

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
UÇAK VE UZAY MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**UÇAK BAKIM ONARIMINDA KALİBRASYON
UYGULAMALARI**

**Hazırlayan
Sevim DURMUŞ**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi İsmail ATA**

Yüksek Lisans Tezi

**Temmuz 2025
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
UÇAK VE UZAY MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**UÇAK BAKIM ONARIMINDA KALİBRASYON
UYGULAMALARI
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Sevim DURMUŞ**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi İsmail ATA**

Yüksek Lisans Tezi

**Temmuz 2025
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmada yer alan tüm bilgilerin, akademik dürüstlük ve etik ilkelere uygun biçimde elde edildiğini beyan ederim. Çalışma sürecinde kullanılan tüm kaynaklara gerektiği şekilde atıfta bulunduğumu; çalışmanın kapsamı dışında kalan hiçbir veri ya da sonucu çalışmaya dâhil etmediğimi ve araştırmanın bütünlüğüne sadık kaldığımı belirtirim.

Sevim DURMUŞ

İmza

“Uçak Bakım Onarımında Kalibrasyon Uygulamaları” başlıklı bu Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün Tez Hazırlama ve Öneri Yönergesi esas alınarak düzenlenmiştir.

Tezi Hazırlayan
Sevim DURMUŞ

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi İsmail ATA

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı Başkanı
Doç. Dr. Murat AYDIN

TEŞEKKÜR

"Uçak Bakım Onarımında Kalibrasyon Uygulamaları" adlı tez çalışmasının yürütülmesinde, sonuçlandırılmasında ve sonuçlarının değerlendirilmesinde bilgi, tecrübe, destek ve yardımlarını esirgemeyen çok değerli danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi İsmail ATA' ya sonsuz saygı ve minnetlerimi sunarım.

Varlıkları ile hayatıma anlam katan ve desteğini esirgemeyen oğlum Aslan DURMUŞ ve eşim Engin DURMUŞ' a teşekkür ederim.



UÇAK BAKIM ONARIMINDA KALİBRASYON UYGULAMALARI

Sevim DURMUŞ

Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2025

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmail ATA

ÖZET

Uçak bakım süreçlerinin güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde yürütülebilmesi, sistemde yer alan ölçüm cihazlarının ve test ekipmanlarının doğruluğunu garanti altına alan kalibrasyon uygulamalarının etkinliğine doğrudan bağlıdır. Özellikle askeri ve sivil havacılıkta hassasiyetin yüksek olduğu kontrol, ölçüm ve izleme sistemlerinde, ölçüm hatalarının önüne geçilmesi, yalnızca donanımsal yeterlilikle değil, aynı zamanda düzenli ve standartlara uygun kalibrasyon faaliyetleriyle sağlanmaktadır. Bu bağlamda, uçak bakım organizasyonlarında kullanılan cihazların, belirli periyotlarla doğrulama işleminden geçirilmesi hem uçuş güvenliğini artırmakta hem de bakım maliyetlerinin düşürülmesine katkı sunmaktadır.

Kalibrasyon uygulamaları, çeşitli ölçüm büyüklüklerini (basınç, sıcaklık, tork, elektriksel büyüklükler vb.) kapsayan geniş bir yelpazede yürütülmekte ve her biri farklı teknik yeterlilikler gerektirmektedir. Bununla birlikte, bakım süreçlerinin yoğunluğu ve operasyonel zaman baskısı, bu uygulamaların hızlı, güvenilir ve izlenebilir şekilde gerçekleştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle günümüzde, kalibrasyon programlarının dijital dönüşümü ve otomasyon sistemleri üzerinden yönetilmesi yaygınlaşmaktadır.

Bu çalışmada, uçak bakım uygulamalarında kalibrasyonun önemi, sürece etkisi ve kalite yönetim sistemleriyle entegrasyonu değerlendirilmiş; uçuş güvenliği için kritik öneme sahip olan ekipmanlar belirlenmiş ve bu ekipmanların önemi vurgulanmıştır. Havacılık sektöründe kalibrasyonun önemini vurgulamak için basınç ölçer kalibrasyonunun konusu işlenmiştir. Kalibrasyon sonuçlarının değerlendirilmesi ve belirsizlik analizi yapılmıştır. Örnek olarak analog göstergeli manometrenin kalibrasyonu yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, kalibrasyonun sadece teknik bir gereklilik değil, aynı zamanda bütüncül bir bakım stratejisinin vazgeçilmez unsuru olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kalibrasyon, Uçak Mühendisliği, Uçak Bakım Uygulamaları, Uçak Ekipmanları

CALIBRATION APPLICATIONS IN AIRCRAFT MAINTENANCE AND OVERHAUL

Sevim DURMUŞ

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master's Thesis, July 2025

Advisor: Assist. Prof. Dr. Ismail ATA

ABSTRACT

The safe and sustainable execution of aircraft maintenance processes is directly dependent on the effectiveness of calibration practices that ensure the accuracy of the measuring devices and test equipment in the system. Especially in highly sensitive control, measurement, and monitoring systems in military and civil aviation, preventing measurement errors is ensured not only by hardware adequacy but also by regular and standard-compliant calibration activities. In this context, periodic verification of devices used in aircraft maintenance organizations both increases flight safety and contributes to reducing maintenance costs.

Calibration applications are carried out across a wide range of measurement variables (pressure, temperature, torque, electrical quantities, etc.), each requiring different technical competencies. However, the intensity of maintenance processes and operational time pressure necessitate that these applications be carried out quickly, reliably, and traceably. Therefore, digital transformation of calibration programs and their management through automation systems are becoming increasingly common.

This study evaluates the importance of calibration in aircraft maintenance practices, its impact on the process, and its integration with quality management systems. Equipment critical to flight safety is identified and its importance is emphasized. To emphasize the importance of calibration in the aviation industry, the topic of pressure gauge calibration is discussed. Calibration results are evaluated and uncertainty analysis is conducted. For example, an analog manometer is calibrated and its results are evaluated. The findings demonstrate that calibration is not only a technical requirement but also an essential element of a holistic maintenance strategy.

Keywords: Calibration, Aircraft Engineering, Aircraft Maintenance Applications, Aircraft Equipment

İÇİNDEKİLER

UÇAK BAKIM ONARIMINDA KALİBRASYON UYGULAMALARI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL VE ONAY	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET.....	vi
TABLOLAR LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KASILTMALAR LİSTESİ	xiii
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

HAVACILIKTA KALİBRASYON VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Kalibrasyonun Tanımı ve Önemi	10
1.2. Kalibrasyon Süreci.....	11
1.3. Kalibrasyon Türleri	11
1.3.1. Doğrudan Kalibrasyon	11
1.3.2. Dolaylı Kalibrasyon	12
1.4. Kalite Sistem Standartları ve Sertifikasyon	12

2. BÖLÜM

UÇAK BAKIMINDA KALİBRASYON UYGULAMALARI

2.1. Uçak Bakım Sürecinin Tanımı ve Önemi	15
2.2. Uçak Bakımında Kullanılan Ölçüm Cihazları	16
2.2.1. Basınç Ölçüm Cihazları.....	16
2.2.2. Sıcaklık Ölçüm Cihazları	17
2.2.3. Elektriksel Ölçüm Cihazları.....	17
2.3. Metroloji ve Uçak Bakımında Kalibrasyonun Önemi.....	18
2.4. Metrolojik İzlenebilirlik	20
2.5. Kalibrasyon Sürecinin Adımları.....	22
2.5.1. Kalibrasyon Öncesi Hazırlık.....	22
2.5.2. Kalibrasyon Planlaması ve Prosedür Seçimi.....	23
2.5.3. Ölçüm İşlemlerinin Uygulanması	25

2.5.4. Sonuçların Analizi ve Ölçüm Belirsizliği	26
2.5.5. Kalibrasyon Raporu ve Sertifikalandırma	29
3. BÖLÜM	
KALİBRASYONUN UÇUŞ GÜVENLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ	
3.1. Kalibrasyon Hatalarının Uçuş Güvenliği Üzerindeki Olası Etkileri.....	31
3.2. Kalibrasyonun Uçak Performansına Katkısı	32
3.3. Kalibrasyonun Bakım Maliyetleri Üzerindeki Etkisi	33
3.4. Uçuş Güvenliğini Doğrudan Etkileyen Ekipmanlar ve Kalibrasyonu	34
4. BÖLÜM	
BASINÇ ÖLÇER KALİBRASYONU	
4.1. Kalibrasyon Yöntemleri	42
4.1.1. Ölü Ağırlıklı (Deadweight) Kalibrasyon Düzenekleri	42
4.1.2. Dijital Kalibrasyon Düzenekleri	43
4.2. Basınç Ölçer Kalibrasyon Standartları.....	43
4.3. Basınç Ölçer Kalibrasyon Uygulaması	44
4.3.1. Kalibrasyon Prosedürünün Seçilmesi	45
4.3.1.1. Temel Kalibrasyon Prosedürü	45
4.3.1.2. Standart Kalibrasyon Prosedürü	46
4.3.1.3. Kapsamlı Kalibrasyon Prosedürü	47
4.4. Kalibrasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi	48
4.4.1. Ölçüm Hatası (Sapma).....	48
4.4.2. Geri Dönüş Sapması (Histerizis).....	49
4.4.3. Tekrarlanabilirlik	49
4.4.4. Sıfır Hatası	50
4.5. Ölçüm Belirsizliğinin Değerlendirilmesi	50
4.5.1. Referans Cihazın Belirsizliği.....	52
4.5.2. Tekrarlanabilirlik Belirsizliği	52
4.5.3. Histerizis Belirsizliği	52
4.5.4. Çözünürlük Belirsizliği.....	53
4.5.5. Sıfır Hatası Belirsizliği.....	53
5. BÖLÜM	
BULGULAR VE TARTIŞMA	
5.1. Ölçümlerde Kullanılan Referans Ekipmanlar ve Kalibrasyon Prosedürü	54

5.1.1. Referans Basınç Kalibratörü (Dijital Kalibrasyon Düzenegi).....	54
5.1.2. Test Cihazı (Analog Basınç Ölçer).....	55
5.2. Kalibrasyon Metodu ve Uygulaması	56
5.3. Kalibrasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi	58
SONUÇ.....	62
KAYNAKÇA	64
ÖZGEÇMİŞ.....	70



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Temel Kalibrasyon Prosedürü Ölçüm Döngüsü	46
Tablo 4.2. Standart Kalibrasyon Prosedürü Ölçüm Döngüsü	47
Tablo 4.3. Kapsamlı Kalibrasyon Prosedürü Ölçüm Döngüsü	48
Tablo 4.4. Basınç ölçer için belirsizlik bütçesi	52
Tablo 5.1. Dijital Basınç Dönüştürücü Teknik Bilgileri	55
Tablo 5.2. Test Cihazı Teknik Bilgileri (Manometre)	56
Tablo 5.3. Kalibrasyon Ölçümü Ham Verileri	57
Tablo 5.4. Kalibrasyon Ölçüm Sonucu Hata, Histerizis ve Belirsizlik Değerleri.....	58

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 5.1. Ölçümlerde Kullanılan Dijital Basınç Kalibratörü	55
Şekil 5.2. Ölçümlerde Kullanılan Analog Basınç Ölçer	56
Şekil 5.3. Basınç Ölçer Kalibrasyon Düzenegi	57
Şekil 5.4. Basınç Ölçer İçin Artan ve Azalan Yöndeki Sapma Değerleri Değişimi	59
Şekil 5.5. Basınç Ölçer İçin Histerizis Değerleri Değişimi	60
Şekil 5.6. Basınç Ölçer İçin Ölçüm Belirsizliği Değerleri Değişimi	60



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
BIPM	: Bureau International des Poids et Mesures (Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu)
CAAS	: Civil Aviation Authority of Singapore (Singapur Sivil Havacılık Otoritesi)
°C	: Sıcaklık birimi (Celsius)
EASA	: Avrupa Havacılık Emniyeti Ajansı
EFCS	: Elektronik Uçuş Kontrol Sistemleri
EURAMET	: Avrupa Ulusal Metroloji Enstitüleri Birliği
FAA	: Amerikan Federal Havacılık İdaresi
FCC	: Flight Control Computer (Uçuş Kontrol Bilgisayarı)
FOG	: Fiber Optik Jiroskop (Modern fiber optik)
FS	: Full Scale (Tam ölçek)
GPU	: Ground Power Unit (Yer güç ünitesi)
GPS	: Global Positioning System (Küresel Konumlama Sistemi)
ICAO	: Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Örgütü
K	: Sıcaklık birimi (Kelvin)
KKD	: Kişisel Koruyucu Donanımlar
m	: Uzunluk birimi (Metre)
Pa	: Basınç birimi (Paskal)
P _{ind}	: Kalibre edilen basınç ölçer göstergesinden okunan değer
P _{ref}	: Referans basınç kalibratöründen okunan değer
RLG	: Ring Laser Gyroscope (Halka lazer jiroskop)
SHGM	: Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü
SI	: Système International d'Unités (Uluslararası Birimler Sistemi)
TSE	: Türk Standardları Enstitüsü
UME	: Ulusal Metroloji Enstitüsü
TÜRKAK	: Türk Akreditasyon Kurumu
δP _(b)	: Tekrarlanabilirlik belirsizliği
δP _(f0)	: Sıfır hatası belirsizliği

δP_h : Histerizis belirsizliği
 δP_r : Çözünürlük belirsizliği
 δP_{ref} : Referans basınç kalibratörünün belirsizliği



GİRİŞ

Hava araçlarının güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde faaliyet gösterebilmesi için yürütülen bakım uygulamaları, havacılık sektöründe büyük önem taşımaktadır. Bu süreçte kullanılan test ve ölçüm cihazlarının doğruluğu uçuş emniyeti ve operasyonel verimlilik açısından da kritik bir faktördür [1]. Kalibrasyon, ölçüm cihazlarının belirli standartlara uygunluğunu kontrol etmek ve gerekiyorsa düzeltici ayarlamalar yapmak için uygulanan sistematik bir süreçtir. Kalibrasyon sayesinde cihazların gösterdiği değerlerin, izlenebilir bir referansla tutarlı olması sağlanır [2]. Havacılık sektöründe, küçük bir ölçüm hatasının dahi büyük sonuçlara yol açabileceği göz önünde bulundurulduğunda, kalibrasyonun uçuş güvenliğine katkısı daha da anlam kazanmaktadır [3].

Kalibrasyonun uçak bakımındaki önemi yasal bir zorunluluk olarak da ortaya çıkmaktadır. Türkiye’de SHGM tarafından yayımlanan SHY-145 talimatı ile Avrupa’daki EASA Part-145 düzenlemeleri, bakım kuruluşlarının ölçüm cihazlarını belirli periyotlar ile kalibre ettirmesini şart koşmaktadır [4]. Bu düzenlemeler, uçuş öncesi ve sonrası kontrollerde kullanılan her cihazın doğruluk belgelerine sahip olmasını zorunlu kılmaktadır. Nitekim ICAO’nun yayımladığı Airworthiness Manual (Doc 9760) belgesinde de tüm bakım ve onarım ekipmanlarının kalibre edilmiş olması gerektiği açıkça ifade edilmektedir [5].

Kalibrasyon süreci genel olarak üç temel adımdan oluşur. Bu süreçte öncelikle cihazın mevcut durumu referans standartlarla karşılaştırılır, sapma varsa uygun ayarlamalar yapılır ve son olarak sonuçlar belgelenecek izlenebilirlik sağlanır [2]. Bu süreç, yalnızca teknik doğruluğu sağlamakla kalmaz, aynı zamanda bakım süreçlerinin belgelenebilirliğini de güvence altına alır. Yanlış ya da ihmal edilmiş bir kalibrasyon, bakım sırasında hatalı ölçümler yapılmasına neden olabilir. Bu da uçuş sırasında oluşabilecek arızaların doğru teşhis edilememesine ve sonuç olarak uçuş emniyetinin tehlikeye girmesine yol açabilir. Örneğin, FAA tarafından yayımlanan bir rehberde, pusula kalibrasyonundaki sapmaların navigasyon hatalarına neden olabileceği

belirtilmiştir [6]. Ayrıca kalibrasyonun yalnızca güvenlik değil, maliyet açısından da faydaları bulunmaktadır. Doğru ölçümle yapılan bakım işlemleri, gereksiz parça değişimlerinin ve arıza tekrarlarının önüne geçerek, işletme giderlerini azaltır [7].

Bu çalışmada kalibrasyonun uçuş güvenliği üzerindeki etkileri, uluslararası standartlar ve düzenlemeler ışığında incelenmiştir. Uçakların güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak için bakım süreçlerinde hassas ölçüm cihazları ve ekipmanlar kullanılmaktadır. Bu bağlamda, metroloji, kalibrasyon, izlenebilirlik ve belirsizlik gibi temel kavramlar, uçak bakım uygulamalarında büyük bir öneme sahiptir. Kalibrasyon, ölçüm cihazlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamak için yapılan sistematik bir süreçtir. Havacılık sektöründe ölçümlerin doğruluğu ve izlenebilirliği, uçuş güvenliğini doğrudan etkileyen faktörler arasında yer almaktadır.

Metroloji, ölçüm bilimidir ve sanayinin birçok alanında kaliteyi ve güvenliğini sağlamaya yönelik kritik bir rol oynamaktadır [8]. Havacılık endüstrisinde metroloji, bakım süreçlerinde kullanılan ölçüm cihazlarının doğruluğunu güvence altına almak için uygulanmaktadır. Uçak bakımında kullanılan ölçüm sistemleri, basınç, sıcaklık, akım, voltaj ve mekanik ölçümler gibi çeşitli parametrelerin hassas bir şekilde ölçülmesini sağlamaktadır.

Uluslararası Birimler Sistemi (SI) havacılık bakımında yaygın olarak kullanılan ölçüm birimlerini belirlemektedir. Basınç ölçümlerinde paskal (Pa), sıcaklık ölçümlerinde kelvin (K) veya Celsius (°C), uzunluk ölçümlerinde ise metre (m) gibi birimler tercih edilmektedir [8]. Uçak bakımında, bu birimlerin doğru bir şekilde kullanılmasını sağlamak için ulusal ve uluslararası standartlara uygun kalibrasyon yöntemleri uygulanmaktadır.

Kalibrasyon uygulamalarında temel adımlar şunlardır:

1. **Referans Standartlarının Kullanımı:** Uçak bakımında kullanılan ölçüm cihazları, ulusal veya uluslararası izlenebilirlik zincirine bağlı referans standartlar ile kalibre edilir [8].
2. **Belirsizlik Analizi:** Kalibrasyon işlemi sırasında, ölçüm cihazlarının belirsizliği değerlendirilerek, güvenilir sonuçlar elde edilmeye çalışılır [8].

3. Düzenli Kalibrasyon Periyotları: Havacılık sektöründe, belirli aralıklarla yapılan kalibrasyon işlemleri sayesinde cihazların doğruluğu korunur.

