABOĞA

Yüksek Lisans Tezi

Mayıs 2012

KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI

ELEKTRONİK ÖLÇÜM CİHAZLARININ BİLGİSAYAR DESTEKLİ KALİBRASYONU

Hazırlayan

Osman TORUNOĞLU

Danışman

Doç.Dr.Nurhan KARABOĞA

Yüksek Lisans Tezi

Mayıs 2012

KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Adı-Soyadı: Osman TORUNOĞLU

İmza : 

YÖNERGEYE UYGUNLUK

"Elektronik Ölçüm Cihazlarının Yazılım Destekli Kalibrasyonu" adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan
Osman TORUNOĞLU

Danışman
Doç. Dr.Nurhan KARABOĞA

Elektrik Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Necmi TAŞPINAR

Doç. Dr. Nurhan KARABOĞA danışmanlığında **Osman TORUNOĞLU** tarafından hazırlanan **"Elektronik Ölçüm Cihazlarının Bilgisayar Destekli Kalibrasyonu"** adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik Elektronik Mühendisliği** Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

16.05.2012

JÜRİ:

Başkan: Prof. Dr. Necmi TAŞPINAR

Üye : Doç. Dr. Nurhan KARABOĞA

Üye : Doç. Dr. Galip SARAÇOĞLU

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 22/05/2012 tarih ve 2012/23-03 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

22 /.05. / 2012..

Prof.Dr. Necmettin MARAŞLI

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının hazırlanılmasında, yürütülmesinde ve tamamlanmasında bilgisini ve desteğini esirgemeyen değerli hocam sayın Doç. Dr. Nurhan KARABOĞA'ya teşekkür ederim.

Bu çalışma süresince sunmuş olduğu fikirlerle çalışmaya ışık tutan amirim Aşir BAHÇEBAŞI'ya teşekkür ederim.

Uygulama safhasında programın alt yapısının oluşturulmasında ve program ara yüzlerinin geliştirilmesinde yardımcı olan ve her türlü sıkıntımda fikir alışverişinde bulunabildiğim değerli mesai arkadaşım Şahin MERSİN'e teşekkür ederim.

Tez çalışması boyunca bana verdiği manevi desteğini hiç eksiltmeyen aileme teşekkür ederim.

Osman TORUNOĞLU

Kayseri, Mayıs 2012

ELEKTRONİK ÖLÇÜM CİHAZLARININ BİLGİSAYAR DESTEKLİ KALİBRASYONU

Osman TORUNOĞLU

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Nisan 2012

Danışman: Doç. Dr. Nurhan KARABOĞA

KISA ÖZET

Kalibrasyon, ölçüm cihazlarının doğruluğunun belirlenmesinde oynadığı rol ile teknolojinin vazgeçilmez unsurlarından biridir. Kalibrasyon, cihazların güvenilirliğini tespit etmek ve sürdürmek için önemlidir. Ancak cihazların kalibrasyon işlemlerinin de en kısa sürede en doğru şekilde yapılması istenir.

Bu çalışmada, elektronik ölçüm cihazlarının kalibrasyonunun, yazılım ve donanım destekleri kullanılarak, bir otomasyon sistemi halinde daha hızlı ve yüksek doğruluklu gerçeklenmesi detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan otomasyon sistemlerinin performansının arttırılmasında, esnekliğinin ve uzun süreçte idame ettirilebilirliğinin sağlanmasında önemli roller oynayan yazılım parametreleri göz önüne alınmıştır. Son yıllarda geliştirilen, cihazların kontrolüne dayalı Değiştirilebilir Sanal Cihazlar (Interchangeable Virtual Instruments, IVI) teknolojisinin sunduğu avantajların otomasyon sisteminin performansına sağladığı katkılar incelenmiştir.

Çalışmada geliştirilen uygulama ile 8½ dijitlik laboratuar tipi bir dijital multimetrenin kalibrasyon otomasyonu IVI teknolojisi tabanlı yazılım mimarisi kullanılarak gerçeklenmiş ve kalibrasyon sonuçları sertifika halinde kullanıcıya sunulmuştur. Uygulama sonucunda elde edilen bulgular ışığında, IVI standartlarının önerdiği cihazların değiştirilebilirliği felsefesi, cihaz benzetimi ve durum önbelleklemesi özelliklerinin kullanılmasının kalibrasyon otomasyonunun yazılım tabanlı idame ettirilebilirliğini sağlamada, kalibrasyon performansını arttırmada ve uzun süreç bakım onarım maliyetlerinin azaltılmasında etkili olduğu ispatlanmıştır. Böylece kalibrasyon otomasyonundan istenen öncelikli hedefler olan zaman tasarrufu ve insan hatalarının en aza indirilmesi sağlanmış ayrıca yazılım altyapısı yeni nesil komut sistemleri ile tasarlanarak sistemin performansı yükseltilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kalibrasyon, otomasyon, sistem performansı, IVI standartları.

COMPUTER-BASED CALIBRATION OF ELECTRONIC MEASUREMENT DEVICES

Osman TORUNOĞLU
Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
M.Sc.Thesis, May 2012
Thesis Supervisor: Assoc.Prof.Dr. Nurhan KARABOĞA

ABSTRACT

Calibration is one of the inevitable elements of the technology with the role it's playing on determining the accuracy of the measurement devices. Calibration is significant to establish and maintain the credibility of the devices. But it is also important that the calibration of the devices should be made in the shortest time and by accurate method.

In this study, confirmation of the calibration of the electronic measurement devices in the quicker and more accurate in an automation system was examined. In the increase of the performance of the automation systems, the software parameters which play vital roles in the in the provision of the sustainment in the long term were considered. The attributions of technological advantages of the Interchangeable Virtual Instruments, which were developed in the recent years, to the performance of the automation systems were studied.

Calibration automation of an eight and half digits laboratory type digital multimeter was realized by using IVI technology based software architecture and calibration results were presented to the users in a certificated way. In the lights of the findings of the applications, it was proved that the thought of changeability of the devices, which IVI standards offer, is effective on the usage of the device analogy and case caching in providing the sustainment with software based of the calibration automation, increasing of the calibration performance and decreasing the cost of the long term maintenance. By this way, the minimization of the time savings and the human mistakes which are prior goals wanted from the calibration automation are reached, besides the performance of the system was enhanced by designing the software infrastructure with the new generation command systems.

Keywords: Calibration, automation, system performance, IVI standards

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK SAYFASI ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI iii
KABUL VE ONAY SAYFASI iv
TEŞEKKÜR v
ÖZET vi
ABSTRACT vii
İÇİNDEKİLER viii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ x
TABLOLAR LİSTESİ xi
ŞEKİLLER LİSTESİ xii

GİRİŞ 1

1. BÖLÜM

TEMEL KALİBRASYON KAVRAMLARI

1.1. Metroloji, İzlenebilirlik ve Kalibrasyon Kavramları 6
1.2. Temel Metrolojik Kavramlar 9
1.2.1. Büyüklük 9
1.2.2. Ölçüm/Ölçme 9
1.2.3. Çözünürlük 9
1.2.4. Doğruluk 10
1.2.5. Kesinlik 10
1.2.6. Nominal Değer (Anma Değeri) 10
1.2.7. Duyarlılık 10
1.2.8. Tekrarlanabilirlik 11
1.2.9. Tekrar Gerçekleştirilebilirlik 11
1.2.10. Kalibrasyon Laboratuarı 11
1.2.11. ISO 17025 Standardı 11
1.3. Standart ve Çeşitleri 12
1.3.1. Ulusal Standart 12
1.3.2. Referans Standart 12

1.3.3. Transfer Standart **13**
1.3.4. Çalışma Standardı **13**
1.4. Ölçüm ve Çeşitleri **13**
1.4.1. Mutlak Ölçüm **13**
1.4.2. Karşılaştırmalı Ölçüm **13**
1.5. Hata ve Çeşitleri **14**
1.5.1. Sistematik Hata **14**
1.5.2. Rastgele Hata **14**
1.6. Elektriksel Cihaz ve Sistemlerde Hata Kaynakları **14**
1.6.1. Termoelektrik Potansiyel (Termal EMF) **15**
1.6.2. Elektromanyetik Girişim (EMI, Electromagnetic Interference) **17**
1.6.3. Manyetik Alan **17**
1.6.4. Toprak Döngüsü **18**
1.7. Ölçüm Sonuçlarının Raporlanması **19**
1.8. Belirsizlik Kavramı ve Hesaplaması **20**
1.8.1. Belirsizlik Hesabında Kullanılan İstatistiksel Kavramlar **21**
1.8.1.1. Ortalama **22**
1.8.1.2. Sapma **22**
1.8.1.3. Standart Sapma **22**
1.8.1.4. Olasılık Dağılım Fonksiyonları **22**
1.8.2. Belirsizliğin Kaynakları **24**
1.8.3. Belirsizlik Tipleri **25**
1.8.3.1. A Tipi Belirsizlik **25**
1.8.3.2. B Tipi Belirsizlik **25**
1.8.4. Belirsizlik Hesabı **26**
1.8.4.1. Model Fonksiyonun Oluşturması **26**
1.8.4.2. Belirsizlik Bileşenlerinin Listelenmesi ve Duyarlılık Katsayılarının Hesaplanması **27**
1.8.4.3. Model Fonksiyonun Oluşturması **28**
1.8.4.4. Genişletilmiş Belirsizlik **28**
1.8.4.5. Belirsizlik Beyanı **29**

2. BÖLÜM
KALİBRASYON OTOMASYONU

2.1. Kalibrasyon Otomasyonunun Temel Bileşenleri 31
2.1.1. Kontrol Birimi 31
2.1.2. Arayüz Donanımları 32
2.1.3. Yazılım 32
2.2. Kalibrasyon Otomasyonunun Faydaları 34
2.3. Literatür Çalışması 34

3. BÖLÜM
DONANIM VE YAZILIM

3.1. Arayüz Donanımı 40
3.2. GPIB 40
3.2.1. Giriş 40
3.2.2. Fiziksel ve Elektriksel Özellikler 42
3.2.3. Cihaz Tipleri 44
3.2.3.1. Konuşucular (Talker) 44
3.2.3.2. Dinleyiciler (Listener) 44
3.2.3.3. Konuşucular/Dinleyiciler 44
3.2.3.4. Kontrol Birimi 44
3.2.4. GPIB Adresleme ve Cihaz Haberleşmesi 45
3.3. Cihaz Komut Standartları 46
3.3.1. Tek Bir Cihaza Yönelik Komut Standartları 46
3.3.2. SCPI Komut Standardı 48
3.3.2.1. SCPI Komut Modeli 48
3.3.2.2. SCPI Komut Yapısı 49
3.3.2.3. SCPI Sentaks Kuralları 50
3.3.2.4. SCPI'nın kullandığı ortak IEEE 488.2 komutları 51
3.3.3. IVI Standardı 51
3.3.3.1. Cihaz Sınıfları 51
3.3.3.2. IVI-C ve IVI-COM Sürücüleri 52
3.3.3.3. IVI Standartlarının Faydaları 53
3.3.4. VISA I/O Mimarisi 55

3.4. Ana Yazılım Programı 55

4. BÖLÜM

KALİBRASYON OTOMASYONU UYGULAMASI

4.1. Giriş 57

4.2. Kalibrasyon Sisteminin Kurulumu 59

4.2.1. Yazılım Tabanı 60

4.2.1.1. Parametrelerin ve Ölçüm Noktalarının Oluşturulması 63

4.2.1.2. Kod Yazımında Dikkat Edilen Hususlar 64

4.2.1.3. Fonksiyonlar 65

4.2.2. Kalibrasyon Düzeneğinin Hazırlanması 67

4.2.3. Uygulamanın Kullanıcı Arayüzü 69

4.2.3.1. Cihaz Bilgilerinin Girilmesi 71

4.2.3.2. Cihaz Bağlantılarının Kontrol Edilmesi 72

4.2.3.3. Ofset ve Kablo Testi 74

4.2.3.4. Kalibrasyon İşlemlerinin Yapılması 77

4.3. Kalibrasyon İşlemleri 78

4.3.1. Ofset Kalibrasyonu 78

4.3.2. DC Gerilim Kalibrasyonu 80

4.3.3. DC Akım Kalibrasyonu 83

4.3.4. AC Gerilim Kalibrasyonu 85

4.3.5. AC Akım Kalibrasyonu 87

4.3.6. Direnç Kalibrasyonu 89

4.3.7. Frekans Kalibrasyonu 91

4.4. Belirsizlik Hesapları 92

4.5. Sonuçların Sertifikalandırılması 92

5.BÖLÜM

BULGULAR

5.1. Kalibrasyon Sürecinin İncelenmesi 96

5.1.1. Kalibrasyon Süresi 97

5.1.2. Diğer Kazanımlar 103

5.2. Yazılım Sürecinin İncelenmesi 104

5.2.1. Uzun Süreçte Sistemin İdamesi 104
5.2.2. Sistemin Benzetimi 105
5.2.3. Durum Önbelleklemesi 106

6.BÖLÜM

SONUÇ – TARTIŞMA ve ÖNERİLER

6.1. Sonuç 107
6.2. Tartışma 109
6.3. Öneriler 109

KAYNAKLAR 121
EKLER 116
ÖZGEÇMİŞ 127

COMPUTER-BASED CALIBRATION OF ELECTRONIC MEASUREMENT DEVICES

Osman TORUNOĞLU
Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
M.Sc.Thesis, May 2012
Thesis Supervisor: Assoc.Prof.Dr. Nurhan KARABOĞA

ABSTRACT

Calibration is one of the inevitable elements of the technology with the role it's playing on determining the accuracy of the measurement devices. Calibration is significant to establish and maintain the credibility of the devices. But it is also important that the calibration of the devices should be made in the shortest time and by accurate method.

In this study, confirmation of the calibration of the electronic measurement devices in the quicker and more accurate in an automation system was examined. In the increase of the performance of the automation systems, the software parameters which play vital roles in the in the provision of the sustainment in the long term were considered. The attributions of technological advantages of the Interchangeable Virtual Instruments, which were developed in the recent years, to the performance of the automation systems were studied.

Calibration automation of an eight and half digits laboratory type digital multimeter was realized by using IVI technology based software architecture and calibration results were presented to the users in a certificated way. In the lights of the findings of the applications, it was proved that the thought of changeability of the devices, which IVI standards offer, is effective on the usage of the device analogy and case caching in providing the sustainment with software based of the calibration automation, increasing of the calibration performance and decreasing the cost of the long term maintenance. By this way, the minimization of the time savings and the human mistakes which are prior goals wanted from the calibration automation are reached, besides the performance of the system was enhanced by designing the software infrastructure with the new generation command systems.

Keywords: Calibration, automation, system performance, IVI standards

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

AFMETCAL : Air Force METrology and CALibration Program Office

ASCII : American Standard Code for Information Interchange

BIPM: International Bureau of Weights and Measures

dll: Dynamic-link library

DMM: Dijital Multi Meter

EA: European Accreditation

EMF: Electo Mechanic Force

EMI: Electromagnetic Interference

EURAMET: European Association of National Metrology Institutes

GPIB: General Purpose Interface Bus

GUM: Guide to The Expression of Uncertainty in Measurement

HP-IB: Hewlett–Packard Interface Bus

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

IEC: International Electrotechnical Commission

ISO: International Organization for Standardization

IVI: Interchangeable Virtual Instruments

LABVIEW : Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench

LAN: Local Area Network

MATLAB : Matrix LABoratory

SCPI: Standard Commands for Programmable Instruments

USB: Universal Serial Bus

VISA: Virtual Instrument Software Architecture

VXI: VME eXtensions for Instrumentation

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Metal çiftlerinin termoelektrik katsayıları 15
Tablo 1.2. DC gerilim model fonksiyonu 27
Tablo 3.1. GPIB'yi oluşturan standartlar ve içerikleri 41
Tablo 3.2. Agilent 3458 DMM'in ölçüm komutları 47
Tablo 3.3. Zorunlu IEEE 488.2 komutları 50
Tablo 4.1. DC gerilim kalibrasyon noktaları 81
Tablo 4.2. DC akım kalibrasyon noktaları 83
Tablo 4.3. AC gerilim kalibrasyon noktaları 85
Tablo 4.4. AC akım kalibrasyon noktaları 87
Tablo 4.5. Direnç kalibrasyonu noktaları 89
Tablo 4.6. Frekans kalibrasyonu noktaları 92
Tablo 5.1. Zaman sorununa çözüm önerileri 98
Tablo 5.2. "*OPC?" komutunun sisteme etkisi 98
Tablo 5.3. Değişken timeout verilmesinin sisteme etkisi 99
Tablo 5.4. Zaman kontrolünün sisteme etkisi 100
Tablo 5.5. Manüel ve otomatik kalibrasyon performans karşılaştırılması 102

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. İzlenebilirlik zinciri 7
Şekil 1.2. Doğruluk ve kesinlik kavramları 10
Şekil 1.3. Standartların hiyerarşik yapısı. 12
Şekil 1.4. Termal EMF'nin gösterimi 16
Şekil 1.5. İki polariteli ölçüm. 16
Şekil 1.6. Manyetik alan etkisinin azaltılması 18
Şekil 1.7. Toprak döngüsünün kaldırılması 18
Şekil 1.8. Normal dağılımlı olasılık yoğunluk fonksiyonu. 23
Şekil 1.9. Dikdörtgen dağılımlı olasılık yoğunluk fonksiyonu. 23
Şekil 1.10. Üçgen dağılımlı olasılık yoğunluk fonksiyonu. 24
Şekil 2.1. Kalibrasyon otomasyonunun temel bileşenleri. 31
Şekil 3.1. GPIB'nin konektör yapısı. 42
Şekil 3.2. Yıldız ve zincir bağlama 43
Şekil 3.3. Adres komutunun yapısı 45
Şekil 3.4. SCPI cihaz modeli. 49
Şekil 3.5. SCPI komut ağacı örneği 49
Şekil 3.6. Cihaz sınıflarının kullanımı 52
Şekil 3.7. IVI mimarisi 53
Şekil 4.1. Agilent 3458A (HP 3458) dijital multimetre [9] 58
Şekil 4.2. Fluke 5720A çok fonksiyonlu kalibratör [59] 58
Şekil 4.3. Agilent 33250A Sinyal Üreteci [60] 59
Şekil 4.4. Uygulamanın yazılım, sürücü ve standart mimarisi. 60
Şekil 4.5. Visual Studio 2008 referans ekleme penceresi 61
Şekil 4.6. Referans sürücülerin tanımlandığı yazılım geliştirme ekranı 62
Şekil 4.7. Sanal yolların ve kaynak sürücüsünün oluşturulması 63
Şekil 4.8. Test programı 65
Şekil 4.9. Yazılım fonksiyonlarının mimarisi 67
Şekil 4.10. Kalibrasyon düzeneği 68
Şekil 4.11. GPIB bağlantıları 69
Şekil 4.12. Kullanıcı arayüzü 70
Şekil 4.13. Cihaz bilgileri giriş ekranı 71
Şekil 4.14. Cihaz bağlantı kontrol akış diyagramı 72

Şekil 4.15. GPIB uyarı ekranı 73
Şekil 4.16. GPIB başarılı ekranı 74
Şekil 4.17. Ofset kalibrasyonu arayüz ekranı 75
Şekil 4.18. Kablo bağlantı ekranı 76
Şekil 4.19. Kablo bağlantı kontrolü akış diyagramı 77
Şekil 4.20. DC volt kalibrasyon ekranı 78
Şekil 4.21. Ofset kalibrasyonu akış diyagramı 79
Şekil 4.22. DC gerilim kalibrasyonu akış diyagramı 82
Şekil 4.23. DC akım kalibrasyonu akış diyagramı 84
Şekil 4.24. AC gerilim kalibrasyonu akış diyagramı 86
Şekil 4.25. AC akım kalibrasyonu akış diyagramı 88
Şekil 4.26. Direnç kalibrasyonu akış diyagramı 90
Şekil 4.27. Frekans kalibrasyonu akış diyagramı 93
Şekil 5.1. Zaman kontrolünün sistem performansına etkisi 101
Şekil 5.2. Otomatik ve manuel kalibrasyonların performans grafiği 102

GİRİŞ

Kalibrasyon ölçüm biliminin vazgeçilmez bir parçasıdır. Ölçüm cihazlarının doğruluğunun sürekliliği periyodik olarak yapılan kalibrasyon işlemleri ile sağlanabilir. Teknoloji ilerledikçe ölçümlerden istenen hassasiyetler de artmakta, yüksek doğrulukta ölçüm sonuçları veren ve güvenilirliği kabul edilebilir sınırlar içerisinde olan cihazlar talep edilmektedir. Bununla birlikte ölçüm cihazlarının bir sistem içerisinde birlikte kullanılmaları durumunda cihazların aynı ölçüm dilini konuşmaları da önem arz etmektedir. Cihazların hassasiyetlerinin ve doğruluklarının belirlenmesi, ulusal veya uluslar arası ortak ölçüm diline yakınlığının tespit edilmesi, periyodik kalibrasyon işlemleri yapılarak, cihazların izlenebilirliğinin sağlanması ile mümkündür.

Bir kalibrasyon işlemindeki amaç, ölçüm cihazlarının ölçtüğü değerlerin doğruluklarının tespiti, sapmaların belirlenmesi ve bu değerlerin ölçümlere etki eden belirsizlik aralıkları ile bir sertifika halinde cihaz kullanıcısına sunulmasıdır.

Kalibrasyon ile doğruluğu tescillenen veya hata değeri belirlenen cihazlarla çalışmak, üretim, arge, eğitim gibi faaliyetlerin güvenilirliğini arttırmak cihaz kullanıcıları için oldukça büyük bir önem arz etmektedir. Kalibrasyon, cihazların güvenilirliğini tespit etmek ve sürdürmek için önemli olmakla birlikte, hem kullanıcı hem de kalibrasyon laboratuarı cihazların kalibrasyon işlemlerinin en kısa sürede en doğru şekilde yapılmasını istemektedirler.

Özellikle ölçüm cihazlarının eksikliğinin büyük zafiyetlere neden olacağı askeri uygulamalar, arge çalışmaları ve üretim süreçlerinde cihazın kalibrasyon süresini en aza indirmek gerekmektedir.

Genel olarak yapılan kalibrasyon işlemleri belirli prosedürler üzerinden yetkili personel tarafından manuel olarak yapılmaktadır. Yapılan manuel işlemlerde personel cihazları elle tuşlara basarak kontrol etmekte, sonuçları da ekrandan okuyarak elde etmektedir. En basit bir cihazın bile onlarca kalibrasyon noktası olduğu düşünüldüğünde bu işlemler için gerekli süre ve personelden kaynaklanan hata olasılığının çokluğu dikkat çekicidir.

Elektronik ölçüm cihazlarının manuel kalibrasyonunda, uzun süren işlemlerden kaynaklanan zaman kaybı, gözlemden kaynaklanan okuma hataları, bağlantı hataları ve tek okumadan dolayı düşük doğruluk gibi birçok olumsuzlukla karşılaşılmaktadır. Ayrıca standartların istediği belirsizlik hesapları da manuel ölçümlerden alınan verilerle tam olarak yapılamamaktadır.

Elektronik ölçüm cihazlarının uzaktan kontrolü mümkün kılan bileşenleri bulunmaktadır. Bu bileşenler ile cihaza komut yollama, cihazdan veri çekme, cihazın tepkilerini kontrol etme gibi işlemler yapılabilmektedir. Bir başka ifade ile uzaktan kontrolün mümkün olduğu elektronik ölçüm cihazlarında, cihazların üzerinde bulunan tuşlarla yaptırılabilen bütün işlemler bir arayüz donanımı yardımı ile bir kontrol birimi üzerinden gönderilen komutlarla yaptırılabilmektedir.

Bu özellikleri ile asıl amacın ölçüm cihazlarının kalibrasyonu olmasa da, kalibrasyon işlemlerinde yapılanlar da farklı değildir. Elektronik ölçüm cihazlarının uzaktan kontrol özelliklerini kullanarak, bir kontrol biriminin denetiminde, arayüz donanımları üzerinden cihazlara komutları yollayarak ve elde edilen verileri yazılım ortamında işleyerek, herhangi bir manuel işleme tabi tutmadan yapılan kalibrasyon işlemine kalibrasyon otomasyonu denilmektedir [1].

Cihazların kalibrasyon otomasyonunda temel üç parça vardır; Kontrol birimi, Arayüz Donanımı, Yazılım.

Cihazların haberleşme arayüzü ve yazılım konfigürasyonunun kontrol edilmesi amacıyla bir kontrol birimi kullanılmaktadır. Cihazlarla bağlantıyı sağlayacak, veri alışverişi ve komut gönderimi işleminde yolu oluşturacak arayüz donanımları kalibrasyon otomasyonunun ikinci kısmını oluşturmaktadır. Kalibrasyon otomasyonunun üçüncü kısmını yazılım oluşturmaktır. Cihazlara komutların gönderilmesi, verilerin çekilmesi ve işlenilmesi yazılım ile gerçekleştirilmektedir.

Yazılımla kalibrasyon prosedüründe mevcut sıralı işlemler koda dökülerek arayüz ile kullanıcının kullanımına sunulmaktadır.

Kalibrasyon otomasyonunun genel hedefi, işlemleri otomasyon haline getirerek en kısa sürede, en yüksek doğrulukla kalibrasyonu tamamlamaktır. Otomasyon ile zamandan tasarruf sağlanmakta, kullanıcıdan kaynaklanan hatalar en aza indirilmekte, bilimsel anlamda kalibrasyondan istenilen hesaplamalar kolaylıkla yaptırılabilmekte, kullanıcıya ölçüm sonuçlarını görsel olarak takip edebilme ve depolama imkânı sağlanmaktadır [1].

Gelişen yazılım teknolojileri, ölçüm cihazlarının uzaktan kontrolünde önemli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle, geliştirilen yeni nesil komut aileleri, kullanıcıya standartlaşmayı sağlamaktadır. IEEE 488.2, Programlanabilir Cihazlar için Standart Komutlar (Standard Commands for Programmable Instruments, SCPI) ve Değiştirilebilen Sanal Cihazlar (Interchangeable Virtual Instruments, IVI) kod standartları ile geliştirilen yazılımlar daha kolay uygulanabilir ve esnek yapıya sahip olmaktadır. Çeşitli üretici firma, tedarikçi, kullanıcı ve sistem geliştiricilerin destek verdiği IVI kuruluşu tarafından oluşturulan IVI standartları, yazılımda herhangi bir değişim yapmadan, aynı işlevli cihazların fiziksel değiştirilebilirliği felsefesi ile ön plana çıkmaktadır [2,3].

Cihaz teknolojilerinin de geliştiği ve kalibrasyon laboratuarlarına her gün farklı üreticilerin aynı işlemleri yapan cihazlarının geldiği düşünüldüğünde, aynı işlevlere sahip cihazların kalibrasyonunun tek bir program üzerinden yapılması olasılığı önem kazanmaktadır. Geliştirilen yeni nesil komut standartlarını kullanarak yapılacak olan kalibrasyon otomasyonu yazılımları ile program sayısı en aza indirilebilir. Yeni nesil nesneye yönelik programlama dillerini destekleyen komut sistemleri ile kalibrasyon otomasyonu yazılımlarının idamesi, bakım ve onarımı daha kolay ve etkin hale getirilebilinir. Özellikle IVI standartlarını kullanarak yapılandırılan otomasyon yazılımlarında, cihazların değiştirilebilirliği felsefesi ve diğer özellikleri ile bakım onarım faaliyetlerinde zaman ve maliyet açısından verimlilik arttırılabilir [2].

Bu tezin amacı, kalibrasyon otomasyonu uygulamalarında, yeni nesil IVI standartlarının avantajlarından yararlanmaktır. Tez çalışması, otomasyon yazılımında IVI standartlarını kullanarak, sistemin verimliliğini ve esnekliğini arttırmayı hedeflemektedir.

Tez, kalibrasyon otomasyonu uygulamasında IVI standartlarının kullanılması ile literatüre katkı sağlamaktadır. Yazılım destekli kalibrasyona yönelik çalışmaların çok az olması, yapılacak olan çalışmanın örnek teşkil etme açısından önemini arttırmaktadır. Böylece tezin, ülkemiz kalibrasyon laboratuarlarında geliştirilmekte olan otomasyon uygulamalarına bir rehber olması hedeflenmektedir.

Tezde yöntem olarak, örnek bir uygulama üzerinden, kalibrasyon otomasyonu yazılımının yapısı, eski ve yeni nesil komut standartları karşılaştırılarak incelenmektedir. Örnek uygulamada eski nesil cihazlarda bulunan kendine özgü komutlar ile yeni nesil cihazların desteklediği yüksek seviyeli IVI komutları bir arada kullanılarak, kalibrasyon otomasyonu uygulamalarında karşılaşılacak çeşitli senaryolar ele alınmaktadır.

Tez, yüksek seviyeli kod standartlarının getirilerinin yanında, kalibrasyon otomasyonu gibi kendine özgü karakteristikleri olan uygulamalardaki sayıltıları ve sınırlılıkları da ele almaktadır. Bu kapsamda, özellikle otomasyon uygulaması hazırlanmasında karşılaşılacak en büyük sorunlardan cihazların zaman senkronizasyonu sorunu irdelenmekte ve çözüm önerileri sunulmaktadır.

Tez, cihazların komut standartlarını desteklemesi ile sınırlıdır. Tezde önerilen yöntemlerin uygulanması, cihazların desteklediği arayüz donanımları, yazılım altyapıları ve komut standartlarına bağlıdır.

Çalışmanın birinci bölümünde diğer bölümlerde kullanılacak olan temel kalibrasyon kavramları, belirsizlik kavramı, standartlara uygun bir kalibrasyon sertifikasının içeriği ve kalibrasyon laboratuarları için gerekli olan ISO 17025 standardı ele alınmaktadır.

İkinci bölümde, kalibrasyon otomasyonunun temel bileşenleri ele alınmakta, literatürdeki kalibrasyon otomasyonu çalışmaları belirli bir sırayla incelenmekte ve tezin diğer çalışmalara göre yeri ve üstünlükleri verilmektedir.

Üçüncü bölümde kalibrasyon otomasyonunda donanım ve yazılım entegrasyonu ele alınmaktadır. Bölümün içeriğinde haberleşme donanımı olarak kullanılan arayüzler incelenmekte, Genel Amaçlı Arayüz Yolu (General Purpose Interface Bus, GPIB)'nun diğer arayüzlere göre avantajları sıralanmakta ve GPIB'nin özellikleri ayrıntılı olarak

anlatılmaktadır. Cihazlarda komut standartları da bu bölümde incelenmekte, özellikle SCPI ve IVI komut standartları üzerinde durulmaktadır. Bölümün son kısmında kontrol biriminin tasarlanabileceği yazılım programları ele alınarak uygun yazılım tercihinin nasıl yapılacağı tartışılmıştır.

Dördüncü bölümdeki örnek uygulamada IVI standartları kullanılarak, sekiz buçuk dijit Dijital Multimetre (DMM)'lerin kalibrasyon otomasyonu gerçeklenmiştir. Bölümde DMM'lerin kalibrasyon prosedürü algoritmalara dökülmüş, cihazlarla haberleşmenin nasıl sağlandığı açıklanmış, komutların yollanması, kalibrasyon prosedürünün uygulanması, verilerin işlenmesi, sonuçların sertifikaya dökülmesi adımları ele alınmıştır. Bölümde ayrıca kullanıcı arayüzünün tasarımı anlatılmıştır.

Beşinci bölümde, geliştirilen uygulamadan elde edilen bulgular incelenmektedir. Altıncı bölümde ise, elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve ne gibi yeni çalışmalar yapılabileceğine değinilmiştir.

1. BÖLÜM

TEMEL KALİBRASYON KAVRAMLARI

1.1. Metroloji, İzlenebilirlik ve Kalibrasyon Kavramları

Metroloji, ölçme ile ilgili teorik ve pratik konuları kapsayan bilim dalıdır. Metroloji, ölçüm belirsizliği ve uygulama alanına bakılmaksızın, ölçüm ile ilgili bütün teorik ve uygulamaya yönelik konuları içerir [4].

Metroloji biliminin yaşamın her alanıyla sıkı bir ilişkisi vardır. İnsan, dış dünyadan gelen verileri, ölçülebilen büyüklüklerle ifade ederek bir anlam kazandırabilir.

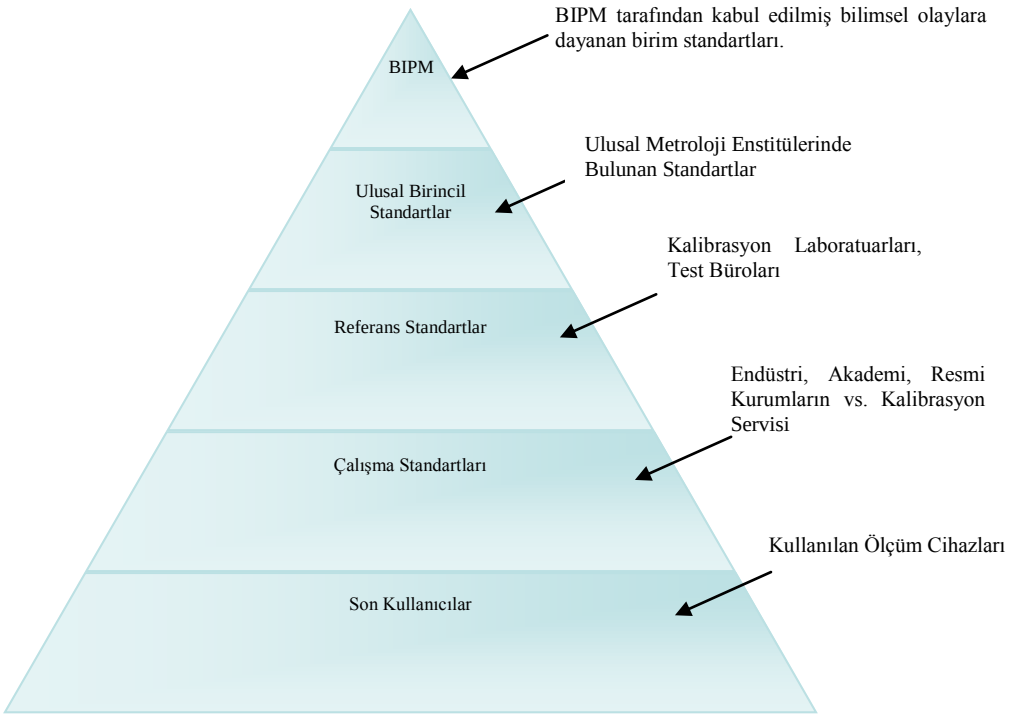
Metrolojinin bir bilim olarak görevi üç ana faaliyette toplanabilir [5],

- Uluslararası düzeyde kabul edilmiş ölçüm birimlerini tanımlayarak bilim ve teknolojinin kullanımına sunmak,
- Tanımlanan ölçüm birimlerini değişmeyen bilimsel yöntemlerle gerçekleştirerek standartlar üretmek,
- Ölçümlerin güvenilirliğini ve doğruluğunu sağlayan izlenebilirlik zincirini oluşturmaktır.

Ölçmede aynı dili kullanabilmek önemlidir. Yapılan ölçümlerin uluslararası veya ulusal alanda ortak ölçüm dilinde olduğunu belirleyebilmek için izlenebilirlik ve karşılaştırma süreçleri daha önemli bir konuma gelmiştir.

İzlenebilirlik, bir ölçüm sonucunun, her biri ölçüm belirsizliğine katkıda bulunan kalibrasyonlardan oluşan belgelendirilmiş kesintisiz bir zincir aracılığı ile belirli bir referansa ilişkilendirilebilme özelliğidir [4].

İzlenebilirlik ile ölçüm sonuçlarının veya bir standart değerin daha yüksek seviyedeki bir referansla ilişkilendirilmesi sağlanır. En üst seviyedeki standart birincil seviye standart olarak kabul edilir. Sırasıyla alt seviyeler bir üst seviyeyi referans kabul eder. Bu zincire **izlenilebilirlik zinciri** denir. Şekil 1.1.'de izlenebilirlik zinciri verilmiştir.



Şekil 1.1. İzlenebilirlik zinciri.

Bir ölçümde izlenebilirliğin sağlanmasındaki temel araç, ölçüm cihazının veya ölçüm sisteminin **kalibrasyonudur**.

Kalibrasyon, uluslararası metroloji sözlüğünde, "belirli koşullarda, ilk aşamada ölçüm standartları tarafından sağlanan büyüklük değerleri ve ölçüm belirsizlikleri ile bunlara karşılık gelen gösterge değerleri ve ilgili ölçüm belirsizlikleri arasında bir ilişkinin oluşturulduğu, ikinci aşamada ise bu bilginin ölçüm sonucunun göstergeden elde edilmesinde kullanıldığı işlemler dizisi" olarak tanımlanmıştır [4].

Bir başka ifade ile **kalibrasyon**, bir ölçme cihazının göstergesinin, ölçülen büyüklüğün gerçek değerinden sapmasını belirlemek ve belgelendirmektir. Burada kalibrasyonun bir karşılaştırma işlemi olduğu ve ayar içermediği söylenebilir. Ayarlar daha sonra kalibrasyondan gelen veriler ışığında yapılmaktadır [1,6].

Yine benzer bir ifade ile **kalibrasyon**, doğruluğu bilinen bir standart veya ölçüm sistemini kullanarak, bir diğer standart ölçü aleti ve test cihazı veya sistemine ait;

- Doğruluğun ölçülmesi,
- Sapmaların belirlenmesi,
- Belgelenmesi,

için yapılan karşılaştırma işlemleridir [7].

Kalibrasyon ile sistemler arasında kullanılan ortak dil doğrulanmış olur. İzlenebilirlik zinciri boyunca cihazlar bir üst standartlarla kalibrasyona tabi tutulur. Böylece ölçüm cihazı yada sisteminin referans kabul edilen standartlara yakınlığı tespit edilerek, kullanıcıya cihaz ve sistemlerinin sapmaları belgelendirilir. Kullanıcı da bu değerleri referans alarak ortak dile uyumu sağlamış olur.

Kalibrasyon ile bir cihazın, sistemin veya referans malzemenin performans özellikleri belirlenir. Bu, genellikle ölçüm standartları veya sertifikalı referans malzemeleri ile doğrudan karşılaştırma ile sağlanır.

Bir cihazın kalibre edilmesini gerektiren nedenler;

- İzlenebilirlik zincirini oluşturmak ve devam ettirmek,

- Ölçüm cihazı ya da sisteminden gelen verilerin diğer ölçümlerle tutarlı olmasını güvence altına almak,
- Ölçüm cihazı ya da sisteminden gelen verilerin doğruluğunu belirlemek,
- Böylece ölçüm güvenilirliğini sağlamaktır [5].

Bakım, onarım, üretim, modernizasyon, test ve muayene gibi süreçler açısından cihaz veya sistem bazında bakıldığında kalibrasyonun gerekliliği iki maddede toplanabilir;

- Ölçüm doğruluklarının zamanla değişmesi,
- Fiziksel niteliklerin bozulması [8].

Ölçüm güvenilirliği cihaz ya da sistemlerin kalibrasyonunun yapılması ile sağlanır. Kalibrasyonu yapılmamış bir cihaz ya da sistem ile yapılan ölçümün yanlış ve hatalı olma ihtimali çok yüksektir.

Kalibrasyon sonuçları kalibrasyon sertifikası ya da kalibrasyon raporu adı verilen dokümanlara kaydedilir ve sunulur. Kalibrasyon sonucu bazen grafik halinde, kalibrasyon faktörü ve kalibrasyon eğrisi şeklide de ifade edilebilir.

1.2. Temel Metrolojik Kavramlar

1.2.1. Büyüklük

Bir olgu, cisim veya maddeye ait olan ve miktarı sayı ve referans olarak ifade edilen özelliktir [4].

1.2.2. Ölçüm/Ölçme

Bir büyüklüğün değerinin belirlenmesi için yapılan işlemler dizisidir [4].

1.2.3. Çözünürlük

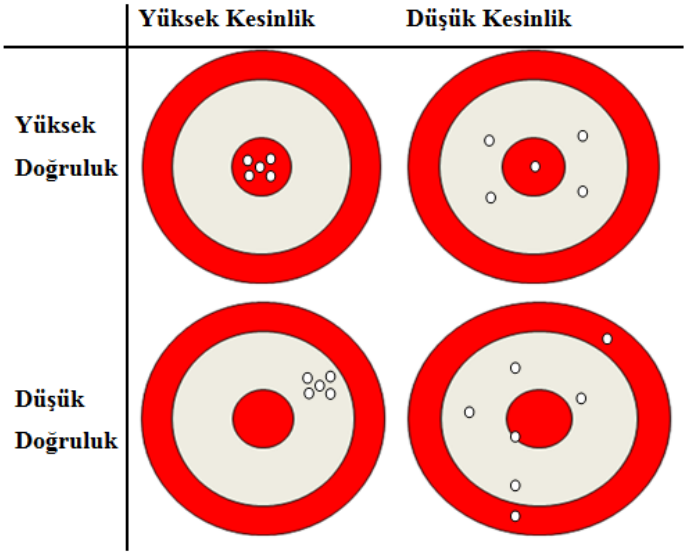
Ölçülen büyüklüğe bağlı gösterge değerinde algılanabilir değişikliğe neden olan ölçülen büyüklükteki en küçük değişimdir [4].