Havacılıkta en sık kalibrasyonu yapılan cihazlar arasında altimetreler, hava hız göstergeleri, tork anahtarları, sıcaklık sensörleri ve yakıt ölçüm sistemleri bulunmaktadır. Bu cihazlar, uçuş operasyonları sırasında kritik ölçümler yaptığı için, kalibrasyon işlemleri uluslararası standartlara (ISO 17025, AS9100 gibi) uygun olarak gerçekleştirilmelidir.

Bu çalışmada literatürden farklı olarak uçak bakımında kalibrasyon uygulamaları incelenmiş, kalibrasyonun uçuş güvenliği üzerindeki etkileri üzerinde durulmuş, uçuş güvenliğini doğrudan etkileyen ekipmanların tespiti sağlanmıştır. Örnek olarak ise havacılık sektöründe çok kullanılan analog bir basınç ölçerin kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon sonucunda ilgili manometrenin sapma değerleri, belirsizlik değerleri ve histerizis değerleri hesaplanmış ve kalibrasyon sonucunun değerlendirilmesi yapılmıştır.

1. Araştırmanın Kapsamı

Havacılık sektöründe güvenliğin sağlanması, bakım süreçlerinin etkin bir şekilde yönetilmesine bağlıdır. Bu nedenle, cihazların zamanla ölçüm doğruluklarında sapmalar meydana gelmemesi gerekmektedir. Aksi takdirde bu durum, yanlış bakım kararlarına ve dolayısıyla uçuş güvenliğinin riske atılmasına yol açabilmektedir.

Bu bağlamda, uçak bakım süreçlerinde kalibrasyon uygulamalarının gerekliliği ve etkinliği önemli bir araştırma sorunu olarak karşımıza çıkmaktadır. Kalibrasyon süreçlerinin doğru yönetilmemesi, ölçüm hatalarının ortaya çıkmasına neden olabileceği gibi, bakım maliyetlerini artırmakta ve operasyonel verimliliği düşürmektedir. Bu araştırma, uçak bakımında kalibrasyonun rolünü detaylı bir şekilde inceleyerek, mevcut uygulamaların neler olduğunu ve bundan sonraki araştırmalar için örnek teşkil edecek çalışmaları kapsamaktadır.

Araştırma kapsamında şu sorulara yanıt aranacaktır:

- Uçak bakımında kalibrasyon uygulamaları neden gereklidir?
- Kalibrasyon süreçlerinde karşılaşılan en yaygın problemler nelerdir?

- Kalibrasyon hatalarının uçuş güvenliğine etkileri nelerdir?

2. Araştırmanın Önemi

Uçak bakım süreçlerinde kalibrasyonun doğru ve zamanında gerçekleştirilmesi hem uçuş güvenliğini hem de operasyonel verimliliği doğrudan etkilemektedir. Uluslararası havacılık otoriteleri (ICAO, FAA, EASA vb.) tarafından belirlenen standartlara uygun olarak yapılan kalibrasyonlar, uçuş sırasında meydana gelebilecek riskleri en aza indirmektedir. Bu araştırma, kalibrasyon uygulamalarının uçuş güvenliğine etkisini daha ayrıntılı bir şekilde ortaya koyarak, sektördeki teknik personel ve yöneticilere rehberlik etmeyi amaçlamaktadır.

Kalibrasyon süreçlerinin havacılık sektöründeki maliyet ve güvenlik üzerindeki etkileri göz önüne alındığında, bu çalışmanın katkıları şu noktalarda öne çıkmaktadır:

- Uçak bakımında kalibrasyon süreçlerinin uçuş güvenliğiyle doğrudan ilişkisini detaylı bir şekilde inceleyerek farkındalık yaratacaktır.
- Havacılık sektöründe faaliyet gösteren bakım ve onarım merkezlerinin kalibrasyon süreçlerini optimize etmelerine katkı sağlayacaktır.
- Mevcut literatürde eksik olan uçak bakımında kalibrasyonun ekonomik boyutu ve operasyonel maliyetlere etkisini değerlendirecektir.
- Kalibrasyon süreçlerinde yapılan hataların neden olduğu olası kazalar ve teknik aksaklıklar hakkında sektör profesyonellerine rehberlik edecektir.

Bu araştırma, uçak bakım uygulamalarının uluslararası standartlara uygun hale getirilmesi ve kalibrasyon süreçlerinin daha etkin bir şekilde yönetilmesi adına sektördeki uygulayıcılara yol gösterici olacaktır.

3. Araştırmanın Sınırlılıkları

Bu araştırma, uçak bakım süreçlerinde kalibrasyon uygulamalarının rolünü ve etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Ancak çalışma, belirli sınırlamalar çerçevesinde ele alınmıştır. Sınırlılıkların farkında olmak, araştırma bulgularının geçerliliğini ve uygulanabilirliğini daha iyi değerlendirmek açısından önemlidir. Bu bağlamda,

araştırmanın kapsamı, veri kaynakları, zaman çerçevesi ve düzenleyici çerçeve açısından sınırlılıkları aşağıda detaylandırılmıştır.

Bu araştırma, ticari uçak bakım süreçlerine odaklanmaktadır. Askeri hava araçları, özel uçaklar ve diğer hava taşıtlarının bakım prosedürleri, araştırmanın kapsamı dışında bırakılmıştır. Çalışmada, uçak bakımında kullanılan ölçüm cihazlarının kalibrasyonu incelenirken, bakım süreçlerindeki diğer teknik işlemler detaylı olarak ele alınmamıştır. Ayrıca, araştırma uçuş güvenliği açısından kalibrasyonun önemi üzerine yoğunlaşmaktadır. Kalibrasyonun ekonomik boyutu ve operasyonel maliyetlere etkisi genel hatlarıyla ele alınacak olsa da finansal analiz ve maliyet optimizasyonu gibi konular kapsam dışında tutulmuştur. Bu nedenle, elde edilen bulgular, daha çok havacılık bakım mühendisleri ve teknik uzmanlar için rehber niteliğinde olacaktır.

Çalışmada kullanılan veriler, literatür taraması, akademik makaleler, teknik raporlar ve uluslararası havacılık otoriteleri tarafından yayımlanan belgelerle sınırlıdır. Birincil veri toplama yöntemi kullanılmamış olup, saha çalışmaları veya uçak bakım merkezlerinden doğrudan alınan veriler araştırma kapsamında değerlendirilmemiş olup sadece örnek kalibrasyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra, havacılık sektöründeki bazı kritik bakım verileri, gizlilik politikaları nedeniyle ticari ve askeri kuruluşlar tarafından paylaşılmamaktadır. Bu durum, araştırmanın daha geniş kapsamlı bir veri setine ulaşmasını sınırlamaktadır. Bu nedenle, elde edilen bulgular büyük ölçüde mevcut akademik ve teknik kaynaklara dayanmaktadır.

Havacılık sektörü, sürekli gelişen teknolojilere ve yenilenen düzenlemelere sahip dinamik bir alandır. Bu araştırma, belirli bir zaman dilimi içinde gerçekleştirilmiş olup, çalışma süresince erişilebilen kaynaklar doğrultusunda hazırlanmıştır. Kalibrasyon süreçleri, zaman içinde geliştirilen yeni teknikler ve düzenleyici otoritelerin belirlediği güncellenmiş standartlarla değişebilir. Dolayısıyla, araştırma tamamlandıktan sonra yeni geliştirilen uygulamalar veya değişen havacılık düzenlemeleri bu çalışmanın dışında kalabilir. Bu durum, araştırmanın uzun vadeli uygulanabilirliği açısından dikkate alınması gereken bir faktördür.

Çalışmada ele alınan kalibrasyon standartları ve düzenlemeler, Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO), Avrupa Havacılık Emniyeti Ajansı (EASA) ve Amerikan Federal Havacılık İdaresi (FAA) gibi küresel havacılık otoritelerinin belirlediği çerçeve

ile sınırlandırılmıştır. Bununla birlikte, farklı ülkelerin ulusal havacılık otoriteleri tarafından belirlenen özel düzenlemeler çalışmaya dahil edilmemiştir. Örneğin, bazı ülkeler, kalibrasyon süreçlerinde yerel yönetmelikler ve sertifikasyon prosedürleri uygulamakta olup, bu araştırma bu tür bölgesel farklılıkları detaylı olarak ele almamaktadır. Bu nedenle, araştırmanın bulgularının küresel ölçekte geçerli olduğu varsayılmakla birlikte, yerel düzenlemelere uyarlanması gerektiği unutulmamalıdır.

Araştırmanın sınırlılıkları, elde edilen bulguların yorumlanması ve uygulanabilirliği açısından önemli bir çerçeve sunmaktadır. Kapsam sınırlılıkları, araştırmanın odaklandığı spesifik alanları belirlerken, veri kaynakları sınırlılığı, kullanılan bilgilerin niteliğini ortaya koymaktadır. Zaman sınırlılığı, araştırmanın güncellenme gerekliliğine işaret ederken, regülasyon sınırlılığı, çalışmanın küresel düzeyde standartlara dayalı olarak hazırlandığını göstermektedir. Bu sınırlamalar doğrultusunda, araştırmanın sonuçlarının gelecekteki çalışmalara referans oluşturabilecek nitelikte olduğu, ancak farklı havacılık sektörleri veya bölgesel regülasyonlar için ek analizler gerektirebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

1. BÖLÜM

HAVACILIKTA KALİBRASYON VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Mevcut literatürde, uçak bakımında kalibrasyonun önemi ve farklı yaklaşımlar detaylı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada, farklı çalışmalardan elde edilen bulgular ve örnek olaylar ele alınmıştır. Cihazların maruz kaldığı çevresel ve operasyonel koşullar her organizasyonda farklılık göstermekte olup bu durum sabit bir kalibrasyon aralığı belirlemeyi güçleştirmektedir. Bu nedenle, ölçüm cihazlarının hangi sıklıkla kalibre edilmesi gerektiği, havacılık ve diğer endüstriyel bakım süreçlerinde üzerinde önemle durulan bir konudur [9]. Uluslararası metroloji otoriteleri, bu farklılıklardan dolayı “sabitleştirilmiş kalibrasyon aralıkları yerine, risk ve kullanım temelli değerlendirme yöntemlerinin” tercih edilmesini önermektedir [10].

Uygulamada birçok kuruluş, kalibrasyon sıklığını geçmiş deneyimlerine veya üretici önerilerine göre belirlemekte; ancak bu yöntemler subjektif ögelere açık olduğundan tutarlılık ve güvenilirlik açısından sınırlılıklar taşımaktadır. Buna istinaden ölçüm cihazlarının kalibrasyon aralıklarının daha objektif biçimde belirlenmesine olanak tanıyan risk analizi modelleri ve karar destek sistemleri geliştirilmiştir. Avrupa Akreditasyon Birliği'nin yayımladığı bir teknik raporda, kalibrasyon sıklığını belirlemek için kestirimsel algoritmalar, geçmiş kalibrasyon verileri ve ölçüm sapmaları gibi değişkenlere dayalı çok kriterli karar verme sistemlerinin kullanılabileceği belirtilmektedir [10]. Bu sistemler, cihazların kullanım sıklığı, ölçüm hassasiyeti ve bakım geçmişi gibi parametreleri değerlendirerek optimum kalibrasyon periyodunun hesaplanmasını sağlamaktadır. Bu çerçevede, Microsoft Excel gibi yaygın platformlar üzerinde kurulan basit karar destek araçlarının, bakım yöneticilerine uygulamada önemli kolaylık sağladığı görülmektedir. Nitekim, CAAS (2020) tarafından yayımlanan bir

uygulama rehberinde, Excel tabanlı istatistiksel izleme formlarının, kalibrasyon yönetiminde veri temelli karar verme sürecine katkı sunduğu ifade edilmektedir [11].

Askerî havacılık gibi yüksek risk ve güvenlik hassasiyeti taşıyan alanlarda, kalibrasyon süreçleri yalnızca teknik bir faaliyet olarak değil, aynı zamanda sistematik ve kurumsal bir yapı içinde yürütülmektedir. Bu tür kuruluşlarda, kalibrasyon işlemleri detaylı prosedürlerle tanımlanmakta ve uygulamalar sıkı kalite güvence mekanizmalarıyla desteklenmektedir [12]. Hava Kuvvetleri gibi askeri kuruluşlarda, ölçüm cihazlarının izlenebilirliğini sağlamak ve olası sapmaları operasyonel riske dönüşmeden önce saptamak amacıyla önleyici bakım uygulamalarına büyük önem verilmektedir [13]. Ticari havacılıkta ise genellikle hata sonrası düzeltici müdahaleler ön plandayken, askerî sistemlerde hataların ortaya çıkmasını engelleyecek proaktif kalite yaklaşımları benimsenmektedir. Askeri uygulamalarda kalibrasyon sonrası ikinci bir kontrol süreci yerine, sürecin ilk adımından itibaren hataya yer bırakmayan yapılandırılmış prosedürlerin uygulanması tercih edilmektedir [12]. Bu durum, kalibrasyonun sadece teknik değil, aynı zamanda stratejik bir süreç olduğunu; insan hatalarının yanı sıra, sistem zayıflıklarının da süreç boyunca kontrol altında tutulması gerektiğini göstermektedir [14]. ABD Savunma Bakanlığı tarafından yayımlanan kalibrasyon kılavuzlarında, hataların sadece teknik personel hatası olmayıp sürecin bütününde sistematik kusurların sonucu olabileceği vurgulanmaktadır [13]. Bu yaklaşım, kalibrasyonun organizasyonel sorumluluk çerçevesinde değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Uçak bakım süreçlerinde gerçekleştirilen kalibrasyon hatalarının, uçuş güvenliği üzerinde ciddi etkileri olabileceği çeşitli uluslararası rapor ve teknik belgelerde vurgulanmaktadır. Torkmetre, basınç sensörü ve sıcaklık ölçer gibi hassas ölçüm cihazlarının yanlış kalibrasyonu, bakım sırasında uygulanan tork veya ayarların standart dışına çıkmasına ve bunun sonucunda kritik bileşenlerin güvenilirliğini kaybetmesine neden olabilmektedir [6]. Federal Aviation Administration (FAA) tarafından yayımlanan bir teknik dokümanda, hatalı kalibrasyon sebebiyle motor parçalarında yanlış tork uygulanmasının motor aşırı ısınması gibi arızalara yol açabileceği ve bu durumun hem uçuş güvenliğini tehdit ettiği hem de bakım maliyetlerini artırdığı ifade edilmiştir [6]. Aynı belgede, bir bakım prosedürü sırasında uygunsuz kalibre edilmiş bir tork anahtarıyla yapılan işlemin, motor tutucularının gevşemesine ve bunun da havada titreşim sorunlarına neden olduğuna dair vaka analizi sunulmaktadır. Buna ek olarak, Avrupa Havacılık Emniyeti Ajansı

(EASA), hatalı kalibrasyonun, uçuş sırasında sistem hatalarına ve dolayısıyla kazaya neden olabilecek zincirleme sorunlar yaratabileceğini belirtmektedir. Bu kapsamda, kalibrasyon süreçlerinin yalnızca doğruluk açısından değil, cihazın kullanım sıklığına, çevresel koşullara ve teknik sınıflandırmasına göre de izlenmesi ve denetlenmesi gerektiği vurgulanmaktadır [15]. Bu örnekler, kalibrasyonun yalnızca teknik bir görev olmadığını, doğrudan uçuş emniyeti ve operasyonel maliyetlerle ilişkili stratejik bir süreç olduğunu göstermektedir.

Literatürde yapılan incelemeler, uçak bakım uygulamalarında kalibrasyonun kritik bir öneme sahip olduğunu göstermektedir. Çalışmalar, kalibrasyon süreçlerinin veriye dayalı analizler ve risk değerlendirme modelleri ile optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Risk analizi modelleri ve karar destek sistemleri gibi yeni teknolojiler, kalibrasyon periyotlarının daha etkin bir şekilde belirlenmesini sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, askeri ve ticari havacılık sektörleri arasında kalibrasyon süreçlerinde farklı yaklaşımlar olduğu, askeri havacılığın daha katı prosedürler uyguladığı görülmektedir. Sonuç olarak, hatalı kalibrasyonların uçuş güvenliği üzerinde doğrudan etkisi olduğu ve geçmişte yaşanan uçak kazalarının bazılarının yanlış kalibrasyon süreçlerinden kaynaklandığı açık bir şekilde görülmektedir. Bu nedenle, havacılık sektöründe kalibrasyonun yalnızca teknik bir süreç olarak değil, sistematik bir güvenlik prosedürü olarak ele alınması gerekmektedir.

Günümüzde kalibrasyon kavramını hayatımızın her aşamasında istisnasız kullanmaktayız. Kalibrasyonun hayatımızdaki önemini anlayabilmemiz açısından birçok örnek mevcuttur. Öncelikli olarak can ve mal kaybını önleme amacıyla kullandığımız bu kavram makinelerdeki, teçhizatlardaki ve cihazlardaki ölçüm doğruluğunu ve sürdürülebilirliğini tespit edebilmek için elzemdir. Örneğin, şehirlerarası yolculuk yapan biri iseniz araç hızını tespit eden kameralar veya radarlarla karşılaşmışsınızdır. Bu noktalarda kontrollü ve azami hızda araç kullanımınız olası ceza ve kaza riskini azaltmaktadır. Olası bir hatalı hız ölçümü sürecin aleyhinize işlemesine sebep olabilmektedir. Bu nedenle, cihazın ölçüm sonuçlarının yanlış veya hatalı bilgi aktarmasını önlemek adına düzenli periyotlarla kalibrasyon yapılması önem arz etmektedir.

Kalibrasyonun uçuş güvenliğine etkisi, havacılık sektöründe 1960'lı yıllardan itibaren sistematik biçimde ele alınmaya başlanmıştır. Uluslararası standartlara dayalı ölçüm sistemlerinin oluşturulması, uçakların havada güvenli hareket etmesinin dışında yer sistemlerinin sürdürülebilirliğini de sağlamayı amaçlamaktadır [12]. Bu bağlamda, sivil ve askeri havacılıkta yürütülen kalibrasyon faaliyetlerinin temel amacı hem uçuş hem de yer operasyonlarının güvenilirliğini sürekli olarak temin etmek şeklinde açıklanabilir [16].

Kalibrasyon işlemlerinin zamanında ve doğru biçimde yapılması hem aviyonik sistemlerin hem de yardımcı yer destek araçlarının optimum performansta çalışabilmesi açısından kritiktir. Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST) tarafından yayımlanan teknik belgelerde, uçak üzerindeki ölçüm sistemlerinin ve sensörlerin belirli aralıklarla kalibre edilmesinin; uçuş kontrol sistemlerinin doğru komutları işlemesi ve verilerin sistemlere güvenli şekilde iletilmesi açısından zorunlu olduğu belirtilmektedir [17]. Buna ek olarak, yer destek ekipmanları (yer güç üniteleri (GPU), torkmetreler veya hidrolik test tezgâhları gibi araçların) da düzenli olarak kalibrasyona tabi tutulması, apron operasyonlarının güvenliğini sağlamakta ve ekipman kaynaklı arıza riskini azaltmaktadır [18]. Yer hizmetlerinde kullanılan bu ekipmanların doğruluğu, bakım prosedürlerinin başarısı ile doğrudan ilişkilidir. Hava trafik kontrol sistemleri kapsamında ise radarlar, hava hızı ölçüm sistemleri ve iletişim cihazlarının kalibrasyonu, özellikle uçuş emniyeti açısından hayati önemdedir. EASA tarafından yayımlanan uçuş muayene kılavuzunda, bu sistemlerin belirlenen tolerans aralıkları dışında çalışmasının kazalara zemin hazırlayabileceği ve bu nedenle kalibrasyonun düzenli olarak yapılmasının zorunlu olduğu vurgulanmaktadır [19].