1.2.4. Doğruluk

Ölçülen büyüklük değeri ile ölçülenin gerçek büyüklük değeri arasındaki uyuşma yakınlığıdır [4].

1.2.5. Kesinlik

Ara arda okunan değerlerin tekrar edilebilirliğidir. Art arda okunan değerlerin arasındaki farkın ne kadar küçük olduğunun göstergesidir [4]. Doğruluk ve kesinlik kavramları birbirine karıştırılmakla birlikte Şekil 1.2.'deki ifade ile en iyi şekilde açıklanabilir.



Şekil 1.2. Doğruluk ve kesinlik kavramları.

1.2.6. Nominal Değer (Anma Değeri)

Doğru kullanıma yardımcı olması amacıyla, ölçülen değeri niteleyen büyüklüğün yuvarlatılmış ya da yaklaşık halidir [4].

1.2.7. Duyarlılık

Bir ölçüm sisteminin göstergesindeki değişimin, buna karşılık gelen ölçülen büyüklük değerindeki değişime oranıdır [4].

1.2.8. Tekrarlanabilirlik

Aşağıdaki koşulların tümüne uyarak, aynı ölçülen büyüklüğe ait ardıl ölçüm sonuçları arasındaki uyuşma yakınlığıdır [4].

- Aynı ölçüm yöntemi,
- Aynı gözlemci,
- Aynı ölçme cihazı,
- Aynı konum,
- Aynı kullanım koşulları,
- Kısa zaman aralığında tekrar.

1.2.9. Tekrar Gerçekleştirilebilirlik

Her bir ölçümün, aşağıdaki değişen koşullarda gerçekleştirildiği zaman, aynı ölçülen büyüklüğe ait ölçüm sonuçları arasındaki uyuşma yakınlığıdır [4].

- Ölçüm metodu,
- Gözlemci,
- Ölçme cihazı,
- Konum,
- Kullanım koşuları,
- Zaman.

1.2.10. Kalibrasyon Laboratuarı

Çevre şartlarının (sıcaklık, nem, toz, aydınlatma vb. gibi) sürekli izlendiği ve kontrol altında tutulduğu, oluşturulmuş prosedürler kullanılarak kalibrasyon işleminin yürütüldüğü, gerekli standart ve teçhizata sahip bir ortamdır [4].

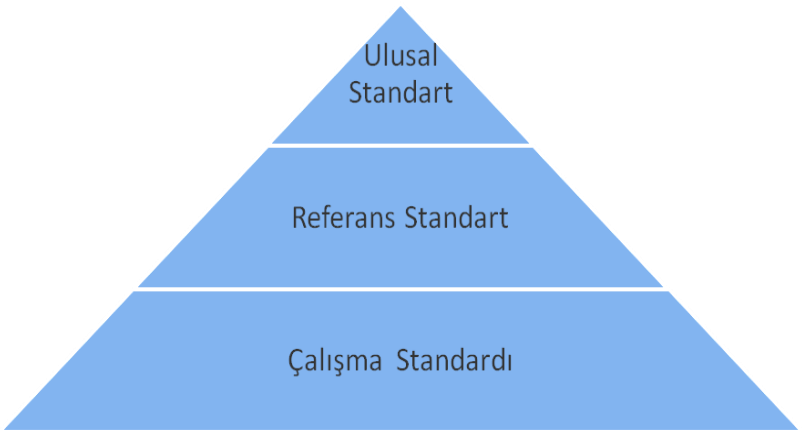
1.2.11. ISO 17025 Standardı

Deney ve kalibrasyon laboratuarlarının yeterliliği için genel şartlar standardıdır. Bu standart, numune alma dahil deney ve/veya kalibrasyon hizmeti veren laboratuarların yeterliliği için gereken genel şartları kapsar [9].

1.3. Standart ve Çeşitleri

Standart, bir büyüklüğün bir veya birden fazla bilinen değerini veya bir birimi mukayese yolu ile diğer ölçü cihazlarına aktarmak amacı ile tanımlayan, gerçekleştiren, muhafaza eden veya yeniden üreten maddi ölçü, ölçü cihazı veya ölçü sistemidir. Standart terimi yerine bazen etalon da kullanılır.

Ölçme veya ölçü cihazında en önemli parametre doğruluktur. Ölçmedeki doğruluk, ölçü cihazının standart büyüklüklere göre yapılan kalibrasyonuna bağlıdır. Standartlar birbirine bağlı kesintisiz bir zincir gibidir ve aşağıdaki birçok alt gruba ayrılır [10].



Şekil 1.3. Standartların hiyerarşik yapısı.

1.3.1. Ulusal Standart

Bir devlete veya ekonomiye hizmet amacıyla ulusal makamlarca kabul edilmiş, büyüklük değerlerinin ilgili büyüklük türüne ait diğer ölçüm standartlarına atanmasında temel olan ölçüm standardıdır.

1.3.2. Referans Standart

Belirli bir kurum ya da mekânda bulunan belirli tür büyüklüklere ilişkin diğer ölçüm standartlarının kalibrasyonu için belirlenmiş ölçüm standardıdır.

1.3.3. Transfer Standart

Ölçüm standartlarının karşılaştırılmasında aracı olarak kullanılan cihazdır.

1.3.4. Çalışma Standardı

Ölçüm cihazları ya da sistemlerinin kalibrasyonu ya da doğrulanmasında rutin olarak kullanılan ölçüm standardıdır. Standartların hiyerarşik sıralaması Şekil 1.3.'te verilmiştir.

1.4. Ölçüm ve Çeşitleri

Kalibrasyon işlemleri de aslında bir ölçmedir. Ölçme, bir büyüklüğe atanabilecek bir veya daha fazla büyüklük değerinin deneysel olarak elde edilme sürecidir. Ölçme, ölçülecek nesnenin belirlenmesi ile başlar, ölçülecek büyüklüğün belirlenmesi ile devam eder.

Sonraki adımda ölçüm yöntemi belirlenir. Daha sonra ölçüm cihazları seçilerek ölçüm düzeneği kurulur. Son olarak ölçme işlemi yapılır ve elde edilen veriler ölçüm sonuçları olarak değerlendirilir ve raporlanır [11].

Bir ölçme işleminde aşağıdaki hususlara dikkat edilmesi gereklidir;

- Ölçüm noktasının doğru seçilmesi,
- Uygun ölçüm cihazlarının seçilmesi,
- Ölçme şartlarının tespit edilmesi,
- Personelin kalifiye edilmesi.

1.4.1. Mutlak Ölçüm

Ölçme büyüklüğünün değerinin, aynı büyüklük ile belirlenmiş olan referansa göre bulunmasıdır.

1.4.2. Karşılaştırmalı Ölçüm

Fiziksel büyüklüğün temel veya türetilmiş aynı çeşit bir referans ile mukayese yapılarak doğrudan ölçülmesidir.

1.5. Hata ve Çeşitleri

Ölçüm çok dikkatli yapılsa da, doğru aletler kullanılsa da hatalı olması muhtemeldir. Kabul edilen hatanın formüle edilmiş hali Eşitlik (1.1)'de verilmiştir. Ancak hataların bilindiği bir ölçme bir anlam ifade eder. Kalibrasyon işlemi de muhtemel hataları tespit etmektedir. Kalibrasyonun özü cihaz ya da sistemlerin ölçüm işleminde sonuca yansıyan hataları kullanıcıya sunmak, böylece kullanıcının hataları hesaba katarak sonuçları değerlendirmesini sağlamaktır [11,12].

$$\text{Ölçülen Değer } (\gamma) = \text{Gerçek Değer } (\chi) + \text{Ölçüm Hatası } (\varepsilon) \qquad (1.1)$$

Karşılaşılacak hatalar sistematik ve rastgele hatalar olarak iki grupta toplanabilir.

1.5.1. Sistematik Hata

Aynı büyüklüğün bir dizi ölçümleri boyunca sabit kalan veya önceden tahmin edilebilen değişimleri gösteren ölçüm hatasıdır. Sistematik ölçüm hatalarına sebep olan birçok etken vardır. Cihaz ya da sistemlerin iç hataları, tekrarlı ölçümlerde sabit olan ve değişmeyen hatlara neden olarak gösterilebilir. Bunlar; imalat, fabrika ayar, referans ve kalibrasyon hatalarıdır.

1.5.2. Rastgele Hata

Belirsiz nedenlerden dolayı çıkan bu hatalar, özellikle tekrarlı ölçme yapılan durumlarda ortaya çıkar. Genel olarak ölçmeyi yapan kişiye ve ortama bağlı hatalar rastgele hata olarak kabul edilir. Ölçmeyi gerçekleştiren kişinin psikolojik durumu, yorgunluğu, dikkatsizliği hataya sebebiyet verir. Ayrıca ortam koşulları da ölçmeye birebir etkilidir. Gürültü, sıcaklık değişimi, nem, elektriksel ve manyetik alan etkileri ortam koşullarından kaynaklanan hatalardır.

1.6. Elektriksel Cihaz ve Sistemlerde Hata Kaynakları

Elektriksel ölçüm yapan cihaz ve sistemlerde dış kaynaklardan gelen çeşitli gürültü ve istenmeyen sinyal kaynakları ölçüm sonuçlarında hataya sebep olmaktadır. Bu nedenle

elektriksel cihaz ve sistemlerin kullanıldığı ölçme işlemlerinde hata kaynakları dikkate alınmalıdır [12].

1.6.1. Termoelektrik Potansiyel (Termal EMF)

Farklı metallerin temas ettirilmesi durumunda sıcaklık farkından kaynaklanan çok küçük bir gerilim oluşur. Bu fark hassas ölçümlerde mikro seviyelerinde doğruluklar arandığı düşünüldüğünde küçümsenemeyecek hatalara sebebiyet vermektedir.

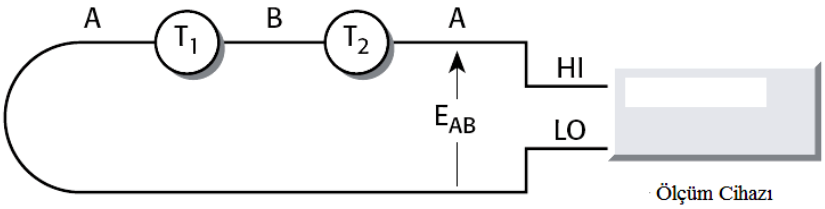
Metal çiftlerinin birleşmesi anında, metallerin sıcaklık katsayılarına bağlı olarak farklı termal EMF'ler oluşur. Tablo 1.1.'de metal çiftlerin birleşmesi ile oluşan sıcaklığa bağlı voltaj değerleri verilmiştir. Tablodan da görüleceği gibi en düşük termal EMF bakır-bakır çiftinde, en yüksek termal EMF ise bakır-bakıroksit çiftindedir.

Tablo 1.1. Metal çiftlerinin termoelektrik katsayıları.

Metal Çifti	**Termal EMF Katsayısı**
Bakır-Bakır	≤ 0.2 µV/°C
Bakır-Gümüş	0.3 µV/°C
Bakır-Altın	0.3 µV/°C
Bakır-Kurşun/Kalay	1 - 3 µV/°C
Bakır-Silikon	400 µV/°C
Bakır-Kovar	~ 40-75 µV/°C
Bakır-Bakıroksit	~1000 µV/°C

T_1 sıcaklığındaki A metali ile T_2 sıcaklığındaki B metalinin oluşturduğu termal EMF Eşitlik (1.2) ile ifade edilebilir. Eşitlikte E_{AB} metal çiftleri arasında oluşan termal EMF; Q_{AB} A ve B metallerinden oluşturulan çiftin termoelektrik katsayısı, T_1 ve T_2 de metal eklemlerinin sıcaklık değerleridir. Şekil 1.4.'te Termal EMF'nin gösterimi verilmiştir.

$$E_{AB} = Q_{AB} (T_1 - T_2) \tag{1.2}$$

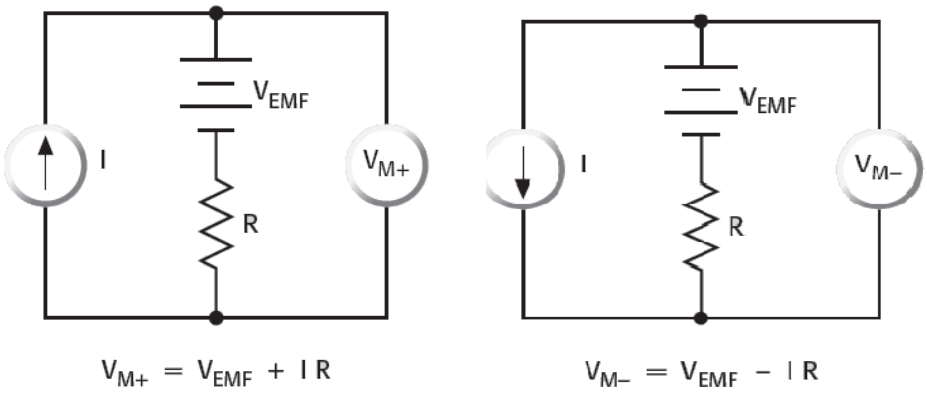


Şekil 1.4. Termal EMF'nin gösterimi.

Formülden görüleceği gibi sıcaklık değerlerinin aynı olması durumunda bir termal EMF oluşmayacaktır. Ancak bu olasılık oldukça düşüktür. Kullanılan kabloların aynı olması bile 1 °C sıcaklık farkı belirli bir termal EMF'ye sebep olduğu düşünüldüğünde, daha büyük farklar dikkate alındığında hataların oluşumu ve giderilmesi durumu daha net ortaya çıkar.

Termal EMF'nin oluşumunu en aza indirmek için aşağıdaki maddeler dikkate alınmalıdır.

- Kullanılan bağlantı elemanlarının (kablo, konektör vb.) tümü bakır olmalı ve bakırda herhangi bir oksitlenme olmamalıdır.
- Kablolar kısa tutulmalı, bağlantı noktalarının sıcaklıkları eşitlenmelidir.
- Bağlantı noktalarında hava akımı olmamalıdır.
- Bağlantılar yapıldıktan sonra termal dengeye gelmesi için bir süre beklenilerek ölçüm işlemi gerçekleştirilmelidir.



Şekil 1.5. İki polariteli ölçüm.

Bu önlemler dikkate alınarak termal EMF azaltılsa da tamamen ortadan kaldırılamamaktadır. Termal EMF'nin değerini belirlemek için ölçümler iki polaritede alınmalıdır [12]. Şekil 1.5.'te iki polariteli ölçüm sistemi gösterilmiştir.

1.6.2. Elektromanyetik Girişim (Electromagnetic Interference, EMI)

Elektriksel, manyetik ve elektromanyetik etkiler hassas ölçümlerde hataya neden olurlar. Çeşitli kaynaklar şu şekilde sıralanabilir;

- Radyo ve TV yayın vericileri,
- Telekomünikasyon vericileri,
- Flüoresan lambalar,
- Büyük statik elektriksel alanlar,
- Darbe kaynakları (yıldırım),
- Yetersiz ekranlanmış, filtrelenmiş veya topraklanmış güç hatları

Elektromanyetik girişimden kaynaklanan hataları azaltmak için aşağıdaki maddelere dikkat edilmelidir;

- Ölçüm ortamı yukarıda belirtilen kaynaklardan uzak tutulmalıdır.
- Bağlantılar kısa tutulmalıdır [12].

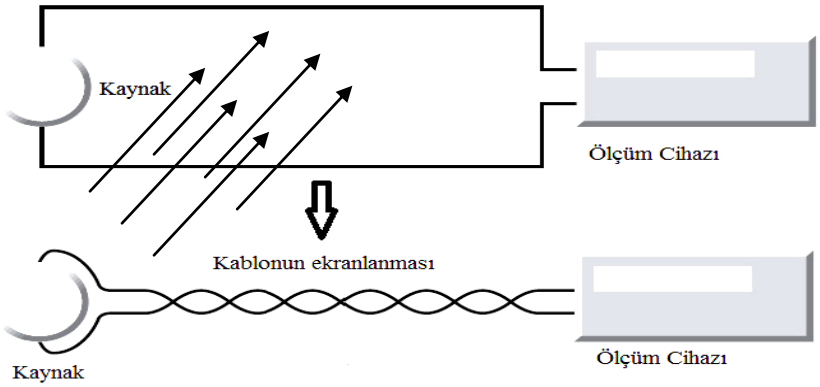
1.6.3. Manyetik Alan

Bir kapalı devre içinden manyetik alan çizgileri geçtiği anda oluşan küçük akım da hatalara sebebiyet verir. Yine yapılan ölçümlerin hassasiyet mertebeleri dikkate alındığında, kabloların gereğinden fazla uzun olması durumunda çevredeki manyetik alan kaynaklarının etkisi ihmal edilemeyecek seviyeye ulaşır.

Manyetik alandan kaynaklanan hataları azaltmak için aşağıdaki maddelere dikkat edilmelidir;

- Kablolar mümkün olduğunca kısa tutulmalıdır.
- Kabloların pozisyonu manyetik alan kaynaklarına paralel olmalıdır.
- Kablo döngüsü kesiti en aza indirilerek manyetik ekranlama yapılmalıdır.

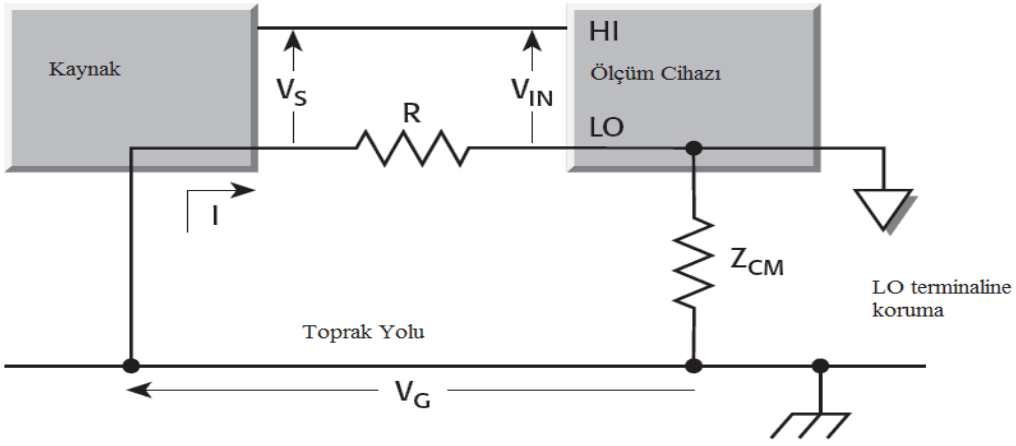
- Manyetik alan kaynaklarının (güç trafosu vb.) ölçüm alanında bulunmaması sağlanmalıdır [12]. Şekil 1.6.'da manyetik alan etkilerinin azaltılması amacıyla kablonun ekranlanması gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Manyetik alan etkisinin azaltılması.

1.6.4. Toprak Döngüsü

Birden fazla cihazın farklı hatlara bağlanması ile toprak döngüsünde istenmeyen bir akım oluşur. Bu akım cihazların LO terminallerinden geçerek hassas ölçümlerde ölçüm doğruluğunu doğrudan etkileyen bir gerilim oluşumuna sebebiyet verir.



Şekil 1.7. Toprak döngüsünün kaldırılması.

Toprak döngüsünden kaynaklanan bu hata, cihazlardan sadece birinin üzerinden topraklama yapılarak ortadan kaldırılabilir [12]. Şekil 1.7.'de toprak döngüsünün kaldırılması için gerekli toprak bağlantıları verilmiştir.

1.7. Ölçüm Sonuçlarının Raporlanması

Kalibrasyon verileri, önceden belirlenmiş ölçüm noktalarında alındıktan sonra işlenerek kullanıcıya sunulması gerekir. Verilerle birlikte kalibrasyon işleminin tekrarını sağlayacak operatör adı, kullanılan standart ve cihazlar, tarih ve ortam parametreleri belirtilmelidir. Cihaz yada sistemin herhangi bir onarım gerektiren modülü varsa kullanıcının onayı alınarak sınırlı kalibrasyon gerçekleştirilmelidir.

Hazırlanan kalibrasyon sonuçları, TS EN ISO/IEC 17025 standardının içeriğine uygun olarak raporlanmalıdır. Standarda göre bir kalibrasyon sertifikasının belirtilen şartlara uygun olması için en az aşağıdaki bilgileri içermelidir.

- Başlık (Kalibrasyon Sertifikası gibi),
- Kalibrasyon sertifikasının numarası (bütün sayfalarda),
- Kalibrasyon sertifikasının toplam sayfa sayısı ve sayfa numaraları,
- Konu (yapılan işin tarifi),
- Kalibrasyonu yapılan cihazın tam adı,
- Kalibrasyonu yapılan cihazın üretici firması,
- Kalibrasyonu yapılan cihazın modeli,
- Kalibrasyonu yapılan cihazın seri numarası,
- Kalibrasyonu yapılan cihazın laboratuara kabul tarihi,
- Talep eden kullanıcının adı ve adresi,
- Kalibrasyonun yapıldığı tarih,
- Kalibrasyon sertifikasının onaylandığı tarih,
- Kalibrasyonda kullanılan referansların tanımı (Adı, üretici firması, modeli, seri numarası, sınıfı, izlenebilirlik vb. bilgileri),
- Kalibrasyonun yapıldığı ortam şartları,

- Kullanılan kalibrasyon metodunun tanımı ve ilgili talimat numarası ve adı,
- Kalibrasyon sonuçları (birimleri ile birlikte),
- Kalibrasyon sonuçlarının ölçüm belirsizliği,
- Açıklamalar (uygun olduğunda, sonuçların sadece kalibrasyonu yapılan cihazla ilgili olduğuna dair beyan),
- Kalibrasyonu yapan personelin ve sorumlunun adları, görevleri ve imzaları,
- Kalibrasyonu yapan laboratuarın yazılı izni olmaksızın kalibrasyon sertifikasının bütününde veya bir kısmında herhangi bir değişiklik yapılamayacağına ve kısmen kopyalanıp çoğaltılamayacağına dair beyan,
- Damga ve damgasız ve imzasız kalibrasyon sertifikalarının geçersiz olduğuna dair beyan.
- Kalibrasyonu yapılan cihaz ya da sistem ayar ve onarım işlemlerine tabi tutulursa ayar öncesi (elde edilebilmesi durumunda) ve sonrası kalibrasyon sonuçları sertifikada belirtilmelidir [9].

1.8. Belirsizlik Kavramı ve Hesaplaması

Bir ölçüm sonucu, ölçülen niceliğin sadece bir tahmini veya yaklaşımıdır. Kalibrasyon işlemlerinde yapılan ölçümlerin sonuçlarının bir anlam ifade etmesi için belirsizlik ifadesini de içermesi gerekmektedir.

Belirsizlik, elde edilen bilgiye dayanılarak ölçülene atfedilen büyüklük değerlerinin dağılımını niteleyen, negatif olmayan sayısal parametre olarak tanımlanmıştır [13].

Ölçüm belirsizliğinin hesaplanmasında ilk olarak Hata Yaklaşımı (Geleneksel Yaklaşım, Gerçek Değer Yaklaşımı) kullanılmış ancak daha sonra Belirsizlik Yaklaşımına geçilmiştir. Hata yaklaşımımın dikkate alındığı ölçümlerde amaç gerçek değere mümkün olduğu kadar yakın bir değer elde etmektir. Gerçek değerden sapma, rastgele hata ve sistematik hatadan oluşmaktadır. Her zaman ayırt edilebilir oldukları varsayılan bu iki hata türü, ayrı ayrı değerlendirilmedir. Bir ölçüm sonucu için bu iki tür hatanın toplam hatayı oluşturmak üzere nasıl birleştirildiği ile ilgili bir kural oluşturulamadığından, genellikle tahmini bir değer

kullanılır. Çoğunlukla, toplam hatanın mutlak değeri için bir üst sınır değeri tahmin edilmekte ve bu değer genellikle "belirsizlik" olarak adlandırılmaktadır [14].

Kabul edilen belirsizlik yaklaşımında ise ölçüm belirsizliği bileşenlerinin, istatistiksel metotlarla hesaplanan **A Tipi** ile istatistiksel olmayan metotlarla elde edilen ve sonrasında bileşenleri varyans cinsinden ifade edilen **B Tipi** olmak üzere iki kategoride gruplandırılması ve bunların matematiksel olasılık teorisine göre tek bir varyans değeri vermek üzere birleştirilmesi önerilmektedir [5,15].

Belirsizlik Yaklaşımı'nın ayrıntıları, ölçülenin tek bir değer olarak ifade edilebileceği varsayımına dayanarak ölçüm belirsizliğinin doğrudan bir ölçüm modeli vasıtasıyla matematiksel olarak ele alındığı **Ölçüm Belirsizliğinin Hesaplanması Kılavuzu'nda (GUM)** verilmiştir [16].

Belirsizlik yaklaşımında ölçümün amacı, gerçek değere en yakın değeri elde etmek değildir. Amaç, ölçüm anında hata yapılmadığı varsayılarak, ölçümde elde edilen veriler kabul edilen etkilerle belirlenmiş makul bir aralıkla ifade edilmektedir.

GUM'un belirsizlik yöntemine göre ilk olarak ölçüm belirsizliğinin tüm bileşenleri belirlenir. Burada ölçüm belirsizliğini etkileyen kaynakları belirlemek için mevcut ölçüm metodu modellenir. Daha sonra ölçüm büyüklükleri matematiksel bir **model fonksiyon** ile ifade edilir [14 - 16].

İkinci olarak her bir **bileşenden gelen standart belirsizlikler** hesaplanır. Son olarak ise, her bir belirsizlik bileşeninin, belirsizliğin yayılımı kuralına göre birleştirilmesi ile **bileşik belirsizlik** oluşturulur [14 - 16].

1.8.1. Belirsizlik Hesabında Kullanılan İstatistiksel Kavramlar

Belirsizlik hesabının felsefesinde ölçüm sonuçlarının bulunabileceği aralığı istatistiksel olarak ifade edebilme söz konusudur. Bu nedenle istatistik biliminin temel konuları belirsizlik hesabında kullanılmaktadır.

1.8.1.1. Ortalama

Bir büyüklüğün n adet ölçümünden elde edilen değerlerin toplamının n'e bölünmesi ile elde edilen değere denir.

1.8.1.2. Sapma

Ölçülen her bir değer ile ortalama arasındaki farktır.

1.8.1.3. Standart Sapma

Eşitlik (1.3) ile ifade edilen standart sapma ortalama değer civarındaki değişimin miktarını gösterir.

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} \qquad \text{(n<20)} \qquad (1.3)$$

1.8.1.4. Olasılık Dağılım Fonksiyonları

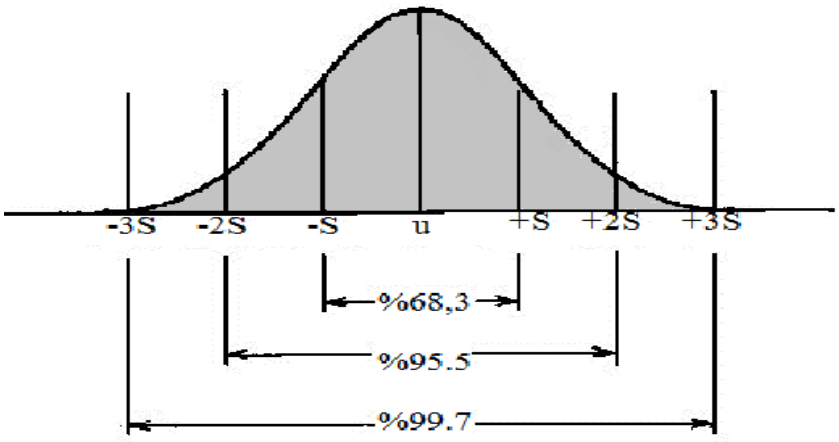
Özellikle her bir bileşenin belirsizliği, olasılık dağılım fonksiyonları üzerinden birleşik belirsizlik hesabına aktarılmaktadır. Bu nedenle olasılık dağılım fonksiyonlarını incelemek gerekir. Karşılaşılan olasılık dağılım fonksiyonları, normal, dikdörtgen, üçgen, trapezoidal, U-tipi olmakla birlikte en fazla kullanılanlar aşağıda belirtilmiştir;

Normal (Gauss) Dağılımı

Tekrarlı yapılan ölçüm verilerinin dağılımı incelendiğinde çan eğrisi şeklinde bir grafik elde edilir. Bu sonuç doğada birçok olayda karşımıza çıktığı için normal dağılım adını almıştır. Ölçme işleminde hata ne kadar azalırsa dağılımın grafiği o kadar dar ve yoğun olur.

Şekil 1.8.'de normal dağılımlı olasılık yoğunluk fonksiyonunun grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde normal dağılımda ölçüm sayısının ortalama değer etrafında daha fazla, kenarlara gidildikçe azaldığı görülmektedir. Burada ölçümün standart sapması S olarak kabul edilirse ölçüm sayısının yaklaşık % 68,3'ü ±1S aralığında bulunur. Yine %95,5'i ±2S

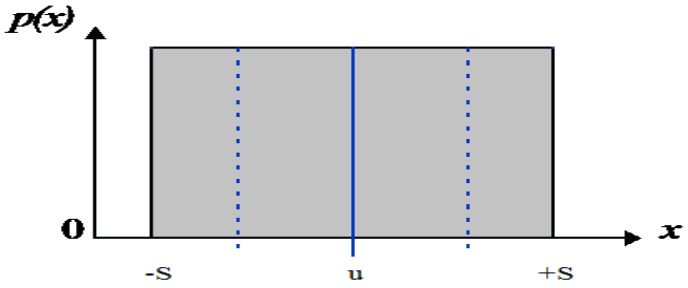
aralığında %99,7'si de ±3S aralığında bulunur. Standart sapma değerini belirlerken kullanılan katsayı kapsam faktörüdür. Örneğin ±1S'nin kapsam faktörü k=1, ±2S'nin kapsam faktörü k=2'dir. Sertifikalarda belirsizlik ifade edilirken k=2 kapsam faktörü tercih edilir.



Şekil 1.8. Normal dağılımlı olasılık yoğunluk fonksiyonu.

Dikdörtgen Dağılım

Kullanılan bir diğer dağılım şekli de dikdörtgen dağılımdır. Ölçüm değerlerinin değişim gösterdiği aralık bilindiği durumlarda kullanılır. Cihaz üreticilerinin belirttiği doğruluk değerleri ve standartların sıcaklık katsayıları bu dağılıma örnek olarak verilebilir.

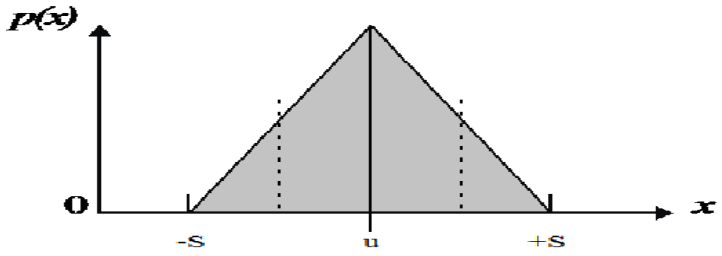


Şekil 1.9. Dikdörtgen dağılımlı olasılık yoğunluk fonksiyonu.

Şekil 1.9.'da dikdörtgen dağılımlı olasılık yoğunluk fonksiyonu verilmiştir. Bu gibi dikdörtgen dağılımı durumlarında normal dağılım ile hesap yapmak belirsizlikte yanlışlıklara sebebiyet vermektedir. Dikdörtgen dağılımını normal dağılıma çevirmek için $1/\sqrt{3}$ ile çarpılması gereklidir.

Üçgen Dağılım

Bir başka dağılım şekli olarak üçgen dağılım da ölçüm değerlerinin değişim gösterdiği aralık ve eğilimlerinin bilindiği durumlarda kullanılmaktadır. Yine üçgen dağılım da normalleştirilerek kullanılır. Üçgen dağılımı normal dağılıma çevirmek için $1/\sqrt{6}$ ile çarpılması gereklidir. Şekil 1.10.'da üçgen dağılımlı olasılık yoğunluk fonksiyonu verilmiştir.



Şekil 1.10. Üçgen dağılımlı olasılık yoğunluk fonksiyonu.

1.8.2. Belirsizliğin Kaynakları

- Ölçüm büyüklüğünün yetersiz tanımlanması,
- Ölçüm büyüklüğünün tanımının gerçekleştirilmesi sırasında eksiklikler,
- Ölçüm işlemine uygun örnekleme yapılmaması,
- Çevre şartlarının ölçüm sonucuna etkisinin katılmaması,
- Analog cihazların okumalarında kişisel hatalar,
- Cihaz çözünürlüğünün sınırlı olması,
- Ölçüm standartlarının ve referans malzemelerin tam değerinin bilinememesi,
- Ölçüm yöntemindeki varsayımlar ve yaklaşımlar,

- Kablo konumu ve toprak döngüsü etkileri,

Belirsizlik kaynakları yapılan ölçüme göre değişebilir. Bu noktada kaynaklar çok iyi tespit edilmeli ve kaynaklardan gelen belirsizlik değerleri doğru bir şekilde toplam belirsizliğe eklenmelidir [15].

1.8.3. Belirsizlik Tipleri

1.8.3.1. A Tipi Belirsizlik

İstatistiksel verilerden gelen belirsizlik değeridir. Yapılan ölçümlerin standart sapmasından elde edilir. Tekrarlı ölçümlerin Gauss dağılımı yaptığı varsayılır. A Tipi belirsizlik değerlendirmesi standart sapma ile ifade edilen Eşitlik (1.4) ile elde edilir.

$$u(x) = \frac{S(\bar{x})}{\sqrt{n}} \tag{1.4}$$

Eşitlikteki; $S(\bar{x})$ deneysel standart sapmadır ve

$$S(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \tag{1.5}$$

ifadesi ile verilir. Eşitlil (1.5)'teki büyüklükler ise,

x_i = i. ölçüm sonucu,

$\bar{x}$ = n adet ölçüm sonucunun ortalaması,

n = ölçüm sayısıdır.

1.8.3.2. B Tipi Belirsizlik

İstatistiksel veriler haricindeki kaynaklardan gelen belirsizlik bileşenleridir. B Tipi Belirsizlikte aşağıdaki bilgiler kullanılmaktadır;

- Daha önceden yapılan ölçümlerden gelen veriler,

- Cihaz veya sistemle ilgili geçmiş tecrübeler,
- Üretici firma tarafından belirtilen belirsizlik verileri,
- Kalibrasyon sertifikalarından gelen veriler,
- Referans değerlere ait belirsizlik verileri.

B tipi belirsizlik hesabında dağılımlar normal dağılım olmadığından, birleşik belirsizlik hesabında A tipi belirsizlikle toplayabilmek için normal dağılıma çevrilmesi gerekmektedir. Yine sertifika değerlerinde kapsam faktörü olarak k=2 verilmesi durumunda, normal dağılıma çevrilirken k=1'e indirilmesi gerekir.

Sonuç olarak, B tipi belirsizlik bileşenlerini birleşik belirsizlikte kullanabilmek için, bileşenlerin değerleri k=1 kapsam faktöründe normal dağılıma çevrilir.

1.8.4. Belirsizlik Hesabı

Belirsizlik hesabında GUM' un önerdiği belirli adımlar sırasıyla yerine getirilir [16];

- Belirsizliğin model fonksiyonu oluşturulur,
- Belirsizlik bileşenleri belirlenerek duyarlılık katsayıları hesaplanır,
- Birleşik belirsizlik hesaplanır,
- Genişletilmiş belirsizlik hesaplanır.

1.8.4.1. Model Fonksiyonun Oluşturması

Yapılan ölçümde, ölçüm değeri Y, n adet giriş büyüklüğüne $(X_1, X_2, ..., X_n)$ f fonksiyonu ile bağlı olsun. Y, Eşitlik (1.6) ile ifade edilir.

$$Y = f(X_1, X_2, ..., X_n) \tag{1.6}$$

Örnek üzerinden gidilirse, Dijital Multi Metre (DMM)' in DC Gerilim özelliği kalibrasyonunun model fonksiyonu şu şekilde oluşturulur [17];

DMM' in DC gerilim kalibrasyonu, referans kalibratörden uygulanan DC gerilimlerin, doğrudan DMM ile ölçülmesi suretiyle gerçekleştirilmektedir. Buna göre model fonksiyona girecek olan giriş büyüklükleri Tablo 1.2.' de belirtilmiştir [17].

Bileşenler kullanılarak oluşturulmuş, çıktı olarak kalibrasyonu yapılan DMM' in hatasını veren model fonksiyon eşitlik (1.7) ve eşitlik (1.8)' deki gibidir.

$$E_{DMM} = f(V_i, V_{ref}, \delta V_{ref}, \delta V_{çöz}) \tag{1.7}$$

$$E_{DMM} = V_i - V_{ref} - \delta V_{ref} - \delta V_{çöz} \tag{1.8}$$

Tablo 1.2. DC gerilim model fonksiyonu.

Sembol	Tanım
E_{DMM}	Kalibrasyonu yapılan DMM' in hatası
V_i	DMM ile ölçülen DC gerilim değeri
V_{ref}	Referans kalibratörden uygulanan değer
δV_{ref}	Kalibratörün gerilim düzeltme değeri (yıllık kayma, vb.)
$\delta V_{çöz}$	DMM' in sonlu çözünürlüğünden kaynaklanan düzeltme

1.8.4.2. Belirsizlik Bileşenlerinin Listelenmesi ve Duyarlılık Katsayılarının Hesaplanması

Y ile ifade edilen ölçüm sonucu değerine etki eden A Tipi istatistiksel belirsizlik bileşeni ile B Tipi diğer belirsizlik bileşenleri bileşik belirsizliğe eklenmek üzere listelenir. Belirsizliği oluşturan bileşenlerin etkileme oranları farklıdır. Belirsizlik bileşenlerinin toplam belirsizliğe etkisini belirten katsayılara duyarlılık katsayıları denir. Duyarlılık katsayısı ile bir belirsizlik bileşenin toplam belirsizliğe yaptığı etkinin önemi ölçüt olarak verilir. Her bir bileşen için $Y = f(X)$ fonksiyonunun duyarlılık katsayıları Eşitlik (1.9) ile ifade edilir. Duyarlılık katsayısı fonksiyonun bileşene göre kısmi türevidir [17].

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial X_i} \tag{1.9}$$

1.8.4.3. Birleşik Belirsizlik Hesabı

Tüm bileşenlerin belirsizlikleri toplanarak bileşik belirsizlik elde edilir. Ancak buradaki toplam standart sapmaları içerdiği için standart sapmaların varyansları toplanıp karekökü alınarak elde edilir. Bileşik belirsizliğin formüle edilmiş hali Eşitlik (1.10)' da verilmiştir. Buradaki girdilerin birbirinden bağımsız olduğu kabul edilmiştir [17].

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} c_i^2 . \frac{u(x_i)^2}{k_i^2}} \tag{1.10}$$

Burada

$u(y)$ = ölçüm değerinin bileşik belirsizliği,

c_i =Duyarlılık katsayısı,

$u(x_i)$ = x_i 'nin belirsizlik bileşeni

k_i = $u(x_i)$ belirsizliğinin olasılık dağılım fonksiyonundan gelen katsayıdır.

1.8.4.4. Genişletilmiş Belirsizlik

Bileşik belirsizlikte k=1 kapsam faktörü ile belirsizlik tanımlanır. Bu da yapılan ölçümlerin güvenilirlik düzeyinin % 68,3 olduğunu ifade etmektedir. Güvenilirlik düzeyi, ölçüm sonucunun % 68,3'lük bir olasılıkla belirtilen belirsizlik aralığının içinde olması anlamına gelmektedir. Ancak pratikte istenilen güvenilirlik düzeyi daha yüksektir. Uygulamalarda belirsizlik, k=2 ya da k=3 güvenilirlik düzeyinden ifade edilir. Bileşik belirsizlik k=1 seviyesinden verildiği düşünülürse, bileşik belirsizlik istenilen seviye ile çarpılarak genişletilmiş belirsizlik elde edilir. Genişletilmiş belirsizlik Eşitlik (1.11)'de verilmiştir [17].

$$U = k.u(y) \tag{1.11}$$

Burada

U = Genişletilmiş belirsizlik

k= Kapsam faktörü

$u(y)$= Bileşik belirsizliktir.

1.8.4.5. Belirsizlik Beyanı

Genişletilmiş belirsizlik de hesaplandıktan sonra, hesaplanmış belirsizliğin ve kalibrasyon değerin kullanıcıya sunulması işlemi kalır. Belirsizlik beyanının kullanıcı tarafından rahatça anlaşılabilmesi, evrensel olması amacıyla GUM ve EA-4/16 kılavuzlarında belirtilen yöntemlerle sunulması gerekmektedir [18]. Belirsizlik beyanında hesaplama yapılan dağılım fonksiyonu ve kapsam faktörü belirtilmelidir. Belirsizlik değeri anlamlı iki basamaktan fazla verilmemelidir. Ayrıca belirsizlik değeri ile kalibrasyon değerinin çözünürlükleri aynı olmalıdır.