1.1. Kalibrasyonun Tanımı ve Önemi

Kalibrasyon, uçak bakımında kullanılan tüm araç ve ekipmanların, belirlenen standartlara uygun olarak çalıştığından emin olmayı sağlayan kritik bir süreçtir. Bu süreç, uçak bakım ve onarım faaliyetlerinin güvenliğini ve etkinliğini doğrudan etkilemektedir. Kalibrasyon işlemleri, bakım ve onarım faaliyetleri sırasında kullanılan ekipmanların doğruluğu bilinen belirli referans standartlarla belirli ortam koşulları altında karşılaştırılması olarak tanımlanabilir. Bu sayede, ölçüm cihazlarının performansı optimize edilerek, uçuş sırasında kritik hataların önüne geçilmiş olunmaktadır [20].

1.2. Kalibrasyon Süreci

Kalibrasyon süreci, bir ölçüm cihazının ya da sistemin, önceden belirlenmiş doğruluk standartlarına göre test edilmesi ve gerekiyorsa bu standartlara uygun şekilde ayarlanmasını kapsamaktadır. Bu süreç, havacılıkta kullanılan cihazların hassasiyetini ve doğruluğunu garanti altına almak için düzenli olarak uygulanmaktadır [21].

Kalibrasyon sürecinin ilk aşaması, kalibrasyon için gerekli ekipmanların ve referans standartların dikkatli bir şekilde seçilmesi ve hazırlanmasıdır. Bu aşama, doğru sonuçların elde edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Ardından, ölçüm cihazının belirli bir dizi koşul altında test edilmesi ve bu test sonuçlarının detaylı bir şekilde kaydedilmesi gelir. Test sonuçları, cihazın doğruluğunu ve performansını değerlendirmek için analiz edilir. Eğer cihaz, belirlenen standartların dışında bir performans sergiliyorsa, ilgili teknik servis hizmeti sayesinde gerekli ayarlamalar yapılır ve kalibrasyon süreci tekrarlanır. Bu sayede, cihazın doğru ve güvenilir ölçümler yapması sağlanmış olur [21].

1.3. Kalibrasyon Türleri

Havacılık sektöründe kullanılan kalibrasyon türleri, uygulamanın niteliğine ve cihazın türüne göre farklılık göstermektedir. Kalibrasyonun doğru bir şekilde yapılabilmesi için, kullanılacak yöntemin ve tekniklerin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir [22]. Başlıca kalibrasyon türleri şunlardır:

1.3.1. Doğrudan Kalibrasyon

Doğrudan kalibrasyon, bir ölçüm cihazının performansının, izlenebilirliği sağlanmış bir referans standart ile birebir karşılaştırılması yoluyla doğrulanması işlemidir. Bu yöntem, özellikle yapı olarak basit ve yalnızca tek bir fiziksel büyüklüğü ölçen cihazlarda tercih edilmektedir [23]. Örneğin, bir termometrenin belirli sıcaklık değerlerini doğru ölçüp ölçmediği, önceden kalibre edilmiş bir referans termometre ile doğrudan kıyaslanarak test edilebilir. Bu işlem, termometrenin belirli sıcaklık noktalarındaki sapmalarını ortaya koyar ve ölçüm doğruluğunun değerlendirilmesini sağlar [24].

Doğrudan kalibrasyon genellikle hızlı, ekonomik ve uygulaması kolay bir yöntemdir. Ancak bu yöntemin temel sınırlaması, yalnızca belirli bir parametreye odaklanmasıdır. Cihazın genel işleyişi, çevresel koşullara duyarlılığı veya çoklu parametrelili performansı

hakkında kapsamlı bilgi vermez [25]. Bu yöntem, birçok endüstriyel uygulamada başlangıç seviyesi kalibrasyonlar için yaygın biçimde kullanılırken; hassasiyetin daha yüksek seviyede gerektiği durumlarda, genellikle dolaylı ya da çok kademeli kalibrasyon teknikleriyle desteklenmesi önerilmektedir [26].

1.3.2. Dolaylı Kalibrasyon

Dolaylı kalibrasyon, ölçüm cihazının doğrudan test edilmesinin mümkün ya da pratik olmadığı durumlarda başvurulan bir yöntemdir. Bu yöntem, genellikle doğrudan ölçüm yapılmasının güç olduğu çok parametrelili sistemlerde ve yüksek düzeyde entegre sensörlerde tercih edilmektedir [27]. Bu kalibrasyon türünde, cihazın çıktıları veya davranışı, başka değişkenler veya sistem performansları üzerinden değerlendirilerek kalibrasyon doğruluğu tespit edilir. Örneğin, bir basınç sensörünün kalibrasyonu doğrudan referans basınçla yapılmak yerine, sıcaklık, voltaj ya da akım gibi dolaylı ilişkili parametrelerin izlenmesiyle sağlanabilir [28].

Dolaylı kalibrasyonun uygulanması, genellikle daha fazla ölçüm adımı ve hesaplama gerektirmektedir. Bununla birlikte, bu yöntem cihazın genel işleyişi ve parametreler arası etkileşimler hakkında daha kapsamlı bir değerlendirme yapılmasına olanak tanımaktadır. Sistem düzeyinde değerlendirme gerektiren havacılık ve uzay gibi ileri teknoloji alanlarında bu yaklaşım yaygın olarak kullanılmaktadır [29].

Bu yöntem aynı zamanda ölçüm belirsizliklerinin azaltılmasına ve cihazın kullanım koşullarına daha uygun kalibrasyon stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır [26]. Dolaylı kalibrasyonun bu bütünsel değerlendirme kapasitesi, onu karmaşık ölçüm sistemlerinde vazgeçilmez hale getirmektedir.

1.4. Kalite Sistem Standartları ve Sertifikasyon

Kalibrasyon işlemlerinin uluslararası standartlara uygun olarak gerçekleştirilmesi, kullanılan cihazların güvenilirliğini ve doğruluğunu artırmaktadır. Havacılık endüstrisinde, kalibrasyon süreçleri için yaygın olarak kullanılan standartlar arasında ISO 17025, ISO 9001, AS9100 ve ilgili cihazlara ait özerk kalibrasyon dokümanları yer almaktadır. Bu standartlar, kalibrasyon laboratuvarlarının teknik yeterliliğini ve kalite yönetim sistemlerini belirlemektedir. Kalibrasyon sertifikası, bir cihazın belirli bir

standarda göre test edildiğini ve gerektiğinde ayarlandığını belgeleyen resmi bir dokümandır. Bu sertifikalar, cihazın havacılık standartlarına uygun olarak çalıştığını garanti altına alır ve uçuş güvenliğini destekler [22].

Kalibrasyon faaliyetlerinin güvenilirliği ve uluslararası geçerliliği, belirli standartlara ve belgelendirme süreçlerine bağlı olarak yürütülmektedir. Uçak bakımında kullanılan ölçüm ekipmanlarının kalibrasyonu, yalnızca teknik doğruluğun sağlanmasıyla sınırlı olmayıp aynı zamanda uluslararası izlenebilirlik ve yasal uygunluk ilkelerine dayanmalıdır [30]. Bu bağlamda en yaygın kabul gören referanslardan biri, ISO/IEC 17025:2017 standardıdır. Bu standart, test ve kalibrasyon laboratuvarlarının teknik yeterliliği ile kalite yönetim sistemlerini tanımlamaktadır. Uçak bakım kuruluşlarında faaliyet gösteren kalibrasyon laboratuvarlarının, bu standarda göre akredite edilmesi, yürütülen işlemlerin doğruluğunu ve geçerliliğini belgelemektedir [31].

Bu çerçevede, bir kuruluşun belirli bir standarda göre faaliyetlerini yeterli düzeyde ve tarafsız biçimde yürüttüğünün, bağımsız ve yetkili bir otorite tarafından resmi olarak tanınması süreci olarak akreditasyon karşımıza çıkmaktadır. Kalibrasyon laboratuvarları için bu süreç genellikle ISO/IEC 17025:2017 standardına uygunluk temelinde yürütülmektedir. Bu standart, laboratuvarların hem teknik yeterliliğini hem de kalite yönetim sistemlerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır [31; 32].

Akreditasyon, ölçüm sonuçlarının izlenebilir, doğrulanabilir ve uluslararası düzeyde tanınabilir olmasını sağlamaktadır. Bu, özellikle havacılık, savunma, enerji ve sağlık gibi yüksek güvenlik ve doğruluk gerektiren sektörlerde kritik bir gerekliliktir. Akredite bir laboratuvar tarafından verilen kalibrasyon sertifikaları, farklı ülkelerde geçerliliğini korumakta olup yeniden test ihtiyacını azaltmaktadır [9]. Ayrıca akreditasyon, laboratuvarlarda uygulanan süreçlerin standartlara uygun, tekrarlanabilir ve şeffaf olmasını güvence altına almaktadır. Bu da kullanıcıların ölçüm sonuçlarına olan güvenini artırır ve olası ticari, teknik ya da hukuki anlaşmazlıklarda güvenilir bir referans noktası sağlar [32; 33]. Kalibrasyon gibi hassas toleranslara dayanan ölçüm faaliyetlerinde, akreditasyon süreci kalite güvencesinin yanı sıra global tanınırlık ve rekabet avantajı da sunmaktadır.

ISO 9001, genel kalite yönetim sistemi gerekliliklerini belirleyerek organizasyonların süreçlerini sürekli iyileştirmesini ve müşteri memnuniyetini artırmasını hedefler.

Kalibrasyon hizmeti veren kuruluşların bu standarda uygun çalışması, kalite süreçlerinin sistematik yürütülmesini sağlar [34]. AS9100 ise, ISO 9001'in havacılık ve uzay sanayii için özel olarak genişletilmiş versiyonudur. Bu standart, uçak bakım ve üretim alanlarında kullanılan kalibrasyon cihazlarının kalite yönetimi açısından izlenebilirliğini, risk temelli düşünmeyi ve ürün emniyetini kapsayan özel gereklilikler içerir [35].

Kalibrasyon sertifikaları, genellikle ölçüm cihazlarının doğruluğunu, belirsizlik değerlerini, izlenebilir referanslarla karşılaştırıldığını ve ölçüm sonuçlarının hangi çevresel koşullarda elde edildiğini içerecek şekilde düzenlenir. Bu sertifikalar, sadece iç denetimlerde değil, ulusal ve uluslararası denetimlerde de kanıtlayıcı belge olarak kullanılır [9]. Kalibrasyon işlemleri, uluslararası metroloji yapıları tarafından tanımlanan izlenebilirlik zincirine uygun şekilde gerçekleştirilmelidir. Bu bağlamda, kalibrasyon işlemlerinin ulusal metroloji enstitüleri (örneğin: TÜBİTAK UME, NIST, PTB) tarafından belirlenen referanslara dayandırılması zorunludur [34; 36]. Havacılıkta ise EASA Part-M ve Part-145 düzenlemeleri, kalibrasyonla ilgili özel yükümlülükler içermektedir. Bu düzenlemelere göre bakım kuruluşları, kullandıkları ölçüm ekipmanlarının kalibrasyon geçmişini kayıt altına almak, geçerlilik tarihlerini izlemek ve her cihaz için kalibrasyon sertifikalarını saklamakla yükümlüdür [37].

2. BÖLÜM

UÇAK BAKIMINDA KALİBRASYON UYGULAMALARI

Uçak bakım faaliyetleri, hava taşıtlarının emniyetli, verimli ve maliyet etkin biçimde işletilmesini sağlamak üzere gerçekleştirilen kapsamlı teknik uygulamaları içermektedir. Bu süreçler, sadece arıza onarımı olmamakla birlikte önleyici kontroller ve performans optimizasyonu gibi işlemleri de kapsamaktadır [38]. Bakımın başarısı ise büyük ölçüde, kullanılan ölçüm ekipmanlarının güvenilirliğine ve doğruluğuna bağlı olarak değişmektedir. Kalibrasyonun uçuş güvenliği üzerindeki etkisi, doğru ölçümlerin sağlanması ve bu ölçümlere dayalı kararların doğruluğundan kaynaklanmaktadır. Ölçüm cihazlarının periyodik olarak kalibre edilmesi hem uçuş güvenliği hem de bakım süreçlerinin etkinliği açısından zorunludur [14].

2.1. Uçak Bakım Sürecinin Tanımı ve Önemi

Uçak bakımı, hava taşıtlarının uçuş güvenliğini sağlamak amacıyla belirli aralıklarla planlanan ve uygulanan sistematik teknik faaliyetler bütünüdür. Bu işlemler; yapısal kontroller, sistem testleri ve parça değişimleri gibi operasyonları içermekte olup sivil havacılık düzenlemeleriyle uyumlu biçimde gerçekleştirilmektedir [38]. Söz konusu faaliyetler, hava aracının operasyonel performansını korumak, güvenlik risklerini en aza indirmek ve maliyetleri optimize etmek amacı taşımaktadır. Uçuş öncesi ve sonrası uygulanan bu bakım prosedürleri, hava aracının hem güvenilir hem de ekonomik hizmet vermesini sağlamaktadır [39].

Bakım uygulamalarının temel hedefi, uçuş sırasında meydana gelebilecek olası teknik arızaları önceden tespit ederek ortadan kaldırmaktır. Bu sayede hem uçuş emniyeti artırılmakta hem de olası operasyonel gecikmelerin önüne geçilmektedir [40]. Bakım programları genellikle üretici talimatları, uçuş saatleri, uçuş çevrimleri veya motor çalışma süresi gibi belirlenmiş periyotlara göre planlanmaktadır. Bu planlama sayesinde

hava aracının hava aracılığı sertifikası kapsamında uçuşa elverişliliği sürekli olarak korunmaktadır [41]. Bu bakım döngüsü içerisinde yürütülen işlemler, detaylı teknik kontrollerden sistemli parça değişimlerine kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Her bir faaliyet, uçağın gövdesinden motor sistemlerine, aviyoniklerden iniş takımlarına kadar uzanan kapsamlı bir teknik değerlendirme sürecinin parçasıdır [42].

2.2. Uçak Bakımında Kullanılan Ölçüm Cihazları

Uçak bakımında kullanılan test ve ölçüm cihazları, hava taşıtlarının emniyetli ve verimli biçimde hizmet verebilmesi için hayati öneme sahiptir. Bu cihazlar, uçak sistemlerinin teknik durumunu değerlendirmek, performans verilerini toplamak ve gerektiğinde müdahale süreçlerini yönlendirmek amacıyla kullanılmaktadır [43]. Bu kapsamda kullanılan cihazlar, uçağın farklı sistemlerinden elde edilen verilerin doğru şekilde ölçülmesini sağlamaktadır. Ölçüm ekipmanlarından basınç göstergeleri, sıcaklık sensörleri, torkmetreler gibi araçlar, bakım sürecinde sistem parametrelerinin güvenilir şekilde izlenmesine olanak tanımaktadır [44]. Her biri özel işlevlere sahip bu ekipmanlar, uçuş güvenliğini doğrudan etkileyen değerlerin ölçümünü gerçekleştirmektedir. Ancak bu cihazların etkinliği için yapısal sağlamlıklarının yanı sıra doğru şekilde kalibre edilmiş olmaları gerekmektedir. Kalibrasyonu yapılmamış ya da yanlış kalibre edilmiş ölçüm ekipmanları, hatalı veri üretimine neden olmakta olup yanlış kararların alınmasına ve uçuş güvenliğinin riske girmesine yol açabilmektedir [45]. Bu nedenle, bakım süreçlerinde kullanılan ölçüm cihazlarının belirlenen aralıklarla ve uygun koşullarda kalibre edilmesi, uluslararası havacılık otoriteleri tarafından zorunlu bir uygulama olarak kabul edilmiştir [38]. Bu ölçüm cihazlarından bazıları basınç ölçüm cihazları, sıcaklık ölçüm cihazları, elektriksel ölçüm cihazları şeklinde sıralanabilir.

2.2.1. Basınç Ölçüm Cihazları

Uçak bakımında kullanılan basınç ölçüm cihazları, özellikle hidrolik, yakıt, yağlama ve pnömatik sistemlerdeki basınç değerlerinin izlenmesinde temel bir işleve sahiptir. Bu cihazlar, sistem içindeki basınçların izin verilen sınırlar içerisinde kalmasını sağlayarak hem uçağın performansını hem de uçuş emniyetini koruma açısından kritik bir rol oynamaktadır [46]. Uçak sistemlerinde meydana gelebilecek basınç sapmaları, doğru ölçüm yapılmadığında fark edilemeyebilir ve bu durum ciddi teknik arızalara ya da güvenlik ihlallerine yol açabilir. Basınç ölçüm ekipmanlarının doğru çalışması, yakıt

akışından iniş takımı sistemine kadar birçok kritik bileşenin sağlıklı şekilde işlemlerini sağlamaktadır [47]. Bu nedenle, bu cihazların belirli aralıklarla kalibre edilmesi, ölçüm doğruluğunun sürekliliğini sağlamak açısından zorunludur. Kalibrasyon süreçlerinde elde edilen veriler, cihazın standarda uygunluğunu teyit etmek amacıyla detaylı şekilde analiz edilip gerekiyorsa teknik ayarlamalar yapılmaktadır [48]. Kalibrasyonu ihmal edilen ya da yanlış kalibre edilmiş bir basınç sensörü, sistem içi verilerin hatalı yorumlanmasına ve operasyonel risklerin artmasına neden olabilir [46].

2.2.2. Sıcaklık Ölçüm Cihazları

Uçak bakımında kullanılan sıcaklık ölçüm cihazları, motorlar, hidrolik sistemler ve diğer hayati sistem bileşenlerinin çalışma sıcaklıklarının izlenmesini sağlayan temel ekipmanlardır. Bu cihazlar, uçak sistemlerinin önerilen termal sınırlar içerisinde çalışmasını güvence altına alarak hem performansın korunmasına hem de sistem arızalarının önlenmesine katkıda bulunmaktadır [49].

Sıcaklık ölçüm cihazlarının doğru ve hassas şekilde çalışması, motor bileşenlerinde meydana gelebilecek aşırı ısınmaların önlenmesi ve diğer sistemlerde termal denge sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Hatalı ölçüm yapan ya da kalibrasyonu ihmal edilmiş bir sensör, yanlış veri aktararak uçuş sırasında sistem dengesizliklerine neden olabilir; bu da uçuş güvenliğini ve ekipman ömrünü doğrudan olumsuz etkileyebilir [50; 51].