Sonuç olarak ölçüm sonucu kullanıcıya Y= y ± U ifadesi ile sunulmaktadır. Bu ifadeden ölçülen Y değerinin yüksek bir güvenilirlikle y - U ile y + U arasında olduğu anlaşılmalıdır [17].

2. BÖLÜM

KALİBRASYON OTOMASYONU

Kalibrasyon laboratuarlarında, işlemler genellikle, daha önceden belirlenmiş olan prosedürler üzerinden, yetkili personel tarafından manuel olarak yapılmaktadır. Yapılan manuel işlemlerde personel cihazları elle tuşlara basarak kontrol etmekte, sonuçları da ekrandan okuyarak elde etmektedir. En basit bir cihazın bile onlarca kalibrasyon noktası olduğu düşünüldüğünde bu işlemler için gerekli süre ve personelden kaynaklanan hata olasılığının çokluğu dikkat çekicidir.

Manuel olarak yapılan kalibrasyonda gözlemlenen başlıca olumsuzluklar,

- Uzun süren işlemlerden dolayı zaman kaybı,
- Gözlemden kaynaklanan okuma hataları,
- Tek okumadan kaynaklanan düşük doğruluk,
- Bağlantı hatalarıdır.

Çoğunlukla ölçüm cihazlarında, uzaktan kontrolü mümkün kılan arayüz donanımları bulunmaktadır. Bu arayüz donanımları ile cihaza komut yollama, cihazdan veri çekme, cihazın tepkilerini kontrol etme gibi işlemler yapılabilmektedir. Bu özelliklerde asıl amaç cihazın kalibrasyonu olmasa da, kalibrasyon işlemlerinde de yapılanlar farklı değildir.

Örneğin; kalibrasyonda kullanılan üretici bir referans kaynağın sinyal üretmesi için komut yollamak yada ölçüm alıcısı bir cihazın algıladığı ölçümleri elde edip, işlemek ve yorumlamak, bu işlemlerin hepsini arayüz bağlantıları olan cihazlarda uzaktan kontrol ederek yapmak mümkündür.

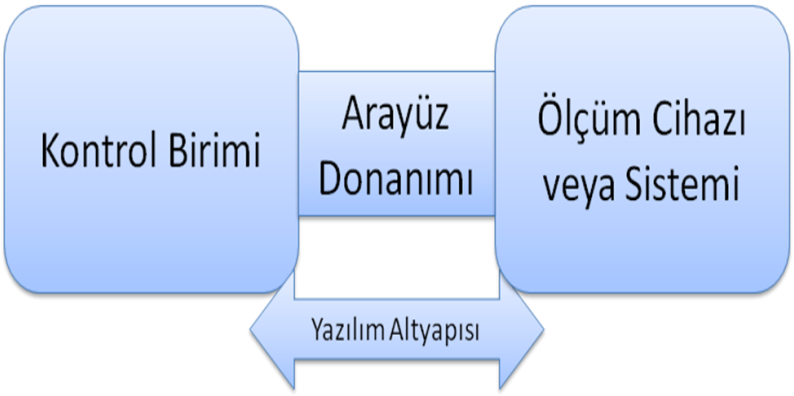
Kalibrasyon işlemlerini, bir kontrol birimi üzerinden yöneterek, arayüz donanımları ile cihazlara gerekli komutları yollamak, komutlara verilen cevapları çekmek ve elde edilen verileri belirli algoritmalarla işlemek suretiyle insan gücünü en aza indirerek gerçekleştirmeye **kalibrasyon otomasyonu** denilir.

Bir kalibrasyon işleminde otomasyona uygun aktiviteler,

- Ölçüm cihazları ve sistemlerinin kalibrasyonu,
- Sonuçların sertifika edilmesi,
- Verilerin işlenmesi, izlenmesi ve depolanması olarak sıralanabilir.

2.1.Kalibrasyon Otomasyonunun Temel Bileşenleri

Cihazların kalibrasyon otomasyonunda temel üç parça vardır; Kontrol birimi, Arayüz Donanımı, Yazılım. Şekil 2.1.'de kalibrasyon otomasyonunun temel bileşenleri arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 2.1. Kalibrasyon otomasyonunun temel bileşenleri.

2.1.1.Kontrol Birimi

Otomasyon sisteminde cihaz, haberleşme arayüzü ve yazılım konfigürasyonunun kontrol edilmesi amacıyla bir kontrol birimi kullanılmaktadır. Genellikle uygulamalarda kontrol birimleri olarak kişisel bilgisayarlar (Personal Computer, PC) kullanılmakla birlikte, mikroişlemci tabanlı kontrol birimleri ya da özel tasarlanmış akıllı kontrol birimlerinin kullanıldığı uygulamalar da mevcuttur[19].

Cihazlardan gelen verilerin depolanması ve işlenmesi de kontrol biriminde yapıldığı için kontrol biriminin doğru seçimi verilerin elde edilmesi, işlenmesi ve saklanmasına doğrudan etki etmektedir.

2.1.2. Arayüz Donanımları

Cihazlarla bağlantıyı sağlayacak, veri alışverişi ve komut gönderimi işleminde yolu oluşturacak arayüz donanımları, kalibrasyon otomasyonunun ikinci kısmını oluşturmaktadır. Genellikle cihazlarda RS-232 veya GPIB arayüz standartları kullanılmaktadır. GPIB standardının paralel haberleşme yapması, onbeş cihaza kadar sistemi desteklemesi, en önemlisi test ve ölçüm cihazlarında geniş destek bulması tercih edilirliğini arttırmaktadır. Yeni nesil cihazlarda GPIB'nin yanı sıra diğer veri iletişim yolları olan Evrensel seri yol (Universal Serial Bus, USB), Yerel alan ağı (Local Area Network, LAN) vb. standartları da destek bulmaktadır. Uygulamaların geneline bakıldığında, kalibrasyon sistemlerinde kullanılan test ve ölçüm cihazlarında en çok kullanılan arayüz GPIB standardıdır [20].

2.1.3. Yazılım

Kalibrasyon otomasyonunun üçüncü kısmını yazılım oluşturmaktır. Cihazlara komutların gönderilmesi, verilerin çekilmesi ve işlenilmesi yazılım ile gerçekleştirilmektedir. Yazılımla kalibrasyon prosedüründe mevcut sıralı işlemler koda dökülerek arayüz ile kullanıcının kullanımına sunulmaktadır. Kullanım amacına yönelik çeşitli yazılımlar olmakla birlikte, genellikle kullanıcı dostu arayüzler sunan yazılımlar tercih edilmektedir. Kullanılan yazılımlar incelendiğinde, Labview gibi simülasyon ile modüller halinde kod yazmaya gerek duymayan yazılımlar, programın oluşturulmasında kolaylık sağlamaktadır [21].

Visual Basic, C#, JAVA gibi nesneye yönelik programlama dilleri kolay kullanımlı kullanıcı arayüzleri hazırlanmasında tercih edilmektedir [22,23]. VEE Pro gibi cihaz üreticisi firmaların, cihaza yönelik program geliştirmeyi sağlayan yazılımlar da mevcuttur [24]. Matematiksel işlemlerin kolaylığı istenildiği durumlarda MATLAB tercih edilmektedir. Uygulamalar incelendiğinde genellikle kullanıcı dostu arayüzler tasarlayan yazılımların tercih edildiği gözlenmektedir.

Kontrol birimi oluşturulması, arayüz donanımımın seçilmesi ve yazılım belirlenmesi ile kalibrasyon otomasyonu hazırlanabilecek duruma gelmektedir. Sonraki adımda, otomasyonu yapılacak cihazların kalibrasyon prosedürlerinde mevcut olan sıralı işlemlerin algoritmaları hazırlanarak koda dökülmesi gerçeklenmektedir. Ardından cihazlarla haberleşmenin sağlaması ve kalibrasyon işlem algoritmaları yaptırılmaktadır.

Yazılan algoritmalarda cihazların özelliklerine göre belirlenmiş kalibrasyon noktalarında istenen işlemler cihaza yaptırılmakta ve sonuçları cihazdan çekilerek işlenmekte ve kullanıcıya sunulmaktadır. Verilerin işlenmesi aşamasında gerekli matematiksel hesaplar yapılmakta ve kullanıcıya standart formatta kalibrasyon sertifikası hazırlanmaktadır.

Kullanıcı arayüzünün hazırlandığı yazılım ile (C#, MATLAB, Labview, vs.) cihazların işlem yaptırıldığı kodları içeren komut standartları farklıdır. Burada otomasyonun hazırlandığı yazılım farklı görevler icra etmekle birlikte, en önemlisi cihazlara işlem yaptıracak komutları yollamaktadır. İşlem yaptıran komutlar ise cihazın özelliğine göre belirlenmiş komutlardır. Cihaz komutları zamanla yapısal olarak değişiklikler göstermiş ancak sonuçta belirli standartlarla tanımlanabilir hale gelmiştir. İlk olarak her cihaz üreticisi kendi cihazına yönelik komutları üretmiş, sonraki süreçte aynı görevleri gerçekleştiren cihazlara ortak komutlar tasarlanarak IEEE 488, IEEE 488.2 ve SCPI standartları ile komutlar standart hale getirilmiştir.

Son olarak IVI kuruluşu ortak komutları işleyebilen cihazların yer değiştirilebilirliğine yönelik, özellikle yüksek seviyeli yazılım dilleri ile uyumlu kod standartları üretmiştir [25]. IVI'nin hazırladığı dinamik kütüphaneler (.dll)'ler cihazların yazılımla kontrolünde yeni bir yaklaşım getirmiştir.

IVI standartları ile oluşturulan ve özellikle nesneye yönelik dilleri destekleyen komutlar her ne kadar cihazların yapabildiği işlemleri uzaktan kontrol ile gerçeklemeyi amaçlasa da kalibrasyon otomasyonunda da yapılanların çok farklı olmaması, IVI komut standartlarının kalibrasyon otomasyonunda da aktif bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. IVI standartlarının kullanılması ile hazırlanacak bir kalibrasyon otomasyonu yazılımı, standardın avantajlarından faydalanabilmeyi sağlayacaktır. IVI standartları özellikle cihazların değiştirilebilirliği felsefesi ile yerine

cihaz kullanımını kolaylaştırarak yazılımda herhangi bir kod değişimi yapmadan donanımsal olarak aynı işlevlere sahip cihazları yerine kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır [26].

2.2. Kalibrasyon Otomasyonunun Faydaları

Kalibrasyon otomasyonunun genel hedefi, işlemleri otomasyonel hale getirerek en kısa sürede, en yüksek doğrulukla kalibrasyonunu tamamlamaktır. Otomasyon ile zamandan tasarruf sağlanmakta, kullanıcıdan kaynaklanan hatalar en aza indirilmekte, bilimsel anlamda kalibrasyondan istenilen hesaplamalar kolaylıkla yaptırılabilmekte, kullanıcıya ölçüm sonuçlarını görsel olarak takip edebilme ve depolama imkanı sağlanmaktadır.

Ayrıca kalibrasyon otomasyonu ile bir kalibrasyon sertifikasında istenilen belirsizlik, hata vb. hesaplarını yazılımsal olarak gerçekleştirerek, kullanıcıya doğruluğu tam ve akredite olmuş bir sertifika hazırlanmaktadır.

Kalibrasyon otomasyonu üzerine yapılan literatürdeki çalışmalar genellikle arayüz donanımı ve kontrol birimi üzerine yapılmasına rağmen yazılımsal boyutta incelemeler ve geliştirmeler sığ kalmıştır. Cihaz teknolojilerinin geliştiği ve kalibrasyon laboratuarlarına hergün farklı üreticilerin aynı işlemleri yapan cihazlarının geldiği düşünüldüğünde, aynı işlevlere sahip cihazların tek bir program üzerinden kalibrasyonunun yapılması önem kazanmaktadır.

Kalibrasyonu yapılacak cihazların ortak komut standartlarını desteklemesi kullanılarak, yapılacak olan kalibrasyon otomasyonu yazılımları ile program sayısı en aza indirilebilir. Yeni nesil nesneye yönelik programlama dillerini destekleyen komut sistemleri ile kalibrasyon otomasyonu yazılımlarının idamesi, bakım ve onarımı daha kolay ve etkin hale getirilebilinir. Özellikle IVI standartlarını kullanarak yapılandırılan otomasyon yazılımları cihazların değiştirilebilirliği felsefesi ve diğer özellikleri ile bakım onarım faaliyetlerinde zaman ve maliyet açısından verimlilik arttırılabilir.

2.3. Literatür Çalışmaları

Literatürde mevcut çalışmalar incelendiğinde, kalibrasyonu yapılacak ve kalibrasyonda kullanılacak cihazların haberleşme arayüzü desteklerine ve kullanılan yazılım ve kontrol birimine göre değişik uygulamalar ile karşılaşılmaktadır. Entegre devrelerin ölçüm

sistemlerine girmesi ile ilk çalışmalar 1970'li yıllarda başlamaktadır. 1978'de Warnew ve West'in yaptıkları çalışmada multimetre kalibrasyonu hafızalı bir hesap makinesi içeren bir otomasyon sistemi ile gerçeklenmiştir [27].

Aynı yıl yapılan başka bir çalışmada, Randle ve Kerth tarafından mikroişlemciler ve entegre devreler kullanılarak mikroişlemci tabanlı, GPIB üzerinden haberleşmeli, assembly kodlu bir sistem gerçeklenmiştir [19].

1989'da Rudkin tarafından yapılan çalışmada cihazlara hakimiyetin sınırlı miktarda olduğu gözlemlenmektedir. Çalışmada modülasyon ölçümü kalibrasyonunda sadece self test (cihazın iç testi) yaptırılabilmiştir. Tam otomatik kalibrasyonu görmek mümkün değildir. Ancak cihazlarla haberleşmenin olması ve self test yaptırılması önemlidir. Çalışma ile aslında cihazların periyodik self testi sağlanmıştır [28].

1995'te Wang ve Chen bilgisayar destekli otomatik kalibrasyon sistemi gerçeklemişlerdir. Sistemin amacı gerilim, akım, güç, reaktif güç ve güç faktörü çeviricilerini içeren bir ya da üç fazlı güç çeviricilerini kalibrasyon etmektir. Yazılımsal olarak kullanıcı dostu bir program hazırlamayı hedefleyen çalışma, on adet transdusere kadar kalibrasyon yapabilen bir otomasyon sistemini içermektedir. Kullanılan cihaz ve ekipmanlar IEEE 488 arayüzü ile kontrol altına alınmıştır. Çalışmanın uygulamasında vurgulanmak istenen, kalibrasyon otomasyonu ile kullanıcı kolaylığı sağlayan bir arayüz tasarımının gerçeklenmesidir. Sadece bir kurulumla on adet transduserin kalibrasyonu ve belirsizlik hesapları yaptırılmıştır [29].

1998'te Drnovsek ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada otomasyon yaklaşımının sıcaklık kalibrasyonu laboratuarında uygulanması tartışılmış ve kalibrasyon otomasyonunun avantajları ele alınmıştır. Gerçeklenen sistemde yazılım olarak Labview tabanı kullanılmış donanımsal bileşenlerde ise PC üzerinden RS 232 kullanılarak sıcaklık banyosu, GPIB kullanılarak köprü, tarayıcılar ve nV/@meter ile veri iletişimi sağlanmıştır [21].

2000'de Kanada Ulusal Araştırma Konseyinde yapılan çalışmada Filipski ve Rinfret, Ac-Dc transfer sistemini otomatik olarak Ac-Dc karşılaştırıcı kullanılarak yazılımsal ve donanımsal olarak gerçeklemişlerdir. Yapılan çalışma ile step motor kontrollü bir mekanik anahtarlama sistemi ile ticari elektronik transfer standartlarının değişimi

gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca çalışma ile yazılım üzerinden belirsizlik sonuçları da en iyi şekilde hesaplanmıştır [30].

Aynı yıl Corra ve Cruz'un yaptığı çalışmada dijital arayüz bağlantısı olmayan ölçüm cihazlarının kalibrasyonunu görüntü işleme tekniğiyle gerçekleyen bir otomatik kalibrasyon sistemi tanımlanmıştır. Görüntü işleme algoritması cihazın ekranını otomatik olarak okumaktadır. Sistem hem analog hem de dijital ekranlı cihazlar için kullanılmaktadır. Ayrıca çalışmada arayüzü bulunan cihazlarda ise sistem GPIB kullanılmıştır [31].

2001'de Muscas ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada voltaj çeviricilerin kalibrasyonu amacıyla bir otomatik test sistemi (Automatic Test Equipment, ATE) geliştirilmiştir [32].

2002'de Ferrero ve arkadaşları Güç kalitesi ölçümü kalibrasyonunda, karmaşık sayısal işaret işleme yöntemlerine dayanan ve oldukça değişken girişlere sahip olan kalibrasyon işlemlerini ve belirsizlik hesaplarını, içeriğinde IEEE 488 arayüz birimi kullanarak cihazlara bağlanan bir sistem ile kontrol etmişlerdir [33].

Aynı yıl Arseneau ve arkadaşları flikermetre kalibrasyonu için bir test sistemi geliştirmişlerdir. Test sistemi ile flikermetre kalibrasyonunda gerekli olan genlik ve frekans değişimleri uygulanmış ve ölçülmüştür. Sistemde bilgisayar kontrollü iki sinyal jeneratörü ile test durumları oluşturulmuştur. Yine modülasyonun ölçümünde iki adet yüksek doğruluklu voltmetre kullanılmıştır. Verilerin alınması ve kayıt edilmesi işlemleri de sistem üzerinden gerçeklenmiştir [34].

2004'te Kennedy'nin yaptığı çalışmada sistemde değiştirilmesi gereken eski nesil veya arızalı cihazların değişiminde sistemin etkilenmemesi için yazılım ağırlıklı bir değişimin gerçeklenmesi ele alınmış GPIB donanımı ve SCPI komut sistemi kullanılarak bir .dll oluşturulmuş ve donanımsal olarak bir test adaptörü üzerinden sistem gerçeklenmiştir [35].

Bağlanmak için gerekli arayüz donanımları olmayan cihazların kontrolünde genellikle ekrandan okuma ve okunan verinin dijital ortama aktarılması söz konusudur. Burada görüntü işleme teknikleri ayrı bir konu olmakla birlikte asıl olan kalibratörlere yine bir

arayüz donanımı ile bağlanılarak haberleşme gerçekleştirilmektedir. 2005'te Pang ve Chan'nın yaptıkları çalışmada arayüz bağlantısı olmayan dijital yada analog multimetrelerin kalibrasyonu görüntü işleme teknikleri kullanılarak cihaz ekranı üzerindeki verilerin alınarak gerçeklenmiştir. [36].

2006'da Creasman ve Pheanis tarafından yapılan çalışmada otomotiv sistemlerinde veri edinimine yönelik ısılçift ve voltaj modüllerinin kalibrasyonu otomasyonel olarak dizayn edilmiş ve uygulanmıştır. Tasarlanan kalibrasyon sisteminde onaltı adet termokupl/voltaj sisteminin durum kartlarının test ve kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir [37].

2007'de Lili tarafından yapılan çalışmada kalibrasyon otomasyonunda kullanılan yazılımsal mimariler iki kısım olarak incelenmiştir; birinci kısımda genel kalibrasyon ve altyapısı için gerekli yazılım arayüzü ele alınmış, ikinci kısımda ise farklı cihazların kalibrasyon görevlerine yönelik kalibrasyon bileşenlerinin yazılım kütüphaneleri incelenmiştir. Sistemin avantajları, yeniden kullanım, esneklik, genişletilebilirlik ve idame kavramları olarak elde edilenler değerlendirilmiştir [38].

Aynı yıl Ahmad ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada radyo frekans (Radio Frequency, RF) metrolojisinde önemli bir büyüklük olan RF güç ölçümünün kalibrasyon otomasyonu ele alınmıştır. 50 MHz ile 18 GHz frekans aralığındaki thermistor mount'ların kalibrasyon faktörü direk ölçüm metodu ile otomasyon haline getirilmiştir. Hindistan ulusal fizik laboratuarında yapılan bu çalışmada, otomasyon tekniğinin içeriğinde kalibrasyonun hızını artırmak ve doğruluğunu yükseltmek amacıyla GPIB arayüzü ve IEEE 488 standardı arayüz kartı donanımsal olarak kullanılmıştır. Yazılım tarafı ise görsel bir arayüzü direk sunan VEE PRO uygulamasında geliştirilmiştir [24].

2008'de Li ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada endüstride kullanılan hassas sensör ve cihazların kalibrasyonunun manuel olarak gerçekleştirilmesindeki zorluklarına dikkat çekilmiş ve bir otomasyon sistemi ile kalibrasyon otomatik hale getirilmiştir. Yaptıkları çalışmada GPIB ve C# kullanarak, SCPI komutlarının avantajlarından yararlanılmış, insan gücünü en aza indiren bir program gerçeklemişlerdir. Özellikle kod yazımında karşılaşılan "timeout" (zaman gecikmesi)

konusunda kodlu örnekler vermişlerdir. Çalışmanın sonucunda insan gücünü en aza indirmek amacıyla haberleşme arayüzü bulunmayan sensörlerin ekran görüntülerini kamera yardımı ile almayı hedeflemişlerdir [22].

2009'da Jia ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, çeşitli fonksiyonları olan farklı cihazların bulunduğu otomasyon sisteminde haberleşme amacıyla GPIB'nin kullanılması ele alınmıştır. Çalışmanın örnek uygulamasında mikrodalga dönüştürücülerin elektriksel performanslarının testi amacıyla bir otomatik test sistemi gerçeklenmiştir. Çalışma sonucunda GPIB'nin test sistemlerinde performansı arttırdığı, personel sayısını azalttığı gösterilmiştir [39].

Aynı yıl Chen ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, bilgisayar tabanlı empedans ölçüm sistemi GPIB arayüzü kullanılarak tasarlanmıştır. GPIB ile PC'ye sinyal üreteci, duran dalga indikatörü, dijital multimetre ve slotted line cihazları bağlanmıştır. Duran dalga dağılımı gösterimi, kalibrasyon otomasyonu, test edilen cihazın (Unit Under Test, UUT) bilgi yönetimi, sertifikasyon işlemleri gibi gerekli fonksiyonlar bilgisayar üzerinden gerçeklenmiştir [23].

2010'da Le-Dan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada GPIB ve PXI arayüzlerinin beraber kullanıldığı entegre otomatik kalibrasyon sistemi tasarlanmıştır. Sistemin kalibrasyon çerçevesinde elektromanyetik, radyofrekans ve zaman frekans alanları bulunmaktadır. Sistemde GPIB ve PXI modülleri C++ programlama dili üzerinden kontrol edilmiştir. Ayrıca veri tabanı olarak Access 2003 kullanılmıştır [40].

Bu tezin literatürdeki çalışmalara göre en önemli farkı, otomasyon sisteminde yeni nesil kod standartlarını kullanarak sistemin performans artırımını sağlamaktır. Özellikle IVI standartlarının kalibrasyon otomasyonu uygulamalarında kullanılmasına literatürdeki çalışmalarda rastlanmamıştır. Yazılım arayüzünün ve cihazların yazılımsal kontrolünün nesneye yönelik programlama tabanlı hazırlanması da tezin diğer çalışmalara göre durumunu vermektedir.

3. BÖLÜM

DONANIM VE YAZILIM

Kalibrasyon otomasyonunda donanım ve yazılım bileşenleri etkin roller oynamaktadır. Cihazların destekledikleri arayüz donanımları ve yazılım tabanlarının doğru seçilmesi ve etkin kullanılması otomasyon sürecinin her aşamasında performansı etkilemektedir. Veri transferinin en hızlı şekilde gerçeklenmesi donanımsal arayüze doğrudan bağlıdır. Cihazlara işlemleri yaptıracak komutların cihazlarla uyumu ve yazılımsal olarak kolay hazırlanabilmesi durumu, otomasyonun tasarımından son kullanıcının otomasyonu kullanmasına kadar her yerde, performansı etkileyen bir parametredir. Ayrıca, otomasyonun kontrol edileceği arayüzün, kullanıcı açısından kolay anlaşılabilir olması, otomasyon yazılımını oluşturan programcı açısından ise kolay tasarlanabilir ve idame ettirilebilir olması gerekmektedir. Bu sebepten, ana yazılım programının seçimi de otomasyon sisteminin performansını etkileyen parametreler arasındadır.

Kalibrasyon sürecinde elektronik ölçüm cihazlarından gelen verileri okumak ve işlemek, aynı zamanda elektronik cihazlardan oluşan standart kalibratörlere işlem yaptırmak gerekmektedir. Veri ve işlem akışını iki yolla sağlamak mümkündür. Birinci yol, ölçüm sonuçlarının cihaz ekranından doğrudan okunarak verilerin manuel elde edilmesi, ayrıca cihazlara yaptırılacak işlemlerin elle girilmesidir. Elektronik ölçüm cihazlarından veri edinimi ve cihazlara işlem yaptırmak için kullanılan ikinci yol ise, donanım ve yazılım destekleri kullanılarak verilerin ediniminin ve cihaz işlemlerinin bilgisayar kontrollü yaptırılmasıdır.

Cihazları bir kontrol birimi üzerinden yazılım ve donanım destekleri ile kontrol etmek mümkündür. Öncelikle cihaz, arayüz ve yazılım konfigürasyonunu bir kontrol birimi ile kumanda etmek gerekmektedir. Uygulamalarda kontrol birimi olarak genellikle kişisel bilgisayarlar tercih edilmektedir. Farklı uygulamalarda mikrodenetleyicilerin ve akıllı

birimlerin kontrol birimi olarak kullanılmasına da rastlanmaktadır [19]. Kontrol biriminin seçimi verilerin elde edilmesi, işlenmesi ve saklanmasına doğrudan etki etmektedir.

3.1. Arayüz Donanımı

Kalibrasyon işleminde kullanılan cihazlar ile kontrol birimi arasında veri ve işlem akışı arayüz donanımları ile sağlanmaktadır. Arayüz donanımının seçiminde, test edilecek veya veri alınacak cihazın hangi donanımları desteklediği ve sistemin çalışma ortamı etkili parametrelerdir. Yine cihaz sayısı, cihazların kontrol mekanizmasına olan uzaklığı ve çevre koşulları da göz önünde tutulması gereken konulardandır.

Çeşitli uygulamalarda cihazlarla haberleşmeyi sağlayan farklı arayüz donanımları kullanıldığı görülmektedir. Kalibrasyon işleminin laboratuar ortamında yapıldığı göz önüne alındığında, laboratuar şartlarına uygun, cihazlarla kolayca adapte olabilen arayüz donanımlarının tercihi ön plana çıkmaktadır. RS-232, USB, LAN ve GPIB cihazlara bağlanmada tercih edilen arayüz donanımlarıdır [20].

Ancak kalibrasyon ve diğer ölçüm uygulamalarında, birden fazla cihaza aynı anda bağlanabilmesi, farklı hızlardaki cihazların aynı sistem içerisinde kullanılmasına izin vermesi, cihaz üreticilerinin geniş desteği, elde edilebilirliği gibi avantajlarından dolayı GPIB standardının diğer standartlara göre daha fazla kullanıldığı gözlemlenmektedir. Bu tezin örnek uygulamasında da arayüz donanımı olarak GPIB kullanılmıştır.

3.2. GPIB

3.2.1. Giriş

Günümüzde Genel Amaçlı Arayüz Yolu (General Purpose Interface Bus, GPIB) olarak isimlendirilen haberleşme standardı ilk olarak programlanabilir test aygıtlarına bağlanmak ve kontrol etmek için Hewlett Packard firması tarafından Hawlett–Packard Interface Bus (HP-IB) adı altında 1965'te geliştirilmiştir. GPIB, programlanabilir aygıtların bilgisayara bağlanmasındaki hızı, esnekliği ve kullanım kolaylığı nedeniyle, diğer üretici firmalar tarafından da kabul görmüştür. 1975 yılında GPIB, IEEE tarafından IEEE-488-1975 (IEEE-488.1) standardı olarak kabul edilmiştir. Standart 1978'de, IEC-625 uluslararası yayınıyla uyumlu olması için küçük değişikliklerle

güncellenmiştir. IEEE-488.1 standardı haberleşme arayüzünün elektriksel, mekaniksel, temel protokol parametrelerini tanımlamaktadır. Ancak standartta bilgi ve komutların formatı hakkında bir özellik bulunmamaktadır. Bu da farklı üreticilerin veri biçimlerini, durum raporlamasını, mesaj değişim protokolünü, ortak konfigürasyon komutlarını ve cihaza özgü komutları kendilerine has oluşturmasına dolayısıyla bu konularda bir standartlaşmanın olmamasına neden olmuştur.

IEEE 488.1 standardına ek bir düzenleme getirilerek 1987 yılında IEEE 488.2 standardı geliştirilmiştir. Geliştirilen IEEE 488.2 standardı ile bilgi kodları ve formatları için genel komutlar tanımlanması, cihaz mesaj protokolü, genel olarak ihtiyaç duyulan cihaz komutlarının tanımlanması, hata protokolleri ve yeni raporlama modelinin tanımlanması gibi yenilikler getirilmiştir.

1990 yılında, Programlanabilir Enstrümanlar İçin Standart Komutlar (Standart Commands for Programmable Instruments, SCPI) olarak bilinen ve IEEE 488.2'yi temel alan farklı firma üreticilerinin uymak zorunda olduğu özel komutları içeren standart tanımlanmıştır. SCPI ile cihazlar arasındaki bütün sistemin, uyumluluğu ve konfigürasyonu garanti altına alınmıştır.

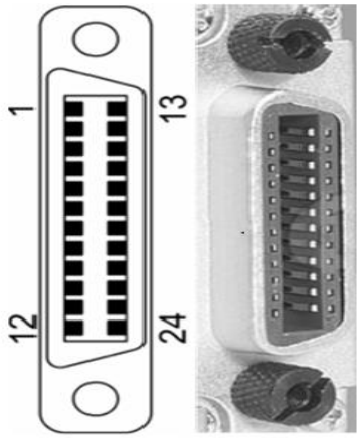
Tablo 3.1. GPIB'yi oluşturan standartlar ve içerikleri.

Standart	**İçerik**
IEEE 488.1	Donanımsal bileşenler
IEEE 488.2	Yazılım dil kuralları ve veri mimarisi, bütün cihazlar için ortak komutlar
SCPI	Benzer cihazların aynı işlevleri için ortak komutlar

Günümüzde GPIB terimi IEEE 488.1, IEEE 488.2, SCPI standartlarını kapsayan genel bir ifade olarak kullanılmaktadır. GPIB'nin kapsadığı standartlar ve içerikleri Tablo 3.1.'de verilmiştir. GPIB standardı yerine "HP-IB" ve "IEEE 488 Bus" ifadeleri de kullanılmaktadır [41].

3.2.2. Fiziksel ve Elektriksel Özellikler

GPIB arayüzünün haberleşme yolu her bir uçta standart bağlayıcılarla birlikte 24 telli koruyuculu bir kablonun içerisinde taşınmaktadır. GPIB kablosu bir ucu erkek, diğer ucu dişi konektör olacak şekilde tasarlanmıştır. Konektörler birbirine geçmekte ve vidalanarak sabitlemektedir. GPIB konektörleri, Amphelon MICRORIBBON, Cinch Seri 57 MICRORIBBON veya AMP CHAMP tipindedir. Her bir kabloda 8 veri hattı, 16 kontrol ve yol yönetim hattı olmak üzere 24 hat bulunmaktadır. GPIB'nin konektör yapısı Şekil 3.1.'de verilmiştir [41]. DIO1'den DIO8 kadar olan 8 veri hattı, bütün komut ve veri mesajlarının GPIB'e taşınmasını sağlar.



Şekil 3.1. GPIB'nin konektör yapısı.

Bütün komutlar ve çoğu veri 7 bit ASCII veya ISO kod sistemini kullanmaktadır. Sekizinci bit olan DIO8 biti ya kullanılmaz ya da hata kontrol biti olarak kullanılır. Veri hatları özellikle paralel konfigürasyonda, yol boyunca bir anda bir byte olacak şekilde veri taşımak için kullanılır. Kontrol ve yol yönetim hatları ise, veri akışını eş zamanlı hale getiren yol yönetim görevleri için kullanılır. Yol yönetim hatları, GPIB üzerinden bilgi akışının yönetiminden sorumludur. Bu hatlar:

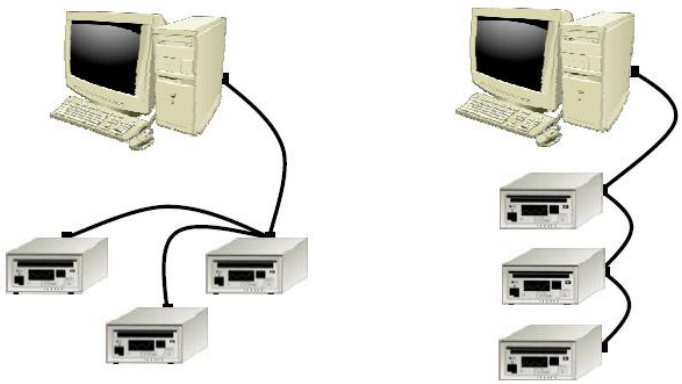
- Interface Clear (IFC, Arayüz Temiz)
- Attention (ATN, Dikkat)
- Remote Enable (REN, Uzaktan Etkinleşim)
- End or Identify (EOI, (Bitir yada Tanımla)
- Service Request (SRQ, Servis İsteği)

Kontrol hatları, cihazlar arasındaki mesaj byte'larının transferini asenkron olarak kontrol eder. Not Ready For Data (NRFD, Veri için hazır Değil), Not Data Accepted (NDAC, Veri kabul edilmedi) ve Data Valid (DAV, Geçerli veri) kontrol hatlarını oluşturmaktadır.

Veri veya komutlar yol boyunca gönderildiklerinde yol yönetim hatları ikisini ayırt eder. GPIB, yol üzerinde taşınacak bilgiyi temsil etmek için ikili gerilim sinyalleri kullanmaktadır. Lojik seviyeleri TTL devrelerindeki gibidir. 0.8 V'un altındaki gerilimler lojik 0'ı temsil eder. Lojik 1 ise 2 V ile 5 V arasındaki değerlerle ifade edilir. 0.8 V ile 2 V arasındaki boşluk gürültüden etkilenmemek içindir. GPIB ile veri transferinde kayıp yaşamamak için standartlarda belirtilen aşağıdaki kurallar yerine getirilmelidir;

- Kablo uzunluğu en fazla 20 metre olabilir.
- Bir hatta en fazla 15 cihaz bağlanabilir, bu cihazların da iki-üç tanesi açık olabilir.
- Herhangi iki cihaz arasındaki kablo uzunluğu 4 metre, bütün hat üzerindeki ortalama mesafe 2 metre olabilir.

GPIB üzerindeki cihazlar yıldız ve zincir olmak üzere iki farklı şekilde bağlanabilmektedir. Yıldız bağlantı yapısında her bir cihaz ayrı bir kablo ile doğrudan kontrol birimine bağlanmaktadır. Tüm konektörler tek bir noktada kontrol birimine bağlandığı için her bir kablonun uzunluk sınırlaması da düşünüldüğünde, yol üzerindeki cihazların kontrol birimine yakın olmaları gerekmektedir [42].



Şekil 3.2. Yıldız ve zincir bağlama.

Zincir bağlantıda kontrol birimi de dahil olmak üzere her bir cihaz bir sonraki cihaza bağlanmaktadır. Kontrol birimi herhangi bir yere bağlanabilir. Genelde cihazları bağlamak için kullanılan yol zincir bağlantıdır. Ancak bir cihazın zincirden çıkarılması durumunda yeni bir konfigürasyona ihtiyaç duyulmaktadır. Yıldız ve zincir bağlantıları Şekil 3.2.'de gösterilmiştir [43].

3.2.3. Cihaz Tipleri

GPIB arayüzü veri ve komut iletimi bakımından dört çeşit cihaz grubuna hitap etmektedir.

3.2.3.1. Konuşucular (Talker)

Konuşucu tipi cihazlar sadece hattaki diğer tanımlı cihazlara veri gönderebilen tek yönlü haberleşme tipi cihazlardır. Konuşucu tipi cihazlar herhangi bir veri almazlar. Kontrol biriminden gelen sinyal ile ilgili veriyi yollarlar. Basit Dijital Volt Metreler bu gruba örnek verilebilir.

3.2.3.2. Dinleyiciler (Listener)

Dinleyici tipi cihazlar sadece diğer cihazlardan veri alabilir. Veri alma işlemini kontrol biriminden gelen sinyal ile tetiklendikten sonra gerçekleştirir. Herhangi bir veri yollama işlemi yapamayan bu cihazlara örnek olarak yazıcı, çizici, kayıt edici cihazlar verilebilir.

3.2.3.3. Konuşucular/Dinleyiciler

Konuşucu ve dinleyici cihazların özelliklerini bir arada yapan cihaz grubudur. Ancak iki işi aynı anda yapamamaktadırlar. Örnek olarak yeni nesil DMM'ler verilebilir. Kontrol birimi tarafından ölçme aralığı ve birimi belirlenirken bir dinleyici olarak çalışan bu cihazlar, sonuçları kontrol birimine yollarken bir konuşucu olarak çalışırlar. Yeni nesil cihazların çoğu bu grupta yer almaktadır.

3.2.3.4. Kontrol Birimi

Kontrol birimi GPIB yolu üzerinde meydana gelen her olayı kontrol eder ve yönetir. Genellikle kontrol birimi olarak PC'ler kullanılmakla birlikte mikroişlemci kontrollü bir cihaz yada akıllı programlanabilen bir cihaz da kontrol birimi olabilir. Hangi cihazın

veri göndereceğini, hangi cihazın veri alacağını ve ne zaman olacağını kontrol birimi belirler. GPIB yolu üzerinde konuşma ve dinleme durumunda cihazlar kontrol birimi tarafından adreslenir, işlemler bittiği anda yine kontrol birimi tarafından adresleri iptal edilir [44].

3.2.4. GPIB Adresleme ve Cihaz Haberleşmesi

Kontrol birimi de dâhil olmak üzere GPIB'ye bağlanan her bir cihaza kendine özgü bir adres belirlenir. Adresleme ile veri yolunda bulunan cihazların, gelen veri ya da komutların kendisine geldiğini anlaması sağlanır. Cihaz adresleri verilirken 0 ile 30 arasında tercihe bağlı bir ondalık ifade verilir. Genelde adresler, cihazın arkasında yer alan DIP anahtarı üzerinden ya da kontrol birimi tarafından yazılım üzerinden gönderilen bir komutla verilir.

GPIB üzerinden bir işlemin gerçekleşmesi için ilk önce kontrol birimi tarafından cihazlar adreslenmelidir. Bir cihazı adreslemek ve yol üzerindeki haberleşmede yer almasını sağlamak üzere, kontrolör gerekli cihaza Şekil 3.3.'te gösterilen bir byte'lık adres komutunu gönderir.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Veri	0	TA	LA	GPIB Adresi				

Şekil 3.3. Adres komutunun yapısı.

0 ile 4 arasında olan bitlerde, haberleşmede kullanılan cihazın GPIB adresi binary (ikili) olarak bulunmaktadır. Kullanılan cihazın dinleyici veya konuşucu olması durumuna göre 5. ve 6. adresler LA ve TA olarak ayarlanır. 7. bit dikkate alınmayan bit olarak değerlendirilir ve sıfır sayılır.

Bir cihazın ayrıca ikinci bir adresi daha olabilir. İkinci adres hexadecimal olarak 60 ile 7E arasında ifade edilmektedir. Cihaz adreslenmesinde ikinci bir adres kullanılacaksa, öncelikle birincil GPIB adresi ve sonra ilgili ikinci adres gönderilir. İkincil adreslemeyi kullanarak 961 adede kadar konuşucu ve dinleyici adresi atanabilir. Haberleşmede kullanılan çoğu cihaz ikinci adresi kullanmamaktadır.

Adreslenen cihazlarda iki mesaj türü üzerinden haberleşme gerçekleştirilir. Bunlardan birincisi verilerin iletimini sağlayan “veri mesajları”, diğeri ise cihazların hangi görevi icra edeceklerini belirleyen “komut mesajlarıdır”. Veri mesajları ile komut mesajlarının bir anda paralel olacak şekilde iletilmesi GPIB’nin paralel haberleşme protokolü olarak tanımlanmasını sağlar [44].

3.3. Cihaz Komut Standartları

Cihazlara işlem yaptırmak için, cihazlara anlam ifade eden kodların yollanması gereklidir. IEEE 488.2 ile bazı genel kodlar bir standart haline getirilmiş olmasına rağmen, cihazların işlemlerine özgü kodlarda bir standartlaşma olmamıştır. Cihaz üreticileri ilk zamanda kendi kod sistemlerini geliştirmişlerdir.

Farklı üreticilerin aynı işlemi yapan cihazlarının farklı kodlarla çalışması, SCPI komut standardının geliştirilmesine yol açmıştır. SCPI ile aynı fonksiyonları icra eden cihazlar ortak bir komut kümesi ile çalışabilir hale gelmiştir.

Yazılım teknolojisinin gelişmesi ile cihaz sürücüleri (instrument drivers) oluşturulmaya başlanmış, VXIplug-play ile yazılım mimarileri ilk kez tanımlanmıştır. Son olarak yazılım teknolojisinin hızlı ilerleyişi karşısında cihaz komut sistemlerinin ve sürücülerinin de gelişmesi ile birlikte, “cihazların değiştirilebilirliği” felsefesine dayalı IVI komut standartları ve sürücüleri tasarlanmıştır.

3.3.1. Tek Bir Cihaza Yönelik Komut Standartları

İlk oluşturulan komutlarda evrensel bir standartlaşma söz konusu olmadığından, cihaz üreticileri kendi komut sistemlerini geliştirmişlerdir. Cihaza özgü komut standartları genellikle eski nesil cihazlarda ve çok spesifik bazı cihazlarda bulunmaktadır. Bu tip komut standartlarının kullanımı, eski nesil cihazların günümüzdeki üretiminde de, kullanıcının komut sistemine aşinalığı dikkate alınarak halen devam ettirilmektedir.

Tezin örnek uygulamasında kalibrasyonu yapılacak cihaz olan Agilent 3458 (HP 3458) multimetre de kendine özgü bir komut sistemine sahiptir. Cihaz sekiz buçuk dijitlik referans DMM olarak günümüzde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak ilk üretiminde henüz SCPI komut standardı olmadığı için kendi komut sistemi üzerine

kurulmuştur. Cihaza asıl işlemleri yaptıran komutlar ölçüm fonksiyonlarının komutlarıdır. Tablo 3.2.'de cihazın ölçüm komutları ve içerikleri verilmiştir [45].

Tablo 3.2. Agilent 3458 DMM'in ölçüm komutları.

Komut	**Açıklama**
DCV	DC voltaj ölçümü
ACV	AC voltaj ölçümü
ACDCV	AC + DC voltaj ölçümü
OHM	İki kablolu direnç ölçümü
OHMF	Dört kablolu direnç ölçümü
DCI	DC akım ölçümü
ACI	AC akım ölçümü
ACDCI	AC + DC akım ölçümü
FREQ	Frekans ölçümü
PER	Periyot ölçümü
DSAC	Doğrudan örneklemeli AC kuplajı
DSDC	Doğrudan örneklemeli DC kuplajı
SSAC	Alt örneklemeli AC kuplajı
SSDC	Alt örneklemeli DC kuplajı

Cihaz bir komut sistemini referans gösteremediğinden cihazın komut sistemi kullanıcı kılavuzlarında detaylı olarak anlatılmıştır. Cihazın kullanıcı kılavuzunda yer alan komut referansı bölümünde, komut yapısı ve sentaks kuralları, komut açıklamaları, parametreler, sorgu komutları, fonksiyon komutları ve ölçümleme işlemleri ile ilgili komutların kullanımı hakkında bilgilere yer verilmiştir [45].

Agilent 3458 DMM'in komut sistemi tek komut, birleşik komut ve sorgulama komutlarından oluşmaktadır. Komutlar bazı sentaks kurallarına sahiptir ve uygulanmadığı durumda cihaz hata verir, işlem yapmaz;

- Komutların büyük harf küçük harf duyarlılığı vardır. Komutlar büyük harflerle yazılmalıdır.

- Birleşik komutlar tek bir komut metninde birden fazla komutu içerir. Birleşik komutlar ‘;’ noktalı virgülle birbirinden ayrılmaktadır.

  Örnek olarak "TRIG HOLD;DCV 3;NPLC 10" komutu bileşik bir komuttur.

- Komutların aldığı parametreler boşluk ile ayrılır. Parametreler duruma göre tamsayı, ondalık ya da üstel formatta olabilir. Ancak komut tamsayı parametre gerektiriyorsa, ondalık sayılar yuvarlanır.
- Sorgulama komutları soru işareti ‘?’ ile sonlanır. Cihazın kimliğini sorgulayan “ID?” gibi [45].

3.3.2. SCPI Komut Standardı

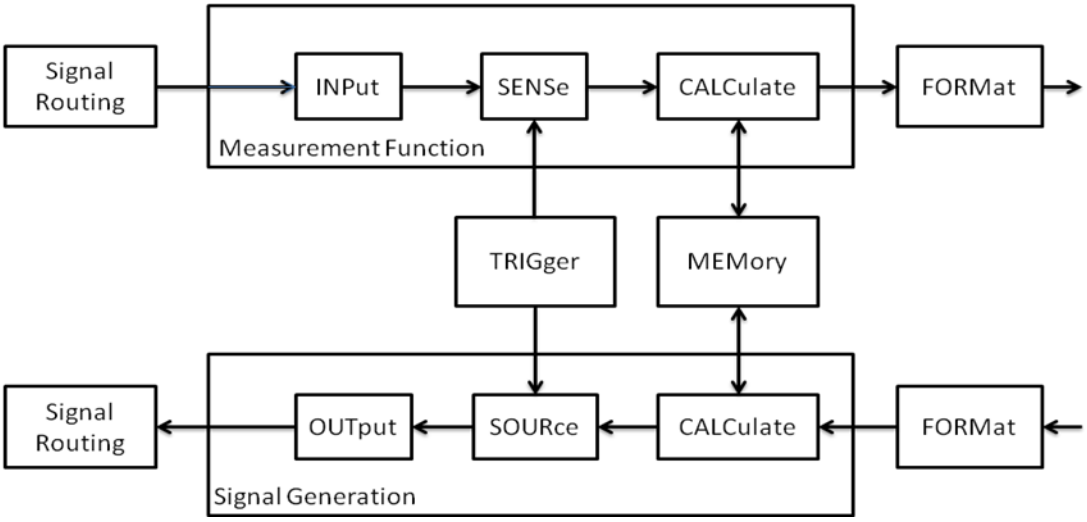
1990 yılında cihaz üreticilerinin farklı kod sistemleri kullanmasından kaynaklanan sorunları çözmek için SCPI komut sistemi tasarlanmıştır. SCPI komut sisteminin felsefesi, aynı fonksiyonlar icra eden cihazları aynı komutlarla kontrol etmektir [3].

3.3.2.1. SCPI Komut Modeli

SCPI komut sisteminin ana modeli cihazdan gelmektedir. Cihazlar ölçüm ve üretim fonksiyonuna göre iki alt sistemde modellenmişlerdir. Ölçüm fonksiyonunda (measurement function) sinyalin girişi (input) ile başlayan algılama (sense) süreci, hesaplama (calculate) ile devam etmekte ve sonuç biçimsel (format) olarak düzenlenerek çıktı alınmaktadır.

Algılama süreci ana ölçümün yapıldığı yerdir. Burada ölçümü başlatan tetikleme (trigger) de modele girmektedir. Her bir tetikleme ayrı bir ölçüm sürecini başlatmaktadır. Hesaplama sürecinde ise hafızalama (memory) modele girmektedir. Böylece yapılan ölçümlerden elde edilen veriler hafızada saklanmaktadır.

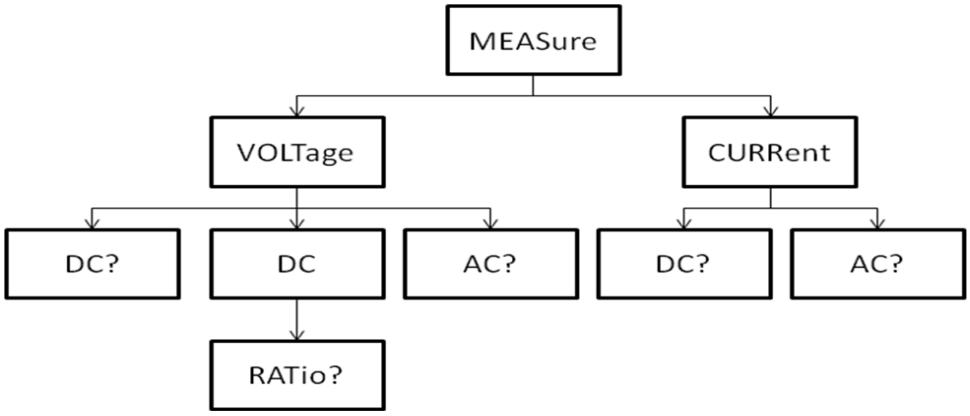
Sinyal üretim (signal generation) fonksiyonunda ise süreç ölçümlemenin ters yönünde çalışmaktadır. Verilen bilginin cihazın anlayacağı biçime çevrilmesi ile başlayan süreç bilginin hesaplanması ve kaynaktan (source) çıkışın (output) sağlanması ile devam etmektedir. Burada kaynaktan sinyalin çıkışı (signal routing) ana süreçtir ve her bir tetikleme ile ayrı bir sinyal çıkışı oluşmaktadır. SCPI cihaz modeli Şekil 3.4.’te gösterilmiştir [3].



Şekil 3.4. SCPI cihaz modeli.

3.3.2.2. SCPI Komut Yapısı

SCPI cihaz modeli, ana komut kategorileri için yatay ve dikey fonksiyonel blokları tanımlar. Ana kategoriler komut ağacı olarak adlandırılan ve gerçekleştirilecek fonksiyonun belirli ayrıntılarını içeren alt komutlardan, parametrelerden ve seçeneklerden oluşur. SCPI standardında multimetreler için tanımlanmış ölçüm fonksiyonunun komut ağacı Şekil 3.5.' de verilmiştir [3].



Şekil 3.5. SCPI komut ağacı örneği.

Tablo 3.3. Zorunlu IEEE 488.2 komutları.

Komut	Tanım
*CLS	Durum Temizleme
*ESE	Olay Durum Etkinleştirme
*ESE?	Olay Durum Etkin Sorgusu
*ESR?	Olay Durum Kaydı Sorgusu
*IDN?	Kimlik Sorgusu
*OPC	İşlem Tamam
*OPC?	İşlem Tamam Sorgusu
*OPT?	Seçenek Tanımlama Sorgusu
*RCL	Geri Çekme
*RST	Reset
*SAV	Kayıt
*SRE	Hizmet İsteği İzni
*SRE?	Hizmet İsteği İzni Sorgusu
*STB?	Durum Byte Okuma Sorgusu
*TST?	Test Sorgusu
*WAI	Bekleme

3.3.2.3. SCPI Sentaks Kuralları

İki nokta üst üste (:) ile komut ağacının katmanları ayrılmaktadır. Komutlar arasına iki nokta üst üste konulması ile bir alt komuta geçilmektedir.

Noktalı virgül (;) ile aynı katmana ait olan birden fazla komut birbirinden ayrılmaktadır. Noktalı virgül kullanımı komut katmanını değiştirmemektedir.

Virgül (,) ile komutun birden fazla parametresi birbirinden ayrılmaktadır. Virgül ile komut değişmemekte sadece parametreler değişmektedir.

Boşluk (tab, space) ile komut ve parametreler birbirinden ayrılmaktadır.

Soru işareti (?) ile cihazdan sorgulama yapılması sağlanmaktadır. Sorgulama komutu ile cihazdan bir cevap beklenmeli, cevabı okumadan bir başka sorgulama komutu yollanmamalıdır.

Yıldız (*) ile IEEE 488.2'nin ortak komutları başlatılmaktadır [44].

3.3.2.4. SCPI'nın kullandığı ortak IEEE 488.2 komutları

SCPI komut sistemi IEEE 488.2 üzerine kurulmuştur. Bir cihazın SCPI desteklemesi için, minimum şart olarak IEEE 488.2'de tanımlanan tüm cihazlarda kullanılan ortak ve zorunlu komutları içermesi gerekmektedir. IEEE 488.2 zorunlu komutları cihazların fonksiyon komutlarını içermemektedir. Cihaza reset, test, etkin kılma, tanımlama, eş zamanlı çalışma, raporlama gibi program komutlarını ve durum sorgulamalarını yaptırmaktadır. Zorunlu IEEE 488.2 komutları Tablo 3.3.'te verilmiştir [3,44].

3.3.3. IVI Standartları

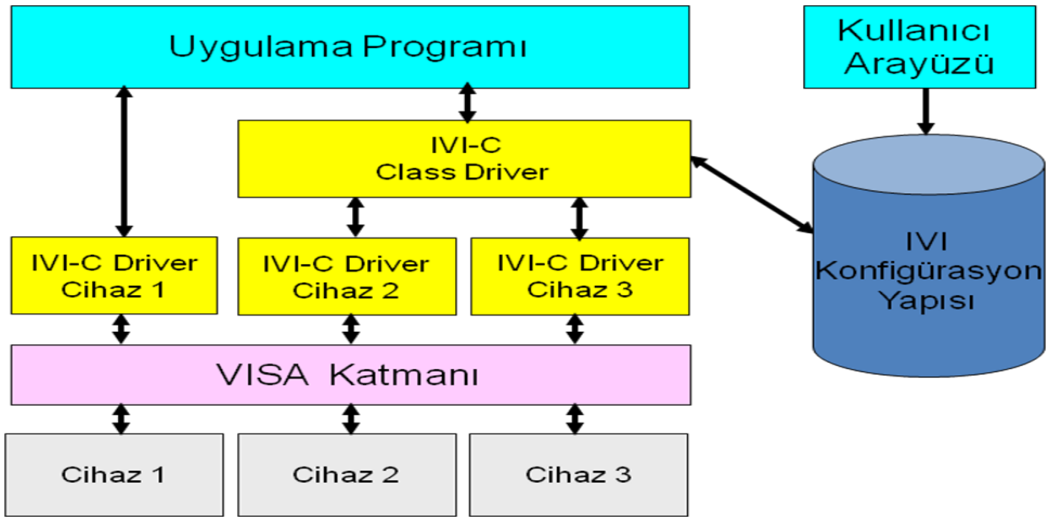
1993 yılında VXIplug&play organizasyonu, SCPI komutlarını taban kullanarak cihaz sürücüleri oluşturmaya başlamıştır. Ancak VXIplug&play tarafından oluşturulan sürücüler cihazların fonksiyonlarını tam olarak ifade edememektedir. VXIplug&play daha çok cihazlarla haberleşme üzerine durmuş, GPIB, VXIBus, RS-232 gibi I/O arayüzlerini kullanabilmek amacıyla ortak yazılım mimarileri tanımlanmıştır [46].

1998 yılında cihaz üreticileri, yazılım geliştiriciler, cihaz kullanıcıları ve cihaz, sistem tedarik ve entegrasyon sürecindeki kişilerin bulunduğu bir konsorsiyum ile Değiştirilebilir Sanal Enstümanlar (IVI, Interchangeable Virtual Instruments) kuruluşu oluşturulmuş ve SCPI ile VXIplug&play'in tanımladıkları standartları geliştirerek, cihaz sınıflarına özgü sürücüler gerçeklenmeye başlanmıştır [46].

3.3.3.1. Cihaz Sınıfları

IVI, cihazları fonksiyonel özelliklerine göre sınıflara ayırmış ve bu cihaz sınıfları için ortak komutların oluşturulduğu sürücüler tanımlamıştır. Örneğin bir DMM sınıfında ortak olarak bütün cihazlar DC voltaj ölçümü yapmaktadır. IVI standardı bu şekildeki ortak komutlara yönelik yazılım tabanlı ortak sürücüler oluşturmaktadır. Günümüzde IVI kuruluşunun oluşturduğu dokuz adet sınıf mevcuttur; Güç Kaynağı, Dijital Multi

Metre (DMM), Fonksiyon Üreteci, Osiloskop, Güç Ölçer, RF Sinyal Üreteci, Spektrum Analizörü, Anahtarlama, Sayıcı/Zamanlayıcı [47].



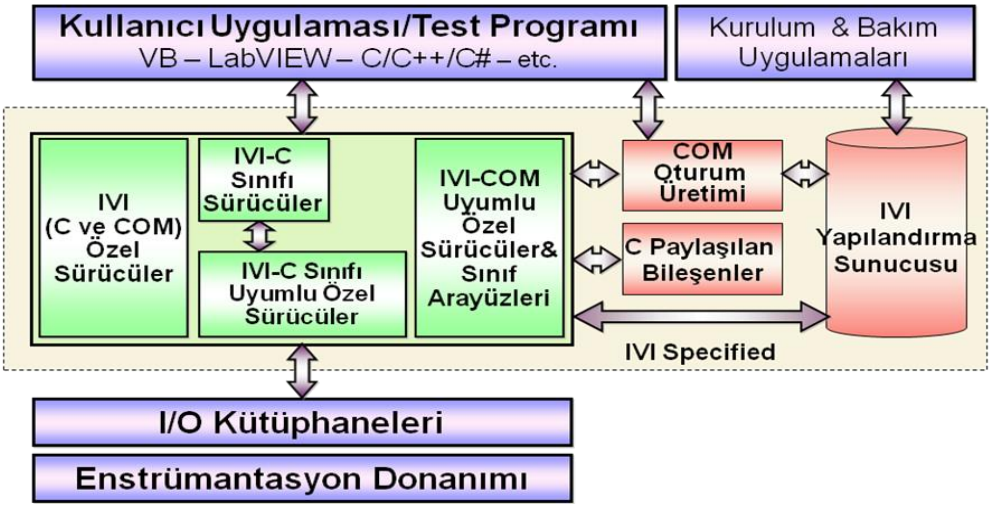
Şekil 3.6. Cihaz sınıflarının kullanımı.

Şekil 3.6.'da bir test sistemi uygulamasının yazılım mimarisi verilmiştir. Cihaz 2 ve Cihaz 3 aynı fonksiyonları işleyen cihazlar olduğu için, ortak tanımlanmış sınıf sürücüsü üzerinden kontrol edilmektedir. Cihaz 1 ise farklı bir fonksiyonları yöneten cihaz olarak direk kendi sürücüsü ile kullanılmıştır. Cihazlara IVI komutlarını yollamak için gerekli yolu oluşturan VISA katmanı mimariye eklenmiştir.

IVI standartlarının sistemde kullanılabilmesi için sürücülerin dinamik kütüphanelerinin (.dll) yüklenmesi gerekir. Kütüphaneler, IVI kuruluşunun resmi internet sitesi olan www.ivifoundation.org'da ücretsiz olarak temin edilebilmektedir [25].

3.3.3.2. IVI-C ve IVI-COM Sürücüleri

IVI standartları ile SCPI ortak komutlarının dil seviyesi arttırılmıştır. Böylece SCPI standartlarının en büyük sorunu olan kodlama hataları azaltılmıştır. IVI'nin IVI-C ve IVI-COM olmak üzere iki ayrı sürücü mimarisi vardır. IVI-C programlama dili olarak ANCI-C tabanlı dillere hitap etmektedir. IVI-COM ise yeni nesil nesneye yönelik programlama dillerinin IVI standardı ile uyumunu sağlamaktadır. Nesneye yönelik programlama dillerinin sınıflandırma felsefesi IVI-COM'da da kullanılmıştır [48].



Şekil 3.7. IVI mimarisi.

IVI-COM tabanlı sürücülerle kullanıcı dostu programlama çok rahat yapılabilmekte, kod yazımında IntelliSense özelliği ile dili kolay kullanabilme, sınıf ve kanal felsefesini etkin bir şekilde kullanabilme gibi özellikleri ile nesneye yönelik programlamanın bütün avantajları kullanılabilmektedir [49]. Şekil 3.7.'de IVI standartlarının mimari yapısı gösterilmektedir.

IVI kuruluşunun oluşturduğu standartların ücretsiz olması, geniş bir üretici desteği ile tarafsız olması, oluşturulan standartların ve sürücülerin bilimsel çalışmalarda da tercih edilmesini sağlamaktadır. ARGE çalışmaları ya da laboratuar çalışmalarında IVI standartları etkin bir şekilde kullanılabilmektedir [50].

3.3.3.3. IVI Standartlarının Faydaları

IVI standartlarının test ve ölçüm sistemlerine kattığı faydalar üç ana başlık altında, cihazların değiştirilebilirliği, cihaz simülasyonu ve durum önbelleklemesi ile performans artırımı olarak sıralanabilir [51].

Şüphesiz ki IVI standartlarının oluşturduğu en büyük avantaj cihazların değiştirilebilirliği özelliğidir. IVI standartları test ve ölçüm yazılımında çok az değişiklikle ya da hiçbir değişiklik yapmadan donanımsal olarak cihazların değiştirilebilmesini amaçlamaktadır [52]. Değişimler aynı fonksiyonları işleten cihaz sınıfları içerisinde mümkün olmaktadır. Farklı üreticilerin IVI standartlarını destekleyen aynı sınıf cihazları, herhangi bir arıza, performans artırımı ya da cihaz yenileme

durumlarında yazılımsal olarak değişiklik yapmadan değiştirilebilir kılınmaktadır. Bu özellik ile yazılım geliştiricileri bir cihaz değişiminde yazılıma herhangi bir müdahalede bulunmamaktadır. Örneğin sistemin yazılım tabanında Tektronix marka TDS210 osiloskopu yönetmek amacı ile IviScope_init sürücüsü kullanılmış ise cihazda herhangi bir sorun olması durumunda yada performans yükseltilmesi istendiğinde, cihaz aynı sürücünün desteklediği National Instruments firmasının bilgisayar tabanlı 5102 model osiloskopu ile değiştirilebilir. Cihazların takas edilme özelliği yazılım geliştirme grubuna da ortak bir avantaj sunmaktadır. Cihaz geliştiricilerinin sistemde kod değişimine gitmeden eşzamanlı olarak cihaz ekleme çıkarma durumunu sağlamaktadır. Bir test sistemini birden fazla geliştiricinin oluşturduğu düşünüldüğünde ve her birinin aynı cihazlara kodlarla müdahale ettiği bir durumda, bu avantaj ile yazılım geliştirici diğer çalışanların oluşturduğu kodlara herhangi bir müdahaleye gerek duymadan cihaz değişimine uygun kodlar kullanabilmektedir. Böylece çalışma grubunun esnekliği ve hızı artmaktadır [51].

IVI standardının cihaz değiştirilebilirliği özelliği ile uzun süreç bakım onarım maliyeti en aza indirilmektedir. Cihazların arıza veya eskimeden dolayı kullanım dışı olması durumunda yazılım kodlarına hiçbir müdahale etmeden ya da çok az bir değişiklik yaparak donanımsal olarak aynı standartları destekleyen cihazlar kolaylıkla yer değiştirebilir. Böylece, yazılım tabanlı maliyetler ve iş gücü en aza indirilir [52].

IVI standartlarının oluşturduğu bir başka avantaj ise cihaz simülasyonudur. IVI cihaz sürücüleri ile uygun programlar kullanılarak, cihaz gerektirmeden simülasyon yapılabilmektedir. Cihaz simülasyonu kullanılarak kodların testi ve geliştirilmesi cihazsız olarak gerçeklenmektedir. Yazılım konfigürasyon adımları sürücüler ile hazırlanmakta ve komutlar sonucunda cihazın vereceği cevaplar da üretilmektedir. Sonuç olarak IVI'nin cihaz simülasyonu ile kod geliştirme ve test sürecinde donanımsal maliyet etkin bir şekilde azaltılmaktadır [52, 53].

IVI standartlarının oluşturduğu diğer bir avantaj ise, durum önbelleklemesi yaparak kontrol birimi ile cihaz arasındaki gereksiz I/O işlemleri en aza indirilerek sistem performansının artırılmasıdır. Sistemin performansı artırımında, kanal güvenliği sağlanarak bir anda birden çok kanalın iş yapabilmesi durumu da söz konusudur [54,55].

3.3.4. VISA I/O Mimarisi

Cihazları işlem yaptıracak komutlar IVI veya SCPI tabanlı standartlarla oluşturulmasına müteakip cihazlara göndermek amacıyla sanal bir yol oluşturmak gerekmektedir. Sanal Cihaz Yazılım Mimarisi (Virtual Instrument Software Architecture, VISA) standardı cihazlar ile PC arasında sanal yolu oluşturan programlama protokolüdür. VISA, diğer sürücülerle oluşturulan komutları çağırır ve cihazlara yollar. VISA, donanımsal ara yüz tipine de bağlı değildir. Seri, GPIB veya VXI gibi arayüzlerde aynı yöntemle çalışır [56].

3.4. Ana Yazılım Programı

Gerek SCPI komutlarını gerekse IVI komutlarının hazırlanması ve bu komutların cihazlara gönderilmesini sağlayan sanal yolların oluşturulması için bir programlama dili desteğine ihtiyaç vardır. Ayrıca bu programlama dili üzerinden kullanıcı grafik arayüzü de hazırlanacak ve kullanıcıya sunulacaktır. Kullanıcın yazılım bilgisine ve kullanım alanına göre herhangi bir programlama dili tercih edilebilir. Seçilen yazılımın bir yandan cihazla haberleşmeyi sağlayıp verileri hafızaya aktarırken diğer yandan verilerin işlenip kullanılabilir olarak sunmayı sağlamalıdır.

Veri ediniminde çeşitli yazılımlar kullanılmakla birlikte, cihazdan alınan verilerin kullanım alanına göre bir yazılım seçilmesi daha faydalı olacaktır. Örneğin, matematiksel işlemlerde kullanacak veriler için MATLAB gibi bilimsel yazılımların tercih edilmesi gibi [57, 58]. Uygulamada görsel bir arayüz sunulması durumunda Visual C#, Visual Basic veya JAVA gibi nesneye yönelik programlama dilleri tercih edilmektedir. Uygulamanın, LABVİEW gibi veri edinimine yönelik grafiksel arayüzler sunan yazılımlarla ya da üretici firmaların oluşturduğu kendi işlevlerine özgü programlarla gerçekleştirme imkânı da vardır.

Bu tezin örnek uygulamasında kullanıcı dostu, görsel bir arayüz tasarımı tercih edilmiş ve ana program Microsoft Visual Studio 2008 kullanılarak tasarlanmıştır.

4. BÖLÜM

KALİBRASYON OTOMASYONU UYGULAMASI

4.1. Giriş

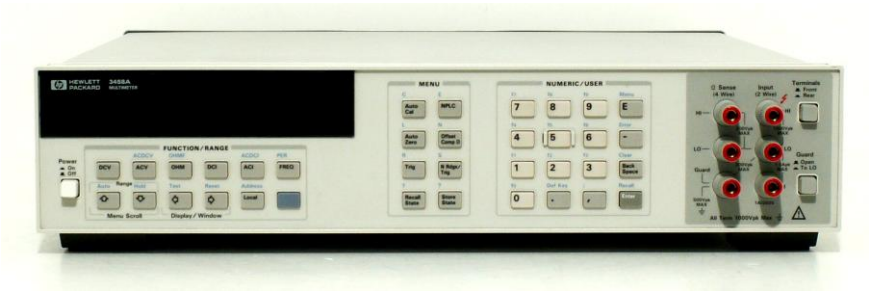
Kalibrasyon otomasyonu, yazılım ve donanım bileşenleri kullanılarak cihazlarla bağlantı sağlayıp, kalibrasyon işlemlerinin bilgisayar üzerinden gerçekleştirilmesidir. Bu çalışmadaki kalibrasyon otomasyonun amacı, 8½ dijit dijital multimetrenin (DMM) kalibrasyonunun otomatik hale dönüştürülmesidir.

Uygulamada 8½ dijit Agilent 3458A (HP 3458) marka DMM'in kalibrasyonunun otomasyonu gerçeklenmiştir. Kalibrasyonu yapılacak DMM Şekil 4.1.'de gösterilmiştir. DMM'in kalibrasyonu, üretici değerleri ve EURAMET/cg-15 dokümanına göre belirlenmiş noktalarda referans kalibratörden ve sinyal kaynağından uygulanan değerlerin doğrudan cihaz tarafından ölçülmesi suretiyle gerçekleştirilmiştir [59].

Ayrıca yapılan kalibrasyonun askeri standartlara uygunluğunu sağlamak için, Amerikan Hava Kuvvetleri Metroloji ve Kalibrasyon Programı (AFMETCAL)'nın T.O.33K8-4-551-1 numaralı teknik dokümanı referans alınmıştır [60].

Hızlı ve güvenilir bir kalibrasyon için cihazın kalibrasyon prosedürleri ISO 17025 standardının belirlediği çerçevede otomasyon uygulaması haline getirilmiştir. Kalibrasyon laboratuarları için gerekli standartların belirtildiği ISO 17025 standardı, kalibrasyon

prosedürlerin yazılım destekli uygulamalara dökülmesini kabul etmektedir. Ancak hazırlanan otomasyon sisteminin sonuçları manuel sonuçlarla doğrulanmalıdır [9].



Şekil 4.1. Agilent 3458A (HP 3458) dijital multimetre [9].

Cihazın kalibrasyonunda prosedürlerin önerdiği referans değerler üreten cihazlar olarak Fluke 5720A model çok fonksiyonlu kalibratör ile Agilent 33250A model sinyal üreteci kullanılmıştır. Şekil 4.2.'de Fluke 5720A model çok fonksiyonlu kalibratör, şekil 4.3.'te ise Agilent 33250A model sinyal üreteci verilmiştir.



Şekil 4.2. Fluke 5720A çok fonksiyonlu kalibratör [61].

Fluke 5720A referans kalibratörü, DMM'in gerilim, akım ve direnç fonksiyonları için gerekli standart değerler üretmektedir [61].

Agilent 33250A sinyal üreteci, DMM'in frekans fonksiyonu için gerekli standart değerler üretmektedir [62].



Şekil 4.3. Agilent 33250A Sinyal Üreteci [62].

Cihazın kalibrasyonu gerçekleştirilen alt fonksiyonları aşağıda sıralanmıştır.

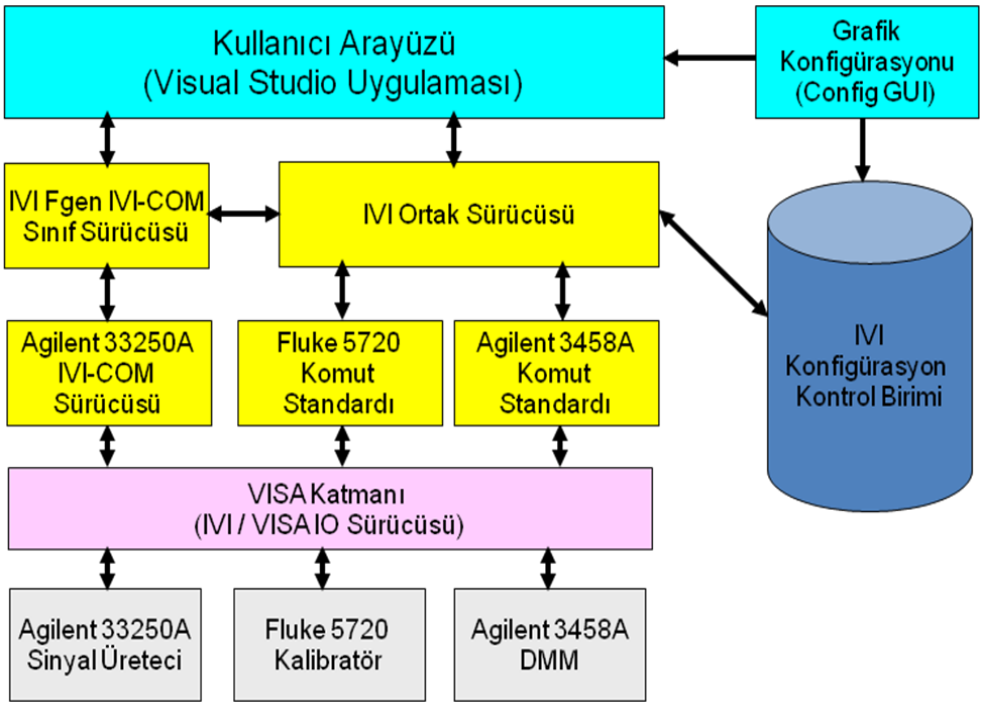
- Ofset
- DC Gerilim
- AC Gerilim (Senkron, Analog)
- DC Akım
- AC Akım
- Direnç (4 telli, 2 telli)
- Frekans

4.2. Kalibrasyon Sisteminin Kurulumu

Uygulama, üçüncü bölümde açıklanan kontrol birimi, arayüz donanımı ve yazılım başlıkları altında oluşturulmuştur. Uygulamada, standart donanımlara sahip bir PC kontrol birimi olarak kullanılmıştır. Arayüz donanımı olarak ise, cihazların desteklediği arayüzler incelenmiş ve üstünlüklerinden dolayı GPIB arayüzü tercih edilmiştir. Uygulamanın yazılım ayağında ise kontrol arayüzü tasarımı, prosedürlerin koda dökülmesi ve verilerin işlenmesi gibi ana görevlerin gerçekleştirileceği bir platform olarak Microsoft Visual Studio 2008 kullanılmıştır. Bu yazılım platformunun seçimindeki ana sebep, platformda IVI standartlarının kullanımının kolaylığıdır. Diğer yandan cihazların kontrolü amacıyla sisteme IVI standartlarının ilgili sürücüleri tanıtılmış ve işlemler bu sürücüler üzerinden koda dökülmüştür.

4.2.1. Yazılım Tabanı

Agilent 3458A DMM'inin kalibrasyonu amacıyla oluşturulacak programın alt yapısı IVI standartları kullanılarak hazırlanmıştır. Kalibrasyonu yapılacak cihazı ve referans değerler üreten cihazları yönetmek için IVI tabanlı yazılım mimarisi Şekil 4.4.'de verilmiştir.

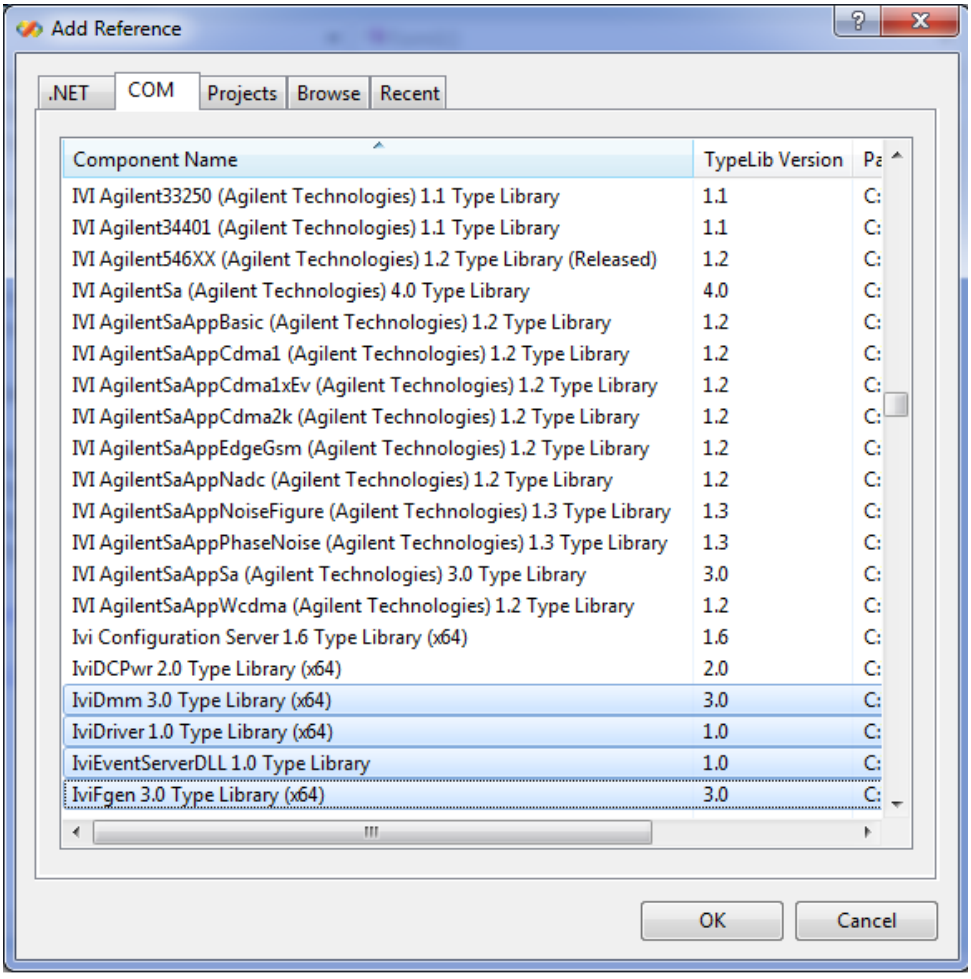


Şekil 4.4. Uygulamanın yazılım, sürücü ve standart mimarisi.

Kullanıcı arayüzünün de oluşturulduğu ana program üzerinden cihazlarla haberleşmenin sağlanması amacıyla, cihazların desteklediği sürücülerin tanımlanması gerekmektedir. Fluke 5720A kalibratör ile Agilent 3458A DMM'in haberleşmesi IVI ortak sürücüsü üzerinden cihazlarının kendine has komutlarının yollanması ile gerçekleştirilmektedir. Agilent 33250A sinyal üretecinin haberleşmesi ise, IVI'nin desteklediği IVI COM tabanlı sinyal üreteci sınıfı (Fgen) üzerinden gerçekleştirilmektedir.

Cihazlarla haberleşmeyi sağlayacak önemli bir yapı da arayüz donanımı üzerinde sanal yolu oluşturacak VISA katmanıdır. Bu katman da IVI'nin standartlarında bulunan VISA sürücüsü ile oluşturulmuştur. Diğer yandan cihaz sürücülerinin sistemle konfigürasyonunu sağlayan konfigürasyon kontrol birimi ile kullanıcı arayüzünü oluşturan grafiksel konfigürasyon birimi yazılım sisteminin destek ünitelerini oluşturmaktadır.

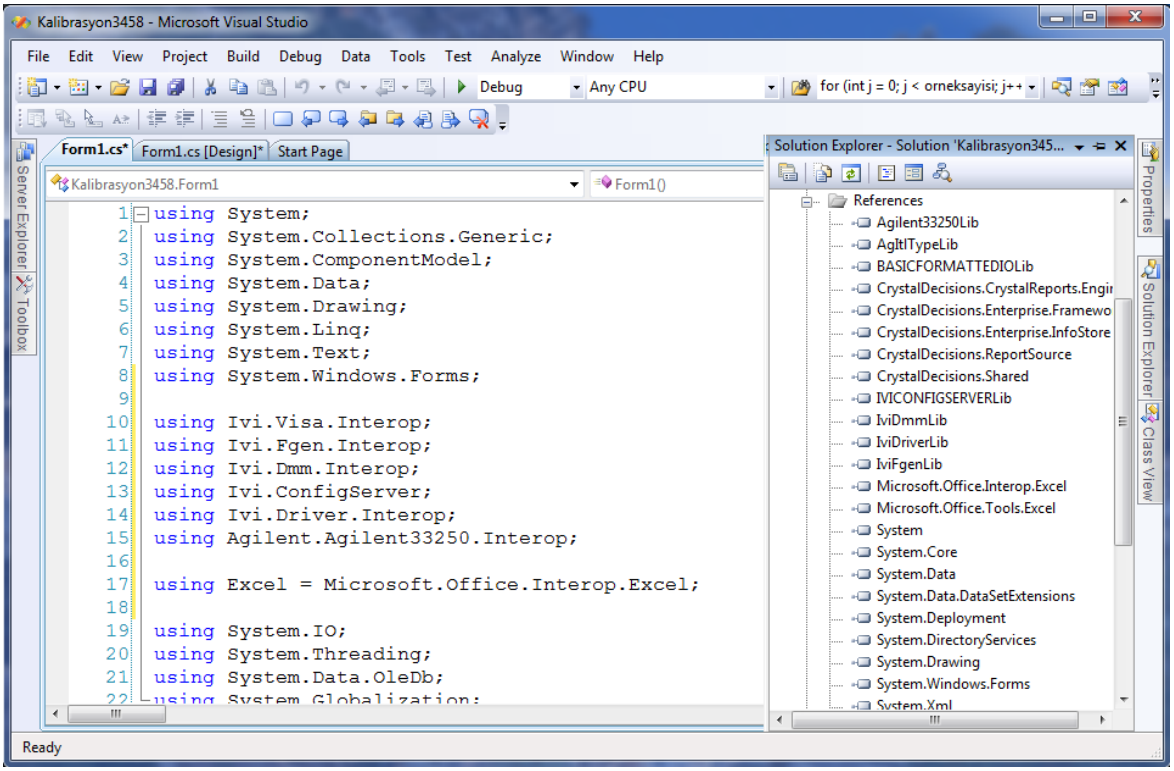
Sürücülerin programda kullanılabilmesi için yazılım tabanında referans olarak gösterilmelidir. Referans gösterilen sürücülerin kullanılacağını belirten ifadeler de koda eklenmelidir. Şekil 4.5.'de Visual Studio 2008 tabanlı yazılım geliştirme platformunun referans sürücü ekleme penceresi verilmiştir. Daha önce IVI kuruluşunun sitesinden ücretsiz olarak indirilmiş ve kontrol birimi olarak kullanılacak PC'ye kurulumları yapılmış olan sürücüler referans ekleme penceresinden, yazılım tabanına eklenmektedir.



Şekil 4.5. Visual Studio 2008 referans ekleme penceresi.