Bu tür cihazların kalibrasyonu, çoğunlukla laboratuvar ortamında belirli sıcaklık aralıklarında yürütülen karşılaştırmalı ölçümlerle gerçekleştirilmektedir. Kalibrasyon sırasında cihazın verdiği değerler, izlenebilirliği sağlanmış referans sıcaklık kaynaklarıyla kıyaslanmakta olup sapma ile karşılaştırılması durumunda düzeltme yapılmaktadır [24]. Kalibrasyon sürecinden elde edilen veriler, cihazın doğruluk düzeyini belgelemek ve ileride referans alınmak üzere kayıt altına alınmaktadır. Bu belgeler hem kalite yönetimi hem de uçuşa elverişlilik denetimleri açısından önem taşımaktadır [31].

2.2.3. Elektriksel Ölçüm Cihazları

Uçak sistemlerinde kullanılan elektriksel ölçüm cihazları, sistemlerin voltaj, akım ve direnç gibi temel elektriksel parametrelerini izlemek ve kontrol altında tutmak amacıyla

kritik öneme sahiptir. Bu cihazlar sayesinde uçak üzerindeki elektrik devrelerinin güvenli ve kararlı bir şekilde çalışması sağlanmaktadır [52].

Elektriksel parametrelerin doğru bir şekilde ölçülmesi, uçuş sırasında elektrik sistemlerinin istikrarlı çalışması için gereklidir. Bu nedenle, ölçüm cihazlarının belirli aralıklarla ve uygun yöntemlerle kalibre edilmesi, sistem güvenilirliğini doğrudan etkileyen bir uygulamadır [53]. Yanlış kalibrasyon yapılmış bir cihaz, örneğin hatalı voltaj ölçümü sonucu sistem arızasına ya da güvenlik ihlaline neden olabilir [54].

Bu cihazların kalibrasyonu genellikle kontrollü laboratuvar koşullarında, izlenebilir referans kaynaklar kullanılarak gerçekleştirilir. Kalibrasyon sürecinde cihazın ölçüm sonuçları, ulusal veya uluslararası referans standartlarla karşılaştırılır; ölçüm sapması tespit edilirse, gerekli ayarlamalar yapılır [31]. Bu işlemler, cihazın hassasiyetini artırmak ve sistemin hata toleransını en aza indirmek için önemlidir [55]. Kalibrasyon sürecinde elde edilen veriler, cihazın performans geçmişini izlemek ve gelecekteki kullanımlarında referans alınmak üzere arşivlenmektedir. Bu kayıtlar hem iç kalite denetimlerinde hem de dış otoritelerce yapılan havacılık denetimlerinde teknik geçerlilik sağlamaktadır [56].

2.3. Metroloji ve Uçak Bakımında Kalibrasyonun Önemi

Uçak bakım faaliyetlerinde amaç, uçuş güvenliğini en üst düzeye çıkarırken maliyetleri optimize etmektir. Bunun temel unsurlarından biri de kullanılan ölçüm cihazlarının doğruluğunun garanti altına alınmasıdır. Ölçüm cihazlarının zaman içinde çeşitli nedenlerle sapma göstermesi muhtemeldir. Bu sapmaların tespit edilmesi ve düzeltilmesi, düzenli kalibrasyon faaliyetleriyle mümkündür [57]. Kalibrasyon; ölçüm cihazlarının belirli standartlara göre doğruluğunun test edilmesi ve ulusal/uluslararası referanslara dayandırılmasıdır [58]. Havacılık bakım organizasyonlarında kalibrasyonun yapılmaması, yanlış ölçüm kaynaklı kritik bakım hatalarına ve uçuş güvenliğini tehlikeye atabilecek sonuçlara yol açabilmektedir.

Bu çerçevede ölçüm bilimi olarak tanımlanan metroloji, tüm teknik disiplinlerde doğru ve güvenilir ölçüm yapılmasını sağlayan temel bilim dalı olarak karşımıza çıkmaktadır. Metrolojinin havacılık sektöründeki önemi, uçuş güvenliği ve bakım kalitesinin doğrudan ölçüm doğruluğuna bağlı olmasından kaynaklanmaktadır. Uçak bakımında kullanılan her türlü test ve ölçüm cihazı, belirli toleranslar içinde çalışmalı ve bu toleransların doğruluğu

metrolojik esaslara uygun olarak garanti altına alınmalıdır [57]. Metroloji, temel olarak bilimsel metroloji, endüstriyel metroloji ve yasal metroloji olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır.

Bilimsel metroloji, ölçüm sistemlerinin temelini oluşturan referans standartların geliştirilmesini ve en yüksek doğruluk seviyelerinde ölçümlerin yapılmasını kapsamaktadır. Bu alandaki çalışmalar; uzunluk, kütle, sıcaklık, elektriksel büyüklükler gibi temel fiziksel büyüklüklerin uluslararası tanımlarının oluşturulması ve korunması üzerine yoğunlaşmaktadır. Ulusal Metroloji Enstitüleri (TÜBİTAK UME gibi) bu kapsamda faaliyet göstermekte olup ülkelerin ölçüm standartlarını dünya ile uyumlu hale getirmektedir [59]. Havacılık bakımında bilimsel metroloji, referans standartların doğruluğunu garanti altına alarak uçuş güvenliği açısından kritik verilerin uluslararası düzeyde karşılaştırılabilir olmasını sağlamaktadır.

Endüstriyel metroloji, üretim ve bakım süreçlerinde kullanılan ölçüm cihazlarının doğruluğunun korunması ve izlenebilirliğinin sağlanmasıyla ilgilidir. Uçak bakım merkezlerinde kullanılan tork anahtarları, basınç dönüştürücüleri, sıcaklık ve ivmeölçer cihazları gibi test ekipmanlarının düzenli olarak kalibre edilmesi bu kapsamda yer almaktadır. Endüstriyel metrolojinin temel amacı, uçuşta kritik rol oynayan komponentlerin bakım ve onarımında ölçüm hatalarını en aza indirerek güvenliği sağlamaktır [60]. Bu bağlamda havacılık endüstrisi, üretim ve bakım süreçlerinde kullanılan cihazların doğruluğunu garanti altına almak için kapsamlı bir kalibrasyon programı yürütmek zorundadır.

Yasal metroloji, kamu yararına yapılan ölçümlerin güvenilirliğini sağlamak amacıyla oluşturulan yasal düzenlemeler ve denetim faaliyetlerini içermektedir. Ticaret, sağlık, çevre ve güvenlik alanlarında kullanılan ölçüm cihazlarının standartlara uygun olması zorunludur. Havacılık sektöründe yasal metroloji, uçuş güvenliğiyle ilgili regülasyonları da kapsamaktadır. Avrupa Birliği Havacılık Emniyeti Ajansı (EASA) ve Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) tarafından yayımlanan regülasyonlar, havacılıkta kullanılan tüm ölçüm cihazlarının izlenebilir kalibrasyon zincirine sahip olmasını ve ilgili sertifikasyon süreçlerinden geçmesini şart koşmaktadır [58].

Bu sınıflandırma, havacılık sektöründe ölçüm doğruluğu ve güvenirliliği konusunda bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır. Bilimsel metroloji, en yüksek doğruluk seviyesinde

referans standartları belirlerken; endüstriyel metroloji bu standartları bakım ve üretim süreçlerine entegre eder; yasal metroloji ise bu süreçlerin hukuki ve uluslararası gerekliliklere uygunluğunu denetler. Sonuç olarak bu üçlü yapı, uçuş güvenliği ve bakım kalitesi üzerinde doğrudan etkiye sahiptir.

2.4. Metrolojik İzlenebilirlik

Uçak bakımında kullanılan tork anahtarları, basınç sensörleri, ivmeölçerler ve sıcaklık ölçüm cihazları gibi ekipmanların düzenli ve izlenebilir bir şekilde kalibre edilmesi, uçuş güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. İzlenebilirliği sağlanmamış ölçüm cihazlarının kullanımı, yanlış ölçümlere ve bakım hatalarına yol açabilmektedir. Uçuş kontrol sistemlerinde kullanılan sensörlerin hatalı ölçüm yapması; yakıt tüketiminde artış, performans kaybı veya daha ciddi sonuçlar doğurabilecek uçuş emniyeti risklerine neden olabilir.

İzlenebilirlik, bir ölçüm sonucunun ulusal veya uluslararası düzeyde tanımlanmış referanslara kesintisiz ve belgelenmiş bir zincir aracılığıyla bağlanabilmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu zincir, ölçüm cihazından başlayarak kullanılan referans cihazlara ve nihayetinde ulusal veya uluslararası standartlara kadar uzanmaktadır [57]. İzlenebilirlik sayesinde, farklı zamanlarda ve farklı laboratuvarlarda yapılan ölçümlerin karşılaştırılabilirliği güvence altına alınmaktadır. Bu bağlamda izlenebilirlik referans standartlar, kalibrasyon zinciri, belgelendirme ve belirsizlik hesabı olmak üzere dört temel unsur üzerine inşa edilmektedir.

İzlenebilirlik zincirinin ilk halkası, ulusal ve uluslararası metroloji enstitüleri tarafından belirlenen referans standartlardır. Bu standartlar, ölçüm birimlerinin en yüksek doğrulukla tanımlandığı temel kaynakları oluşturmaktadır. Türkiye’de bu görev, TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) tarafından yürütülmekte, uluslararası düzeyde ise Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) ve benzeri kuruluşlar sorumluluk üstlenmektedir. Havacılık bakımında kullanılan cihazların kalibrasyonu, bu temel standartlara dayalı olduğunda uluslararası karşılaştırılabilirlik mümkün hale gelir [58]. Kalibrasyon zinciri, ölçüm cihazlarının belirli aralıklarla daha üst düzey hassasiyetli cihazlara karşı test edilmesini ifade etmektedir. Bu zincir, cihazın fabrikadan çıktığı andan kullanım ömrü boyunca devam etmektedir. Uçak bakımında kullanılan bir tork anahtarının kalibrasyonu; önce referans tork dönüştürücüye, ardından ulusal standartlara

bağlı daha üst düzey referanslara dayanır [59]. Böylece yapılan ölçümlerin doğruluğu, cihazın tüm kullanım ömrü boyunca güvence altına alınır.

Ölçüm doğruluğu ve güvenilirliği, yalnızca kullanılan cihazların hassasiyetine değil, aynı zamanda ölçümlerin uluslararası kabul görmüş standartlara dayandırılmasına bağlıdır. Bu nedenle izlenebilirlik zincirinin temelinde uluslararası standartlar yer almaktadır. Standartlar, ölçüm prosedürlerinin ve kalibrasyon süreçlerinin nasıl yürütüleceğini belirler ve farklı ülkelerde yapılan ölçümlerin birbiriyle karşılaştırılabilirliğini garanti eder [58]. Havacılık bakım sektöründe ISO/IEC 17025, ISO 9001 ve benzeri kalite yönetim sistemleri standartları öne çıkmaktadır. Özellikle ISO/IEC 17025 standardı, kalibrasyon ve test laboratuvarlarının teknik yeterliliklerini ve kalite yönetim süreçlerini düzenleyerek ölçüm sonuçlarının uluslararası düzeyde kabul edilebilirliğini sağlamaktadır. Bu standart, laboratuvarların yalnızca teknik doğruluk sağlamasını değil, aynı zamanda dokümantasyon ve sürekli iyileştirme gibi yönetsel gereklilikleri de yerine getirmesini zorunlu kılmaktadır [57].

İzlenebilirliğin ve ölçüm standartlarının küresel ölçekte uyumlaştırılması, uluslararası metroloji kuruluşlarının koordinasyonu ile sağlanmaktadır. Bu kuruluşlar, farklı ülkelerde yapılan ölçümlerin ortak bir referans sistemine bağlanmasını, böylece ölçüm sonuçlarının karşılaştırılabilir ve güvenilir olmasını sağlamaktadır. 1875 yılında imzalanan Metre Antlaşması ile kurulmuş olan BIPM, dünya genelinde ölçüm birimlerinin tanımlanması ve sürekliliğinin sağlanmasından sorumludur. Uluslararası Birimler Sistemi (SI) ile ilgili tüm temel standartların geliştirilmesi ve güncellenmesi bu kurumun görev alanına girmektedir. Uçak bakımında kullanılan ölçümlerin SI birimleriyle uyumlu olması, BIPM'in belirlediği bu standartlara dayanır [58]. Her ülke, kendi metrolojik altyapısını oluşturmak ve uluslararası standartlarla uyumu sağlamak üzere ulusal kurumlara sahiptir. Türkiye'de bu görevler farklı kurumlar arasında paylaştırılmıştır. Türkiye'nin metroloji alanındaki temel kurumu TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME)'dir. Ölçüm standartlarının oluşturulması, uluslararası metroloji kurumlarıyla iş birliği yapılması ve izlenebilirlik zincirinin korunması TÜBİTAK UME'nin sorumlulukları arasındadır. Uçak bakımında kullanılan referans cihazların kalibrasyonu, bu kurumun belirlediği ulusal standartlar temelinde yapılmaktadır. TÜRKAK (Türk Akreditasyon Kurumu) laboratuvar, belgelendirme ve muayene kuruluşlarının akreditasyonundan sorumludur. Kalibrasyon ve test

laboratuvarlarının uluslararası standartlara uygunluğunu güvence altına alır ve izlenebilirlik zincirinin ulusal düzeyde işlerliğini destekler. Buna ek olarak ürün, hizmet ve sistem standartlarının hazırlanmasından sorumlu olan TSE ise birçok teknik düzenlemenin uluslararası standartlarla uyumlu hale getirilmesine katkıda bulunur.

2.5. Kalibrasyon Sürecinin Adımları

Kalibrasyon, ölçüm cihazlarının belirli bir referans standarda göre doğruluklarının belirlenmesi ve gerektiğinde düzeltilmesi işlemidir. Uçak bakım süreçlerinde kalibrasyonun sistematik ve izlenebilir şekilde yürütülmesi; uçuş güvenliği, bakım kalitesi ve uluslararası standartlara uyum açısından kritik bir rol oynamaktadır [58]. Kalibrasyon süreci belirli aşamalardan oluşur ve bu aşamaların her biri, ölçüm sonuçlarının güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. Aşağıda, havacılık bakımında kullanılan standart prosedürlere dayalı kalibrasyon süreci ayrıntılı şekilde sunulmuştur.

2.5.1. Kalibrasyon Öncesi Hazırlık

Kalibrasyon işlemi, yalnızca cihazın test edilmesi veya ayarlanması ile sınırlı olmayan, sistematik bir süreci ifade etmektedir. Bu sürecin ilk aşaması olan hazırlık ve planlama, ölçüm doğruluğunu ve izlenebilirliği doğrudan etkileyen kritik bir adımdır. Kalibrasyona başlamadan önce yapılması gereken planlama, cihazın ve ortamın uygun hale getirilmesi, kullanılan referansların doğrulanması ve kalibrasyonu yapacak personelin yetkinliğinin gözden geçirilmesi bu sürecin temelini oluşturmaktadır [58]. Bu hazırlıklar, ölçüm belirsizliğini azaltarak kalibrasyonun doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmakta olup izlenebilirlik zincirinin sürekliliğini desteklemektedir.

Kalibrasyona tabi tutulacak cihazın fiziksel durumu sürecin en önemli bileşenlerinden biridir. Cihazda gözle görülür bir hasar, deformasyon veya işlev kaybı olup olmadığı incelenir. Havacılık özelinde özellikle uçak bakımında kullanılan tork anahtarları, basınç dönüştürücüleri ve ivmeölçerler gibi cihazların mekanik aksamaları kontrol edilir. Ölçüm hassasiyetini etkileyebilecek toz, yağ veya diğer kirleticiler cihazdan uzaklaştırılır. Bu temizlik sırasında üretici talimatları ve kullanılan malzemelerin cihazın yüzeyine zarar vermeyecek şekilde seçilmesi oldukça önemlidir [60]. Buna ek olarak, kalibrasyonun gerçekleştirileceği ortam koşullarının stabil olmasına dikkat edilmelidir. Ölçüm belirsizliğini azaltması güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlaması nedeni ile çevresel

koşulların kontrolü şarttır. Uçaklarda sıcaklık değişimlerine duyarlı ivmeölçerler, basınç sensörleri ve elektriksel ölçüm cihazlarının performansları, ortam sıcaklığındaki küçük değişimlerden bile etkilenebilmektedir. Bu nedenle kalibrasyon odasının sıcaklığı ve nemi, standartlarda belirtilen sınırlar içinde tutulmaktadır [61]. Ayrıca, uçak bakım hangarlarında veya laboratuvar ortamlarında dış kaynaklı titreşimler, hassas ölçüm cihazlarında kalibrasyon sırasında hatalara neden olabilmektedir. Kalibrasyon yapılacak alanın titreşimden ve aşırı gürültüden izole edilmesi önerilmektedir.

Kalibrasyonun başarısı, kullanılan referans standartların doğruluğuna bağlı olarak değişmektedir. Buna istinaden, kullanılan referans cihazların ulusal ve uluslararası standartlara izlenebilirliği belgelenmiş olmalıdır. Bu cihazların kalibrasyon sertifikalarının geçerliliği kontrol edilmelidir [59]. Kalibrasyon öncesi referans cihazların kendi performans testlerinin yapılması ve doğru çalıştıklarının doğrulanması gerekmektedir. Kalibrasyonu gerçekleştirecek personelin yetkinliği ve iş güvenliği koşullarının sağlanması da hazırlık sürecinin bir parçasıdır. Kalibrasyon yapacak teknisyenlerin ilgili cihaz ve prosedürler konusunda eğitilmiş ve yetkilendirilmiş olması gerekir. Elektriksel ölçümler veya yüksek basınç altında yapılan kalibrasyon işlemlerinde kişisel koruyucu donanımların (KKD) kullanımı zorunludur [60].

Kalibrasyon işlemi başlamadan önce yapılacak işlemlerin planlanması ve kayıt altına alınması gerekmektedir. Hangi cihazların, hangi standartlara göre, hangi zaman diliminde kalibre edileceği belirlenir. Önceki kalibrasyon sertifikaları, cihaz bakım kayıtları ve izlenebilirlik belgeleri kontrol edilir ve arşivlenir [58].

2.5.2. Kalibrasyon Planlaması ve Prosedür Seçimi

Kalibrasyon sürecinin doğru, tekrarlanabilir ve izlenebilir şekilde gerçekleştirilmesi için sistematik bir planlama yapılması ve uygulanacak prosedürlerin net olarak belirlenmesi gerekir. Planlama aşaması; kalibrasyonun zamanlamasını, kullanılacak standartları, prosedürlerin seçimini ve gerekli kaynakların tahsisini kapsar. Uygun planlama yapılmadığında, kalibrasyonun etkinliği düşebilir ve ölçüm belirsizlikleri artabilir [58].