Eklenen sürücüler programda kullanılabilir hale gelmiştir. Ancak nesneye yönelik programlama dili olan Visual Studio 2008 yazılım geliştirme platformu, sürücülerin nesne

ve sınıflarını kullanabilmek için kod olarak tanımlanmasını istemektedir. Son olarak, kod geliştirme ortamında sürücüleri kullanmak için gerekli kodlar eklenmiştir. Sürücüleri tanımlayan komut satırlarını ve eklenmiş referansları kontrol penceresini içeren yazılım geliştirme ekranı Şekil 4.6.'da verilmiştir.

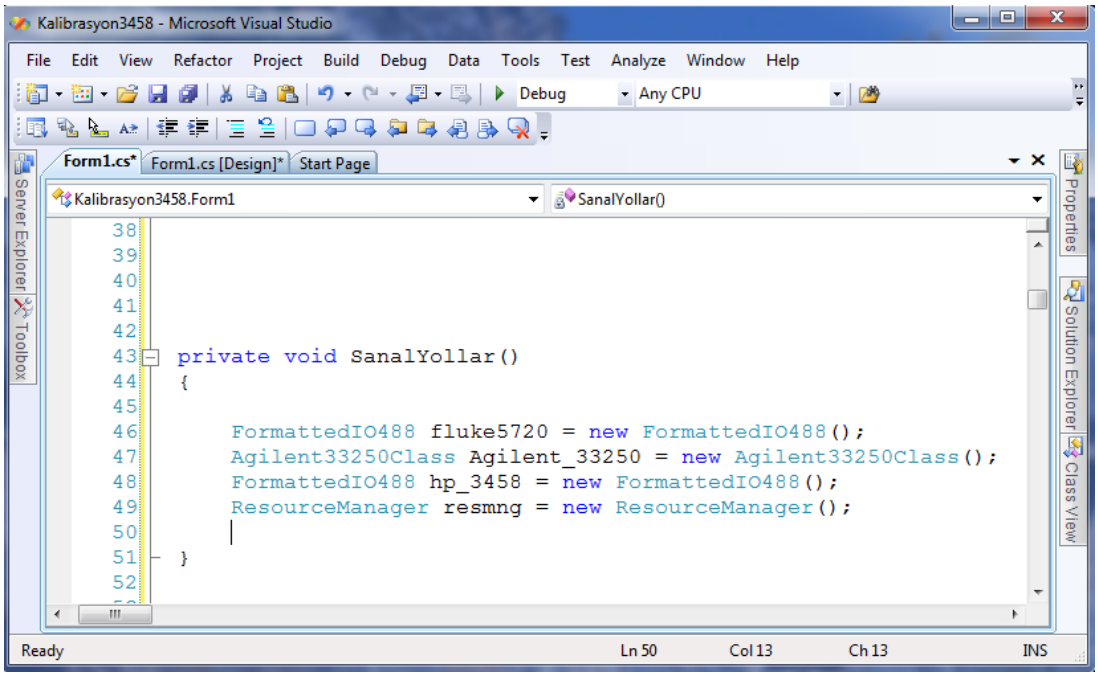


Şekil 4.6. Referans sürücülerin tanımlandığı yazılım geliştirme ekranı.

İlgili sürücülerin tanımlanmasının ardından, yazılım tabanında cihazlara komutların gönderileceği IVI tabanlı sanal yolların oluşturulması gerekmektedir. Agilent 3458A DMM'in ve Fluke 5720A kalibratörün sanal yolları IVI-VISA sürücüsü, Agilent 33250 sinyal üretecinin sanal yolu ise IVI COM tabanlı Agilent 33250 sürücüsü ile oluşturulmuştur.

Şekil 4.7.'de sanal yolları oluşturulduğu kod dizlerini içeren yazılım geliştirme ekranı verilmiştir. Sanal yolların ve kaynak yöneticisinin oluşturulması ile sistem, sanal yolların arayüz adreslerinin girilmesine müteakip, cihazlara komut yollayacak duruma gelecektir.

Cihazların GPIB arayüz adreslerinin girilmesi ve kontrol komutları olarak ilk komutların yollanması cihaz kontrol fonksiyonunda yapılmaktadır.



Şekil 4.7. Sanal yolların ve kaynak sürücüsünün oluşturulması.

4.2.1.1. Parametrelerin ve Ölçüm Noktalarının Oluşturulması

Ölçümlerde kullanılacak **parametreler**, duruma göre değiştirilebilmesini sağlamak amacıyla global değişkenler olarak tanımlanmıştır. Parametreler, örnekleme sayısı, şebeke frekansı çevrim sayısı (Number of Power Line Cycles, NPLC), zaman ifadeleri gibi değişkenlerdir.

Ölçümlerde kullanılacak **ölçüm noktaları** EURAMET/cg-15 standardında belirlenen noktalar referans alınarak oluşturulmuştur. Cihazlar komutlarda kullanılan parametreleri metinsel (string) ifade olarak kabul ettikleri için ölçüm noktaları da metinsel değişkenler olarak tanımlanmıştır. Ölçüm noktaları ile birlikte ölçüm bölgeleri (range) de tanımlanmıştır. Tanımlanan değerler ileride döngülerde kullanılması amacıyla dizi şeklinde oluşturulmuştur. Direnç ölçümü değerlerinin tanımlanmasında, kalibratörün değerlerinin

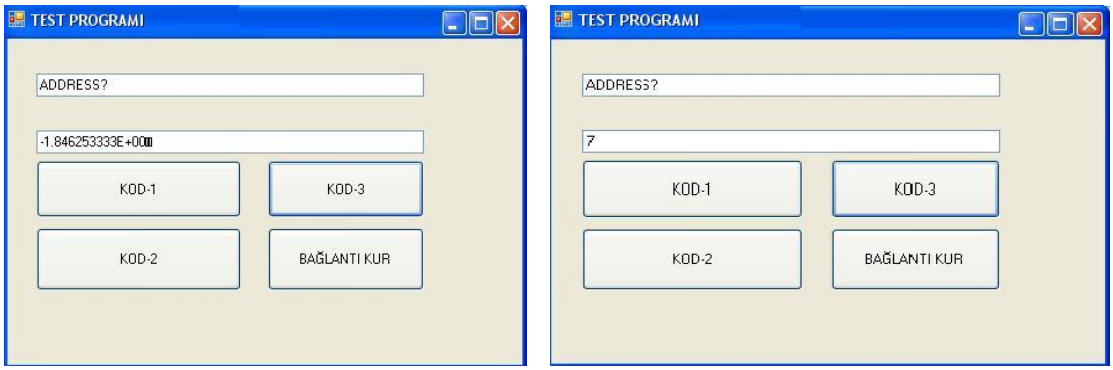
sabit direnç değerleri ile uymamasından dolayı kalibratör değerleri direnç değişken dizisine girilmiştir.

4.2.1.2. Kod Yazımında Dikkat Edilen Hususlar

Cihazlara bütün işlemler yazılım aracılığıyla yaptırılacağı için sistemin yazılımı en önemli süreçlerden biridir. Diğer programlama yazılımlardan farklı olarak otomasyon sisteminde cihazlara işlem yaptırırken cihazların tepkilerini ve tepki sürelerini kontrol etmek önemli ve zor bir süreçtir. Cihaza herhangi bir komut yollandığında, işlem bitmeden başka bir komutun yollanması hata vermektedir. Cihazların işlem süreleri ilk kontrolde test edilerek diğer komuta geçmeden işlemin biteceği zamana kadar bir gecikme verilmelidir.

Örneğin, Agilent 3458A'nın self kalibrasyonu "ACAL ALL" komutu ile başlamakta ve 11 dakika sürmektedir. Cihaza bu süre içerisinde bir başka işlem için komut yollandığında cihaz hata vermektedir. Çözüm için programa 11 dakika gecikme verilmesi gerekmektedir. Fluke 5720A ise bu duruma çözüm olarak "OPC?" komutunu üretmiştir. "OPC?" komutu ile işlemin bittiği sorgulanmaktadır. İşlem bittiğinde cihaz "1" cevabı vermektedir. Böylece sorgulama sonunda cihazdan "1" gelmesi ile diğer işleme geçilmektedir. Cihazların tepki verme sürelerinin ayarlanması da önemlidir. "NPLC" komutu ile cihazlara işlem periyodu verilmektedir. NPLC'nin yüksek olması sonucun kalitesini arttırmakla birlikte cihazın tepki süresini de uzatmaktadır. Özellikle direnç ölçümü gibi hassasiyeti yüksek ölçümlerde tepki verme süreleri yüksek tutulmalıdır [45].

Cihazlara gönderilecek komutlar ve cihazdan çekilen veriler her zaman istenilen formatta olmamaktadır. Programa gömülecek komutların önceden test edilmesi ve istenilen sonuçları verip vermediğinin kontrol edilmesi ve sonuçların istenilen formata getirilmesi gerekmektedir. Şekil 4.8.'de program süresince kullanılan test penceresi verilmiştir. Test penceresinde "ADDRESS?" komutu gönderilerek cevap olarak GPIB adresinin verilmesi istenmiştir. İlk etapta cihazdan gelen veri işlenmeden gösterilmiş ve anlamsız bir ifade çıkmıştır. İkinci durumda kod içine cihaz cevabını işleyen satırlar eklenmiş ve cevap anlamlandırılmıştır.



Şekil 4.8. Test programı.

Cihazlardan gelen hata mesajları dikkatle incelenmeli ve hata durumuna göre işlem yapılmalıdır. Cihazlar, bazı durumlarda sadece hata numarası vermekte, bazı durumlarda ise hatanın açıklamasını da vermektedir.

4.2.1.3. Fonksiyonlar

Gerekli sürücülerin tanıtılmasından sonra işlemleri gerçekleştirecek fonksiyonlar oluşturulmuştur. Fonksiyonlar, kalibrasyon işlemlerinin gerçeklendiği kalibrasyon fonksiyonları, gerekli ön kontrollerin yapıldığı kontrol fonksiyonları, matematiksel işlemlerin gerçekleştirildiği matematik fonksiyonları ve verilerin kullanılabilir hale getirildiği veri düzenleme fonksiyonundan oluşmaktadır. Ana görevi kalibrasyon fonksiyonları üstlenmekte olup, diğer fonksiyonlar kalibrasyon prosedürlerinin gerçeklenmesine yardımcı olmaktadır. Yardımcı fonksiyonların görevleri ana hatları ile aşağıda belirtilmiştir.

Cihaz Kontrol Fonksiyonu

Cihazlar ile haberleşmenin sağlandığı ilgili sanal yolları oluşturan ve yolların doğru olup olmadığını kontrol eden fonksiyondur. Fonksiyon bir yandan sanal yolları kontrol ederken, diğer yandan GPIB arayüzü üzerinde tanımlanan adreslerde belirtilen cihazların olup olmadığını kontrol etmekte ve kullanıcıya bilgi vermektedir.

Kablo Bağlantı Kontrol Fonksiyonu

Her bir kalibrasyon adımının gerçekleştirilmesi anında gerekli olan kablo bağlantılarını kontrol eden fonksiyondur. Bu fonksiyon kullanıcının yaptığı bağlantıların doğruluğu kontrol edilmekte ve hata ihtimali en aza indirilmektedir. Fonksiyon çıktı olarak kullanıcıya bağlantıların doğruluğu hakkında bilgi vermektedir.

Veri Düzenleme Fonksiyonu

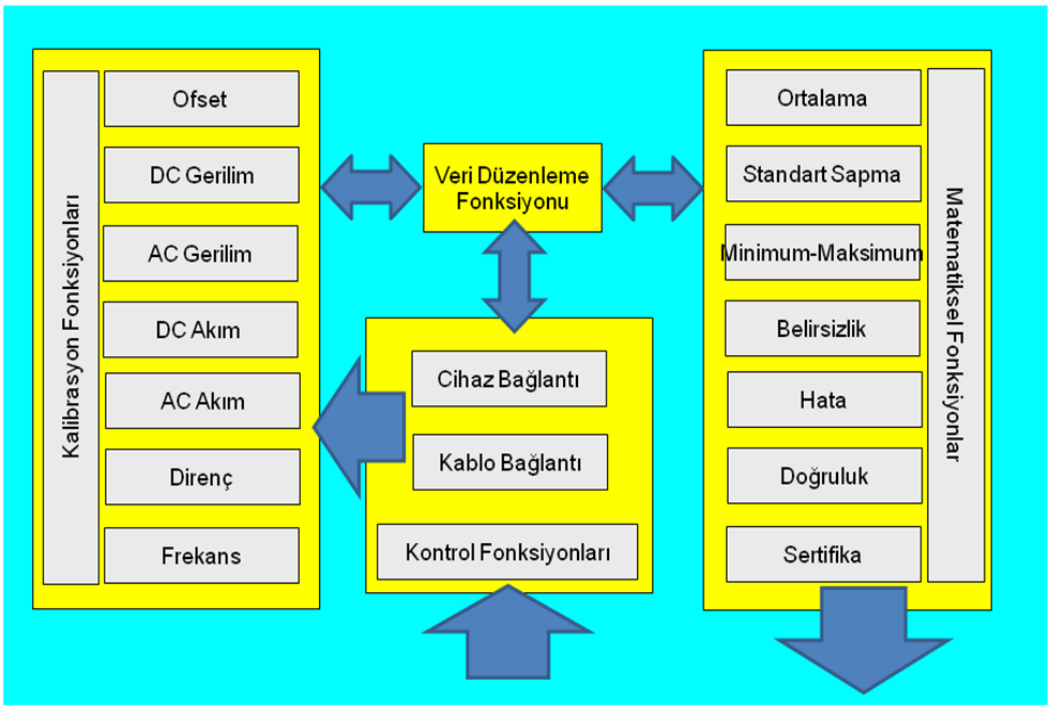
Agilent 3458A'nın kullandığı değişken türü metinsel (string) değişkendir. Cihaza gönderilen komutlar gibi cihazdan gelen veriler de metinsel ifade halindedir. Ancak çeşitli matematiksel işlemlere tabi tutulacak olan verileri metinsel ifade halinde kullanmak mümkün değildir. Program dâhilinde "VeriDuzenle" fonksiyonu ile veriler düzenlenerek matematiksel işlemlerde kullanılabilecek sayısal (double) değişken haline getirilmektedir.

Bu fonksiyon ile cihazdan gelen veriler kontrol birimi ve yazılım tabanı için anlamlı hale getirilmektedir. Sertifika çıktısının tamamen bu veriler üzerinden yapılan matematiksel işlemlere dayalı olduğu düşünüldüğünde fonksiyonun kalibrasyon işlemlerinin bütün basamaklarını etkilediği göze çarpmaktadır.

Matematiksel Fonksiyonlar

Kalibrasyon işlemlerinin çıktısı olan sertifikanın hazırlanmasında kullanılacak verileri oluşturan fonksiyonlar bütünüdür. Ortalama, standart sapma, minimum ve maksimum değerler ve hata, doğruluk değerlerinin bulunması matematiksel fonksiyonların altında bulunmaktadır. Bu veriler ile bir kalibrasyon işleminin güvenilirlik seviyesini gösteren, belirsizlik ifadesi hesaplanmaktadır. Sonuç olarak kalibrasyon değerleri ortalama ifadesi ile belirsizlik ve hata değerlerinin verildiği bir sertifikada cihaz kullanıcısına sunulmaktadır.

Kalibrasyon otomasyonu uygulamasının yazılım fonksiyonlarının mimari yapısı Şekil 4.9.'da verilmiştir. Mimari yapı yorumlanırsa, kontrol mekanizmaları ile başlayan kalibrasyon süreci ilgili prosedürlere göre hazırlanmış fonksiyonların gerçekleştirilmesi ile devam etmektedir. Fonksiyonlar sonucu edinilen veriler düzenlenerek matematiksel işlemlerde kullanılacak hale gelmektedir. Son olarak, işlenmiş veriler kullanılarak kalibrasyon işlemlerinin çıktısı olan sertifika hazırlanmaktadır.



Şekil 4.9. Yazılım fonksiyonlarının mimarisi.

4.2.2. Kalibrasyon Düzeneğinin Hazırlanması

Kalibrasyon işlemlerinin, sıcaklık, nem, toz, aydınlatma vb. çevre şartlarının sürekli izlendiği ve kontrol altında tutulduğu laboratuar ortamında, gerekli topraklama, termal EMF ve elektromanyetik girişim kontrollerinin yapıldığı bir düzenekte gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Uygun şartların oluşturulduğu ortamda kurulmuş ve hazır olan kalibrasyon düzeneği Şekil 4.10.'da gösterilmiştir.

Kalibrasyon sisteminin fiziksel kurulumu birinci bölümde açıklanan sınırlamalara göre yapılmıştır. Hata kaynaklarının etkileri dikkate alınarak, yapılacak ısıl kararlılık beklemeleri, cihaz ve kabloların konumları, toprak bağlantıları gibi durumlar prosedürlere uygun olarak gerçekleştirilmelidir. Örneğin, kullanılacak referans kalibratör ve sinyal üreteci ile kalibrasyonu yapılacak DMM'in ısıl dengeye gelmesi için en az bir gün laboratuar ortamında bekletilmesi gerekmektedir. Sistem kurulumundan itibaren işlemlerin yapılması için ısıl dengenin sağlanması gerekmektedir.



Şekil 4.10. Kalibrasyon düzeneği .

Cihazlar ile kontrol birimi arasındaki bağlantılar USB-GPIB çevirici arayüz özelliğine sahip olan Agilent 82357A model GPIB arayüz birimi ile yapılmıştır [63]. Cihazların GPIB bağlantısı Şekil 4.11.'de gösterilen şekilde yıldız topolojisi kullanılarak yapılmıştır. Bütün cihazlar, çoklama kabloları kullanılarak Agilent 3458A'nın GPIB portunda toplanmış, son olarak eklenen GPIB arayüzü de USB ucuyla PC'ye aktarılmıştır.



Şekil 4.11. GPIB bağlantıları.

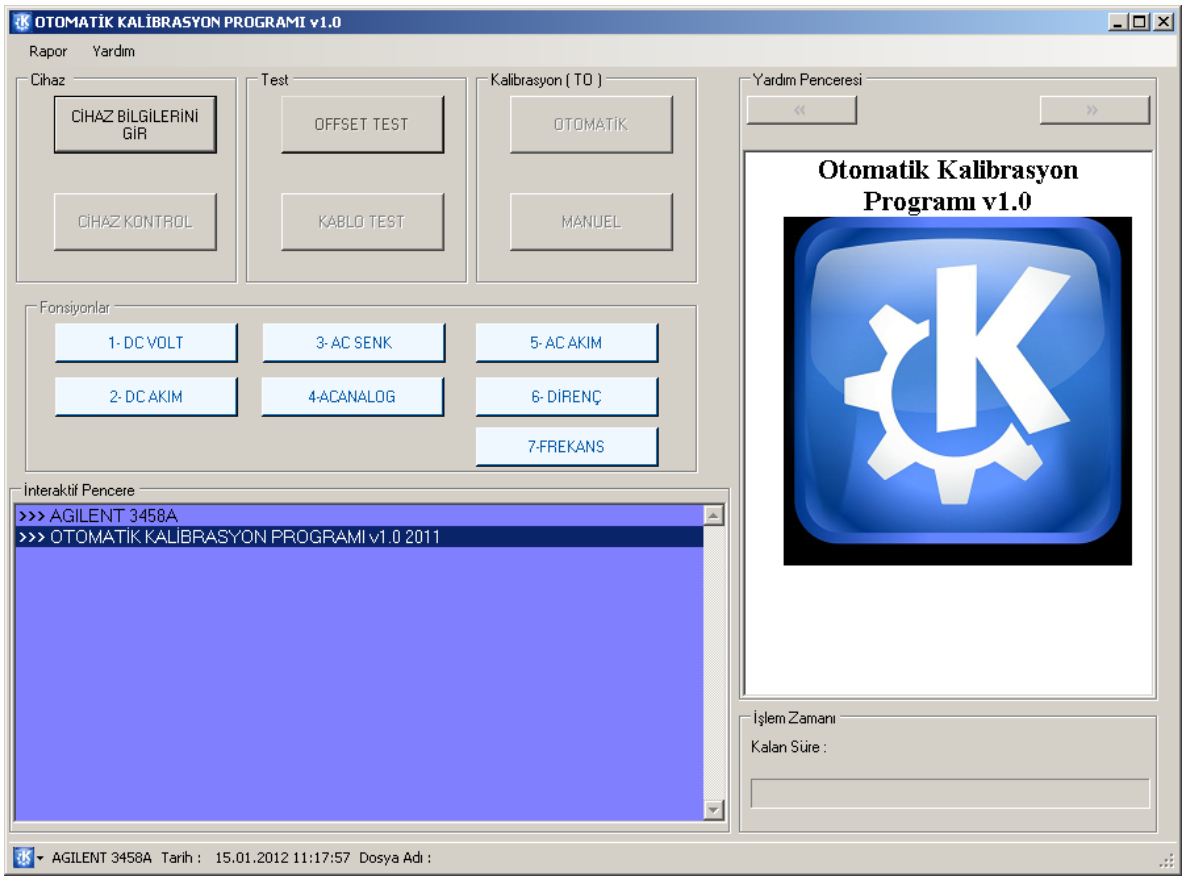
4.2.3. Uygulamanın Kullanıcı Arayüzü

Uygulamanın kullanıcı arayüzü Microsoft Visual Studio 2008 platformunda C# tabanlı geliştirilmiştir. Arayüzde gerçekleştirilen işlemleri izlemek amacıyla bir adet interaktif pencere bulunmaktadır. Kullanıcı, interaktif pencere ile işlemleri takip edebilmekte ve ölçüm sonuçlarını görebilmektedir. Yardım penceresi ile kullanıcıya görsel öğelerle bulunduğu adımdaki işlemlere yönelik yardım ifadeleri sunulmaktadır. Zaman takibi ile gerçekleştirilen işlemin ne kadar kaldığı görsel olarak belirtilmektedir. Şekil 4.12.'de uygulamanın kullanıcı arayüzü verilmiştir.

İşlemlerin tamamı işlem sırasına uygun olarak konumlandırılmış nesnelerle kontrol edilebilmektedir. Nesneler özelliklerine göre gruplara ayrılmış, böylece kullanıcıya görsel bir kolaylık sağlanmıştır. İlk grupta, cihaz bilgileri girilmekte ve cihaz bağlantı kontrolleri yapılmaktadır.

İkinci grupta, ofset kalibrasyonu ve kablo bağlantı test işlemleri gerçekleştirilmektedir. Ofset kalibrasyonunun burada yapılmasının nedeni bağlantılarının diğer kalibrasyonlardan

farklı olarak kısa devre durumunda olmasıdır. Ayrıca ofset fonksiyonu cihaz self test işlemlerini içerisinde bulundurması ile bir açıdan test işlemlerine benzemektedir.



Şekil 4.12. Kullanıcı arayüzü.

Diğer grupta ise kalibrasyonun otomatik olarak tamamının yapılması veya manuel olarak her bir fonksiyonun ayrı ayrı yapılması sorgulanmaktadır. Kullanıcı otomatik durumunu seçmesi halinde ilgili kalibrasyon işlemleri ardı ardına yapılmakta ve tek seferde tamamlanmaktadır. Ancak istenilen yerde durdurma yapılabilmektedir.

Son grupta ise ayrı ayrı yapılması durumu için kalibrasyon fonksiyonları sunulmuştur. Arayüzün üst tarafındaki araç çubuğunda ise sertifika işlemleri ile arayüzün kullanımına yönelik yardım menüleri bulunmaktadır. Kullanıcı arayüzün çalışması incelendiğinde, öncelikle cihaz bilgilerinin girilmesi gerekmektedir. Kullanıcı arayüzü tasarımında

işlemlerin sıralı bir şekilde gerçekleştirilmesi hedeflenmiş, nesnelerin yerleşimi ve aktif olma durumu bu hedefe göre düzenlenmiştir.

4.2.3.1. Cihaz Bilgilerinin Girilmesi

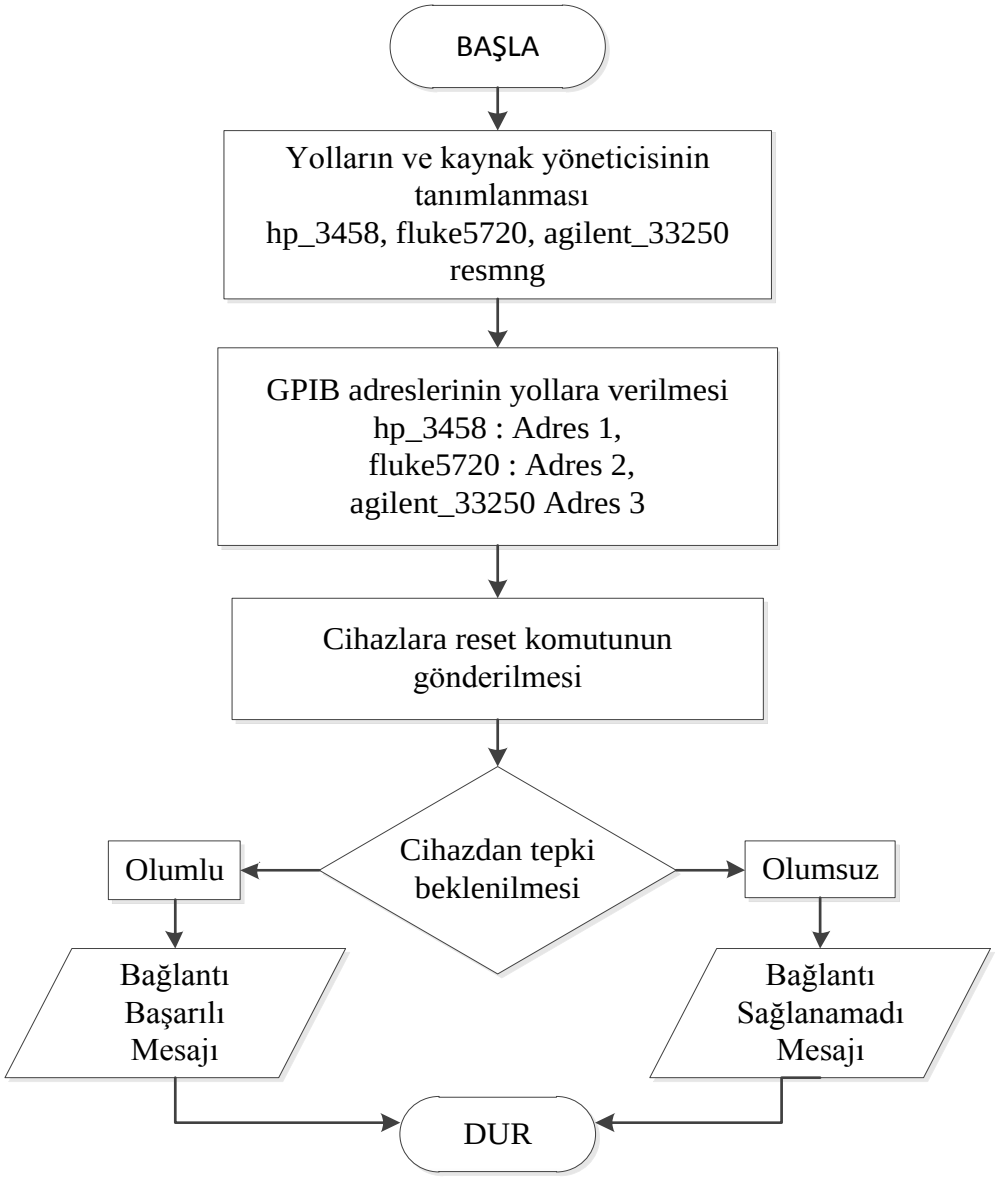
Cihaz bilgileri girilmedikçe diğer nesneler aktif olmamaktadır. Cihaz bilgilerinin girildiği ekran Şekil 4.13.'de verilmiştir. Cihaz bilgileri ekranında, kullanıcıdan, cihaza ait seri no, üretici firma, model gibi tanımlayıcı bilgiler ile sertifikada kullanılacak olan laboratuar bilgileri, teknik personel ve sorumlu personel bilgileri girilmesi istenmektedir. Bilgiler daha sonra sertifika hazırlamada kullanılmak üzere veritabanına kaydedilmektedir.



Şekil 4.13. Cihaz bilgileri giriş ekranı.

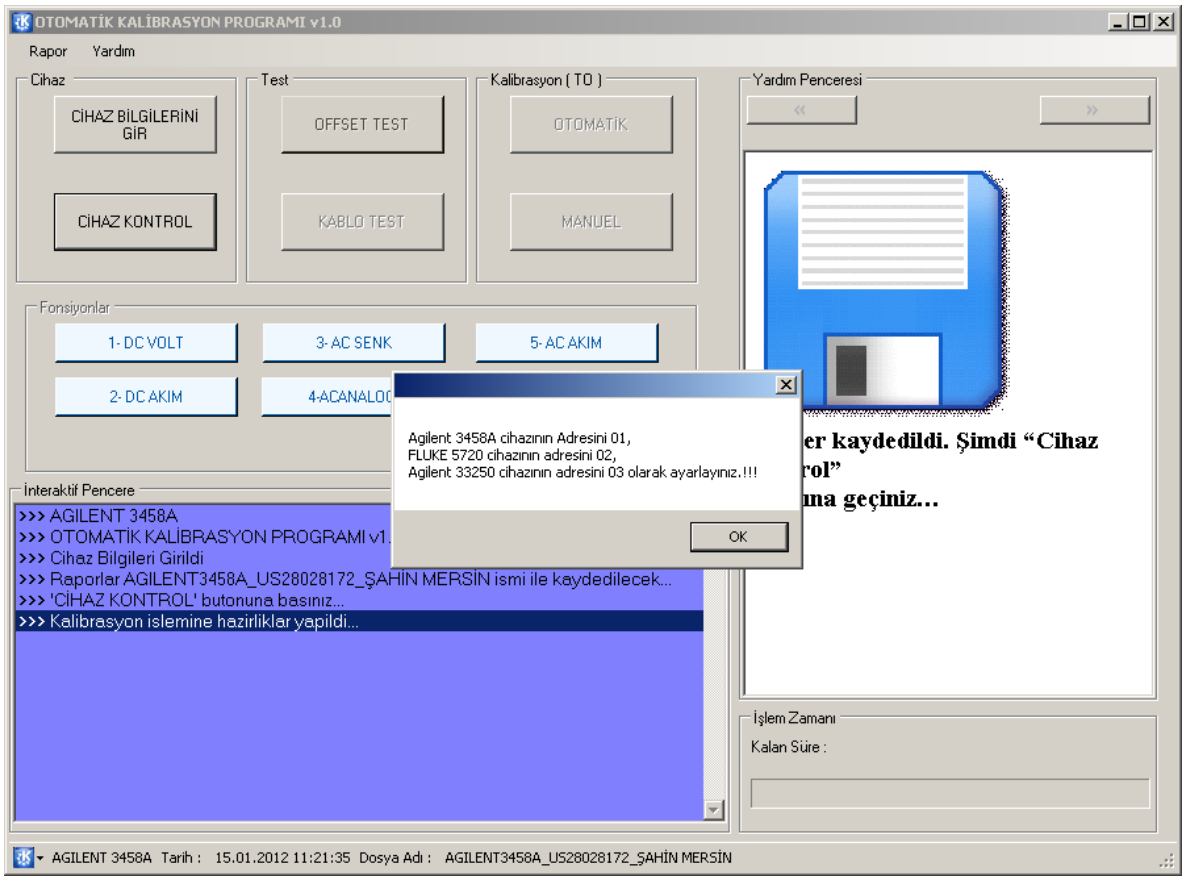
4.2.3.2. Cihaz Bağlantılarının Kontrol Edilmesi

Cihaz bilgilerinin girilmesi ve ayarların kaydedilmesi ile cihaz kontrol nesnesi aktif hale gelmektedir. Cihaz kontrol butonuna basıldığı anda cihaz bağlantıları kontrol edilmektedir. Cihazlara bağlantı kontrol algoritması Şekil 4.14.'de verilmiştir.



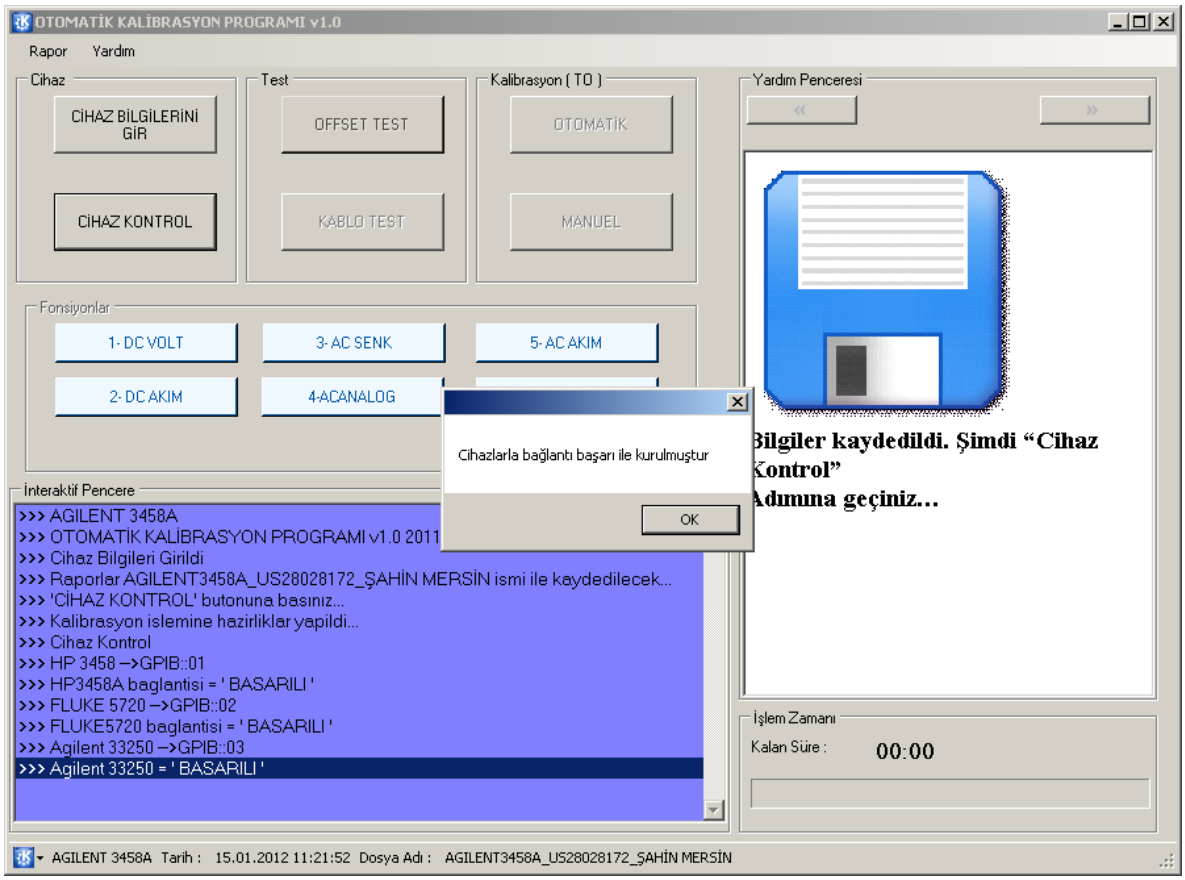
Şekil 4.14. Cihaz bağlantı kontrol akış diyagramı.

Cihaz kontrol butonuna basılması ile Şekil 4.15.'de verilen GPIB uyarı ekranında kullanıcıya cihaz adreslerinin olması gereken değerleri söylenmektedir.



Şekil 4.15. GPIB uyarı ekranı.

Cihaz bağlantıları doğru yapılması halinde, interaktif pencere yardımıyla, program bağlantı adreslerini vermekte ve cihaz bağlantılarının sorunsuz olduğunu bildirmektedir. Şekil 4.16.'da cihaz kontrol işleminin sorunsuz geçtiği ve doğru adresler üzerinden cihazlarla iletişimin hazır olduğu bilgilerinin bulunduğu program arayüzü verilmiştir.

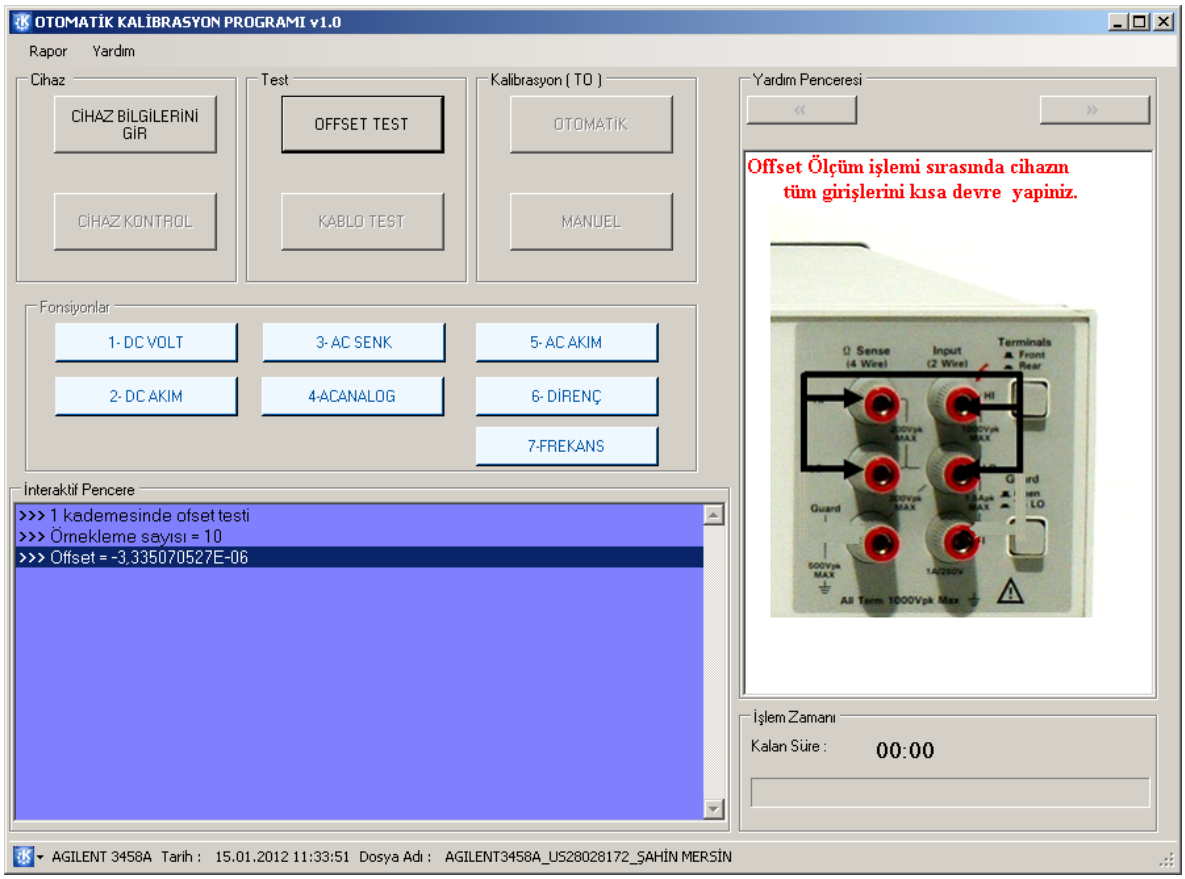


Şekil 4.16. GPIB başarılı ekranı.