Kalibrasyona tabi tutulacak cihazların önem derecesine göre sınıflandırılması planlamanın ilk adımıdır. Uçuş kontrol ve emniyetine doğrudan etki eden cihazlar (örneğin pitot-statik basınç sensörleri, tork anahtarları, ivmeölçerler) öncelikli olarak

planlanır. Kritik olmayan ancak bakım ve kalite süreçlerini destekleyen cihazlar daha sonraki planlama dönemine alınabilir. Bu yaklaşım, kaynak kullanımının verimli olmasını ve uçuş güvenliği açısından kritik parametrelerin önce ele alınmasını sağlar [60].

Her cihaz için üretici talimatları, uluslararası standartlar (ISO/IEC 17025 vb.) ve işletme içi bakım prosedürleri dikkate alınarak kalibrasyon periyotları belirlenmektedir. Periyot belirlenirken cihazın kullanım sıklığı, çalışma koşulları ve önceki kalibrasyon sonuçları göz önünde bulundurulmaktadır [59]. Örneğin, sık kullanılan cihazlar daha kısa aralıklarla kalibre edilir. Titreşim, sıcaklık değişimleri veya nem gibi etkenlerin fazla olduğu ortamlarda çalışan cihazların kalibrasyon periyotları daha kısa tutulmalıdır. Cihazın önceki kalibrasyon raporlarındaki sapma eğilimleri incelenerek zamanlama optimize edilir [59].

Kalibrasyon için gerekli olan referans standartların, ölçüm cihazlarının ve kalifiye personelin planlama aşamasında belirlenmesi gerekmektedir. Bu adım, sürecin aksamadan ve standartlara uygun şekilde yürütülmesini sağlamaktadır. Ayrıca kalibrasyon sırasında ihtiyaç duyulabilecek yardımcı cihazlar (örneğin veri toplama sistemleri veya çevresel koşul izleme cihazları) da bu aşamada planlanmalıdır [61]. İzlenebilirliği sağlanmış ve geçerli kalibrasyon sertifikasına sahip referans cihazların hazır bulundurulması önemlidir.

Kalibrasyon sürecinin doğru bir şekilde yürütülmesi için uygulanacak prosedürlerin net olarak belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Cihaz üreticisinin sunduğu kalibrasyon kılavuzları, prosedür seçiminde birincil referanstır. Bu kılavuzlar, cihazın tasarım özellikleri ve performans gereklilikleri hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. ISO/IEC 17025 ve ilgili sektörel standartlar, kalibrasyon prosedürlerinin teknik doğruluğunu ve kalite yönetim gerekliliklerini belirler. Havacılık bakımında ayrıca EASA ve FAA gibi otoritelerin yayımladığı standartlar da dikkate alınır [58]. Bakım kuruluşlarının kendi kalite yönetim sistemlerinde tanımladığı prosedürler, belirlenen standartların ve üretici talimatlarının uyarlanmış bir versiyonunu sunmaktadır. Bu kurumsal prosedürler, mevcut insan kaynağı ve ekipman koşullarıyla uyumlu hale getirilmiş uygulama adımlarını içermektedir [60].

Prosedür seçim aşamasında risk ve belirsizlik analizleri de yapılmalıdır. Seçilen yöntemin ölçüm belirsizliği üzerindeki etkileri değerlendirilerek daha hassas ve güvenilir

yöntemlerin tercih edilmesi sağlanır. Ayrıca uygulama sırasında karşılaşılabilecek riskler (cihazın fiziksel zarar görmesi, çevresel koşulların sapması vb.) önceden belirlenir ve bu risklere karşı önleyici tedbirler alınır [61]. Planlama ve prosedür seçim sürecinde yapılan tüm değerlendirmeler kayıt altına alınmalıdır. Kalibrasyon planı; cihaz listesi, belirlenen prosedürler, kalibrasyon periyotları, sorumlu personel ve kullanılan referans cihazlar gibi bilgileri içermelidir. Hazırlanan plan, kalite yönetim birimi veya ilgili yönetici tarafından onaylanarak yürürlüğe girer [58]. Bu belgeler hem denetim süreçlerinde hem de izlenebilirlik zincirinin korunmasında kritik öneme sahiptir [59].

Kalibrasyon planlaması ve prosedür seçimi; bakım süreçlerinin kalitesini, ölçüm sonuçlarının güvenilirliğini ve uluslararası standartlara uyumu doğrudan etkileyen temel bir adımdır. İyi bir planlama, gerekli kaynakların ve insan gücünün etkin kullanılmasını sağlarken, doğru prosedür seçimi ölçümlerdeki hata payını minimize eder. Böylece uçak bakımında kritik parametrelerin doğru ölçülmesi ve uçuş güvenliğinin korunması mümkün hale gelir.

2.5.3. Ölçüm İşlemlerinin Uygulanması

Kalibrasyon sürecinde en kritik aşamalardan biri, ölçüm işlemlerinin doğru ve tekrarlanabilir şekilde uygulanmasıdır. Bu aşama, cihazın performansının referans standartlarla karşılaştırılarak doğruluğunun belirlenmesini ve sapmaların tespit edilmesini içermektedir. Havacılık bakımında yapılan ölçüm uygulamaları; uçuş güvenliğini, bakım kalitesini ve uluslararası standartlara uyumu doğrudan etkilediğinden, bu adımın hatasız yürütülmesi büyük önem taşır [58].

Ölçüm işlemlerinin planlanması, cihazın kullanım aralığı ve fonksiyonel özelliklerine uygun olacak şekilde ölçüm noktalarının belirlenmesiyle başlamaktadır. Fonksiyonel aralık adı altında cihazın en düşük, orta ve maksimum değerlerde doğruluğu test edilir. Bu çerçevede, uçak bakımında kritik değerleri etkileyebilecek tork, basınç, sıcaklık ve ivme noktalarına ayrı bir önem verilir [60]. Bu yaklaşım, cihazın tüm operasyonel aralıkta güvenilirliğinin sağlanmasına olanak tanır.

Kalibrasyon işlemleri sırasında cihazın tekrarlanabilirliği ve doğruluğu ölçülür. Tekrarlanabilirlik testleri aracılığı ile aynı ölçüm noktasında birden fazla ölçüm alınarak cihazın tutarlılığı kontrol edilir. Bu test, cihazın kısa süreli performans kararlılığı

hakkında bilgi verir. Elde edilen ölçüm sonuçları, izlenebilirliği sağlanmış referans cihaz değerleriyle karşılaştırılır. Sapmaların kabul edilebilir limitler içinde olup olmadığı değerlendirilir [61].

Kalibrasyon sırasında elde edilen tüm ölçümler kayıt altına alınır ve analiz edilmek üzere düzenlenir. Modern kalibrasyon uygulamalarında dijital veri toplama sistemleri kullanılarak insan hatası minimize edilir. Ölçüm değerleri, tarih, saat, ortam koşulları ve kullanılan referans cihaz bilgileriyle birlikte belgelenir. Bu bilgiler, izlenebilirlik zincirinin önemli bir parçasıdır ve ileride yapılacak denetimlerde kanıt olarak kullanılır [59]. Ölçüm sırasında çevresel faktörlerin kontrol altında tutulması ve kaydedilmesi gerekir. Ölçüm hassasiyetini etkileyebilecek en önemli parametrelerden biri sıcaklık ve nemdir. Özellikle hassas sensörlerde bu tür etkiler ölçüm hatalarına yol açabileceğinden gerekli izolasyon önlemleri alınır [60]. Buna ek olarak ölçüm işlemleri sırasında kullanılan cihazın yapısına bağlı olarak çeşitli riskler ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, yüksek voltaj veya akım altında yapılan işlemlerde uygun koruyucu donanımlar kullanılmalıdır. Tork anahtarları, basınç cihazları veya yüksek sıcaklıkla çalışan sistemlerde mekanik ve termal riskler dikkate alınmalıdır [58].

Ölçüm işlemlerinin uygulanması; ölçüm noktalarının belirlenmesi, tekrarlılık ve doğruluk kontrollerinin yapılması, verilerin toplanıp kaydedilmesi, çevresel koşulların izlenmesi ve iş güvenliği önlemlerinin alınması gibi adımları içermektedir. Bu süreçlerin titizlikle yürütülmesi, kalibrasyonun güvenilirliğini artırmakta olup uçuş güvenliği açısından kritik olan bakım süreçlerinde doğru kararlar alınmasını sağlamaktadır.

2.5.4. Sonuçların Analizi ve Ölçüm Belirsizliği

Kalibrasyon sürecinde elde edilen verilerin analizi, ölçüm sonuçlarının güvenilirliğinin değerlendirilmesi ve cihazın performansının doğrulanması açısından kritik bir aşamadır. Ölçüm verileri, öncelikle referans standartlardan elde edilen değerlerle karşılaştırılarak cihazın sapma miktarı belirlenir. Bu aşamada cihazın ölçüm aralığı boyunca elde edilen tüm veriler incelenir ve cihazın doğruluk, tekrarlanabilirlik ve kararlılık gibi performans parametreleri değerlendirilir. Ölçüm verilerinin analizinde, yalnızca tek bir noktadaki sapma değil, cihazın tüm çalışma aralığı boyunca gösterdiği eğilim ve hata davranışları da dikkate alınır [58].

Sonuçların değerlendirilmesinde kullanılan temel göstergelerden biri, cihazın belirlenen tolerans limitleri içindeki performansdır. Eğer ölçüm sonuçları tolerans dışına çıkmışsa cihazın yeniden ayarlanması veya bakımının yapılması gerekir. Bu değerlendirme sonucunda cihazın mevcut performansının kabul edilebilir olup olmadığına karar verilir ve kalibrasyonun geçerlilik süresi belirlenir [60]. Analiz sürecinde toplanan tüm veriler resmi kayıtlarla belgelenir, böylece izlenebilirlik ve sonraki kalibrasyonlar için referans sağlanır.

Ölçümün güvenilirliğinin temel göstergelerinden biri de ölçüm belirsizliği olup bir ölçüm sonucunun olası gerçek değerden sapma miktarını ifade etmektedir. Belirsizlik, ölçüm sonucu tek başına değerlendirildiğinde yanlış anlamalara yol açabilecek olan eksik bilgiyi tamamlar. Belirsizliğin kaynağı tek bir faktörden ibaret olmayıp; ölçüm cihazı, çevresel koşullar, operatör etkisi ve kullanılan yöntemle bağlı çok sayıda bileşen içermektedir. Uçak bakımında bu belirsizliklerin tanımlanması ve minimize edilmesi hem uçuş güvenliğini hem de bakım maliyetlerinin optimizasyonunu doğrudan etkilemektedir [58]. Belirsizlik genellikle A tipi ve B tipi olmak üzere iki ana kategoride değerlendirilmektedir.

A tipi belirsizlik, istatistiksel yöntemlerle belirlenip tekrarlanan ölçüm serilerinden elde edilen verilerin analiziyle hesaplanmaktadır. Temel istatistiksel parametreler olan ortalama ve standart sapma, A tipi belirsizliğin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Uçak bakımında kullanılan bir tork anahtarının aynı noktada on kez ölçüm yapması sonucunda elde edilen değerlerin varyansı, cihazın tekrarlanabilirliğini gösterir. Bu tekrarlanabilirlik verileri kullanılarak belirsizlik hesaplanır. A tipi belirsizlik, deneysel verilere dayandığından, cihazın gerçek kullanım koşullarındaki performansını daha net bir şekilde yansıtır [61].

B tipi belirsizlik, deneysel olarak değil; cihaz üreticisi tarafından belirtilen toleranslar, daha önce yapılmış kalibrasyon sertifikaları, literatür verileri ve deneyim gibi doğrudan istatistiksel olmayan kaynaklara dayanmaktadır. Bir pitot-statik test cihazının üretici tarafından $\pm 0,3$ kPa tolerans ile sunulması veya önceki kalibrasyon raporlarında cihazın doğruluk değerlerinin belirtilmiş olması, B tipi belirsizlik bileşenleri arasında yer alır. B tipi belirsizlik, cihaz hakkında geçmiş deneyimlere dayalı güvenilir bir belirsizlik tahmini sunar ve ölçüm sonucuna ilişkin ek bir güvence sağlar [60].

Ölçüm belirsizliği yalnızca cihaz ve standartlardan değil, çevresel koşullardan ve insan faktöründen de etkilenmektedir. Sıcaklık, nem ve titreşim gibi koşullar cihazın performansını doğrudan etkileyebilmektedir. Örneğin sıcaklığa duyarlı ivmeölçerler, farklı sıcaklık aralıklarında farklı tepkiler gösterebilir ve bu durum ölçüm belirsizliğine yansır [61]. Ölçüm cihazının yanlış kullanımı veya okuma hataları, özellikle manuel ölçümlerde önemli bir belirsizlik kaynağıdır. Bu nedenle uçak bakımında görev alan teknisyenlerin eğitimi ve yetkinliği, ölçüm belirsizliğinin azaltılmasında kritik rol oynamaktadır. Her bir belirsizlik bileşeni (A ve B tipi belirsizlikler ile çevresel ve operatör etkileri) ayrı ayrı değerlendirilir ve daha sonra kök toplam karesel yöntem kullanılarak birleştirilir. Bu yöntem, toplam ölçüm belirsizliğinin kapsamlı bir şekilde belirlenmesini sağlamakta olup özellikle uçuş güvenliği açısından kritik olan parametrelerin kontrolünde kullanılmaktadır [59].

Ölçüm sürecinde elde edilen sonuçlar, tek bir değeri ifade etmekle birlikte her zaman belirli bir hata payına sahiptir. Bu hata payı, ölçüm belirsizliği kavramı ile açıklanmaktadır. Ancak yalnızca standart belirsizlik değeri, ölçümün güvenilirlik düzeyi hakkında tam bir bilgi sunmaz. Bu nedenle genişletilmiş belirsizlik ve güven aralığı kavramları devreye girmektedir. Genişletilmiş belirsizlik, ölçüm sonucunun belirli bir olasılıkla (çoğunlukla %95) hangi aralıkta yer aldığını belirtir ve kullanıcılara daha anlaşılır ve güvenilir bir sonuç sunar [58]. Güven aralığı, ölçüm sonucunun olası gerçek değeri kapsama olasılığı ile ifade etmektedir. Örneğin %95 güven düzeyinde verilen bir sonuç, ölçümün gerçek değerinin belirtilen aralıkta olma olasılığının %95 olduğunu gösterir. Havacılık bakımında bu kavram, kritik parametrelerin ölçümünde hata payını net bir şekilde ortaya koyarak bakım kararlarının doğruluğunu destekler. Örneğin, pitot-statik sistemler ölçülen hava hızı ve irtifa değerleri, %95 güven düzeyinde $\pm 0,5$ knot belirsizlik aralığıyla rapor edilebilir. Aynı şekilde, motor sıcaklık kontrol sistemlerinde kullanılan sensörlerin ölçüm sonuçları, $\pm 0,2$ °C genişletilmiş belirsizlik ile ifade edilir [60]. Havacılık bakım süreçlerinde bu kavramların doğru uygulanması; bakım prosedürlerinin kalitesini artırır, uluslararası standartlara uyumu kolaylaştırır ve uçuş güvenliğine doğrudan katkıda bulunur [61].

Sonuçların analizi ve belirsizlik hesaplarının yapılması, kalibrasyon raporlarının en önemli bölümünü oluşturur. Bu süreç, yalnızca cihazın mevcut performansını ortaya koymakla kalmaz, aynı zamanda bakım organizasyonuna cihazın gelecekteki kullanım

güvenliği hakkında da bilgi sağlar. Böylece uçak bakımında kullanılan kritik cihazların ölçümlerinde güvenilirlik ve izlenebilirlik sağlanır, uluslararası standartlara uyum güvence altına alınır ve uçuş emniyeti açısından önemli bir katkı sağlanır.

2.5.5. Kalibrasyon Raporu ve Sertifikalandırma

Kalibrasyon sürecinin tamamlanmasının ardından elde edilen verilerin ve yapılan işlemlerin resmi olarak belgelenmesi gerekir. Bu belgeler, kalibrasyonun doğruluğunu, izlenebilirliğini ve geçerliliğini kanıtlayan en önemli unsurlardır. Hazırlanan kalibrasyon raporu, kalibrasyonu yapılan cihazın özelliklerini, kullanılan referans standartları, ölçüm sonuçlarını, sapma değerlerini ve hesaplanan ölçüm belirsizliklerini ayrıntılı olarak içerir. Raporda ayrıca kalibrasyonun hangi koşullarda yapıldığı, kullanılan yöntemler ve cihazın performansının ilgili standartlara göre değerlendirilmesi yer alır [58].

Kalibrasyon raporu yalnızca cihazın mevcut durumunu göstermekle kalmaz, aynı zamanda gelecekte yapılacak bakım ve kalibrasyon işlemleri için de bir referans oluşturur. Bu raporlar, uçak bakımında kullanılan tüm kritik cihazlar için zorunlu olup hem işletme içi denetimlerde hem de ulusal ve uluslararası havacılık otoritelerinin incelemelerinde talep edilen resmî belgeler arasındadır. Bu nedenle raporların eksiksiz, doğru ve uluslararası kabul görmüş formatlara uygun olarak düzenlenmesi önemlidir [60].

Kalibrasyon süreci sonunda cihaz için bir sertifika düzenlenir. Sertifika, kalibrasyonun başarıyla tamamlandığını ve cihazın belirlenen tolerans aralıkları içinde doğru ölçüm yaptığını resmi olarak belgeler. Sertifikada; cihazın tanımı, seri numarası, kullanılan referans standartlar, kalibrasyon sonuçları, belirsizlik değerleri ve kalibrasyonun geçerlilik süresi gibi bilgiler yer alır. Sertifika, imzalı ve yetkilendirilmiş personel tarafından onaylanarak geçerlilik kazanır [59].

Sertifikalandırma yalnızca kalibrasyonun doğruluğunu değil, aynı zamanda izlenebilirlik zincirinin sürekliliğini de gösterir. Bu belgeler, cihazın ulusal ve uluslararası standartlara uygunluğunu kanıtladığı için uçuş güvenliği, bakım kalitesi ve yasal gerekliliklerin karşılanması açısından kritik bir rol oynar. Belgelerin düzenli olarak arşivlenmesi ve gerektiğinde denetimlerde sunulabilir olması, bakım organizasyonlarının kalite yönetim sistemlerinin bir parçasıdır [61].

Kalibrasyon süreci sonunda cihazın ölçüm sonuçlarının kabul edilebilir tolerans aralıklarının dışında kaldığının tespit edilmesi, düzeltici işlemlerin uygulanmasını zorunlu kılmaktadır. Bu durum, cihazın mevcut haliyle güvenilir ölçüm yapamayacağı ve uçak bakım süreçlerinde risk oluşturabileceği anlamına gelmektedir. Bu noktada düzeltici işlemler, cihazın performansını yeniden standartlara uygun hale getirmek amacıyla yapılan planlı müdahaleleri kapsamaktadır [58].

İlk olarak cihazın kalibrasyon sapmasının kaynağı araştırılır. Bu sapma; mekanik aşınma, elektronik bileşenlerin arızalanması, çevresel faktörlerin etkisi ya da yanlış kullanım gibi farklı nedenlerden kaynaklanabilir. Kaynak belirlendikten sonra cihazın üretici talimatlarına uygun şekilde ayarlanması veya onarılması sağlanır. Bazı durumlarda cihazın yalnızca mekanik ayarı yeterli olurken, daha ciddi sapmaların görüldüğü durumlarda parça değişimi veya komple bakım işlemleri gerekebilir [59]. Düzeltici işlem uygulandıktan sonra cihazın tekrar kalibrasyona tabi tutulması zorunludur. Bu adım, yapılan işlemin doğruluğunu teyit eder ve cihazın ölçüm hassasiyetinin gerekli tolerans aralıklarına ulaştığını gösterir. Tekrar yapılan kalibrasyonda cihazın performans kriterlerinin karşılandığı doğrulanırsa, cihaz tekrar kullanılabilir hale gelir ve sertifikalandırılır [60].

Tüm düzeltici işlemler ve tekrar kalibrasyon sonuçları, resmî belgelerle kayıt altına alınarak arşivlenir. Bu kayıtlar, cihazın bakım geçmişinin izlenebilirliğini sağlar ve gelecekte olası sapmaların erken tespiti için referans oluşturur. Ayrıca, uygulanan düzeltici işlemler kalite yönetim sistemi kapsamında analiz edilerek benzer hataların tekrar oluşmasını önleyecek iyileştirme faaliyetlerinin planlanmasına katkı sağlar [61].

Kalibrasyon süreci, uçak bakımında kullanılan tüm ölçüm cihazlarının doğruluğunu garanti altına alan sistematik bir yaklaşımdır. Bu sürecin doğru şekilde yürütülmesi, ölçüm belirsizliğini en aza indirir, uçuş güvenliğini artırır ve uluslararası standartlara uyumu sağlar. Her adımın dikkatle planlanması ve kayıt altına alınması, izlenebilirlik zincirinin devamlılığını destekler ve bakım organizasyonlarının kalite yönetim süreçlerine önemli katkı sağlar.

3. BÖLÜM

KALİBRASYONUN UÇUŞ GÜVENLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

3.1. Kalibrasyon Hatalarının Uçuş Güvenliği Üzerindeki Olası Etkileri

Uçak bakımında kullanılan ölçüm ve test cihazlarının doğru kalibre edilmesi, uçuş güvenliği açısından kritik bir zorunluluktur. Kalibrasyon, bu cihazların belirli standartlara uygun çalıştığını ve ölçüm sonuçlarının güvenilir olduğunu garanti altına almaktadır. Ancak kalibrasyon sürecinde yapılan hatalar, cihazın yanlış değerler göstermesine neden olabilir ve bu durum uçuş operasyonlarını doğrudan etkileyebilir. Uçuş kontrol sistemleri, motor performans izleme ekipmanları, yakıt ölçüm sistemleri ve navigasyon sensörleri gibi kritik bileşenlerde ortaya çıkan kalibrasyon hataları, uçuş güvenliği üzerinde ciddi riskler doğurmaktadır [58].

Kalibrasyon hataları aynı zamanda “gizli arıza” (latent failure) özelliği taşıdığı için, genellikle olay meydana gelmeden fark edilmez. Bu durum, hatanın fark edilmesini ve düzeltilmesini geciktirerek riskin büyümesine neden olmaktadır. Bu nedenle uluslararası havacılık düzenlemeleri, kalibrasyonun sadece teknik bir görev değil, aynı zamanda risk önleme stratejisi olarak ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır [38].

Kalibrasyon hatalarının en belirgin etkilerinden biri, uçuş kontrol parametrelerinde sapmalara neden olmasıdır. Örneğin pitot-statik sistemin hatalı kalibre edilmesi, uçak hızının olduğundan daha düşük veya yüksek ölçülmesine yol açabilir. Bu durumda pilot, yanlış hız bilgisine dayanarak hatalı manevralar yapabilir ve bu da stall (tutuş kaybı) veya yapısal limitlerin aşılması gibi tehlikeli durumlara sebep olabilir. Benzer şekilde, altimetre sensörlerinin yanlış kalibrasyonu, irtifa bilgisinin hatalı okunmasına neden olarak çarpışma riskini artırabilir [60].

Motor ve yakıt sistemlerinde kullanılan sensörlerdeki kalibrasyon hataları, performans ve yakıt tüketimi hesaplamalarında yanlışlıklara yol açabilir. Motor sıcaklık ve basınç sensörlerinin hatalı kalibrasyonu, motorun limit değerleri aşmasına rağmen pilotun bunu fark etmemesine sebep olabilir. Bu durum, motorun hasar görmesine veya uçuş sırasında arıza yaşanmasına yol açarak uçuş güvenliğini ciddi şekilde tehlikeye atar [61]. Kalibrasyon hataları, uçuş sürecinin dışında bakım süreçlerinde de risk oluşturmaktadır. Yanlış kalibre edilmiş bir tork anahtarının kullanılması, kritik bağlantı elemanlarının ya aşırı sıkılmasına ya da gevşek bırakılmasına sebep olabilir. Bu tür hatalar, uçağın yapısal bütünlüğünü zayıflatabilir ve operasyonel riskleri artırabilir [59]. Ayrıca bakım personeli, yanlış ölçüm verilerine güvenerek gereksiz bileşen değişimi yapabilir veya gerekli müdahaleleri atlayabilir; bu da maliyetlerin artmasına ve uçuş emniyetinin zayıflamasına neden olabilir.

3.2. Kalibrasyonun Uçak Performansına Katkısı

Uçak sistemlerinde kullanılan ölçüm ve kontrol cihazlarının hassas ve güvenilir sonuçlar üretmesi, sadece uçuş güvenliği açısından değil, aynı zamanda uçuş performansının korunması ve iyileştirilmesi bakımından da kritik bir öneme sahiptir. Bu cihazların düzenli olarak kalibre edilmesi, sistemlerin optimum aralıkta çalışmasını sağlayarak uçak performansını doğrudan etkilemektedir [62]. Motor sistemlerinde kullanılan tork anahtarları, sıcaklık sensörleri ve yakıt akış ölçerler gibi cihazların doğru ölçüm yapması, yakıt tüketiminden itki verimliliğine kadar birçok performans parametresini etkilemektedir. Hatalı ölçüm verilerine dayalı bakım veya ayarlamalar, motor gücünde azalma, yakıt verimsizliği ve aerodinamik dengesizlik gibi sorunlara neden olabilir [63]. Bu da hem performans düşüklüğü hem de işletme maliyetlerinde artışla sonuçlanabilir.

Kalibrasyon, aynı zamanda uçak sistemlerinin arıza oranlarını azaltarak operasyonel sürekliliği ve görev güvenilirliğini artırır. EASA tarafından yayımlanan teknik belgelerde, doğru kalibre edilmiş cihazlarla yapılan bakım ve ölçüm işlemlerinin, uçakların arıza yapma ihtimalini önemli ölçüde azalttığı ve rotadan sapma, acil iniş gibi performans düşürücü olayların önüne geçtiği belirtilmektedir [64]. Bunun yanı sıra, kalibrasyon yoluyla sağlanan tutarlı ölçümler, bakım programlarının daha doğru planlanmasına da olanak tanımaktadır. Bu durum, öngörülebilir bakım stratejilerinin uygulanmasına ve uçuş operasyonlarının daha verimli yönetilmesine katkı sağlar [38].

Uçuş kontrol sistemleri, motor performans sensörleri, yakıt ölçüm ekipmanları ve navigasyon cihazları gibi kritik unsurların hassasiyetinin korunması, uçuş emniyeti ve operasyonel verimlilik açısından hayati önem taşır [58]. Uçaklarda hız, irtifa ve tırmanma oranı gibi uçuş parametreleri, pitot-statik sistem ve ilgili sensörler aracılığıyla ölçülür. Bu sistemlerin düzenli olarak kalibre edilmesi, pilotların doğru hız ve irtifa bilgilerine erişmesini sağlar. Yanlış kalibre edilmiş bir pitot tüpünün hız bilgisini olduğundan düşük göstermesi, pilotun fazla güç uygulamasına neden olarak gereksiz yakıt tüketimine ve yapısal yük artışına yol açabilir. Doğru kalibrasyon sayesinde bu tür sapmalar önlenir ve uçuş performansı optimize edilir [60]. Benzer şekilde sıcaklık, basınç ve yakıt akış miktarını sürekli olarak izleyen motor sensörleri içinde geçerlidir. Bu veriler, motorun verimli ve güvenli çalıştırılması için gereklidir. Düzenli kalibrasyon yapılmadığında, sensörlerin sapma değerleri motorun normalden daha sıcak veya daha düşük basınçta çalışmasına neden olabilir. Bu durum hem motor ömrünü kısaltır hem de performansı düşürür. Yakıt akış sensörlerinin doğru kalibrasyonu, yakıt-hava karışımının optimum düzeyde tutulmasını sağlar ve yakıt tüketimini azaltırken uçak menzilini artırır [61].

Kalibrasyon, uçuş sırasında meydana gelebilecek performans kayıplarını önlediği gibi bakım planlamasını da olumlu yönde etkiler. Doğru ölçüm verileri, bakım ekibinin arıza eğilimlerini daha doğru öngörmesini ve önleyici bakım faaliyetlerini etkin bir şekilde planlamasını sağlar. Böylece uçuş programlarında gecikmelerin önüne geçilir, yakıt ve zaman tasarrufu sağlanır ve genel operasyonel maliyetler düşer [60].

3.3. Kalibrasyonun Bakım Maliyetleri Üzerindeki Etkisi

Havacılıkta bakım maliyetlerinin yönetilebilir seviyede tutulması hem ticari hem de operasyonel verimlilik açısından büyük önem taşımaktadır. Bakım sürecinde kullanılan ölçüm cihazlarının doğru ve zamanında kalibrasyonu, maliyetleri doğrudan etkileyen stratejik bir unsur olarak öne çıkmaktadır [65]. Yanlış kalibrasyon, ölçüm sapmalarına ve buna bağlı olarak hatalı teşhis ya da gereksiz parça değişimlerine yol açabilmektedir. Bu durum yalnızca bakım süresini uzatmakla kalmaz, aynı zamanda parça, iş gücü ve gecikme kaynaklı maliyetleri de artırmaktadır [66]. Doğru kalibre edilmemiş bir tork anahtarının neden olduğu montaj hatası, kritik bileşenlerde erken yıpranma ya da arıza riskini yükselterek uzun vadede ciddi maliyetlere neden olabilir.

Southwest Airlines, 2017 yılında başlattığı “Predictive Maintenance” programı kapsamında uçakların motor sensörlerini düzenli olarak kalibre ederek, bakım maliyetlerinde %30'a varan bir tasarruf sağlamıştır. Bu program, kalibrasyon verilerine dayanarak uçağın arızalanmadan önce bakım ihtiyacını tespit etmeyi mümkün kılmıştır. Benzer şekilde, British Airways, uçak bakımında kalibrasyon süreçlerine daha fazla yatırım yaparak, uçakların yerde bekleme sürelerini %20 oranında azaltmıştır.

Yanlış kalibrasyon ise bakım maliyetlerini artırıcı bir etkiye sahiptir. 2016 yılında yaşanan bir vakada, bir havayolu şirketi, uçaklarının yakıt ölçüm sensörlerinin yanlış kalibre edilmesi nedeniyle birkaç uçuşu iptal etmek zorunda kalmış ve bu durum hem bakım masraflarını hem de uçuş iptallerinden doğan maliyetleri artırmıştır. Bu örnek, kalibrasyonun bakım maliyetleri üzerindeki kritik rolünü açıkça göstermektedir.

3.4. Uçuş Güvenliğini Doğrudan Etkileyen Ekipmanlar ve Kalibrasyonu

Uçuş güvenliğini doğrudan etkileyen ve düzenli olarak kalibrasyon gerektiren birçok ekipman bulunmaktadır. Bu ekipmanlar, uçakların güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak için hassas ölçüm ve kontrol sistemlerine dayanmaktadır. İşte uçuş güvenliğini etkileyen ve kalibrasyon gerektiren başlıca ekipmanlar altimetre, pitot tüpü, hız göstergeleri, gyroskoplar, küresel konumlandırma sistemi (GPS), tork dönüştürücüler, yakıt sensörleri, elektronik uçuş kontrol sistemleri, otomatik pilot sistemleri, basınç sensörleri, termometreler, sıcaklık sensörleri ve manyetik pusula (kompas) şeklindedir. Çalışmada bu ekipmanlara ve kalibrasyon sürecine yer verilmiştir.

Uçakların güvenli bir şekilde seyir yapabilmesi için doğru yükseklik bilgisi kritik bir öneme sahiptir. Bu bilgiyi sağlayan temel cihazlardan biri altimetredir. Altimetreler, uçuş sırasında uçağın deniz seviyesinden ne kadar yüksekte olduğunu ölçerek pilotlara ve otomatik sistemlere hayati bilgiler sunmaktadır. Altimetreler genellikle atmosfer basıncını ölçerek irtifa bilgisini sağlamaktadır. Ancak, atmosferik koşullardaki olası değişimlerden etkilenen altimetreler uçuş performansını da etkileyebilmektedir. Bu nedenle, altimetrelerin hassas kalibrasyonu uçuş güvenliği için zorunludur. Kalibrasyon işlemi, standart basınç değerlerine göre cihazın doğruluğunun kontrol edilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Hatalı bir altimetre pilotların irtifalarının yanlış hesaplanmasına neden olup potansiyel tehlikelere yol açabilir.

Altimetreler, uçakların irtifa bilgilerini basınç değişimlerine dayanarak hesaplayan kritik aviyonik cihazlardır. Uçuş güvenliği ve operasyonel doğruluk açısından altimetrelerin hassasiyetinin korunması zorunludur. Ancak çeşitli çevresel ve sistemsel etkiler, altimetrelerin ölçüm doğruluğunu olumsuz yönde etkileyebilir. Atmosferdeki basınç değişimleri, altimetrelerin en temel hata kaynağıdır. Hava basıncında meydana gelen ani değişimler, altimetre göstergesinin gerçek irtifadan sapmasına yol açabilir. Özellikle hızlı hava kütlesi geçişleri veya meteorolojik değişkenliklerin yüksek olduğu bölgelerde bu hata daha belirgin hale gelmektedir [58]. Altimetreler standart atmosfer koşullarına göre kalibre edilir. Ancak sıcaklık ve nemdeki farklılıklar, atmosfer yoğunluğunu değiştirerek altimetre ölçümlerinde belirsizlik oluşturur. Yüksek irtifalarda sıcaklık sapmalarının daha fazla hissedilmesi nedeniyle, uçuş sırasında anlık sıcaklık verilerinin dikkate alınması önemlidir [60].

Altimetrelerin periyodik olarak kalibre edilmesi, ölçümlerin referans standartlarla uyumlu hale getirilmesi açısından kritik bir süreçtir. Kalibrasyonun yanlış yapılması veya standart basınç değerine (1013,25 hPa) göre ayarlama eksiklikleri, uçuş boyunca sürekli hatalı yükseklik bilgisi üretilmesine neden olabilir. Bu tür sapmalar, özellikle aletli yaklaşma ve otomatik pilot modunda uçulan uçuşlarda ciddi riskler doğurabilir [59]. Dijital altimetreler, elektronik sinyaller üzerinden çalıştıkları için elektromanyetik girişimlerden etkilenebilir. Uçağın kendi elektronik sistemlerinden kaynaklanan parazitler veya harici elektromanyetik etkiler, altimetre sinyallerinde bozulmalara yol açabilir. Bu tür etkilerin önlenmesi için sinyal koruma kalkanlarının ve düzenli sistem testlerinin uygulanması gereklidir [61]. Altimetrelerin düzenli aralıklarla kalibre edilmesi ve bakım süreçlerinde basınç sensörlerinin, elektronik bileşenlerin ve elektromanyetik koruma önlemlerinin gözden geçirilmesi; uçuş güvenliği ve yakıt tüketimi gibi operasyonel parametreler üzerinde doğrudan olumlu etki sağlar. Ayrıca uçuş sırasında çevresel verileri sürekli izleyen sensörlerin kullanımı, altimetre ayarlarının anlık olarak optimize edilmesine imkân tanır ve hata oranlarını önemli ölçüde düşürür [60].

Pitot tüpleri, uçaklarda hava akışının dinamik basıncını ölçerek uçuş hızı gibi kritik parametrelerin hesaplanmasına olanak sağlayan temel sensörlerdir. Uçuş güvenliği ve performans verimliliği açısından bu sistemlerin doğru çalışması hayati önem taşır. Pitot tüplerinden elde edilen veriler yalnızca hava hızı göstergesinde değil, aynı zamanda otomatik pilot, yakıt hesaplama ve uçuş yönetim sistemleri gibi birçok kritik uçuş

fonksiyonunda da doğrudan kullanılır [58]. Pitot tüplerinde meydana gelen hataların başlıca nedenleri arasında sistem tıkanmaları, buzlanma, yabancı madde birikimi ve sensör kalibrasyon eksiklikleri yer alır. Bu durumlar, hız ölçümlerinde sapmalara ve dolayısıyla pilotun yanlış kararlar almasına neden olabilir. Bunun dışında buzlanma, hava akışının kesintiye uğramasına ve sensörün gerçek basınç farkını algılayamamasına yol açarak uçağın beklenmedik performans değişimlerine girmesine sebep olur [60].

Pitot tüplerinin doğru çalışması, periyodik kalibrasyon ve bakım faaliyetlerine bağlıdır. Kalibrasyon işlemi, sensörün referans basınç standartlarına göre ayarlanmasını ve ölçüm hassasiyetinin garanti altına alınmasını sağlar. Uygun kalibrasyonun yapılmaması, uçak hız göstergesinde sürekli hata oluşmasına ve uçuş yönetim sistemlerinde performans kaybına yol açabilir. Ayrıca kalibrasyon sırasında ölçüm belirsizliklerinin analiz edilmesi ve bu belirsizliklerin azaltılmasına yönelik iyileştirmeler, sistem güvenilirliğini artırır [59]. Pitot tüplerinde performans kayıplarını önlemek için sensör yüzeylerinin düzenli temizliği, buzlanma önleyici ısıtma sistemlerinin kontrolü ve kalibrasyon sonrası doğruluk testlerinin uygulanması önemlidir. Ayrıca bakım sırasında çevresel koşulların ve uçuş profilinin göz önünde bulundurulması, potansiyel hata kaynaklarının belirlenmesine ve bakım planlarının buna göre optimize edilmesine yardımcı olur [60].