4.2.3.3. Ofset ve Kablo Testi

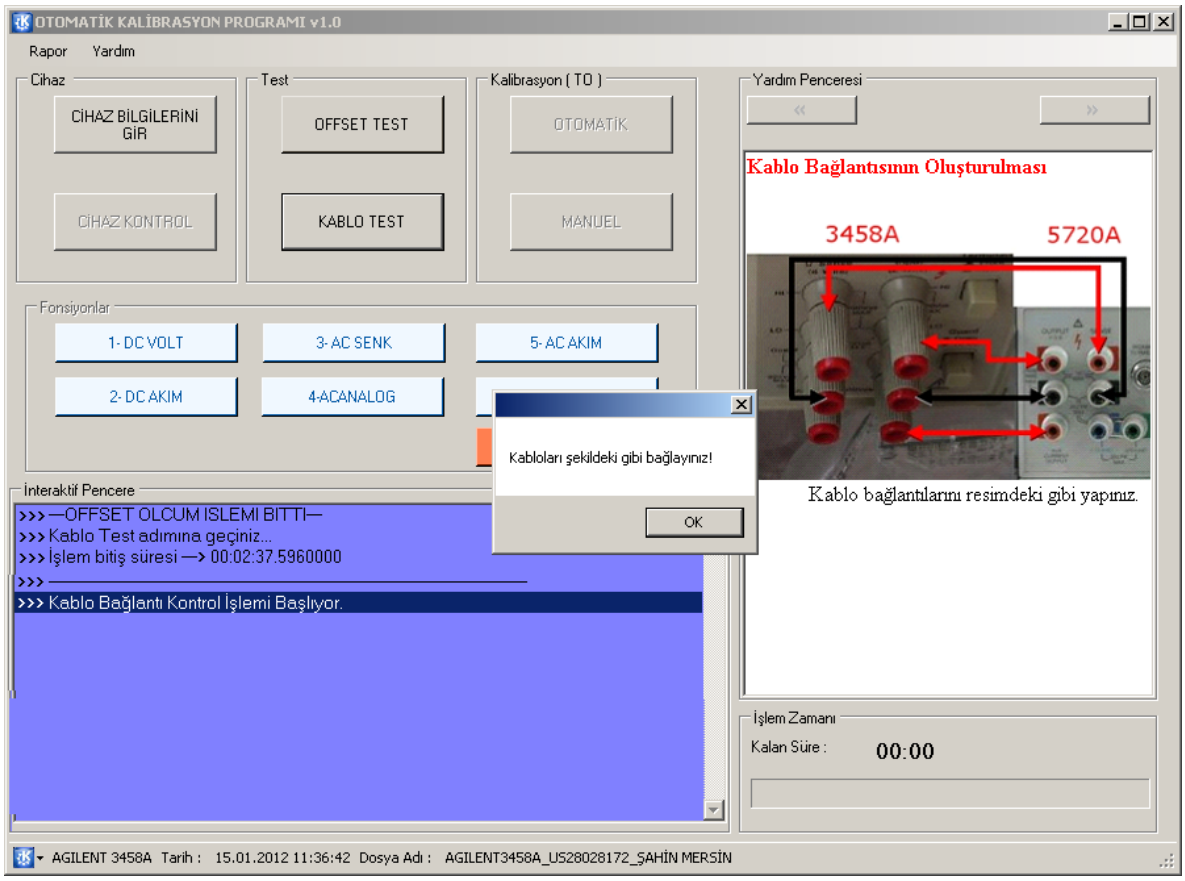
Program, cihazlarla iletişimin hazır olması ile ofset ve kablo bağlantı testleri grubunu aktif hale getirmektedir. Ofset kalibrasyonu ve testi diğer kalibrasyon işlemlerinden farklı bir bağlantıya sahip olduğu ve başlangıç ön koşullarını oluşturduğu için bu gruba alınmıştır. Bir cihazın ofset testinden geçememesi durumunda diğer kalibrasyon işlemleri de devam etmemektedir.

Şekil 4.17.'de ofset kalibrasyonun işlendiği arayüz ekranı verilmektedir. Arayüzün yardım penceresinde ofset bağlantıların nasıl olacağı verilmiştir. İnteraktif pencerede ise ofset kalibrasyonun hangi basamağında hangi ölçümü yapmakta olduğu ve ölçüm değeri gösterilmektedir. Şekil 4.17.'deki durumda 1 Volt kademesinde 10 adet ölçüm yapılmakta olduğu belirtilmekte ve birinci ölçümün değeri verilmektedir.



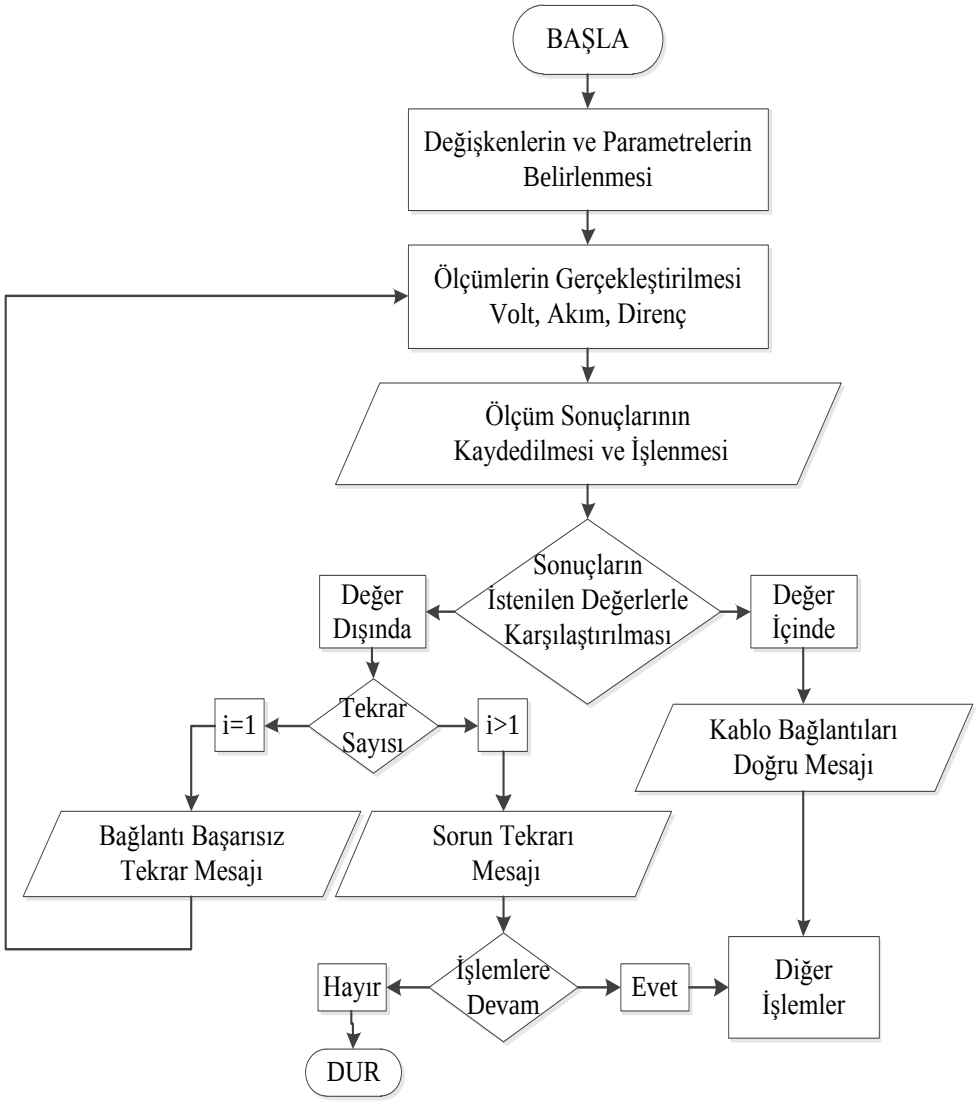
Şekil 4.17. Ofset kalibrasyonu arayüz ekranı

Cihaz ofset kalibrasyonu ve testini geçmesi durumunda, program kalibrasyon işlemlerinin yapılabilmesi için kablo bağlantılarının kurulmasını istemektedir. Şekil 4.18.'de kablo bağlantı ekranı verilmiştir.



Şekil 4.18. Kablo bağlantı ekranı.

İlgili mesaj bildirimlerinden sonra yapılan kablo bağlantılarının kontrolünü sağlamak amacıyla kablo kontrol fonksiyonu oluşturulmuştur. Fonksiyonda her bir kablonun üzerinden geçireceği tahmini değerler cihaza uygulanarak ölçümler alınmış, ölçüm sonuçları incelenerek doğru değerler arasında olup olmadığı kontrol edilmiştir. Ölçüm değerlerinin istenilen değerler olmaması durumunda kullanıcıya kablo bağlantı kontrolü yapması amacıyla uyarı mesajı verilmiştir. Uyarı mesajı sonucunda yapılan yeni bağlantılarda da hatanın tekrar etmesi durumunda yine kullanıcıya bir mesaj ile hatanın giderilemediği kalibrasyon işlemine devam edip etmeyeceği sorgulanmaktadır. Bu sorgulamadaki amaç, kablo bağlantılarının hatasız olması ancak olası bir cihaz arızasının bulunması durumudur. Kablo bağlantı fonksiyonunun akış diyagramı Şekil 4.19.'da verilmiştir.

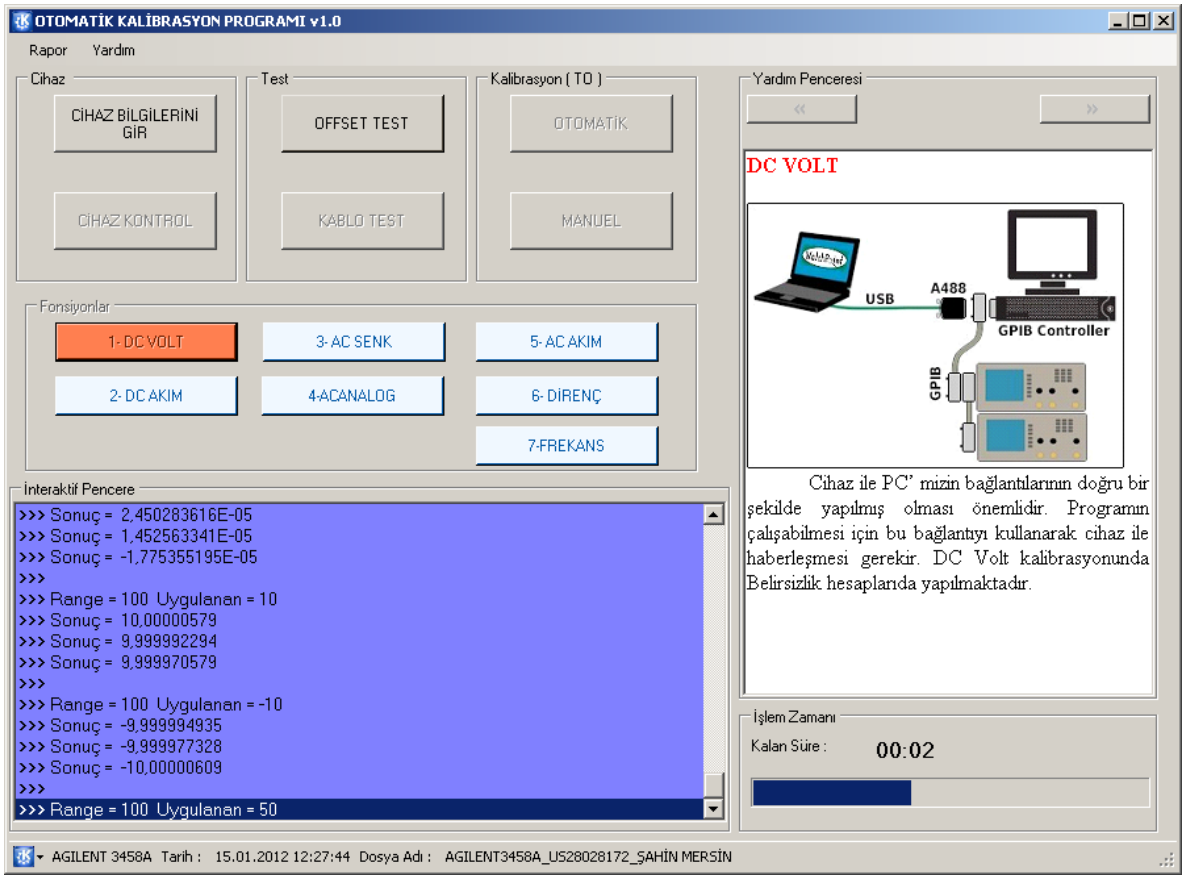


Şekil 4.19. Kablo bağlantı kontrolü akış diyagramı.

4.2.3.4. Kalibrasyon İşlemlerinin Yapılması

Kablo bağlantılarının doğruluğunun tespiti ile program kalibrasyon işlemlerinin yapılabilmesi için ilgili nesne grubunu aktif hale getirmektedir. Kullanıcı burada isteğe göre otomatik olarak tüm kalibrasyonu ya da tek tek sadece istenilen fonksiyonu yapabilmektedir. Örnek olması açısından, Şekil 4.20'de DC Volt fonksiyonunun kalibrasyonundan bir kesit verilmiştir. Kullanıcı interaktif pencereden hangi kademede hangi ölçümün yapıldığını görebilmekte ve işlem zamanı nesnesinden ne kadar süre

kaldığını izleyebilmektedir. Ayrıca ölçüm işlemleri devam ederken yardım penceresinde çeşitli bilgilendirme öğeleri sunulmaktadır.

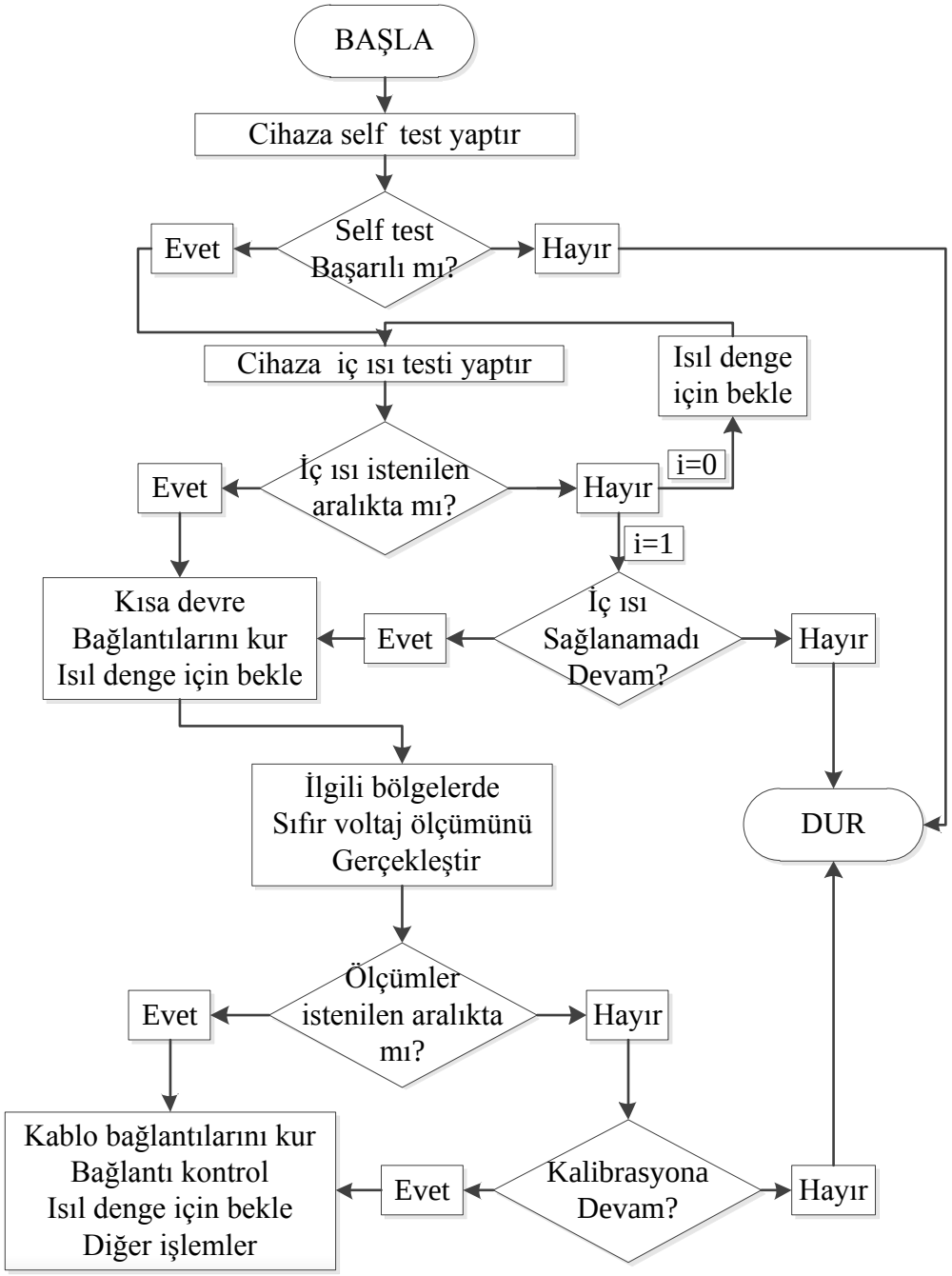


Şekil 4.20. DC volt kalibrasyon ekranı.

4.3. Kalibrasyon İşlemleri

4.3.1. Ofset Kalibrasyonu

Ofset kalibrasyonunda başlangıç olarak cihaza self test yaptırılmaktadır. Self testte cihaz bütün fonksiyonlarını denetlemekte bir arıza durumu olup olmadığını kontrol etmektedir. Kalibrasyonuna devam etmek için cihazın self testi geçmesi ön koşuldur. Kabul edileceği gibi cihazda herhangi bir arıza varsa ölçüm yapmaya gerek yoktur. Bu durumda cihaz bakım, onarım sürecine girer.



Şekil 4.21. Ofset kalibrasyonu akış diyagramı.

Cihaz self testi başarı ile geçmesi durumunda iç sıcaklık kontrolü gerçekleştirilir. İç sıcaklığın kabul edilebilir aralıkta olup olmadığı kontrol edilir. Eğer cihazın iç sıcaklığı istenilen değer aralığında değilse, cihaz ısıl dengeye gelmesi için bekletilir. Bekleme

sonunda tekrar kontrol edilerek eğer hala ısıl dengeye gelmedi ise kullanıcıya kalibrasyon işlemlerine devam etmek isteyip istemediği sorulur. Isıl dengenin sağlanması ya da kalibrasyona devam etme isteği durumlarında cihaz kısa devreye alınır ve bağlantıların ısıl dengeye gelmesi için beş dakika bekletilir.

Kısa devre yapılmasındaki amaç cihazın ölçüm bölgelerinde ofset değerlerinin istenilen aralıklarda olup olmadığının kontrolüdür. Ofset, bütün ölçümlerde var olan sabit hatadır. Ofset değeri sıfır ölçümünde belirlenir. Cihaza herhangi bir gerilim uygulanmadan cihaz girişleri ince bir bakır ile Şekil 4.17.'deki gibi kısa devre edilerek ölçümler gerçekleştirilir.

Yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar işlenerek sertifikanın ilgili kısmına eklenmek amacıyla program tarafından depolanmaktadır. Ayrıca ofset ölçümü bütün diğer ölçümleri etkileyeceği için sonuçların istenilen değer aralığında olup olmadığı hemen kontrol edilerek değer dışı sonuçlar kullanıcıya bildirilir. Değer dışı sonuçların çıkması durumunda kullanıcıdan kalibrasyon işlemlerine devam etme durumu sorgulanır.

Diğer işlemlere geçilmesinin istenmesi durumunda kullanıcıdan Şekil 4.18.'de gösterilen kablo bağlantılarının yapılması talep edilerek kablo kontrol prosedürü uygulanır. Yine ısıl dengeye gelmesi için program beş dakika bekletilir. Ofset kalibrasyonunun akış diyagramı Şekil 4.21.'de verilmiştir.

4.3.2. DC Gerilim Kalibrasyonu

Cihazın DC gerilim fonksiyonu gerekli kablo bağlantılarının yapıldığı sistemle, referans kalibratörden uygulanan doğruluğu bilinen DC gerilimlerin, doğrudan DMM ile ölçülmesi suretiyle gerçekleştirilir. DC gerilim kalibrasyon noktaları Tablo 4.1.'de belirtilmiştir.

DMM'in DC gerilim fonksiyonlarının kalibrasyonu için ölçüm noktaları, üretici önerileri, AFMETCAL prosedürleri ve EURAMET/cg-15 dokümanında belirtilen noktalar dikkate alınarak belirlenmiştir. İşlemler için AFMETCAL prosedürü takip edilmiştir.

DC Gerilim kalibrasyonunda, DMM'e ilgili ölçüm bölgesinde, bir döngü içerisinde sırayla DC volt ölçümü komutu yollanmaktadır. Eş zamanlı olarak kalibratörden ilgili değerlerin

uygulanması sağlanmaktadır. Döngü içerisinde ölçüm noktalarındaki değerler kalibratöre sırasıyla uygulatılmaktadır. Yapılan ölçümlerde alınacak örnek sayısı belirlenir. Tek tetikleme ile istenilen miktarda ölçüm alması komutu DMM'e yollanır.

Yeterli miktarda bekleme yapıldıktan sonra ölçüm değerleri cihazdan çekilerek bir başka döngü içerisinde daha önceden tanımlanmış geçici bir dizi değişkenine kaydedilmektedir.

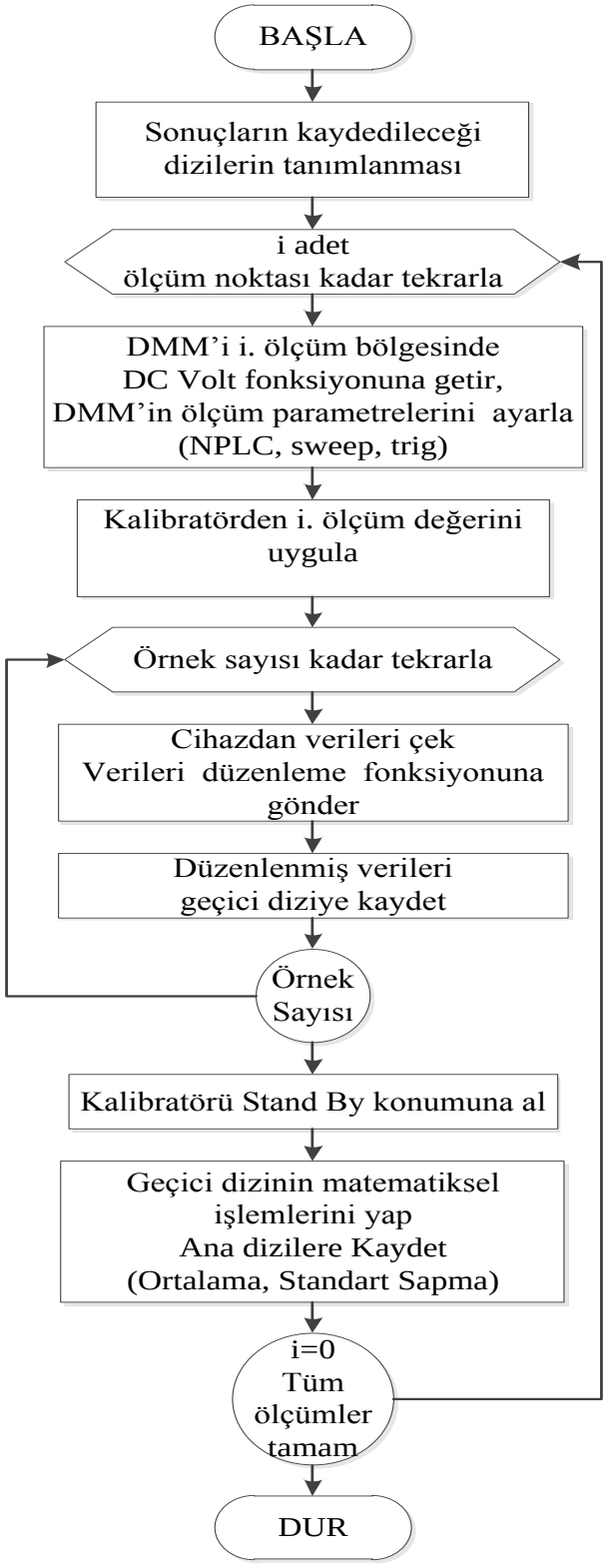
Tablo 4.1. DC gerilim kalibrasyon noktaları.

Ölçüm Bölgesi	Ölçüm Noktası
100 mV	0 mV, 10 mV, -10 mV, 50 mV, -50 mV, 100 mV, -100 Mv
1V	0 V, 0.1 V, -0.1 V, 0.5 V, -0.5 V, 1 V, -1 V
10 V	0 V, 1 V, -1 V, 3 V, -3 V, 5 V, -5 V, 7 V, -7 V,10 V,-10 V
100 V	0 V, 10 V,-10 V, 50 V,-50 V,100 V, -100 V
1000 V	0 V, 100 V, -100 V, 500 V, -500 V, 700 V, -700 V, 1000 V, -1000 V

Cihazdan elde edilen değerler metinsel ifade olduğu için kullanılabilir durumda değildir. Veriler düzenlenmesi için ayrı bir fonksiyona yönlendirilir.

Düzenlenerek işlem yapılabilecek duruma gelen veriler ortalaması ve standart sapması hesaplanarak, global diziye kayıt ettirilir.

Bu veriler daha sonra sertifika işleminde kullanılacaktır. DC gerilim fonksiyonu akış diyagramı Şekil 4.22.'de verilmiştir.



Şekil 4.22. DC gerilim kalibrasyonu akış diyagramı.

4.3.3. DC Akım Kalibrasyonu

Cihazın DC akım fonksiyonu gerekli kablo bağlantılarının yapıldığı sistemle, referans kalibratörden uygulanan, doğruluğu bilinen DC akımların, doğrudan DMM ile ölçülmesi suretiyle gerçekleştirilir. DC akım kalibrasyon noktaları Tablo 4.2.'de belirtilmiştir.

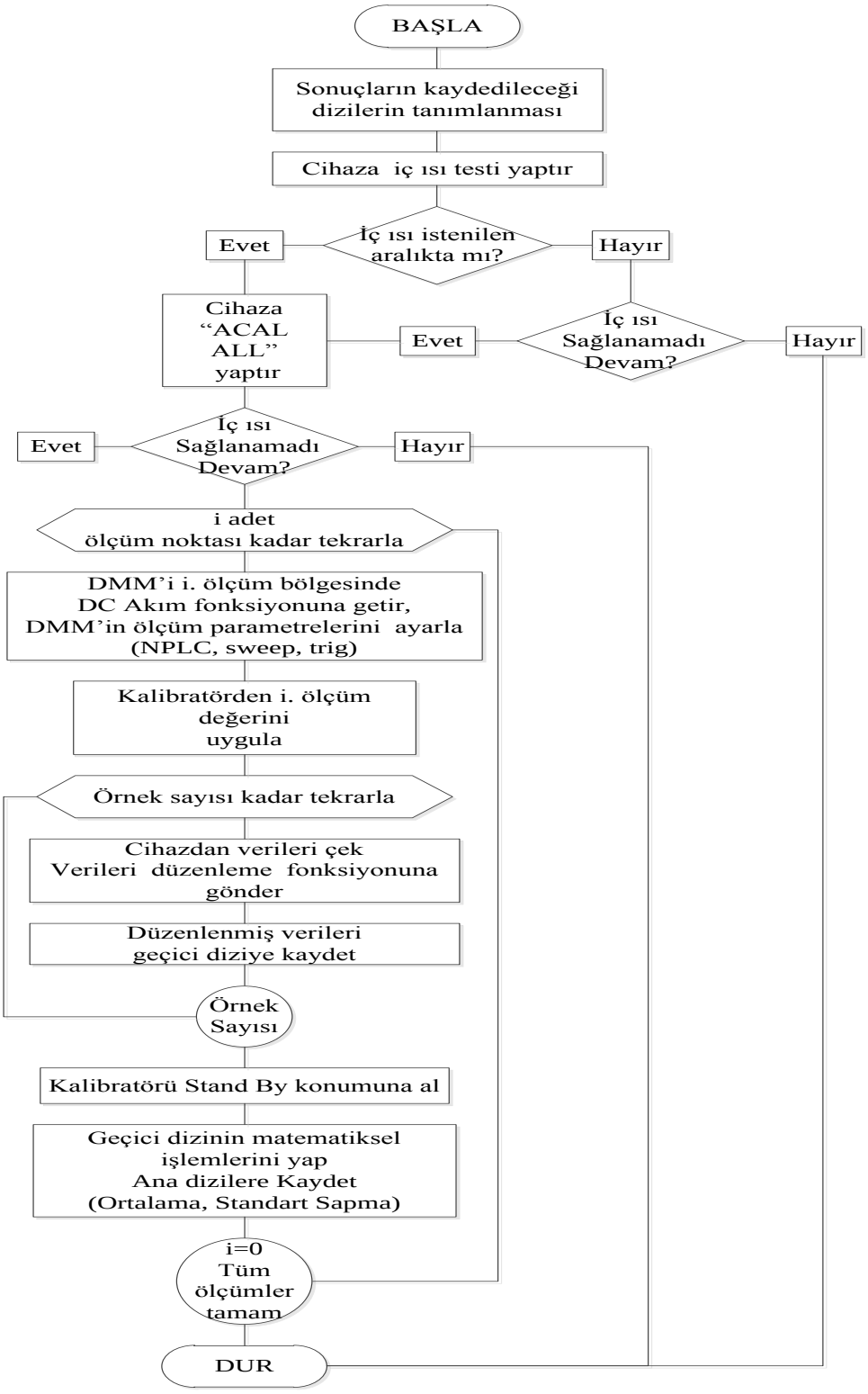
Tablo 4.2. DC akım kalibrasyon noktaları.

Ölçüm Bölgesi	Ölçüm Noktası
100 µA	0 µA, 10 µA, -10 µA, 50 µA, -50 µA, 100 µA, -100 µA,
1 mA	0 mA, -0.1 mA, 0.5 mA, -0.5 mA, 1 mA, -1 mA,
10 mA	0 mA, 1 mA, -1 mA, 5 mA, -5 mA, 10 mA, -10 mA
100 mA	0 mA, 10 mA, -10 mA, 50 mA, -50 mA, 100 mA ,-100 mA
1 A	0 A, 0.1 A, -0.1 A, 0.5 A, -0.5 A, 1 A, -1 A

DMM'in DC akım fonksiyonlarının kalibrasyonu için ölçüm noktaları, üretici önerileri, AFMETCAL prosedürleri ve EURAMET/cg-15 dokümanında belirtilen noktalar dikkate alınarak belirlenmiştir. İşlemler için AFMETCAL prosedürü takip edilmiştir.

DC akım kalibrasyonunda ölçümlere başlanmadan önce prosedüre göre, cihazın içi sıcaklık testi tekrar yaptırılmaktadır. Isıl dengeye ulaşmış cihaz, self kalibrasyon komutu (ACAL ALL) ile self kalibrasyona tabi tutulur.

Self kalibrasyonu başarı ile geçen cihaza, DC gerilim kalibrasyonundaki gibi, ölçüm değerleri uygulanarak cihazdan ölçüm sonuçları çekilir ve işlenip, depolanır. DC akım fonksiyonu akış diyagramı Şekil 4.23.'de verilmiştir.



Şekil 4.23. DC akım kalibrasyonu akış diyagramı.

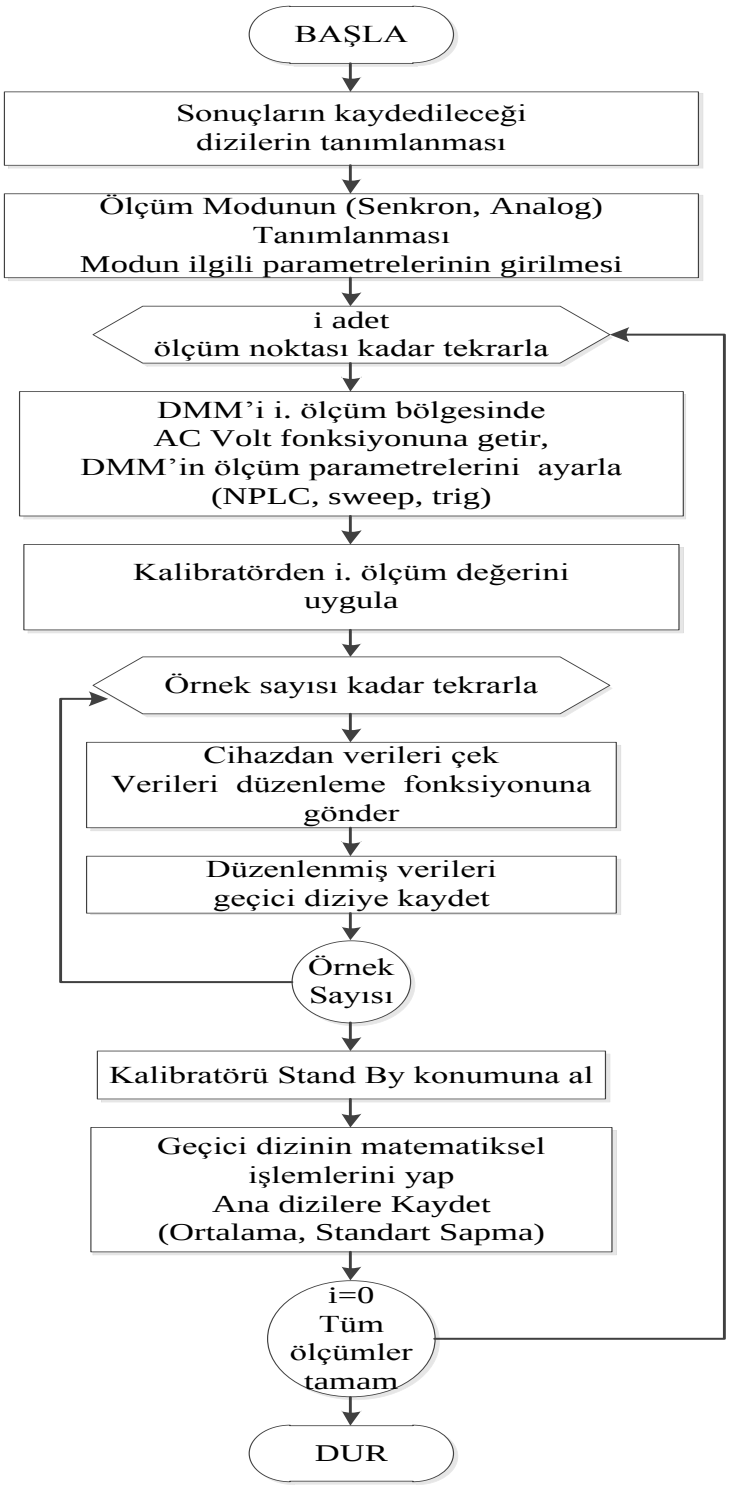
4.3.4. AC Gerilim Kalibrasyonu

DMM'in AC gerilim fonksiyonlarının kalibrasyonu için ölçüm noktaları, üretici önerileri, AFMETCAL prosedürleri ve EURAMET/cg-15 dokümanında belirtilen noktalar dikkate alınarak belirlenmiştir. İşlemler için AFMETCAL prosedürü takip edilmiştir.

DMM'in AC gerilim kalibrasyonu senkron ve analog fonksiyonlarında ayrı ayrı yapılmaktadır. Cihazın AC gerilim fonksiyonu, gerekli kablo bağlantılarının yapıldığı sistemle, referans kalibratörden uygulanan, doğruluğu bilinen AC gerilimlerin, doğrudan DMM ile ölçülmesi suretiyle gerçekleştirilir. AC gerilim kalibrasyon noktaları Tablo 4.3.'te belirtilmiştir.

Tablo 4.3. AC gerilim kalibrasyon noktaları.

Ölçüm Bölgesi	Ölçüm Noktası
100 mV	100 mv (50 Hz, 1 kHz, 20 KHz)
1 V	0.1 V (50 Hz, 1 kHz, 20 kHz) 1 V (50 Hz, 1 kHz, 20 kHz, 50 kHz, 100 kHz, 300 kHz, 500 kHz, 1 MHz)
10 V	1 V (50 Hz, 1 kHz, 20 kHz, 1 MHz) 2 V, 5 V, 7 V (1 kHz) 10 V (20 Hz, 50 Hz, 1 kHz, 20 kHz, 50 kHz, 100 kHz, 300 kHz, 500 kHz)
100 V	10 V (50 Hz, 1 kHz, 20 kHz) 100 V (1 kHz, 20 kHz, 50 kHz, 100 kHz)
1000 V	100 V (50 Hz, 1kHz, 20 kHz) 500 V (1 kHz), 700 (50 Hz, 1 kHz)
10 V (Analog)	1 V (50 Hz, 1kHz, 20 kHz, 50 kHz,1 MHz) 3 V, 5 V, 7 V (1 kHz) 10 V (20 Hz, 50 Hz, 200 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 20 kHz, 50 kHz,100 kHz, 300 kHz, 500 kHz, 1 Mhz)



Şekil 4.24. AC gerilim kalibrasyonu akış diyagramı.

Ölçüm noktalarından görüleceği gibi, AC gerilimde ölçüm noktaları ile birlikte frekans değerleri de ölçüme girmektedir. Bu durumda cihazlara frekans değerlerinin de bildirilmesi gerekmektedir. Ölçüm işlemleri başlatılmadan önce ölçümün senkron yada analog yapılması durumuna göre, DMM'e ilgili senkron veya analog komutları yollanarak modun ayarlanması gerekmektedir. AC gerilim ölçümüyle ilgili diğer parametreler (band genişliği, çözünürlük, NPLC) girildikten sonra ölçüm işlemi başlatılmaktadır. Ölçüm işleminde diğer kalibrasyon işlemlerinde olduğu gibi bir döngü içerisinde ölçüm değerleri uygulanarak cihazdan ölçüm sonuçları çekilir ve işlenip, depolanır. AC gerilim (senkron ve analog) fonksiyonu akış diyagramı Şekil 4.24'de verilmiştir.

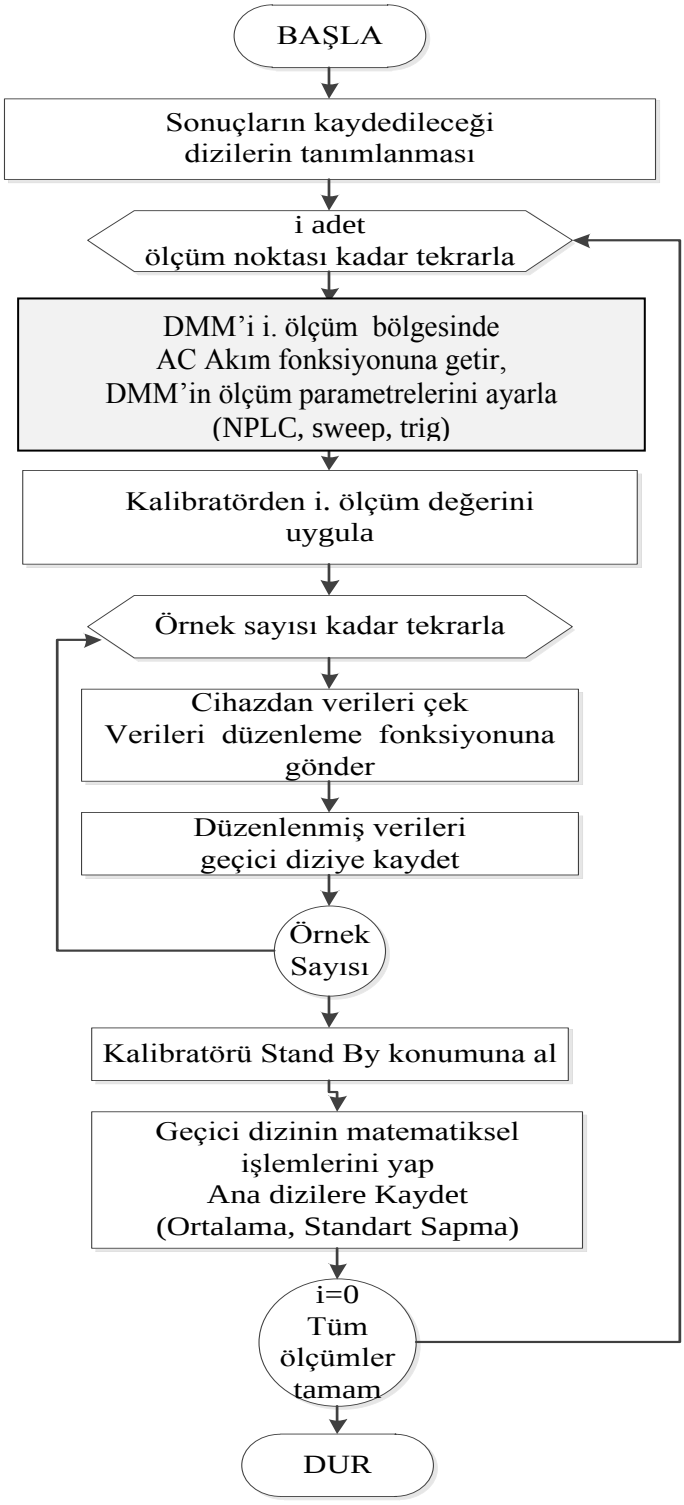
4.3.5. AC Akım Kalibrasyonu

Cihazın AC Akım fonksiyonu gerekli kablo bağlantılarının yapıldığı sistemle, referans kalibratörden uygulanan doğruluğu bilinen AC Akımların, doğrudan DMM ile ölçülmesi suretiyle gerçekleştirilir. AC Akım kalibrasyon noktaları Tablo 4.4.'de belirtilmiştir.

Tablo 4.4. AC akım kalibrasyon noktaları.

Ölçüm Bölgesi	Ölçüm Noktası
10 mA	5 mA (20 Hz, 50 Hz, 1 kHz, 5 kHz) 10 mA (20 Hz, 50 Hz, 1 kHz, 5 kHz)
100 mA	10 mA (1 kHz) 100 mA (50 Hz, 1 kHz, 5 kHz)
1 A	0.1 A (1 kHz) 1 A (50 Hz, 1kHz, 5 kHz)

DMM'in AC Akım fonksiyonlarının kalibrasyonu için ölçüm noktaları, üretici önerileri, AFMETCAL prosedürleri ve EURAMET/cg-15 dokümanında belirtilen noktalar dikkate alınarak belirlenmiştir. İşlemler için AFMETCAL prosedürü takip edilmiştir.



Şekil 4.25. AC akım kalibrasyonu akış diyagramı.