Hız göstergeleri (airspeed indicators), uçuş sırasında hava hızının doğru bir şekilde belirlenmesini sağlayan kritik aviyonik cihazlardır. Uçuş güvenliği açısından pilotların doğru hız bilgisine sahip olması; kalkış, tırmanış, seyir, yaklaşma ve iniş aşamalarında hayati önem taşır. Bu cihazlar, genellikle pitot-tüpleri aracılığıyla elde edilen dinamik basınç ile statik basınç farkını ölçerek çalışır ve bu fark, uçağın hava hızı olarak ekrana yansıtılır [58]. Hız göstergelerinde oluşabilecek hataların başlıca nedenleri arasında pitot-statik sistemdeki tıkanmalar, çevresel faktörler (örneğin buzlanma), sensör arızaları ve kalibrasyon eksiklikleri yer alır. Bu hatalar, uçuş sırasında pilotun yanlış hız bilgisine dayanarak hatalı manevralar yapmasına ve uçuş güvenliğinin tehlikeye girmesine neden olabilir. Özellikle düşük hızlarda hatalı göstergeler, stall riski gibi kritik tehlikeler doğurabilir [60].

Hız göstergelerinin doğru çalışması, düzenli bakım ve kalibrasyon işlemlerine bağlıdır. Kalibrasyon, cihazın belirli standart basınç değerlerine göre ayarlanmasını ve hassasiyetinin doğrulanmasını sağlar. Kalibrasyon eksikliği, hız göstergesinde sürekli bir

sapma oluşmasına yol açarak uçuşun tüm aşamalarında yanlış hız bilgisi verilmesine neden olabilir. Bu tür sapmalar, yakıt tüketiminin artmasına, uçuş performansının düşmesine ve potansiyel uçuş kazalarına zemin hazırlayabilir [59].

Hız göstergelerindeki hatalar, geçmişte yaşanan çeşitli hava aracı kazalarının başlıca sebepleri arasında yer almıştır. Yanlış hız bilgisi nedeniyle pilotlar, özellikle otomatik pilot modunda yanlış uçuş konfigürasyonları seçebilmekte ve bu da uçuş emniyetinin zayıflamasına neden olabilmektedir. Bu sebeple, hız göstergelerinin düzenli kontrolü, pitot-statik sistemin temizliği ve kalibrasyonunun yapılması, uçuş operasyonlarının güvenliği ve sürdürülebilirliği açısından zorunludur [61].

Gyroskoplar, açısal momentumu koruma prensibine dayanır. Klasik mekanik gyroskoplar, dönen bir rotorun açısal hız vektörünü koruma eğilimi üzerinden çalışırken; modern fiber optik (FOG) ve halka lazer (RLG) gyroskoplar ise ışığın interferometrik özelliklerinden yararlanır. MEMS tabanlı gyroskoplar ise daha küçük, enerji verimli ve elektronik devrelerle entegre çalışabilir yapılarıyla özellikle insansız hava araçları gibi platformlarda yaygın kullanılmaktadır. Gyroskopların ölçümlerinde deterministik (sabit kayma, orantı katsayısı sapmaları) ve olasılıksal (beyaz gürültü, rasgele sürüklenme) hata türleri ortaya çıkar. Bu hatalar zamanla birikerek yönelim hesaplamalarında ciddi sapmalara yol açabilir. Bu nedenle kalibrasyon kritik öneme sahiptir. IEEE standartları hem fiber optik hem de lazer gyroskoplar için ayrıntılı test ve kalibrasyon prosedürleri geliştirmiştir [61]. Gyroskopların doğru çalışabilmesi için yalnızca imalat sırasında değil, kullanım süresi boyunca düzenli aralıklarla kalibrasyon yapılması gerekir. Kalibrasyon sayesinde cihazın metrolojik performansı doğrulanır, hata parametreleri belirlenir ve belirsizlikler minimize edilir. Özellikle havacılıkta uçuş güvenliği açısından bu süreç kritik bir öncelik taşır [58].

Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System - GPS), uydu tabanlı konum, hız ve zaman bilgisi sağlayan küresel bir navigasyon teknolojisidir. 1970'li yıllarda Amerika Birleşik Devletleri Savunma Bakanlığı tarafından askeri amaçlarla geliştirilen GPS, günümüzde sivil ve endüstriyel alanlarda da geniş bir kullanım alanına sahiptir. Havacılık, denizcilik, kara taşımacılığı, tarım ve savunma gibi sektörlerde vazgeçilmez bir konumlandırma ve navigasyon aracı olarak öne çıkmaktadır. GPS, dünya yüzeyinde

her noktada kesintisiz, doğru ve güvenilir konum bilgisi sunabilmesi nedeniyle, modern ulaşım ve lojistik altyapısının ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir.

Tork dönüştürücüler, dönel hareket yapan sistemlerde torkun doğru ve hassas bir şekilde ölçülmesini sağlayan elektro-mekanik cihazlardır. Genellikle gerinim ölçer (strain gauge) temelli yapılarıyla bilinirler ve üzerine bağlandıkları metalin deformasyonunu elektrik sinyaline dönüştürerek çalışırlar. Bu dönüştürücüler motorlar, krank milleri, dişli kutuları ve diğer tork üreten bileşenlerin kalibrasyonu ve performans ölçümlerinde kritik rol oynar [59].

Tork dönüştürücüler, üzerine bağlandıkları parçanın burulma etkisi altında meydana gelen gerinimi tespit eder. Bu gerinim, Wheatstone köprüsü adı verilen devreler aracılığıyla elektriksel olarak ölçülür ve tork değeriyle ilişkilendirilir. Sensörlerin doğru monte edilmesi, hassas ölçüm için zorunludur. Kullanılan kaplin ve flanşlar, torkun homojen ve kayıpsız iletimini sağlar. Tork dönüştürücüler; havacılık, otomotiv, türbin ve güç iletim sistemleri gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda, torkun yanı sıra hız ve güç parametrelerinin de ölçülmesi gerekir. Bu ölçümler, sistem performansının izlenmesi ve bakım planlamasının optimize edilmesi için kritik öneme sahiptir [59].

Doğru ölçüm yapılabilmesi için tork dönüştürücülerin belirli periyotlarla kalibre edilmesi gereklidir. Kalibrasyon sürecinde kullanılan referans sistemler; ölü ağırlık prensibine dayalı kalibrasyon makineleri ve referans tork dönüştürücüleri olabilir. Kalibrasyonun amacı, ölçüm belirsizliğini minimuma indirmektir. Ortam sıcaklığı ve nem gibi çevresel faktörler ölçüm belirsizliği üzerinde doğrudan etkilidir, bu nedenle test ortamı titizlikle kontrol edilmelidir. Tork, hız ve güç ölçümleri; dönen makinelerin performans analizi, bakım optimizasyonu ve olası arızaların erken tespiti açısından hayati önem taşır. Yanlış tork ölçümleri hem ekonomik kayıplara hem de güvenlik sorunlarına yol açabilir. Bu nedenle tork dönüştürücüler yalnızca ölçüm cihazı değil, aynı zamanda sistemin güvenilirliğini sağlayan kritik bir bileşen olarak kabul edilir [59].

Yakıt sensörleri, modern ulaşım ve özellikle havacılık sistemlerinde yakıt seviyesinin, sıcaklığının ve akış hızının hassas şekilde ölçülmesini sağlayan kritik elemanlardır. Bu sensörler, yakıt yönetimi ve uçuş güvenliği açısından hayati bir role sahiptir. Yakıt sensörlerinin performansı, kullanılan ölçüm teknolojisine ve ortam koşullarına bağlıdır.

Havacılıkta kullanılan yakıt sensörleri genellikle kapasitif, ultrasonik, piezoelektrik ve piezodirençli prensiplerle çalışır. Piezoelektrik sensörler, mekanik bir yük veya basınca maruz kaldıklarında elektrik yükü üreten kristal yapıları kullanır ve yüksek dinamik basınç koşullarında oldukça etkilidir [60]. Piezodirençli sensörler ise gerinim ölçer prensibiyle çalışarak hassas yakıt akışı ölçümleri için uygundur. Sensörlerin doğruluğu ve güvenilirliği, imalat toleransları, kalibrasyon süreçleri ve çevresel koşullar gibi faktörlerden etkilenir. Örneğin, sıcaklık ve nem gibi değişkenler sensör performansında sapmalara yol açabilir. Bu nedenle yakıt sensörleri düzenli olarak kalibre edilmeli ve performans belirsizlikleri minimize edilmelidir. Kalibrasyon işlemi, sensörün gerçek değer ile ilişkisini belirleyerek ölçüm belirsizliğini tanımlar ve sensörün güvenilir kullanımını sağlar [58]. Yakıt sensörlerinin kalibrasyonu sırasında, sensörlerin belirli sıcaklık ve basınç koşullarında tekrarlanabilir ve izlenebilir ölçümler yapabilmesi sağlanır. Bu süreç, özellikle uçak gibi güvenlik kritik sistemlerde hayati öneme sahiptir. Kalibrasyon sonucunda elde edilen veriler, sensör hatalarının belirlenmesi ve giderilmesi için kullanılır, böylece uçuş sırasında yakıt seviyesinin doğru şekilde izlenmesi garanti altına alınır. Özetle, yakıt sensörleri; yakıt seviyesinin doğru ölçülmesi, uçuş güvenliğinin artırılması ve bakım maliyetlerinin azaltılması için vazgeçilmezdir. Sensörlerin düzenli kalibrasyonu ve çevresel etkilerin minimize edilmesi, yakıt yönetim sistemlerinin güvenilirliğini doğrudan etkiler ve havacılıkta operasyonel emniyetin temel unsurlarından biridir.

Elektronik Uçuş Kontrol Sistemleri (EFCS), modern havacılıkta uçuşun güvenliğini ve hassasiyetini artıran en kritik bileşenlerden biridir. Bu sistemler, mekanik ve hidrolik uçuş kontrol sistemlerinin yerini alarak elektronik sinyaller üzerinden kumanda yüzeylerinin yönetimini sağlar. EFCS'nin temel amacı, pilot komutlarını elektronik olarak algılayıp uygun şekilde uçağın kontrol yüzeylerine aktarmaktır. Böylece, geleneksel sistemlerde karşılaşılan mekanik sürtünme ve arıza riskleri azaltılmış olur.

EFCS, temelde sensörler, uçuş kontrol bilgisayarları ve yürütücü sistemler olmak üzere üç ana bileşenden oluşur. Sensörler; ivmeölçerler, dönüölçerler ve basınç algılayıcıları gibi uçuş parametrelerini ölçer ve bu verileri uçuş kontrol bilgisayarına iletir. Uçuş kontrol bilgisayarları (Flight Control Computer - FCC), bu sensörlerden gelen verileri gerçek zamanlı olarak işler ve uçağın kararlılığını sağlamak için gerekli düzeltmeleri

belirler. Bu komutlar yürütücü sistemler aracılığıyla kanatçıklara, dümenlere ve diğer kontrol yüzeylerine iletilir.

Ataletsel sensörler ve ivmeölçerler EFCS'nin doğruluk ve güvenilirlik performansını belirleyen en önemli bileşenlerdendir. İvmeölçerler ve dönüölçerler, uçağın ivmesini ve açısal hızını ölçerek uçuş dinamiklerini belirlemekte kritik rol oynar. Bu sensörlerin hassasiyeti ve kalibrasyonu, uçuş güvenliği açısından hayati öneme sahiptir. Literatürde, ivmeölçerler ve dönüölçerlerin performans parametrelerinin doğruluğunun sağlanması için deterministik ve olasılıksal hata kaynaklarının analiz edilmesi gerektiği ve bu nedenle kapsamlı kalibrasyon testlerinin yapılmasının zorunlu olduğu belirtilmektedir [61].

Otomatik pilot sistemleri, modern hava araçlarının uçuş güvenliği ve verimliliğini artıran önemli teknolojik unsurlardan biridir. Bu sistemler, uçuş sırasında pilotun iş yükünü azaltarak daha kararlı, güvenli ve yakıt açısından verimli bir seyir imkânı sunar. Özellikle uzun menzilli uçuşlarda, otomatik pilotun üç temel eksen üzerinde sağladığı kontrol, uçuşun istikrarını ve doğruluğunu belirgin biçimde artırmaktadır.

Otomatik pilot sistemleri, genellikle üç temel eksen üzerinde kontrol sağlar. Bunlar yatay düzlemdeki hareketler (yalpa/roll), dikey düzlemdeki eğim hareketleri (irtifa/pitch) ve burun yönelimi ile ilgili sapma hareketleri (yön/yaw) olarak tanımlanmaktadır. Yalpa, uçağın kanatlarının sağa veya sola eğimini ifade eder. Bu eksen üzerindeki kontrol, genellikle kanat üzerindeki aileronlar aracılığıyla sağlanır. Otomatik pilot sistemleri, uçuş sırasında yatay stabilitenin korunması için yalpa hareketlerini sürekli olarak düzenler. Bu sayede, özellikle rüzgâr türbülansı veya dengesiz hava akımları gibi dış etkenler karşısında uçağın istenmeyen eğim hareketleri minimize edilir. İrtifa kontrolü, uçağın burnunun yukarı veya aşağı yönelimini belirleyen eksen üzerindeki hareketleri içerir. Bu kontrol, genellikle kuyruk yüzeylerinde bulunan yatay stabilizatör ve elevatörler aracılığıyla gerçekleştirilir. Otomatik pilot, uçuş sırasında belirlenen tırmanış veya alçalma profiline uygun olarak uçağın eğimini otomatik olarak ayarlayarak uçuşun istenen irtifada ve dengede kalmasını sağlar. Yön hareketi, uçağın dikey eksen etrafındaki dönüşlerini ifade eder ve kuyrukta yer alan dümen (rudder) aracılığıyla gerçekleştirilir. Sapma hareketinin doğru kontrol edilmesi, özellikle yan rüzgâr koşullarında ve dönüş manevralarında kritik öneme sahiptir. Otomatik pilot sistemleri, sapma hareketlerini dengeleyerek uçağın koordineli ve düz bir uçuş gerçekleştirmesine yardımcı olur. Bu

işlevlerin gerçekleştirilmesi için otomatik pilot sistemlerinde ivmeölçerler, dönüölçerler (gyroskoplar), GPS tabanlı konumlandırma sistemleri ve basınç sensörleri kullanılır [61]. Bu nedenle, kalibrasyonu oldukça elzemdir.

Manyetik pusulalar, uçağın yönünü belirlemek için kullanılır. Eğer pusula yanlış veri sağlarsa, pilotlar yanlış yön tayini yapabilir. Pusulaların kalibrasyonu, manyetik alan değişimlerine karşı duyarlılığını kontrol etmek için yapılır. Bu işlem sırasında genellikle manyetik test cihazları kullanılır.

Uçuş güvenliği, uçaktaki kritik ekipmanların düzenli olarak kalibre edilmesine bağlıdır. Altimetre, pitot tüpü, hız göstergeleri, gyroskoplar, GPS alıcıları, tork dönüştürücüler ve diğer sensörlerin kalibrasyonu, uçuşun güvenli ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar. Bu çalışmada, uçak ekipmanlarının kalibrasyon süreçleri detaylandırılmıştır ve her bir cihazın uçuş güvenliği üzerindeki rolü vurgulanmıştır.

4. BÖLÜM

BASINÇ ÖLÇER KALİBRASYONU

Kalibrasyon, en genel ifadesiyle doğruluğu bilinen bir ölçüm büyüklüğü ile doğruluğu bilinmeyen bir ölçüm büyüklüğünün belirli çevre şartları altında karşılaştırma dizisidir. Karşılaştırma işlemi esnasında her iki büyüklükten kaynaklanabilecek hatalar olmakla birlikte bu hataların toplamı ise gerçekleştiren ölçüm için belirsizlik değerini vermektedir. Her bir ölçüm büyüklüğü ile birlikte belirsizlik değerinin sunulması ise gerçekleştirilen ölçümün güvenilirliğine katkı sağlayacaktır.

Bu bölümde uçak bakım onarım çalışmalarında çok fazla sayıda bulunan hidrolik sistemlere entegre analog ve sayısal basınç ölçüm cihazlarının kalibrasyonlarının nasıl yapıldığı, ölçüm belirsizliklerinin nasıl hesaplandığı konularına değinilmiştir.

4.1. Kalibrasyon Yöntemleri

Analog ve sayısal basınç ölçerlerin kalibrasyonunda genel olarak kullanılan iki farklı yöntem vardır. Bunlardan birincisi, belirli değerlere sahip kütlelerin bir piston silindir mekanizması üzerine oluşturduğu basınç ile ölçüm yapan ölü ağırlıklı (deadweight test cihazı) kalibrasyon düzenekleri, diğeri ise bir pompa ve dijital basınç sensörü yardımıyla ölçüm yapan dijital kalibrasyon düzenekleridir.

4.1.1. Ölü Ağırlıklı (Deadweight) Kalibrasyon Düzenekleri

Deadweight test cihazları değerleri bilinen kütleler ile basınç dengesi oluşturularak basınç ölçerlerin kalibrasyonu için kullanılan cihazlardır. Bir piston silindir düzeneği üzerine yerleştirilen kütlelerin ağırlıklarının oluşturduğu basınç değeri ile ölçülmek istenen basınç ölçer cihazının karşılaştırılması prensibine göre çalışmaktadır. Deadweight test cihazları analog ve sayısal basınç ölçerlerin kalibrasyonunun yanı sıra yüksek doğrulukları sayesinde endüstride yaygın olarak kullanılan dijital kalibrasyon

düzeneklerinin de kalibrasyonlarının gerçekleştirilmesinde kullanılmaktadır. Hem hidrolik hem de pnömatik olarak basınç oluşturabilen tipleri mevcuttur.

Ölü ağırlıklı kalibrasyon düzenekleri kullanılırken dikkat edilmesi gereken en önemli etkenlerden bir tanesi yerçekimi ivmesidir. Kütlelerin oluşturduğu ağırlıkların tespiti için büyük önem arz etmektedir. Diğer bir husus ise kalibrasyonun gerçekleştirileceği ortam şartlarıdır. Sıcaklık ve nem değerlerindeki değişim ölçüm sonuçlarını etkileyeceği için bu duruma dikkat edilmesi gerekmektedir.

4.1.2. Dijital Kalibrasyon Düzenekleri

Dijital basınç kalibrasyon düzenekleri genel olarak referans bir dijital basınç ölçer ile bu basınç ölçer için basınç oluşturan bir pompa düzeneğinin bir arada kullanıldığı sistemlerdir. Endüstriyel çalışmalarda dijital ve analog basınç ölçerlerin kalibrasyonlarının gerçekleştirilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle ölçüm cihazlarının bir laboratuvar içerisinde gerçekleştirilemediği saha kalibrasyonlarında önemli rol oynamaktadırlar. Oluşturulacak basınca göre hidrolik veya pnömatik olarak çalışan pompalar mevcuttur. Yüksek doğrulukları, hızlı tepki süreleri ve en önemlisi portatif olarak taşınabilmeleri kullanıcılara çalışma kolaylığı sağlamaktadır.