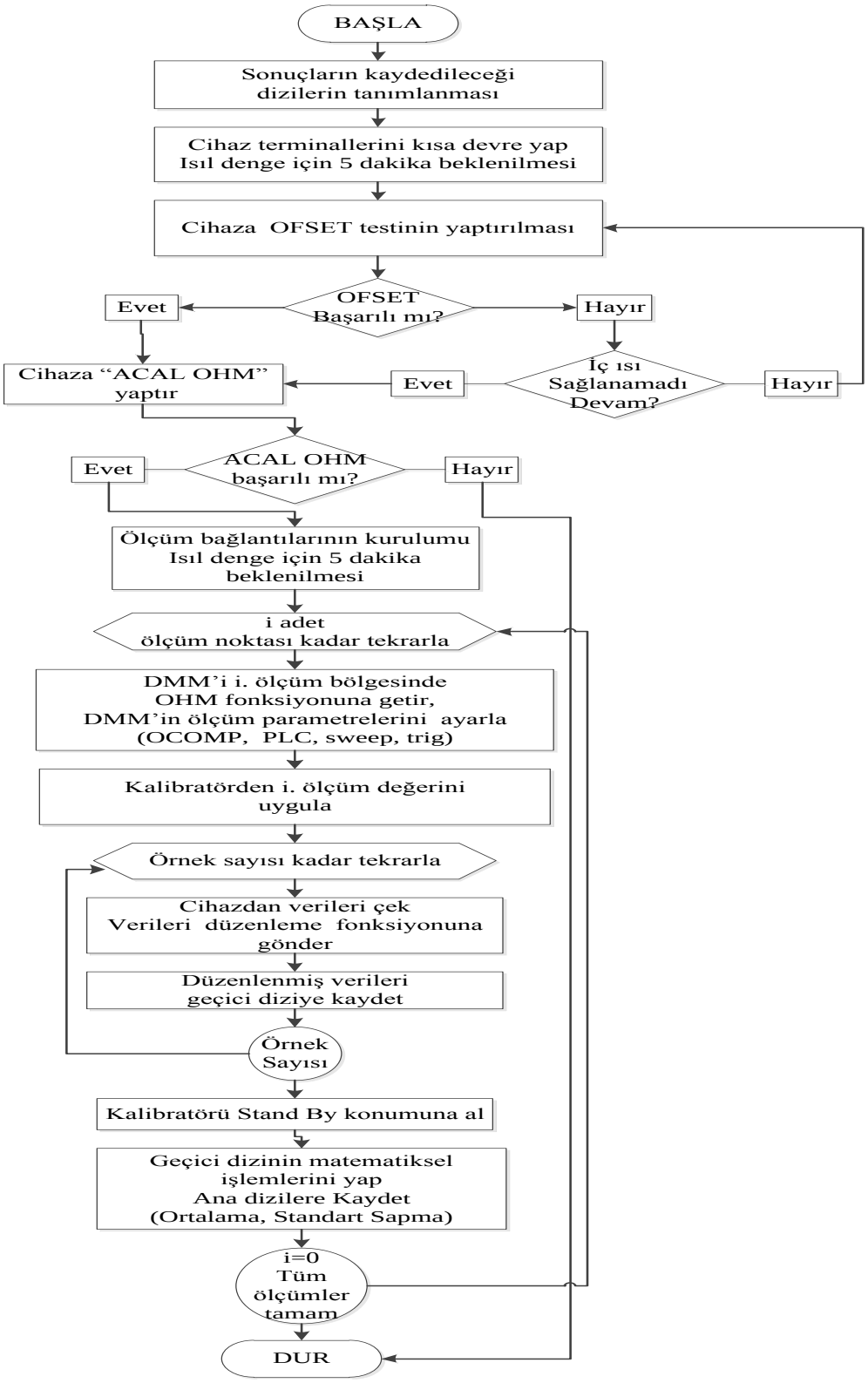
AC akım kalibrasyonunda, AC gerilimde olduğu gibi frekans değerleri de ölçüme girmektedir. Bu durumda cihazlara ölçüm noktaları ile birlikte frekans değerlerinin de bildirilmesi gerekmektedir. Ölçüm işleminde diğer kalibrasyon işlemlerinde olduğu gibi gerekli ölçüm parametrelerinin girilmesi akabinde, bir döngü içerisinde ölçüm değerleri uygulanarak cihazdan ölçüm sonuçları çekilir ve işlenip, depolanır. AC akım fonksiyonu akış diyagramı Şekil 4.25'te verilmiştir.

4.3.6. Direnç Kalibrasyonu

Cihazın direnç fonksiyonu gerekli kablo bağlantılarının yapıldığı sistemle, referans kalibratörden uygulanan doğruluğu bilinen direnç değerlerinin, doğrudan DMM ile ölçülmesi suretiyle gerçekleştirilir. Direnç kalibrasyonu ölçüm noktaları Tablo 4.5.'te belirtilmiştir. Ölçüm noktaları tam değer olmasına rağmen, kalibratör direnç standardı olarak tam değer uygulayamamaktadır. Örneğin 10 Ω değerinde kalibratörün uyguladığı değer 10.000095 Ω'dur. Bu sorunu aşmak için uygulanan değerler tek tek girilerek bir dizi değişkeninde tanımlanmıştır.

Tablo 4.5. Direnç kalibrasyonu noktaları.

Ölçüm Bölgesi	Ölçüm Noktası
10 Ω	0 Ω, 10 Ω
100 Ω	10 Ω, 100 Ω
1 k Ω	0.1 k Ω, 1 k Ω
10 k Ω	1 k Ω, 10 k Ω
100 kΩ	10 kΩ, 100 kΩ
1 MΩ	0.1 MΩ, 1 MΩ
10 MΩ	1 MΩ, 10 MΩ
10 Ω (2 Wire)	0 Ω
100 MΩ (2 Wire)	10 MΩ, 100 MΩ



Şekil 4.26. Direnç kalibrasyonu akış diyagramı.

DMM'in direnç fonksiyonlarının kalibrasyonu için ölçüm noktaları, üretici önerileri, AFMETCAL prosedürleri ve EURAMET/cg-15 dokümanında belirtilen noktalar dikkate alınarak belirlenmiştir. İşlemler için AFMETCAL prosedürü takip edilmiştir.

Direnç ölçümlerinde, yüksek değerlerde yükten gelen direnç değerini elemine etmek için iki kablolu ölçüm yapılmaktadır. Direnç kalibrasyonunda iki kablolu durumunun da kalibrasyonunu gerçekleştirmek için, 10 Ω ve 100 M Ω değerlerinde iki kablolu ölçüm yapılmıştır. İki kablolu ölçüm durumunda cihazlarda otomatik kompanzasyon, sense ve 4 Wire ölçüm modlarının kapalı olması gerekmektedir. Programın akışına iki kablolu ölçüm modu gömülmüştür.

Direnç ölçümlerinde ofset hatasının kabul edilen değerler arasında olması önemli bir husustur. Direnç kalibrasyonunda da ölçümlere başlamadan önce cihazın giriş uçları kısa devre edilerek ofset hatası kontrolü yapılmaktadır. Ofset testini geçen cihaza direnç modu iç kalibrasyonu (ACAL OHM) yaptırılmaktadır. İç kalibrasyonu başarıyla geçiren cihaza tablodaki değerler kalibratörden uygulatılarak ölçümler bir döngü içerisinde gerçekleştirilir. Diğer kalibrasyon işlemlerinde olduğu gibi ölçüm verileri işlenerek depolanır. Direnç kalibrasyonu akış diyagramı Şekil 4.26.'da verilmiştir.

4.3.7. Frekans Kalibrasyonu

Cihazın frekans fonksiyonu gerekli kablo bağlantılarının yapıldığı sistemle, referans sinyal üretecinden uygulanan doğruluğu bilinen sinyallerin, doğrudan DMM ile ölçülmesi suretiyle gerçekleştirilir. Frekans kalibrasyon noktaları Tablo 4.6.'da belirtilmiştir.

DMM'in frekans fonksiyonunun kalibrasyonu için ölçüm noktaları, üretici önerileri, AFMETCAL prosedürleri ve EURAMET/cg-15 dokümanında belirtilen noktalar dikkate alınarak belirlenmiştir. İşlemler için AFMETCAL prosedürü takip edilmiştir.

Ölçüm işleminde diğer kalibrasyon işlemlerinde olduğu gibi gerekli ölçüm parametrelerinin girilmesi akabinde, bir döngü içerisinde ölçüm değerleri uygulanarak cihazdan ölçüm sonuçları çekilir ve işlenip, depolanır. Frekans fonksiyonu akış diyagramı Şekil 4.27.'de verilmiştir.

Tablo 4.6. Frekans kalibrasyonu noktaları.

Ölçüm Bölgesi	Ölçüm Noktası
1 Hz	1 Hz
15 Hz	15 Hz
100 Hz	100 Hz
1 kHz	1 kHz
10 kHz	10 kHz
100 kHz	100 kHz
500 kHz	500 kHz
1 MHz	1 MHz
2 MHz	2 MHz
10 MHz	10 MHz

Frekans kalibrasyonunda farklı bir cihaza geçildiği için kablo bağlantılarının tekrar kurulması gerekir. Kullanıcıya gerekli bağlantıları yapması için mesaj yollanmakta ve bağlantının yapılmasına müteakip test edilmektedir. Bu durumda sinyal üreticisi ile DMM arasında frekans ölçümlerinin yapılacağı tek kablo bağlanmaktadır. Kablo girişinin farklı olmasından dolayı yanlış bağlanma ihtimali düşüktür.

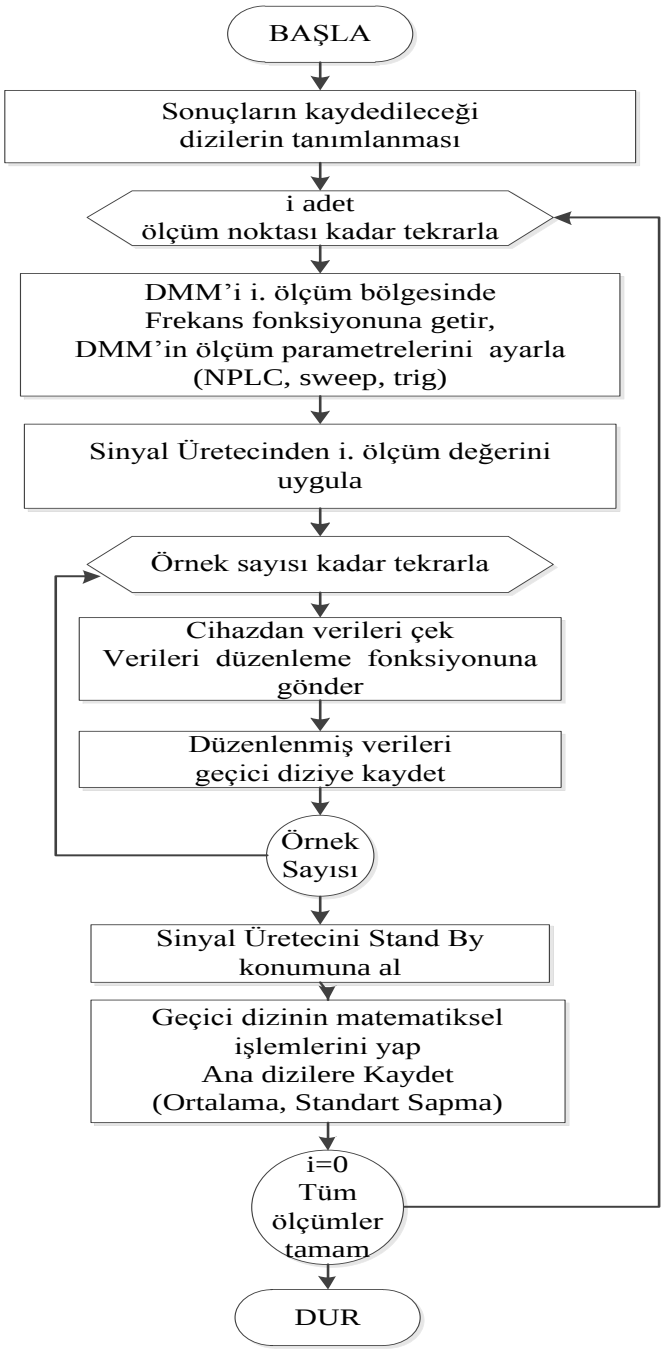
4.4. Belirsizlik Hesapları

Kalibrasyon işlemlerinde yapılan ölçümlerin belirsizliği, birinci bölümde açıklanan belirsizlik hesapları doğrultusunda yapılmaktadır. Ortam şartları, kullanılan cihazların sertifika bilgileri, üretici firma bilgileri göz önüne alınarak yapılan hesaplamalar kullanıcıya sertifikada verilmektedir.

4.5. Sonuçların Sertifikalandırılması

Kalibrasyon işleminin çıktısı olan sertifika, TS EN ISO/IEC 17025 standardının içeriğine uygun olarak hazırlanmaktadır [9]. Sertifika program tarafından baskıya hazır durumda sunulmakta, talep edildiği durumda yazdırılabilmektedir. EK–A'da kalibrasyonu

gerçeklenen bir DMM'in kalibrasyon sertifikası verilmiştir. Sertifikada yapılan her ölçüm için ölçüm bölgesi, uygulanan değer, hata ve belirsizlik değerleri verilmektedir.



Şekil 4.27. Frekans kalibrasyonu akış diyagramı

5. BÖLÜM

BULGULAR

Kalibrasyon otomasyonu uygulamasında yazılım sürecini IVI standartları üzerinden geliştirmeyi amaçlayan çalışma hem kalibrasyon işlemi hem de otomasyon yazılımı açısından çeşitli veriler sunmaktadır. Bir kalibrasyon otomasyonundan istenen getirileri çalışmada görmek mümkündür. Diğer yandan IVI tabanlı yazılım altyapısı ile otomasyonun optimizasyonu ve idame ettirilebilirliği söz konusu olmaktadır [65].

Uygulamadaki cihazların seçiminde, öncelikle uygulamanın yapıldığı kalibrasyon laboratuarındaki cihazlar dikkate alınmıştır. 8½ dijit DMM'lerin manuel kalibrasyon işlemleri oldukça uzun ve zahmetlidir.

Referans standart olarak kullanılan bu tip DMM'ler köklü bir geçmişe sahip olmalarına rağmen, ilgili laboratuarda bu cihaza yönelik bir otomasyon bulunmamaktadır. Ticari otomasyonlar ise istenilen askeri standartları sağlamamaktadır. Diğer yandan aynı tip DMM'lerin kalibrasyonuna yönelik dışarıdan gelen talepler de oldukça fazladır. İkinci olarak bu uygulama, geliştirilen kalibrasyon otomasyonu sisteminde farklı komut sistemlerini bir arada kullanmak mümkün olduğu için seçilmiştir. Bu özelliği ile çalışma, komut sistemlerinin özelliklerini aynı anda kullanarak, otomasyon sisteminin performansının arttırılması konusunda etkili olmuştur.

Fluke 5720A çok fonksiyonlu kalibratör ve Agilent 3458A DMM'in kontrolünde kendilerine has komut dilleri kullanılmıştır. Komutlar ortak IVI sürücüsü üzerinden işlenmiştir. Agilent 33250A sinyal üreteci ise doğrudan IVI standartlarında mevcut sinyal üreteçlerine yönelik standart sürücünün tanımlanması ile yönetilmiştir.

Sistem kalibrasyon gibi başlı başına bir bilimsel alan ile yazılım mühendisliği gibi ayrı bir bilimsel alanı birleştirmiştir. Böylece ölçüm cihazlarına yönelik yazılım çalışmaları da uygulamada yerini alarak çeşitli bulgular sunmuştur.

5.1. Kalibrasyon Sürecinin İncelenmesi

Tüm otomasyon sistemlerinde olduğu gibi kalibrasyon otomasyonu sisteminde de harcanan zaman ve insan gücü en aza indirilmeye çalışılmaktadır. Ayrıca insan hatasının en aza indirilmiş olduğu yüksek doğruluklu ölçüm sonuçları da bir kalibrasyon otomasyonu sürecinin beklenenleri arasındadır.

Yapılmış olan kalibrasyon otomasyonunda hedeflenenler aşağıda sıralanmıştır.

- Kalibrasyon otomasyonu ile cihazın kalibrasyon işlem süresini en aza indirerek **zamandan tasarruf etmek**.
- Kalibrasyon otomasyonuyla işlemlerin tamamını bilgisayar kontrollü olarak yaptırarak, kullanıcıya sadece başlangıç bağlantılarını yaptırmak, böylece **iş yükünü** en aza indirmek.
- Yapılan bağlantıların yazılım ile kontrol edilmesi sağlanarak, kullanıcı kaynaklı **bağlantı hatalarını** en aza indirmek.
- Yapılan ölçümlerde, istenilen sayıda ve çözünürlükte örneğin cihazdan otomatik olarak alınarak, kullanıcıya bağlı **gözlem hatalarını** yok etmek.
- Alınan çoklu sayıda veri ile standart sapma, ortalama vs. işlemleri yazılım kullanarak yaptırmak, böylece matematiksel **işlem hatalarını** yok etmek.
- Sertifika işlemleri için ISO 17025 standardında istenilen belirsizlik, hata vs. hesaplarını doğru ve güvenli bir şekilde yaparak, bilimsel ve akredite bir kalibrasyon işlemi gerçekleştirerek **standartlara uygun olarak sertifikalanmasını** sağlamak.

5.1.1. Kalibrasyon Süresi

Cihaz kullanıcıları cihazın kalibrasyon laboratuarında geçirdiği süreyi cihazları kullanamama açısından verimsiz süre olarak değerlendirmekte ve bu süreyi en aza indirmek istemektedirler. Kalibrasyon laboratuarı da işgücünü azaltmak amacıyla cihazların kalibrasyon sürelerini düşürecek çalışmalar yapmaktadır. Özellikle cihazların eksikliğinin büyük olumsuzluklara yol açacağı uygulamalarda cihazın kalibrasyon süresinin azaltılması gerekmektedir. Bu çalışmanın uygulamasında kalibrasyonu gerçekleştirilen cihaz, referans standart olarak sıkça kullanıldığı için kalibrasyon süresinin azaltılması amaçlanmıştır.

8½ dijitlik DMM'ler en hassas ölçüm doğruluğuna ulaşmak için yanıt alma sürelerini uzun tutmaktadır. Uzun ölçüm süreçlerine, önceden kestirilemeyen beklemeler de eklendiğinde kalibrasyon sürecinde gereksiz zaman kayıpları oluşmaktadır. Yapılan yazılım tabanlı düzenlemeler ile sistemde boşa harcanan zamanın en aza indirilmesi sağlanmıştır.

Uygulamada kullanılan cihazların veri yolu cevap bekleme süreleri kontrol edilerek sistemde gereksiz beklemeler en aza indirilmiştir. Kalibrasyon prosedürü işlenirken bazı durumlarda sisteme bekleme verilmesi gerekmektedir. Cihaza bir işlemin gerçeklenmesi amacıyla komut gönderildiğinde, işlemin gerçekleştirilmesi süresince başka bir komut gönderilmemesi durumunda sistem gönderilen ikinci komutu dikkate almamakta yada hata vermektedir. Bu durumda sistem, cihazlarda başlatılan işlemlerin bitirilmesine kadar bekletilmelidir.

Bazı cihazlarda işlemlerin bittiğine dair cevap gönderme özelliği mevcuttur. Verilmesi gereken bekleme sürelerinin minimum değerleri ya cihazdan gelen işlem bittiğine dair bildirimlerle yada deneysel olarak tespit edilmiş verilerle belirlenerek ilgili yerlerde koda çevrilmiştir. Cihazların zaman sorunlarına bazı genel çözüm önerilerini gösteren kod dizini Tablo 5.1.'de verilmiştir [65].

Zaman sorunlarına, bekleme ve tarama sürelerinin yazılım tabanlı olarak düzenlenmesi ile sistem performansı artmaktadır. Sistemin zaman performansında etkin rol oynayan komutlardan biri "*OPC?" komutudur. Cihaza "*OPC?" komutu gönderildiğinde cihaz işlemin bitmesini takip etmekte, işlemin bitmesine müteakip "1" cevabı vermektedir.

Tablo 5.1. Zaman sorununa çözüm önerileri.

Durum	Kod

Cihaza bir işlemi başlattıktan (OPER) sonra cihazdan işlemin bittiğine dair durum beklenmesi (*OPC?)	`fluke5720.WriteString("OPER",true);`
	`fluke5720.WriteString("*OPC?",true);`
	`fluke5720.ReadString();`

Sistemde oluşturulan sanal arayüz yollarına cevap bekleme süresi (tarama süresi) tanımlanması	`hp_3458.IO.Timeout = 50000;` `fluke5720.IO.Timeout = 50000;`
Sisteme gecikme (bekleme) verilmesi	`System.Threading.Thread.Sleep(1000);`

Kalibrasyon prosedürlerinin işlenmesi sırasında, yukarıda da belirtildiği üzere, cihazlara bir işlemi gerçekleştirmeleri için ilgili komut gönderildiğinde, başlayan işlem bitene kadar, farklı bir işlemi yapması için komut gönderilememektedir. Bu durumda cihazlardan "*OPC?" komutları gibi işlemin bittiğine dair cevap beklenmeli yada böyle bir cevap verme özelliliği yoksa deneysel olarak tespit edilmiş süreler kadar beklemeler verilmelidir. Bekleme sürelerinin optimum seçilmesi sistem performansını önemli oranda etkilemektedir.

Tablo 5.2. "*OPC?" komutunun sisteme etkisi.

Fonksiyon	Kontrolsüz (dakika)	*OPC? (dakika)	Zaman Tasarrufu (%)	Kazanç (dakika)
Ofset	21	17	19,0	4
DC Gerilim	59	51	13,6	8
AC Gerilim	150	132	12,0	18
DC Akım	47	41	12,8	6
AC Akım	55	43	21,8	12
Direnç	63	55	12,7	8
Frekans	34	34	0,0	0
Toplam	429	373	13,0	56

Tablo 5.2.'de "*OPC?" komutunun eklenerek işlemlerin bitip bitmediğinin kontrol edilmesinin sistem performansına etkisi verilmiştir. Frekans üretiminde kullanılan Agilent 33250A'nın "*OPC?" komutunun olmaması, frekans kalibrasyonunda bu komutun bir etkisi olmamasına neden olmuştur.

Kontrol birimi ile cihazlar arasında veri alışverişini sağlayan arayüz donanım yollarının IVI-VISA tabanlı sanal yollarının cevap tarama sürelerinin işlemin durumuna göre düzenlenmesi sistem zaman performansının artımında önemli bir parametre olmaktadır. Agilent 3458A DMM'in farklı fonksiyonlar için farklı sonuç verme süreleri bulunmaktadır. Cihaz direnç ölçümünde oldukça uzun bir ölçüm alma süresine sahip iken, akım veya frekans ölçümlerinde bu süre direnç ölçümlerine göre yaklaşık on kat daha azdır.

Tablo 5.3.'de eski yöntemle tek bir cevap tarama süresinin verilmesi ile IVI-VISA altyapısını kullanarak ayrı ayrı verilmesi durumunda oluşan değişim gösterilmiştir.

Tablo 5.3. Değişken timeout verilmesinin sisteme etkisi.

Fonksiyon	Sabit Timeout (dakika)	Değişken Timeout (dakika)	Zaman Tasarrufu (%)	Kazanç (Dk)
Ofset	17	13	23,5	4
DC Gerilim	51	47	7,8	4
AC Gerilim	132	116	12,1	16
DC Akım	41	36	12,2	5
AC Akım	43	38	11,6	5
Direnç	55	49	10,9	6
Frekans	34	28	17,6	6
Toplam	373	327	12,3	46

Dolayısıyla cihazın programa ölçüm sonuçlarını yollama süreci de aynı şekilde farklı olacaktır. Bu durumda, her bir ölçüm fonksiyonu için hatta fonksiyonlardaki alt ölçümler (dirençte 2 veya 4 kablolu, AC gerilimde senkron veya asenkron gibi) için sanal arayüzlerin

cevap tarama süreleri farklı olmalıdır. IVI-VISA tabanlı oluşturulan kodlarda “timeout” bilgisi ile cihazların arayüz cevap tarama süreleri verilebilmektedir. Her bir fonksiyon için algoritmaların işlenmesine başlanmadan “timeout” değerlerinin belirlenmesi sistemdeki gereksiz beklemeleri en aza indirmiş ve sistemin performansını arttırmıştır.

Cihazların *OPC? gibi işlemin bitip bitmediğini kontrol eden bir komutun olmaması durumunda yada komutun kullanılamayacağı durumlarda, cihaza bir komut gönderildiğinde, deneysel olarak tespit edilen işlem süresi kadar gecikme (sleep, delay) verilmesi gerekmektedir.

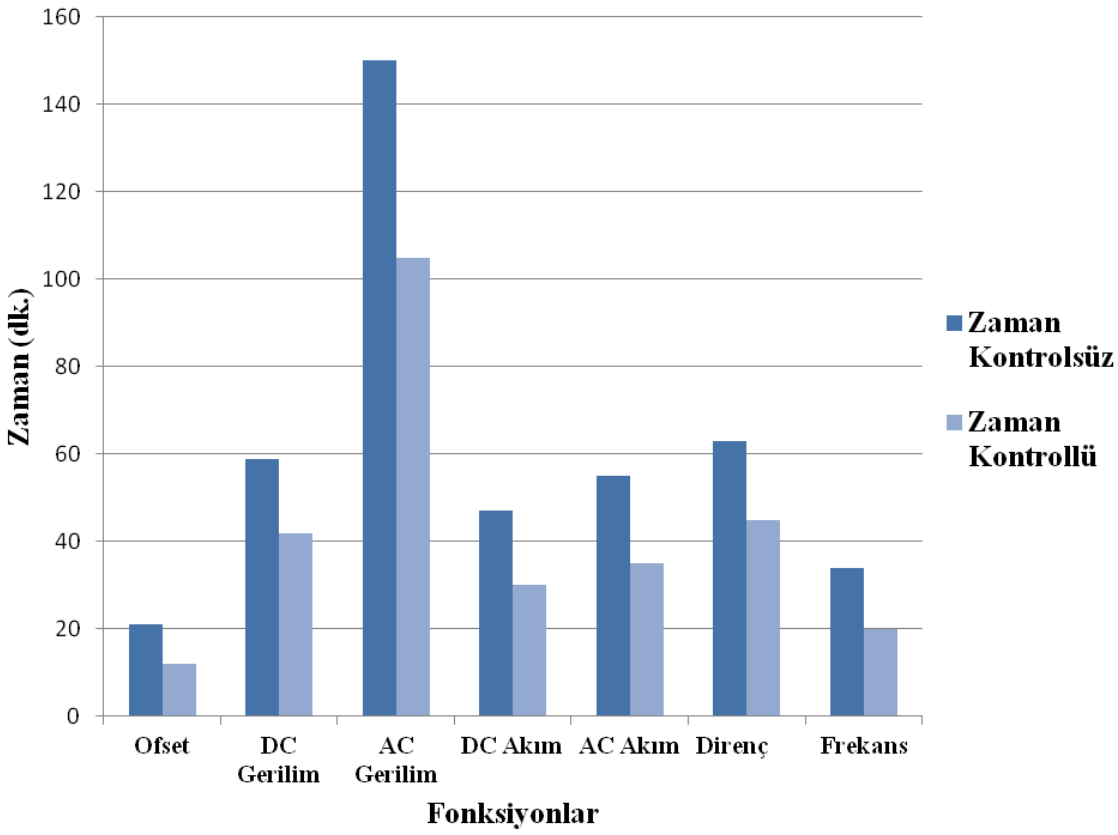
Gecikmelerin süresinin en uygun seçilmesi sistemin hızını etkileyen önemli bir parametredir.Bu çalışmada ele alınan zaman sürecini optimum olarak yönetmeye yönelik önemli parametreler ile sistemin performansının ne kadar değiştiği gözlemlenmiştir.

Tablo 5.4. Zaman kontrolünün sisteme etkisi.

Fonksiyon	Zaman Kontrolü Yapılmamış (Dakika)	Zaman Kontrolü Yapılmış (Dakika)	Zaman Tasarrufu (%)	Kazanç (Dakika)
Ofset	21	12	42,9	9
DC Gerilim	59	42	28,8	17
AC Gerilim	150	105	30,0	45
DC Akım	47	30	36,2	17
AC Akım	55	35	36,4	20
Direnç	63	45	28,6	18
Frekans	34	20	41,2	14
Toplam	429	289	32,6	140

Sistem performansı, bekleme veya tarama sürelerinin düzenlenmesi ve eklenmesi ile oldukça artmaktadır. Tablo 5.4.’te kalibrasyon fonksiyonlarının işlem süresi performans karşılaştırılması yapılmıştır.

Zaman kontrolünün sisteme olan etkisi şekil 5.1.'de verilen grafikte gösterilmektedir.



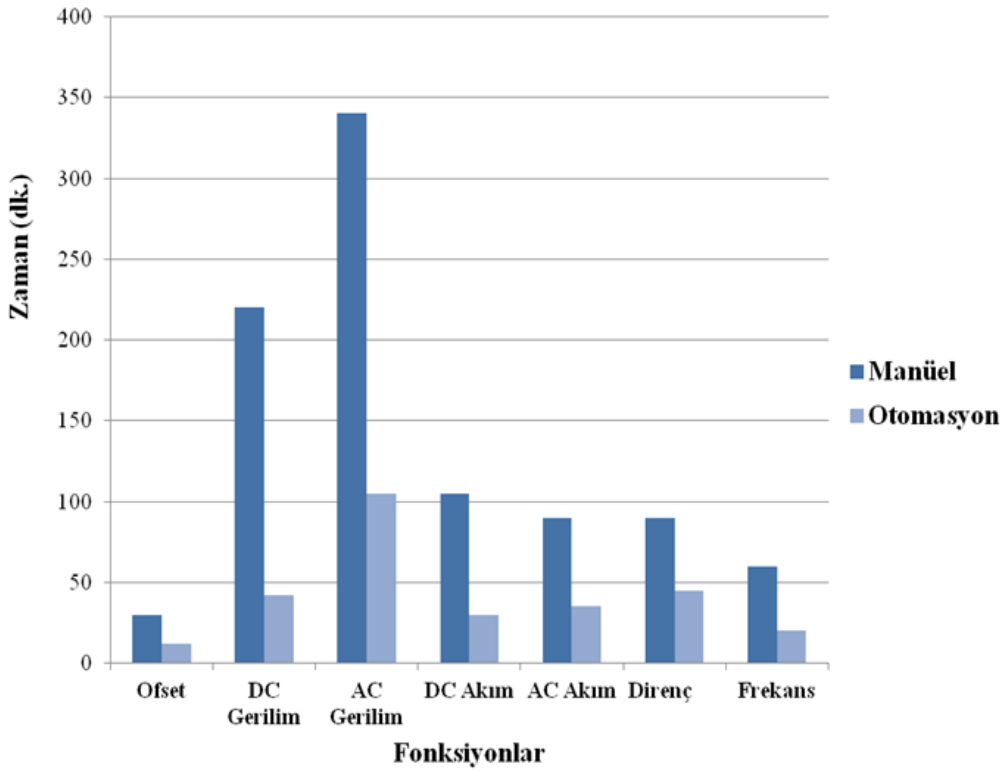
Şekil 5.1. Zaman kontrolünün sistem performansına etkisi.

Kalibrasyon işleminin geneline bakıldığında, çalışmanın en önemli çıktısı olan manuel ve otomatik kalibrasyon arasındaki zaman farkı, oluşturulan sistemin performansını verecektir. Manuel kalibrasyon ile kalibrasyon otomasyonu uygulaması karşılaştırıldığında Tablo 5.5.'teki sonuçlar elde edilmektedir.

Manuel kalibrasyonda harcanan süre boyunca teknisyenin işlem başında hazır olması gerektiği gerçeği, kalibrasyon otomasyonunun getirdiği işgücü kazancını daha açık ve net bir şekilde ortaya koymaktadır. Şekil 5.2.'de otomatik kalibrasyon ile manuel kalibrasyon arasındaki performans karşılaştırılması grafiksel olarak verilmiştir.

Tablo 5.5. Manuel ve otomatik kalibrasyon performans karşılaştırılması.

Fonksiyon	Manuel Kalibrasyon (Dakika)	Otomatik Kalibrasyon (Dakika)	Zaman Tasarrufu (%)	Kazanç (Dakika)
Ofset	30	12	60,0	18
DC Gerilim	220	42	80,9	178
AC Gerilim	340	105	69,1	235
DC Akım	105	30	71,4	75
AC Akım	90	35	61,1	55
Direnç	90	45	50,0	45
Frekans	60	20	66,7	40
Toplam	935	289	459,2	646



Şekil 5.2. Otomatik ve manuel kalibrasyonların performans grafiği.

5.1.2. Diğer Kazanımlar

Cihazların hassasiyeti arttıkça kalibrasyon süreçleri de uzamaktadır. Normal koşullarda 8½ dijitlik bir DMM'in kalibrasyonu da oldukça zor ve uzun bir süreçtir. Tekrarlı ölçüm işlemleri ise süreci içinden çıkılmaz hale getirmektedir. Manuel kalibrasyon işleminde yaklaşık 200 adet ölçüm, 400 adet matematiksel işlem, 3000 adet tuşa basma işlemi yapılmakta iken kalibrasyon otomasyonu ile işlemlerin birkaç tuşa dokunma ve bağlantı kurma rahatlığına indirgenmesi oldukça önemlidir. Böylece insan gücü en aza indirilmektedir.

Yapılan işlemlerin çok az bir kısmının manuel olması ve bu işlemlerin yazılım ile kontrol edilmesi ile kullanıcı kaynaklı hatalar en aza indirilmektedir. Cihaz kontrol ve kablo kontrol fonksiyonları ile kullanıcın yaptığı bağlantılar kontrol edilmektedir.

Kalibrasyon süreci başlı başına bir ölçüm sürecidir. Ancak 8½ dijitlik bir DMM'in ekranında ölçüm sonucu olarak virgülden sonra sekiz basamak bulunmaktadır. Hassasiyetin yüksek olması önemlidir. Ancak gözle edinilen ölçümlerde ölçüm hassasiyetinin düşük, sonuçların hatalı olma olasılığı çok yüksektir. Diğer yandan ortalama, standart sapma gibi matematiksel hesaplarda çoklu sayıda örnek gerekmektedir. Kalibrasyon otomasyonu ile kullanıcı istediği örnek sayısını girmekte ve ölçüm sonuçlarının edinimi sürecinde olaya müdahil olmamaktadır. Böylece sistem gözlem hatalarını ortadan kaldırmaktadır.

Ölçüm sonuçlarının elde edilmesi ile matematiksel hesap sürecine geçilmektedir. Yine matematiksel hesapların bir yazılım desteği alınmadan yapılması kalibrasyon verilerini yorumlama sürecini oldukça yavaşlatmaktadır. Bu durumda devreye yazılım tabanlı matematiksel fonksiyonlar girmektedir. Oluşturulan matematiksel fonksiyonlar kullanılarak, alınan çoklu sayıda veri ile standart sapma, ortalama vs. işlemler yaptırılmış, böylece matematiksel işlem hataları en aza indirilmiştir.

Kalibrasyon işleminin çıktısı olan kalibrasyon sertifikası için ISO 17025 standardında istenilen belirsizlik ve hata hesapları doğru ve güvenli bir şekilde yapılmıştır. Böylece, bilimsel ve akredite bir kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiş ve standartlara uygun olarak hazırlanan sertifika kullanıcıya sunulmuştur.

5.2. Yazılım Sürecinin İncelenmesi

Elde edilen bütün kazanımlarda yazılım desteğinin önemli bir etkisi vardır. Bazı sistem performans parametrelerin belirlenmesinde ise yalnızca yazılım ve komut standardı seçimi etkilidir. Kullanılan IVI standartlarının getirileri ile sistemin performansı yükseltilmiştir. Özellikle IVI standartlarının sunduğu cihazların değiştirilebilirliği, cihaz benzetimi ve durum önbelleklemesi özellikleri ile otomasyon sistemi daha etkin hale getirilmiştir.

5.2.1. Uzun Süreçte Sistemin İdamesi

Bir otomasyon sisteminden beklenen önemli parametrelerden birisi de uzun süreçte bakım ve onarım maliyetinin düşük olmasıdır. Genellikle yapılan çalışmalarda otomasyon sistemlerinin idamesini cihazlar ve diğer donanımsal bileşenler üzerinden sağlamak hedeflenmiştir. Yazılım tabanına yönelik bir hedef ise yazılımın üzerinde yapılacak değişikliklerin yazılım bilgisi gerektirmesinden dolayı talep görmemiştir. Sistem kullanıcıları ile program geliştiricilerinin farklı personeller olması, geliştirilen programların kendine has dil özellikleri olması, sistem kullanıcılarını yazılım tabanından uzak tutmuştur.

Ancak, yeni nesil yazılım teknolojileri ile geliştirilen programların uzun süreçte idamesi oldukça kolay hale gelmiştir. Nesneye yönelik programlama dillerinin sınıf felsefesi ile hazırlanan programlara, IVI standartlarının avantajları da eklendiğinde karşımıza oldukça verimli sonuçlar çıkmaktadır. Sistemin yazılım tabanlı uzun süreç idame ettirilebilirlik avantajlarından bazıları aşağıdaki maddelerde sıralanmıştır.

a. Uzun süreçte bir cihazın arıza yada bakım durumuna girerek devre dışı kalması yada cihazın kullanım süresinin dolması ile daha teknolojik bir cihazla değiştirilmesi durumlarında sistem yazılım tabanında yapılacak küçük değişimlerle çalışmasına devam edebilmektedir.

   Sistemde kullanılan sinyal üretecinin arızalandığı ve kalibrasyon laboratuarında eşdeğer ancak farklı bir firmanın IVI Fgen sınıfını destekleyen bir sinyal üreteci olduğu varsayıldığında sistemde yapılacak tek şey arızalı cihaz yerine diğer cihazın

kullanılması olacaktır. Sisteme yeni cihazı tanıtmak ve adres yolunu cihaza belirtmek yeterli olacaktır.

b. Kalibrasyonu yapılan cihaz yerine başka bir cihazın kalibrasyonun yapılması durumunda, standartlara göre düzenlenmiş ölçüm noktaları ve parametreleri değiştirilmeden yalnızca yeni cihazın bilgileri girilerek sistem adapte edilebilir.

Çoğu kez benzer fonksiyonları işleten ancak farklı cihazlar kalibrasyon laboratuarına gelmekte ve her biri için aynı kalibrasyon prosedürleri farklı programlarda işlenmektedir. Ancak geliştirilen uygulama, Agilent 3458A yerine, bir başka DMM'in gelmesi durumunda yazılımda yapılacak tanımlama işlemleri ve cihaza özgü komutların eklenmesi ile sistemi yeni cihaza adapte edebilmektedir.

Diğer cihazların sisteme adaptasyonunda, standartlara uygun ölçüm noktalarının seçimi ve IVI tabanlı sanal yolları oluşturan IVI VISA sürücüsü önemli rol oynamaktadır.

Standartlarda belirlenen ölçüm noktaları her bir DMM için yaklaşık aynıdır. Böylece değiştirilmesine gerek kalmamaktadır. Diğer yandan gönderilecek komutlar da IVI standartları için aynı olduğundan, değişiklik yapmadan sistem idame ettirilebilmektedir.

c. Sistem yazılımında görülen değişimler uzun süreç bakım onarım durumlarında kolaylıkla yapılabilmektedir. Nesneye yönelik programlama dillerinde var olan sınıf oluşturma ve sınıflara yeni nesneler ekleme özellikleri uygulamanın yazılım tabanında mevcuttur. Oluşturulan IVI nesnelerinin parametreleri kolaylıkla değiştirilebilmekte yeni IVI nesneleri tanımlanabilmektedir.

5.2.2. Sistemin Benzetimi

IVI standartlarının önerdiği en önemli özelliklerden biri olan sistem benzetimi uygulamada sağlanabilmektedir. Cihaza gerek duymadan, sistemdeki cihazların benzetimi yapılabilmektedir. Sistem, IVI sürücülerinde tanımlı cihazlara ait cevapları istenildiği

takdirde üretebilmektedir. Böylece donanımsal bir destek gerekmeden yazılım tabanı geliştirilebilmektedir.

5.2.3. Durum Önbelleklemesi

Sistem, IVI standartlarının sunduğu önemli bir avantaj olan durum önbelleklemesini kullanmaktadır. Durum önbelleklemesi, kontrol birimi ile cihaz arasındaki gereksiz I/O işlemleri en aza indirilerek sistem performansının artırılmasıdır. Sistemin performans artırımında, kanal güvenliği sağlanarak bir anda birden çok kanalın iş yapabilmesi durumu da söz konusu olmakta böylece aynı anda birden fazla cihaza hakim olunabilmektedir.

Sunulan bulgular ile kalibrasyon otomasyonu sisteminin optimizasyonu, idame ettirilebilirliği ve diğer cihazlara adaptasyonu açıklanmıştır. Böylece yapılan çalışmanın ileriye yönelik geliştirmelere açık olduğu anlaşılmaktadır.

6. BÖLÜM

SONUÇ - TARTIŞMA ve ÖNERİLER

6.1. Sonuç

Kalibrasyon, ölçüm cihazlarının doğruluğunun belirlenmesinde ve izlenebilirliğinin sağlanmasında oynadığı rol ile teknolojinin vazgeçilmez unsurlarından biridir. Kalibrasyon ile doğruluğu tespit edilmiş, hata değerleri belirlenmiş cihazlarla çalışmak, yapılan ölçümlerin güvenilirliğini arttırmaktadır.

Kalibrasyon ölçüm güvenilirliğini sağlamakta gerekli olmakla birlikte, cihaz kullanıcıları cihazın kalibrasyonda geçirdiği süreyi verimsiz süre olarak değerlendirmekte ve bu süreyi azaltmak istemektedirler. Diğer yandan kalibrasyon laboratuarları da işgücü bakımından kalibrasyon süresini azaltmaya çalışmaktadırlar. Özellikle ölçüm cihazının eksikliğinin zafiyetler oluşturacağı uygulamalarda, kalibrasyon süresi azaltılmak istenen önemli bir parametredir.

Elektronik ölçüm cihazlarının kalibrasyonu, cihazları yazılım ve donanım destekleri ile uzaktan kontrol ederek daha hızlı ve yüksek doğruluklu yapılabilmektedir. Kalibrasyon işlemlerinin otomasyon halinde yaptırıldığı uygulamalarda ile zamandan tasarruf sağlanmakta, kullanıcı kaynaklı hatalar en aza indirilmekte ve kalibrasyon sertifikası için gerekli matematiksel hesaplar yapılabilmektedir.

Bu çalışmada geliştirilen uygulama ile 8½ dijitlik laboratuar tipi bir DMM'in kalibrasyon otomasyonu gerçeklenmiştir. Cihaz kalibrasyon laboratuarlarında referans

standart olarak kullanıldığı için kalibrasyonunun hızlı ve yüksek doğruluklu yapılması hedeflenmiştir. Geliştirilen uygulama ile kalibrasyon süresi önemli ölçüde azaltılmıştır. İşlemlerin tamamı otomasyon üzerinden gerçekleştirildiğinden gerekli insan gücü de azaltılmıştır.

Kablo bağlantıları gibi insan gücü gerektiren mekanik işlemler, yazılım ile kontrol ettirilmiş, insan hatası ortadan kaldırılmıştır. İstenilen sayıda ölçüm alma imkânı ve alınan ölçümleri takip etme ve depolama imkânı oluşturulmuştur. Matematiksel hesaplamalar ve sertifika işlemleri otomasyona yatırılarak standartların istediği kalitede sertifika çıktısı alınması sağlanmıştır.

Diğer yandan, gerçekleştirilen otomasyon uygulamasının yazılım tabanı nesneye yönelik programlama tabanı ile oluşturulmuştur. Cihazlara işlem yaptırmak amacıyla yeni nesil IVI standartları ve sürücüleri kullanılmıştır.

Böylece IVI standartları ve sürücülerinin avantajları kalibrasyon otomasyonu uygulamasına aktarılmıştır. IVI'nin sunduğu cihaz değiştirilebilirliği özelliği ile uygulamanın uzun süreçteki idamesinde, yazılım tabanında çok az değişiklikle, sistemin bakım onarım işlemlerinin yapılması sağlanmıştır.

IVI'nin sunduğu diğer bir özellik olan durum önbelleklemesi ile sistemdeki gereksiz beklemeler en aza indirilmiş böylece sistemin performansı arttırılmıştır. Yine IVI standartları tarafından sağlanan cihaz simülasyonu özelliği ile cihazlar olmadan kod geliştirme imkanı sağlanmıştır.

IVI standartlarının aktif bir şekilde kullanılması ile, uygulamanın yazılım kısmı canlı kalacak bir şekilde tasarlanmıştır. Böylece uzun süreçte bakım, onarım ve performans yükseltme durumlarında yazılımın kolayca değiştirilebilecek bir yapıya sahip olması sağlanmıştır. Ayrıca yazılım, benzer cihazların kalibrasyon işlemlerine de kolayca adapte olacak bir yapıda geliştirilmiştir.

6.2. Tartışma

Kalibrasyon otomasyonundaki en önemli hedefler zaman tasarrufu ve insan hatalarının en aza indirilmesidir. Çalışmada istenilen hedefler gerçekleştirilmekte, yazılım altyapısı

yeni nesil komut sistemleri ile tasarlanarak sistemin performansının yükseltilmesi sağlanmaktadır.

Literatürdeki benzer kalibrasyon otomasyonu uygulamaları genel itibariyle sistemin performans artırımını donanımsal bileşenler üzerinden gerçekleştirmeyi hedeflemiştir. Kalibrasyon ve yazılım gibi birbirinden farklı alanlar yeterince iç içe kullanılmamıştır. Günümüzde artan yazılım bilgisi ve gelişen yeni nesil yazılım teknolojilerinin kalibrasyon otomasyonuna uygulanması ile sistemlerin verimleri arttırılmaktadır.

Uygulamada otomasyon ve yazılım desteklerinden faydalanabilmek için hedefler iyi belirlenmelidir. Bu çalışmada, bir yandan gerekli kalibrasyon işlemlerinin gerçekleştirilmesi hedeflenirken diğer yandan yapılacak uygulamanın dinamik bir yapıya sahip olması amaçlanmıştır. Bu sebeple IVI standartları ve nesneye yönelik programlama tabanı kullanılmıştır.

Uygulamaların geliştirilmesinde cihazların desteklediği komut sistemleri önemlidir. Eski nesil ya da özel cihazlarda IVI standartlarının desteği bulunmayabilir. Bu durumda IVI'nin sunduğu avantajlardan yararlanılamaz. Amaçlanan hedeflere ulaşılması için, geliştirilecek sistemlerin altyapı çalışmaları iyi yapılmalıdır.

6.3. Öneriler

IVI standartlarının sunduğu özellikleri elektronik ölçüm cihazlarında kullanmak sistemlerin performansını arttırmaktadır. Uygulamaları IVI standartları veya sürücüleri ile geliştirmek, hem yazılım geliştirme sürecinde hem de sistemin ileriye yönelik idamesinde büyük avantajlar sağlayacaktır.

IVI sürücüsü olmayan cihazların sürücülerini geliştirmek cihaz kullanıcıları, yazılım geliştiricileri ve cihaz üreticilerinin hedefleri arasında olması ve bu hedefin gerçekleştirilmesi, cihazların gelecekte de aktif olarak kullanılmasını sağlayacaktır.

Kalibrasyon sistemlerinin tamamen otomasyon haline getirilmesi, bu sebeple yazılım teknolojilerinin kalibrasyon sistemleri ile daha yakın ilişkide olması üst seviye kalibrasyon laboratuarlarının hedefleri arasında olmalıdır.

Sonuç olarak IVI standartları ya da geliştirilen diğer standartların kullanılması ile elektronik ölçüm cihazlarının kullanıldığı ileriki uygulamaların performansı arttırılabilir. Uygulamaların daha dinamik bir yapıya sahip olması sağlanabilir.

KAYNAKLAR

1. Corporation, F., 1999. Calibration: Philosophy in Practice, Fluke Corporation, USA, 528 pp.
2. Editional Version 1.6, 2010. IVI-1.2: Operating Procedures 1.6, IVI Foundation, USA, 30 pp.
3. Standard Commands for Programmable Instruments (SCPI), SCPI Consortium, USA, 819 pp.
4. JCGM, 2008. International Vocabulary Of Metrology Basic And General Concepts And Associated Terms (VIM), BIPM, France, 191 pp.
5. Howarth, P., Redgrave, F., 2008. Metrology–In Short, EURAMET, UK, 86 pp.
6. Cameron D. N., 2005. Technical Training Measurement And Calibration Handbook. Keesler Air Force Base, Mississippi, USA, 100 pp.
7. Keith R., 2006. Fundamentals of Test Measurement Instrumentation. ISA, USA, 337 pp.
8. Pennella C. R., Kimothi S. K., 2004. The Metrology Handbook. ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin, USA, 50 pp.
9. TS EN ISO/IEC 17025 "Deney ve Kalibrasyon Laboratuvarlarının Yeterliliği İçin Genel Şartlar" Standardı.
10. Pastacı, H., 2003. Elektrik Elektronik Ölçmeleri. YTÜ, İstanbul, 496 s.
11. Morris, A.S., 2001. Measurement and Instrumentation Principles. Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford, 491 pp.
12. Keithley, 2004. Low Level Measurements Handbook Precision DC Current, Voltage and Resistance Measurements Keithley Instruments, Inc., USA. 239 pp.
13. Lira, I., 2002. Evaluating the Measurement Uncertainty Fundamentals and Practical Guidance, IOP Publishing Ltd., UK, 260 pp.
14. Dror M., L'ecuyer P., Szıdarovszky F., 2007. Modeling Uncertainty An Examination Of Stochastic Theory, Methods, And Applications, Springer Science Business Media, Inc, USA, 781 pp.
15. Kirkup, L., 2007. Calculating and Expressing Uncertainty In Measurement, Sydney, Australia, 27 pp.
16. JCGM, 2008. Guide To The Expression Of Uncertainty In Measurement. BIPM, France, 134 pp.

17. Multimetre Kalibrasyonu Eğitim Dokümanı, TUBİTAK, Kocaeli. 58 s.
18. EA, 2003. Guidelines On The Expression Of Uncertainty In Quantitative Testing, EA, 4/16. 27 pp.
19. Randle, W.C., Kerth, N., 1978. Microprocessors in instrumentation. Proceedings of the IEEE, 66(2): 172-181.
20. Güven, B., Uzun, T. Kontrol sistemlerinde kullanılan veri haberleşmesi teknolojileri, s.127-133, 1. Haberleşme Teknolojileri Ve Uygulamaları Sempozyumu, Kasım 21-24 2007, İstanbul.
21. Drnovsek, J., Bojkovski, J., Pusnik, I., Tasic, T., 1998. Automation of a calibration laboratory, pp. 365-366. Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest, Jul 6-10 1998, Washington.
22. Li N., Liu Q., Wang L., Liu X., 2008. A novel approach for automation of precision calibration process, pp. 319-323. 4th International Conference on Information and Automation for Sustainability, Dec 12-14 2008, Beijing.
23. Chen S., Yuan X., Yu C., Zhao Q., 2009. Development of the Automated impedance measurement system based on the slotted line, pp. 214-217. International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, April 11-12 2009, Zhangjiajie.
24. Ahmad, S., Rustagi, V.K., Govil, A.K., Aggarwal, R., Pal, B., Kothari, P.C., 2007. Automation of direct comparison technique and study of long term performance on the calibration, pp. 1-4. Asia-Pacific Microwave Conference, Dec 11-14 2007, Bangkok.
25. www.ivi.org, (Erişim tarihi: Nisan 2012)
26. Fertitta, K. G., 2010. Understanding the benefits of IVI. (Web page: http://www.ivifoundation.org/resources/default.aspx (Date accessed: January 2012).
27. Warner, E. M., West, J. L., 1978. Programmable automatic multimeter calibration system. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 27(2): 156-159.
28. Rudkin, A.M., 1989. Automatıc self-test provıdes ımproved accuracy and user confıdence. IEEE Colloquium on Reliable Electronic Measurements, 6: 1-4.

29. Wang, S.C., Chen, C.L., 1995. Computer-aided transducer calibration system for a practical power system, **Measurement and Technology Science, 142**(6): 459-462.

30. Filipski, P. S., Rinfet, R., 2000. An automated AC-DC transfer calibration system, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 49(2): 279-284.

31. Corra, A. E., Cruz, S. A., 2000. Automatic calibration of analog and digital measuring instruments using computer vision, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 49(1): 94-99.

32. Muscas, C., Peretto, L., Sasdelli, R., Briani, A., 2001. An automatic test equipment for the calibration of voltage transducers, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 50(6): 1638-1643.

33. Ferrero, A., Lazzaroni, M., Salicone, S., 2002. A calibration procedure for a digital instrument for electric power quality measurement, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 51(4): 716-722.

34. Arseneau, R., Sutherland, M.E., Zelle, J.J., 2002. A test system for calibrating flickermeters, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 51(4): 598-600.

35. Kennedy, C.R., 2004. Software replacement of test module adapters for depot instrumentation due to obsolescence, **IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 19(**7): 25-30.

36. Pang, L.S.L., Chan, W.L., 2005. Computer vision application in automatic meter calibration, pp. 1731-1735. Industry Applications Conference, Oct 2-6 2005, Hong Kong.

37. Creasman, S.M., Pheanis, D.C., 2006. Automated System for Calibration and Validation of Automotive Test Instrumentation, pp. 1-7. World Automation Congress, WAC '06, July 24-26 2006, Budapest.

38. Lili , X., 2007. A Programming Model for Instrument Calibration System, pp. 1-205-1-208. 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, Aug 16 2007- July 18 2007, China.

39. Jia J., Kuang J., He Z., Fang J., 2009. Design of automated test system based on GPIB, pp. 1-943-1-948. 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, Aug 16-19 2009, Beijing.

40. Le-Dan Y., Fu-long Z., Hua Z., Ying-chun G., Miao C., 2010. The development of comprehensive automatic calibration system based on integrated communications, pp. 3355-3358. International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, June 26-28 2010, Niagara Falls.
41. http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_488, (Erişim tarihi:Ocak 2012)
42. Caristi A. J., 1989. IEEE-488 General Purpose Instrumentation Bus Manual (Professional & Technical Series), Academic Press, USA, 253.
43. http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3419%20#toc0, (Erişim tarihi:Ocak 2012)
44. Park J., Mackay S., 2003. Practical Data Acquisition for Instrumentation and Control Systems, Newnes, GB, 407 pp.
45. Agilent Technologies, 3458A Multimeter User's Guide.
46. Bode, F., 2003. IVI comes of age: an overview of IVI specifications with current status**. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, 18** (6): 31-34.
47. Kennedy, C., 2005. Development of a new ınterchangeable virtual ınstrument class specification, pp. 812-819. IEEE AUTOTESTCON 2005, The Systems Readiness Technology Conference, Sept 26-29 Sept. 2005, Orlando, FL.
48. Wang S., Peng X., Zhao H., Ma X. Hao D., 2009. The design of hybrid bus architecture for military automatic test system, pp. 3-367-3-71. 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, Aug 16-19 2009, Beijing.
49. Niu S., Xu A., 2008. A COM-based instrument interchangeable framework and its realization approach, pp. 543-549. IEEE AUTOTESTCON 2008, The Systems Readiness Technology Conference, Sept 8-11 Sept. 2008,Utah.
50. Fertitta, K., 2005. Navigating the landscape of IVI, pp. 801-811. IEEE AUTOTESTCON, The Systems Readiness Technology Conference, Sept 26-29 Sept. 2005, Orlando, FL.
51. Cheij, D., 2001. Using interchangeable virtual instrument (IVI) drivers to increase test system performance. **Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, 16** (7): 8-11.
52. Smith, H., Wiegand, F., 2006. Instruments interchangeability using interchangeable virtual instrument technology, pp. 141-146. IEEE AUTOTESTCON 2006, The Systems Readiness Technology Conference, Sept 18-21 Sept. 2006,California.

53. Lind, D., Haney, M., Healey, R., 2011. Polymorphic analog instrument environment, pp. 254 – 258. IEEE AUTOTESTCON 2011, The Systems Readiness Technology Conference, Sept 12-15 2011, Baltimore, USA.
54. Mueller, J.E., 2005. Using IVI in .NET and the upcoming IVI .NET standard, pp. 744-750. IEEE AUTOTESTCON 2005, The Systems Readiness Technology Conference, Sept 26-29 Sept. 2005, Orlando, FL.
55. Johnson, P.R., 2000, IVI-A users perspective, pp. 434-437. IEEE AUTOTESTCON 2000, The Systems Readiness Technology Conference, Sept 18-21 Sept. 2000, Anaheim, California.
56. Wolle, J., 2010. Replacing Obsolete Instrumentation - Lessons Learned, pp. 1-5. IEEE AUTOTESTCON 2010, The Systems Readiness Technology Conference, Sept 11-16 2010, Orlando, Florida.
57. Yang S., Ling L., Kang G., 2010. Research of an Automatic RF Devices Characteristic Test Bench for DC and Scattering Parameters, pp. 1-4. 2nd International Information Engineering and Computer Science Conference (ICIECS), Dec 25-26 2010, Wuhan, China.
58. Zhiqiang Z., Zhiqiang S., Haibo Q., Fumin L., 2011. Conferring on the calibration method of input attenuator of spectrum analyzer, pp. 276 – 281. 10th International Electronic Measurement & Instruments Conference (ICEMI 2011), Aug 16-19 2011, Chengdu, China.
59. EURAMET/cg-15/v.01, 2007. Guıdelines on the calibration of digital multimeter. EURAMET,18 pp.
60. AFMETCAL, 2010. T.O.33K8-4-551-1, Technical Manual, Calibration Prosedure For Digital Voltmeter 3458A, 39 pp.
61. Fluke Corporation, 5720A Multifunction Calibrators User's Guide.
62. Agilent Technologies, 33250A Function/Arbitrary Waveform Generator User's Guide.
63. Agilent Technologies, Agilent 82357A USB/GPIB Interface Converter User's Guide.
64. Torunoğlu, O., Karaboğa N. 2012, Değiştirilebilir Sanal Enstrümanlar Teknolojisi ile Kalibrasyon Otomasyonu Uygulamalarında Performans Artırılması. **Savunma Bilimleri Dergisi** (Kabul edildi)

EK-A

KALİBRASYON SERTİFİKASI

CERTIFICATE OF CALIBRATION

Sertifika No : 2011EMM003 Sayfa No : 1/11
Certificate Number Page Number

CİHAZ ADI Device Name	: Dijital Multimetre
ÜRETİCİ FİRMA Manufacturer	: AGILENT
MODEL / TİP NO Model/Type Number	: 3458A
SERİ NO Serial Number	: US28028172
CİHAZ KODU Device Code	: -
TALEP EDEN Issued For	: A Laboratuarı
KALİBRASYON TARİHİ Date of Calibration	: 03/28/2012
GELECEK KALİBRASYON TARİHİ Date of Next Calibration	: 03/28/2013

Tarih Date of Issue	Labaratuvar Amiri Director of Laboratory
03/28/2012	Yetkili Personel

KALİBRASYON LABORATUARI **CALIBRATION LABORATORY**

Bu kalibrasyon sertifikası, Ulusal Metroloji Enstitüsü' nde (UME) bulunan ulusal standartlara izlenebilirliği belgeler ve Kalibrasyon Laboratuarının izni olmadan kısmen de olsa değiştirilemez. Damgasız ve imzasız kalibrasyon sertifikaları geçerli değildir.
This Certificate Provides traceability to recognised national standarts realised at the UME and may not be even partially changed without permission of Calibraton Laboratory. Calibration Certificates without signature and seal are not valid.

CERTIFICATE OF CALIBRATION

KALİBRASYON LABORATUARI / CALIBRATION LABORATORY

1. KALİBRASYONDA KULLANILAN REFERANSLAR :

Cihaz Adı : Meter Kalibratör
Model/Tip : 5720A
Seri No : 7530211
Üretici Firma : Fluke
İzlenebilirlik : UME, Sertifika No:2011 G1LV-000

Cihaz Adı : Amplifier
Model/Tip : 5725A
Seri No : 7450007
Üretici Firma : Fluke
İzlenebilirlik : UME, Sertifika No:2011 G1LV-000

Cihaz Adı : Sinyal Üreteci
Model/Tip : 33250A
Seri No : 13160212
Üretici Firma : Agilent
İzlenebilirlik : UME, Sertifika No:2011 G1MD-000

2. KALİBRE EDİLEN CİHAZ :

Cihaz Adı : Multimetre
Model/Tip : 3458A
Seri No : A123
Üretici Firma : Agilent
Ölçme Aralığı : DC Gerilim 100 mV – 1000 V
DC Akım 100 µA – 1 A
Direnç 10 Ω - 1 GΩ
..AC Gerilim 10 mV – 1000 V
..AC Akım 100 µA – 1 A
..Frekans 1 Hz – 10 MHz

3. KALİBRASYON YAPILDIĞI YER VE CİHAZIN KABUL TARİHİ

Kalibrasyon Laboratuarı
03/20/2012

4. ORTAM ŞARTLARI :

Sıcaklık : (23±1)°C
Bağıl Nem : %(45±10)

5. KALİBRASYON YÖNTEMİ VE PROSEDÜRÜ :

HP 3458A Dijital Multimetre cihazının kalibrasyonu, için ölçüm noktaları, üretici önerileri, AFMETCAL prosedürleri ve EURAMET/cg-15 dokümanında belirtilen noktalar dikkate alınarak belirlenmiştir. İşlemler için AFMETCAL prosedürü takip edilmiştir.

Kalibrasyon Sonuçları
Calibration Results

DC GERİLİM

KADEME/ÖLÇÜM ARALIĞI	UYGULANAN REFERANS DEĞER	ONAY/ÖLÇÜLEN DEĞER	HATA	BELİRSİZLİK
100 mV	0,00000 mV	-0,00005 mV	-0,0000500 mV	0,06 µV/V
	10,00000 mV	09,99986 mV	-0,0001400 mV	40 µV/V
	-10,00000 mV	-10,00022 mV	-0,0002200 mV	40 µV/V
	50,00000 mV	0,49,99972 mV	-0,0002800 mV	15 µV/V
	-50,00000 mV	-050,00012 mV	-0,0001200 mV	15 µV/V
	100,00000 mV	99,99954 mV	-0,0004600 mV	10 µV/V
	-100,000000 mV	-99,99993 mV	0,0000700 mV	10 µV/V
1 V	0,00000000 V	-0,0000009 V	-0,0000001 V	10 µV/V
	0,10000000 V	0,09999950 V	-0,0000005 V	10 µV/V
	-0,10000000 V	-0,09999995 V	0,0000001 V	10 µV/V
	0,50000000 V	0,49999932 V	-0,0000007 V	10 µV/V
	-0,50000000 V	-0,49999863 V	0,0000014 V	10 µV/V
	1,00000000 V	0,99999873 V	-0,0000013 V	10 µV/V
	-1,00000000 V	-0,99999778 V	0,0000022 V	10 µV/V
10 V	0,0000000 V	-00,0000004 V	-0,0000004 V	10 µV/V
	1,0000000 V	00,9999982 V	-0,0000018 V	10 µV/V
	-1,0000000 V	-00,9999989 V	0,0000011 V	10 µV/V
	3,0000000 V	02,9999971 V	-0,0000029 V	10 µV/V
	-3,0000000 V	02,9999978 V	5,9999978 V	10 µV/V
	5,0000000 V	04,9999953 V	-0,0000047 V	10 µV/V
	-5,0000000 V	04,9999934 V	9,9999934 V	10 µV/V
	7,0000000 V	06,9999934 V	-0,0000066 V	10 µV/V
	-7,0000000 V	-06,9999945 V	0,0000055 V	10 µV/V
	10,0000000 V	09,9999909 V	-0,0000091 V	10 µV/V
	-10,0000000 V	-09,9999912 V	0,0000088 V	10 µV/V

DC GERİLİM (Devam)

KADEME/ÖLÇÜM ARALIĞI	UYGULANAN REFERANS DEĞER	ONAY/ÖLÇÜLEN DEĞER	HATA	BELİRSİZLİK
100 V	0,000000 V	0000,000005 V	0,0000050 V	10 µV/V
	10,000000 V	009,999943 V	-0,0000570 V	10 µV/V
	-10,000000 V	-009,444488 V	0,5555120 V	10 µV/V
	50,000000 V	050,000022 V	0,0000220 V	10 µV/V
	-50,000000 V	-050,000048 V	-0,0000480 V	10 µV/V
	100,000000 V	100,000022 V	0,0000220 V	10 µV/V
	-100,000000 V	-100,000089 V	-0,0000890 V	10 µV/V
1000 V	0,00000 V	0000,000000 V	0,0000000 V	10 µV/V
	100,000000 V	0100,00024 V	0,0002400 V	10 µV/V
	-100,000000 V	-0100,00043 V	-0,0004300 V	10 µV/V
	500,000000 V	0500,00345 V	0,0034500 V	10 µV/V
	-500,000000 V	-0500,00435 V	-0,0043500 V	10 µV/V
	700,000000 V	0700,00321 V	0,0032100 V	10 µV/V
	-700,000000 V	-0700,00308 V	-0,0030800 V	10 µV/V
	1000,00000 V	1000,123 V	0,1230000 V	10 µV/V
	-1000,00000 V	-1000,321 V	-0,3210000 V	10 µV/V

DC AKIM

KADEME/ÖLÇÜM ARALIĞI	UYGULANAN REFERANS DEĞER	ONAY/ÖLÇÜLEN DEĞER	HATA	BELİRSİZLİK
100 µA	0,00000 µA	-0,00015 µA	-0,00015 µA	0.5 nA/A
	10,00000 µA	9,99982 µA	0,0001800 µA	30 µA/A
	-10,00000 µA	-10,00005 µA	0,0000500 µA	30 µA/A
	50,00000 µA	49,99995 µA	0,0000500 µA	25 µA/A
	-50,00000 µA	-49,99985 µA	-0,0001500 µA	25 µA/A
	100,00000 µA	99,99977 µA	0,0002300 µA	25 µA/A
	-100,00000 µA	-99,99951 µA	-0,0004900 µA	25 µA/A
1 mA	0,0000000 µA	0,0000009 µA	-0,0000009 µA	2 nA/A
	0,1000000 mA	0,0999994 mA	0,0000006 mA	25 µA/A
	-0,1000000 mA	-0,0999995 mA	-0,0000005 mA	25 µA/A
	0,5000000 mA	0,5000230 mA	-0,0000230 mA	25 µA/A
	-0,5000000 mA	-0,4999937 mA	-0,0000063 mA	25 µA/A
	1,0000000 mA	0,9999993 mA	0,0000007 mA	25 µA/A
	-1,0000000 mA	-0,9999944 mA	-0,0000056 mA	25 µA/A
10 mA	0,000000 mA	0,000008 mA	-0,0000080 mA	10 nA/A
	1,000000 mA	0,999993 mA	0,0000070 mA	30 µA/A
	-1,000000 mA	-1,000004 mA	0,0000040 mA	30 µA/A
	5,000000 mA	5,000002 mA	-0,0000020 mA	25 µA/A
	-5,000000 mA	-4,999993 mA	-0,0000070 mA	25 µA/A
	10,00000 mA	9,999998 mA	0,0000020 mA	25 µA/A
	-10,00000 mA	-9,999997 mA	-0,0000030 mA	25 µA/A
100 mA	0,00000 mA	0,00015 mA	-0,0001500 mA	80 nA/A
	10,00000 mA	9,99989 mA	0,0001100 mA	30 µA/A
	-10,00000 mA	-10,00006 mA	0,0000600 mA	30 µA/A
	50,00000 mA	50,00217 mA	-0,0021700 mA	25 µA/A
	-50,00000 mA	-50,00176 mA	0,0017600 mA	25 µA/A
	100,00000 mA	100,00125 mA	-0,0012500 mA	25 µA/A
	-100,00000 mA	-100,0014 mA	0,0014000 mA	25 µA/A

DC AKIM (Devam)

KADEME/ÖLÇÜM ARALIĞI	UYGULANAN REFERANS) DEĞER	ONAY/ÖLÇÜLEN DEĞER	HATA	BELİRSİZLİK
1 A	0,0000000 A	0,0000032 µA	-0,0000032 µA	2 µA/A
	0,1000000 A	0,0999985 µA	0,0000015 µA	85 µA/A
	-0,1000000 A	-0,1000049 µA	0,0000049 µA	85 µA/A
	0,5000000 A	0,5000298 µA	-0,0000298 µA	55 µA/A
	-0,5000000 A	-0,5000258 µA	0,0000258 µA	55 µA/A
	1,0000000 A	1,0000655 µA	-0,0000655 µA	55 µA/A
	-1,0000000 A	-1,0000652 µA	0,0000652 µA	55 µA/A

FREKANS

UYGULANAN REFERANS) DEĞER	ONAY/ÖLÇÜLEN DEĞER	HATA	BELİRSİZLİK
1,000000 Hz	1,000078 Hz	0,000078 Hz	32 µHz/Hz
15,00000 Hz	15,00068 Hz	0,000680 Hz	32 µHz/Hz
100,0000 Hz	100,0054 Hz	0,005400 Hz	32 µHz/Hz
1,000000 Hz	1,000054 Hz	0,000054 Hz	32 µHz/Hz
10,00000 Hz	10,00036 Hz	0,000360 Hz	32 µHz/Hz
100,0000 Hz	100,0058 Hz	0,005800 Hz	32 µHz/Hz
500,0000 Hz	500,0189 Hz	0,018900 Hz	32 µHz/Hz
1,000000 Hz	1,000056 Hz	0,000056 Hz	32 µHz/Hz
2,000000 Hz	2,000078 Hz	0,000078 Hz	32 µHz/Hz
10,00000 Hz	10,00038 Hz	0,000380 Hz	32 µHz/Hz

AC GERİLİM

KADEME/ÖLÇÜM ARALIĞI	UYGULANAN REFERANS) DEĞER	FREKANS	ONAY/ÖLÇÜLEN DEĞER	HATA	BELİRSİZLİK
100 mV	100,00000 mV	50 Hz	99,99699 mV	-0,00301 mV	80 µV/V
	100,00000 mV	1 kHz	99,99194 mV	-0,00806 mV	80 µV/V
	100,00000 mV	20 kHz	99,98755 mV	-0,01245 mV	80 µV/V
1 V	0,1000000 V	50 Hz	0,0999870 V	-0,00001 V	180 µV/V
	0,1000000 V	1 kHz	0,0999921 V	-0,00001 V	180 µV/V
	0,1000000 V	20 kHz	0,0999956 V	0,00000 V	180 µV/V
	1,0000000 V	50 Hz	0,9999864 V	-0,00001 V	70 µV/V
	1,0000000 V	1 kHz	0,9999824 V	-0,00002 V	70 µV/V
	1,0000000 V	20 kHz	0,9998755 V	-0,00012 V	70 µV/V
	1,0000000 V	50 kHz	0,9999118 V	-0,00009 V	70 µV/V
	1,0000000 V	100 kHz	0,9998667 V	-0,00013 V	70 µV/V
	1,0000000 V	300 kHz	1,0008334 V	0,00083 V	500 µV/V
	1,0000000 V	500 kHz	1,0023295 V	0,00233 V	600 µV/V
	1,0000000 V	1 Mhz	1,0051021 V	0,00510 V	1200 µV/V
10 V	1,000000 V	50 Hz	0,999934 V	-0,00007 V	60 µV/V
	1,000000 V	1 kHz	1,000005 V	0,00001 V	60 µV/V
	1,000000 V	20 kHz	0,999887 V	-0,00011 V	60 µV/V
	1,000000 V	1 Mhz	1,004661 V	0,00466 V	2500 µV/V
	2,000000 V	1 kHz	1,999988 V	-0,00001 V	60 µV/V
	5,000000 V	1 kHz	5,000081 V	0,00008 V	60 µV/V
	7,000000 V	1 kHz	7,000156 V	0,00016 V	60 µV/V
	10,000000 V	20 Hz	10,000105 V	0,00010 V	60 µV/V
	10,000000 V	50 Hz	10,000039 V	0,00004 V	60 µV/V
	10,000000 V	1 kHz	10,000073 V	0,00007 V	60 µV/V
	10,000000 V	20 kHz	9,999095 V	-0,00090 V	60 µV/V
	10,000000 V	50 kHz	9,999197 V	-0,00080 V	60 µV/V
	10,000000 V	100 kHz	9,996712 V	-0,00329 V	100 µV/V
	10,000000 V	300 kHz	9,990193 V	-0,00981 V	200 µV/V
	10,000000 V	500 kHz	9,999590 V	-0,00041 V	800 µV/V
	10,000000 V	1 MHz	10,050559 V	0,05056 V	2500 µV/V

AC GERİLİM (Devam)

KADEME/ÖLÇÜM ARALIĞI	UYGULANAN REFERANS DEĞER	FREKANS	ONAY/ÖLÇÜLEN DEĞER	HATA	BELİRSİZLİK
100 V	10,00000 V	50 Hz	9,99992 V	-0,00008 V	70 µV/V
	10,00000 V	1 kHz	10,00019 V	0,00019 V	70 µV/V
	10,00000 V	20 kHz	9,99960 V	-0,00040 V	70 µV/V
	100,00000 V	50 Hz	100,00086 V	0,00086 V	70 µV/V
	100,00000 V	1 kHz	100,00102 V	0,00102 V	70 µV/V
1000 V	100,00000 V	20 kHz	99,99852 V	-0,00148 V	70 µV/V
	100,00000 V	50 kHz	100,01619 V	0,01619 V	70 µV/V
	100,00000 V	100 kHz	100,03448 V	0,03448 V	70 µV/V
	100,0000 V	50 Hz	99,9913 V	-0,00870 V	70 µV/V
	100,0000 V	1 kHz	99,9919 V	-0,00810 V	70 µV/V
	100,0000 V	20 kHz	99,9730 V	-0,02700 V	70 µV/V

AC GERİLİM – ANALOG

KADEME/ÖLÇÜM ARALIĞI	UYGULANAN REFERANS DEĞER	FREKANS	ONAY/ÖLÇÜLEN DEĞER	HATA	BELİRSİZLİK
10 V	1,00000 V	50 Hz	0,99974 V	-0,00026	0.5 mV/V
	1,00000 V	1 kHz	0,99986 V	-0,00014	0.5 mV/V
	1,00000 V	20 kHz	0,99965 V	-0,00035	0.5 mV/V
	1,00000 V	50 kHz	0,99888 V	-0,00112	0.5 mV/V
	1,00000 V	1 MHz	0,91568 V	-0,08432	0.5 mV/V
	3,00000 V	1 kHz	2,99883 V	-0,00117	0.5 mV/V
	5,00000 V	1 kHz	4,99843 V	-0,00157	0.5 mV/V
	7,00000 V	1 kHz	6,99859 V	-0,00141	0.5 mV/V
	10,00000 V	20 Hz	9,99225 V	-0,00775	0.5 mV/V
	10,00000 V	50 Hz	9,99843 V	-0,00157	0.5 mV/V
	10,00000 V	200 Hz	9,99961 V	-0,00039	0.5 mV/V
	10,00000 V	500 Hz	9,99960 V	-0,00040	0.5 mV/V
	10,00000 V	1 kHz	9,99958 V	-0,00042	0.5 mV/V
	10,00000 V	20 kHz	9,99970 V	-0,00030	0.5 mV/V
	10,00000 V	50 kHz	9,99977 V	-0,00023	0.5 mV/V
	10,00000 V	100 kHz	9,99922 V	-0,00078	10 mV/V
	10,00000 V	300 kHz	10,00674 V	0,00674	10 mV/V
	10,00000 V	500 kHz	10,02634 V	0,02634	10 mV/V
	10,00000 V	1 MHz	10,15912 V	0,15912	10 mV/V

AC AKIM

KADEME/ÖLÇÜM ARALIĞI	UYGULANAN REFERANS DEĞER	FREKANS	ONAY/ÖLÇÜLEN DEĞER	HATA	BELİRSİZLİK
10 mA	5,00000 mA	20 Hz	4,99742 mA	-0,00258 mA	1 mA/A
	5,00000 mA	50 Hz	4,99896 mA	-0,00104 mA	0,2 mA/A
	5,00000 mA	1 kHz	4,99946 mA	-0,00054 mA	0,2 mA/A
	5,00000 mA	5 kHz	4,99993 mA	-0,00007 mA	0,2 mA/A
	10,00000 mA	20 Hz	10,00075 mA	0,00075 mA	0,5 mA/A
	10,00000 mA	50 Hz	10,00178 mA	0,00178 mA	0,5 mA/A
	10,00000 mA	1 kHz	10,00012 mA	0,00012 mA	0,5 mA/A
	10,00000 mA	5 kHz	10,00023 mA	0,00023 mA	0,5 mA/A
100 mA	10,0000 mA	1 kHz	10,0087 mA	0,00870 mA	0,5 mA/A
	100,0000 mA	50 Hz	100,0034 mA	0,00340 mA	0,5 mA/A
	100,0000 mA	1 kHz	100,0123 mA	0,01230 mA	0,5 mA/A
	100,0000 mA	5 kHz	100,0140 mA	0,01400 mA	0,5 mA/A
1 A	0,100000 A	1 kHz	0,100210 A	0,00021 A	0,5 mA/A
	1,000000 A	50 Hz	1,000020 A	0,00002 A	0,5 mA/A
	1,000000 A	1 kHz	1,000134 A	0,00013 A	0,5 mA/A
	1,000000 A	5 kHz	1,001123 A	0,00112 A	0,5 mA/A

DİRENÇ

KADEME/ÖLÇÜM ARALIĞI	UYGULANAN REFERANS) DEĞER	ONAY/ÖLÇÜLEN DEĞER	HATA	BELİRSİZLİK
10 Ω	0,00000 Ω	0,00000 Ω	0,00000 Ω	30 µΩ/Ω
	10,000095 Ω	10,000086 Ω	-0,00001 Ω	10 µΩ/Ω
100 Ω	10,000095 Ω	10,000083 Ω	-0,00001 Ω	10 µΩ/Ω
	100,00124 Ω	100,00109 Ω	-0,00015 Ω	10 µΩ/Ω
1 kΩ	100,00124 Ω	100,00113 Ω	-0,00011 Ω	10 µΩ/Ω
	1000,0072 Ω	1000,0065 Ω	-0,00070 Ω	10 µΩ/Ω
10 kΩ	1000,0072 Ω	1000,0066 Ω	-0,00060 Ω	10 µΩ/Ω
	10000,14 Ω	10000,12 Ω	-0,02000 Ω	10 µΩ/Ω
100 kΩ	10000,14 Ω	10000,15 Ω	0,01000 Ω	10 µΩ/Ω
	99999,85 Ω	99999,83 Ω	-0,02000 Ω	10 µΩ/Ω
1 MΩ	99999,85 Ω	99999,84 Ω	-0,01000 Ω	10 µΩ/Ω
	999976,7 Ω	999976,3 Ω	-0,40000 Ω	10 µΩ/Ω
10 MΩ	999976,7 Ω	999976,2 Ω	-0,50000 Ω	10 µΩ/Ω
	9999481 Ω	9999434 Ω	-47,00000 Ω	10 µΩ/Ω
10 Ω (2 Uçlu)	0,00000 Ω	0,00023 Ω	0,00023 Ω	100 µΩ/Ω
10 MΩ (2 Uçlu)	9999481 Ω	9999476 Ω	-5,00000 Ω	100 µΩ/Ω
	100006610 Ω	100006570 Ω	-40,00000 Ω	100 µΩ/Ω

6. UYGUNLUK BEYANI :

Cihazın belirtilen ölçüm sonuçları ile kullanılması kullanıcı sorumluluğundadır.

7. AÇIKLAMALAR :

Kalibrasyon sonuçları sadece AGILENT 3458A model, - US28028172 seri numaralı Dijital Multimetre cihazına ait olup kalibrasyon tarihinden itibaren ve sertifikada belirtilmiş olan şartlar altında geçerlidir. Cihazın performası için gerekli çevre şartlarında kullanımından kullanıcı sorumludur.

8. KALİBRASYON ETİKETİNİN YERİ :

Kalibrasyon etiketi cihazın üzerine yapıştırılmıştır.

9. KALİBRASYONU YAPANLAR :

Kalibre Eden	Kalite Kontrol Elemanı
Teknisyen	Kalite Elemanı

KALİBRASYON LABORATUARI **CALIBRATION LABORATORY**

Bu kalibrasyon sertifikası, Ulusal Metroloji Enstitüsü' nde (UME) bulunan ulusal standartlara izlenebilirliği belgeler ve Kalibrasyon Laboratuarının izni olmadan kısmen de olsa değiştirilemez. Damgasız ve imzasız kalibrasyon sertifikaları geçerli değildir.
This Certificate Provides traceability to recognised national standarts realised at the UME and may not be even partially changed without permission of Calibraton Laboratory. Calibration Certificates without signature and seal are not valid.

CERTIFICATE OF CALIBRATION

ÖZ GEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Osman TORUNOĞLU

Uyruğu: Türkiye (TC)

Doğum Tarihi ve Yeri: 25 Aralık 1984, Giresun

Medeni Durumu: Bekar

Tel: 0531 779 00 04

email: osmantorunoglu@gmail.com

Yazışma Adresi: Ertuğrulgazi Mah.59. Sok. Köşktepe Sitesi No:7/11 Sincan/ANKARA

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü	2012
Lisans	İstanbul Üni.Müh.Fak.Elk-Elkt.Müh.	2008
Lise	Hamdi Bozbağ Anadolu Lisesi, GİRESUN	2002

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
20011- Halen	K.K.K.lığı Kara Harp Okulu	Öğretim Görevlisi
2009-2011	K.K.K.lığı Elektro Optik Sistemler Bakım Merkezi Müdürlüğü	ARGE Proje Subayı

YABANCI DİL

İngilizce