4.2. Basınç Ölçer Kalibrasyon Standartları

Analog ve sayısal göstergeli basınç ölçerlerin kalibrasyonlarının gerçekleştirilmesi için Avrupa’da kullanılan iki farklı rehber doküman vardır. Bunlardan birincisi Almanya Cumhuriyetinin Ulusal Akreditasyon Kurumu (Deutsche Akkreditierungsstelle “DAkKS”, die nationale Akkreditierungs-behörde der Bundesrepublik Deutschland) tarafından yayımlanmış olan DKD-R 6-1 Calibration of Pressure Gauges, ikincisi ise Avrupa Ulusal Metroloji Enstitüleri Birliği (“EURAMET” - The European Association of National Metrology Institutes) tarafından yayımlanmış olan Euramet Cg-17 Ver. 4.1 (09/2022) Guidelines on the Calibration of Electromechanical and Mechanical Manometers’dır. Her iki dokümanda analog ve sayısal göstergeli basınç ölçerlerin kalibrasyonu için kullanılabilir. Ülkemizde daha ziyade Avrupa Ulusal Metroloji Enstitüleri Birliği tarafından yayımlanan dokümanlar kullanılmakta olup bu çalışmada da basınç kalibrasyonu ve ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi ilgili dokümana göre gerçekleştirilmiştir.

4.3. Basınç Ölçer Kalibrasyon Uygulaması

Havacılıkta kullanılan sistemler ve alt sistemlerde bulunan analog ve sayısal basınç ölçerler bakım onarım aşamasında kalibrasyona tabi tutulur ve kalibrasyon sonucunda uygun bulunan cihazlar operasyonel olarak kullanımına devam edilir. Bir ölçüm cihazının kalibrasyonunun yapılabilmesi için öncelikle ilgili cihazın kalibrasyona uygun olması gerekmektedir. Kalibrasyonu yapılacak cihazın genel görünüş ve fonksiyonellik açısından test edilmesi gerekir.

Genel görünüş olarak gözle muayene edilerek ilgili basınç ölçerin temizliği, sızdırmazlık durumu, bağlantılarının hasarlı olup olmadığı vb. kontrol edilir. Fonksiyonel açıdan ise, basınç iletim hattında sızdırma olup olmaması, ibresinin sağlamlığı, okuma ünitesinin çalışma durumu ve kapasitesinin tamamında etkin çalışıp çalışmama durumları değerlendirilir.

Kalibrasyon uygulama aşamaları şu şekildedir;

- Kalibre edilecek cihaz eğer gerekiyor ise referans cihaza bağlanmadan hem bağlantı noktaları hem de bütün yüzeylerinde mevcut olan yağ, pas, toz vb. gibi yabancı maddelerden temizlenir.
- Kalibrasyon sistemine basınç ölçerin bağlantıları uygun aparatlar kullanılarak gerçekleştirilir.
- Referans cihaz ile kalibre edilecek cihaz arasında seviye farkının oluşmamasına dikkat edilir.
- Laboratuvar sıcaklığının ısı olarak dengede olması ve her iki cihazında sıcaklık dengesinin oluşması beklenir.
- Kalibrasyon esnasında sıcaklık değişiminin ± 1 °C değerini geçmemesi gerekmektedir. Aksi takdirde gerçekleştirilen kalibrasyon durdurulmalıdır.
- Kalibrasyona başlamadan önce kalibre edilecek cihaz en az iki defa maksimum kapasiteye kadar yüklenmeli ve bu basınç değerinde en az bir dakika beklenmelidir. Bu süreçte bağlantılarda herhangi bir kaçak olup olmadığı kontrol edilmelidir.
- Ön yükleme işlemi bittikten ve basınç tamamen boşaltıldıktan sonra kalibre edilen cihaz için sıfır değeri okuması yapılır.

- Bir ölçme çevriminde, birbirini takip eden ölçme aralıkları arasındaki zaman dilimi mümkün olduğunca eşit olmalıdır ve bu zaman dilimi 30 s'den az olmamalıdır.
- Her ölçme noktasında okumalar, en erken basınç değerine ulaşıldıktan 30 s sonra yapılmalıdır.
- Ölçüm kademelerinde basınç ölçerinin maksimum değerine ulaşıldığında buradaki basınç değeri iki dakika (bourdon tüplü manometreler için 5 dakika) beklendikten sonra kaydedilir ve basınç değeri azaltılarak ölçümler kademeli olarak tamamlanır.
- Kalibre edilen basınç ölçerindeki basınç değeri sıfır değerine geldiğinde ise 30 s beklenir ve sıfır okuması yapılır.
- Kalibre edilecek olan cihaza uygun seçilmiş olan kalibrasyon prosedürüne göre çevrim ve tekrarlanabilirlik ölçümleri gerçekleştirilir.

Kalibrasyonu tamamlanan basınç ölçer bağlantıları sökülerek sapması ve ölçüm belirsizliği değerleri değerlendirilir.

4.3.1. Kalibrasyon Prosedürünün Seçilmesi

Avrupa Ulusal Metroloji Enstitüleri Birliği'nin yayımlamış olduğu basınç ölçer kalibrasyon dokümanı olan Euramet Cg-17 Ver. 4.1 (09/2022) Guidelines on the Calibration of Electromechanical and Mechanical Manometers dokümanında kalibrasyonu yapılacak olan basınç ölçerinin performansına göre üç farklı yöntem belirlenmiştir. Kalibrasyon prosedürleri belirlenirken en etkili parametre kalibre edilecek olan cihazın tahmini hedeflenen belirsizlik değeridir. Temel, Standart ve Kapsamlı olmak üzere üç farklı kalibrasyon prosedürü mevcuttur.

4.3.1.1. Temel Kalibrasyon Prosedürü

Kalibrasyonu gerçekleştirilecek olan test cihazının tahmini belirsizlik değerinin, cihazın en büyük ölçüm değerinin (FS: Full scale) %0,2'sinden büyük olması durumunda ilgili cihaza Temel Kalibrasyon prosedürü uygulanmaktadır. Bu prosedüre göre ölçümler artan ve azalan yönde olmak üzere sıfır dahil altı noktada bir çevrim olarak gerçekleştirilir. Tekrarlanabilirlik ölçümü ise cihaz ölçüm kapasitesinin 0 %FS ve orta noktaya yakın bir yerinde (örneğin 40 %FS veya 60 %FS) üç çevrim artan ölçümler şeklinde

gerçekleştirilir. Temel kalibrasyon prosedürünün ölçüm döngüsü Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Temel Kalibrasyon Prosedürü Ölçüm Döngüsü

Referans Basınç	1. Çevrim		2. Çevrim		3. Çevrim	
	Artan Basınç	Azalan Basınç	Artan Basınç	Azalan Basınç	Artan Basınç	Azalan Basınç
$P_{ref, 0}$	$P_{ind, 1,0}$	$P_{ind, 2,0}$	$P_{ind, 3,0}$	-	$P_{ind, 5,0}$	-
$P_{ref, 1}$	$P_{ind, 1,1}$	$P_{ind, 2,1}$	-	-	-	-
$P_{ref, 2}$	$P_{ind, 1,2}$	$P_{ind, 2,2}$	$P_{ind, 3,2}$	-	$P_{ind, 5,2}$	-
$P_{ref, 3}$	$P_{ind, 1,3}$	$P_{ind, 2,3}$	-	-	-	-
$P_{ref, 4}$	$P_{ind, 1,4}$	$P_{ind, 2,4}$	-	-	-	-
$P_{ref, 5}$	$P_{ind, 1,5}$	$P_{ind, 2,5}$	-	-	-	-

Burada P_{ref} , referans cihazdan okunan basınç değerlerini, P_{ind} ise ölçümü gerçekleştirilen cihazdan okunan ölçüm değerlerini göstermektedir. Bir çevrim olarak gerçekleştirilen ölçümlerde ikinci ve üçüncü çevrim sadece tekrarlanabilirlik ölçümü için gereklidir.

4.3.1.2. Standart Kalibrasyon Prosedürü

Kalibrasyonu gerçekleştirilecek olan test cihazının tahmini belirsizlik değerinin, cihazın en büyük ölçme değerinin %0,05 ile %0,2’si arasında olması durumunda ilgili cihaza Standart Kalibrasyon prosedürü uygulanmaktadır. Bu prosedüre göre ölçümler artan ve azalan yönde olmak üzere sıfır dahil on bir noktada bir çevrim olarak gerçekleştirilir. Tekrarlanabilirlik ölçümü ise üç çevrimin artan yönlerinde dört farklı basınç noktasında (tercihen 0 %FS, 20 %FS, 50 %FS ve 80 %FS) gerçekleştirilir. Standart kalibrasyon prosedürünün ölçüm döngüsü Tablo 4.2’de verilmiştir. Diğer ölçüm noktalarındaki tekrarlanabilirlik ölçümleri için ise aşağıda verilen değerlerden büyük olanı hesaba katılmaktadır.

- 10 %FS’ de (0 %FS veya 20 %FS)
- 30-40 %FS’ de (20 %FS veya 50 %FS)
- 60-70 %FS’ de (50 %FS veya 80 %FS)
- 90-100 %FS’ de (80 %FS)

Tablo 4.2. Standart Kalibrasyon Prosedürü Ölçüm Döngüsü

Referans Basınç	1. Çevrim		2. Çevrim		3. Çevrim	
	Artan Basınç	Azalan Basınç	Artan Basınç	Azalan Basınç	Artan Basınç	Azalan Basınç
$P_{ref, 0}$	$P_{ind, 1,0}$	$P_{ind, 2,0}$	$P_{ind, 3,0}$	-	$P_{ind, 5,0}$	-
$P_{ref, 1}$	$P_{ind, 1,1}$	$P_{ind, 2,1}$	-	-	-	-
$P_{ref, 2}$	$P_{ind, 1,2}$	$P_{ind, 2,2}$	$P_{ind, 3,2}$	-	$P_{ind, 5,2}$	-
$P_{ref, 3}$	$P_{ind, 1,3}$	$P_{ind, 2,3}$	-	-	-	-
$P_{ref, 4}$	$P_{ind, 1,4}$	$P_{ind, 2,4}$	-	-	-	-
$P_{ref, 5}$	$P_{ind, 1,5}$	$P_{ind, 2,5}$	$P_{ind, 3,5}$	-	$P_{ind, 5,5}$	-
$P_{ref, 6}$	$P_{ind, 1,6}$	$P_{ind, 2,6}$	-	-	-	-
$P_{ref, 7}$	$P_{ind, 1,7}$	$P_{ind, 2,7}$	-	-	-	-
$P_{ref, 8}$	$P_{ind, 1,8}$	$P_{ind, 2,8}$	$P_{ind, 3,8}$	-	$P_{ind, 5,8}$	-
$P_{ref, 9}$	$P_{ind, 1,9}$	$P_{ind, 2,9}$	-	-	-	-
$P_{ref, 10}$	$P_{ind, 1,10}$	$P_{ind, 2,10}$	-	-	-	-

Burada P_{ref} , referans cihazdan okunan basınç değerlerini, P_{ind} ise ölçümü gerçekleştirilen cihazdan okunan ölçüm değerlerini göstermektedir.

4.3.1.3. Kapsamlı Kalibrasyon Prosedürü

Kalibrasyonu gerçekleştirilecek olan test cihazının tahmini belirsizlik değerinin, cihazın en büyük ölçme değerinin 0,05 %FS' den küçük olması durumunda bu prosedür uygulanır. Bu prosedüre göre ölçümler artan ve azalan yönde olmak üzere sıfır dahil on bir noktada üç çevrim olarak gerçekleştirilir. Tekrarlanabilirlik hesabı ise üç çevrim olarak gerçekleştirilen ölçümlerde her nokta için hesaplanarak belirlenir. Kapsamlı kalibrasyon prosedürünün ölçüm döngüsü Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Kapsamlı Kalibrasyon Prosedürü Ölçüm Döngüsü

Referans Basınç	1. Çevrim		2. Çevrim		3. Çevrim	
	Artan Basınç	Azalan Basınç	Artan Basınç	Azalan Basınç	Artan Basınç	Azalan Basınç
$P_{ref, 0}$	$P_{ind, 1,0}$	$P_{ind, 2,0}$	$P_{ind, 3,0}$	$P_{ind, 4,0}$	$P_{ind, 5,0}$	$P_{ind, 6,0}$
$P_{ref, 1}$	$P_{ind, 1,1}$	$P_{ind, 2,1}$	$P_{ind, 3,1}$	$P_{ind, 4,1}$	$P_{ind, 5,1}$	$P_{ind, 6,1}$
$P_{ref, 2}$	$P_{ind, 1,2}$	$P_{ind, 2,2}$	$P_{ind, 3,2}$	$P_{ind, 4,2}$	$P_{ind, 5,2}$	$P_{ind, 6,2}$
$P_{ref, 3}$	$P_{ind, 1,3}$	$P_{ind, 2,3}$	$P_{ind, 3,3}$	$P_{ind, 4,3}$	$P_{ind, 5,3}$	$P_{ind, 6,3}$
$P_{ref, 4}$	$P_{ind, 1,4}$	$P_{ind, 2,4}$	$P_{ind, 3,4}$	$P_{ind, 4,4}$	$P_{ind, 5,4}$	$P_{ind, 6,4}$
$P_{ref, 5}$	$P_{ind, 1,5}$	$P_{ind, 2,5}$	$P_{ind, 3,5}$	$P_{ind, 4,5}$	$P_{ind, 5,5}$	$P_{ind, 6,5}$
$P_{ref, 6}$	$P_{ind, 1,6}$	$P_{ind, 2,6}$	$P_{ind, 3,6}$	$P_{ind, 4,6}$	$P_{ind, 5,6}$	$P_{ind, 6,6}$
$P_{ref, 7}$	$P_{ind, 1,7}$	$P_{ind, 2,7}$	$P_{ind, 3,7}$	$P_{ind, 4,7}$	$P_{ind, 5,7}$	$P_{ind, 6,7}$
$P_{ref, 8}$	$P_{ind, 1,8}$	$P_{ind, 2,8}$	$P_{ind, 3,8}$	$P_{ind, 4,8}$	$P_{ind, 5,8}$	$P_{ind, 6,8}$
$P_{ref, 9}$	$P_{ind, 1,9}$	$P_{ind, 2,9}$	$P_{ind, 3,9}$	$P_{ind, 4,9}$	$P_{ind, 5,9}$	$P_{ind, 6,9}$
$P_{ref, 10}$	$P_{ind, 1,10}$	$P_{ind, 2,10}$	$P_{ind, 3,10}$	$P_{ind, 4,10}$	$P_{ind, 5,10}$	$P_{ind, 6,10}$

Burada P_{ref} , referans cihazdan okunan basınç değerlerini, P_{ind} ise ölçümü gerçekleştirilen cihazdan okunan ölçüm değerlerini göstermektedir.

4.4. Kalibrasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kalibrasyonu gerçekleştirilen her bir basınç ölçer için değerlendirme yapabilmek için ilgili cihazın sapma, histerizis ve tekrarlanabilirlik hatalarının belirlenmesi gerekmektedir. Hesaplamalar sonucunda kalibre edilen cihazın uygunluk değerlendirmesi yapılabilir ve kullanım durumuna karar verilebilir.

4.4.1. Ölçüm Hatası (Sapma)

Ölçüm hatası (sapma), ölçümü gerçekleştirilen her bir noktadaki referans cihazın gösterge değeri ile ölçümü gerçekleştirilen cihazın göstergesi arasındaki farktır ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$Hata = |P_{ind} - P_{ref}| \quad (4.1)$$

4.4.2. Geri Dönüş Sapması (Histerizis)

Bir ölçme cihazında ölçme yapılırken herhangi bir değere artarak veya azalarak yaklaşılması durumunda meydana gelen fark histerizis olarak tanımlanmaktadır. Basınç ölçerler özellikle artan ve azalan basınç değerlerine sürekli olarak maruz kaldıkları için histerizis performansları önemlidir. Bir basınç ölçerin histerizis hatası şu şekilde tespit edilir (Euramet Cg-17, 2022);

$$h_j = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n |(P_{ind,2m,j} - P_{ind,2m-1,0}) - (P_{ind,2m-1,j} - P_{ind,2m-1,0}) - (P_{ref,2m,j} - P_{ref,2m-1,0}) + (P_{ref,2m-1,j} - P_{ref,2m-1,0})| \quad (4.2)$$

Burada n, ölçümlerde gerçekleştirilen artan yöndeki çevrim sayısını ifade etmektedir.

4.4.3. Tekrarlanabilirlik

Ölçümü gerçekleştirecek cihaz için herhangi bir montaj değişimi yapılmadan aynı ölçüm noktasında gerçekleştirilen ölçüm sapmaları arasındaki farkın sıfır değeri ile düzeltilmesi ile elde edilmektedir (Euramet Cg-17, 2022).

$$b'_{up,j} = \max\{|(p_{ind,3,j} - p_{ind,3,0}) - (p_{ind,1,j} - p_{ind,1,0}) - (p_{ref,3,j} - p_{ref,3,0}) + (p_{ref,1,j} - p_{ref,1,0})|, |(p_{ind,5,j} - p_{ind,5,0}) - (p_{ind,1,j} - p_{ind,1,0}) - (p_{ref,5,j} - p_{ref,5,0}) + (p_{ref,1,j} - p_{ref,1,0})|, |(p_{ind,5,j} - p_{ind,5,0}) - (p_{ind,3,j} - p_{ind,3,0}) - (p_{ref,5,j} - p_{ref,5,0}) + (p_{ref,3,j} - p_{ref,3,0})|\} \quad (4.3)$$

$$b'_{dn,j} = \max\{|(p_{ind,4,j} - p_{ind,3,0}) - (p_{ind,2,j} - p_{ind,1,0}) - (p_{ref,4,j} - p_{ref,3,0}) + (p_{ref,2,j} - p_{ref,1,0})|, |(p_{ind,6,j} - p_{ind,5,0}) - (p_{ind,2,j} - p_{ind,1,0}) - (p_{ref,6,j} - p_{ref,5,0}) + (p_{ref,2,j} - p_{ref,1,0})|, |(p_{ind,6,j} - p_{ind,5,0}) - (p_{ind,4,j} - p_{ind,3,0}) - (p_{ref,6,j} - p_{ref,5,0}) + (p_{ref,4,j} - p_{ref,3,0})|\} \quad (4.4)$$

$$b'_{mean,j} = \max\{b'_{up,j}, b'_{dn,j}\} \quad (4.5)$$

Burada j indeksi nominal basınç değerini göstermekte olup b'_{up} , artan yöndeki, b'_{dn} ise azalan yöndeki tekrarlanabilirlik değerini ifade etmektedir.

4.4.4. Sıfır Hatası

Sıfır ölçümü her bir artan ve azalan ölçüm serisinden önce ve sonra kaydedilmelidir. Basınç ölçümü için sıfır hatası şu şekilde hesaplanır (Euramet Cg-17, 2022);

$$f_0 = \max\{|p_{ind,2,0} - p_{ind,1,0} - (p_{ref,2,0} - p_{ref,1,0})|, |p_{ind,4,0} - p_{ind,3,0} - (p_{ref,4,0} - p_{ref,3,0})|, |p_{ind,6,0} - p_{ind,5,0} - (p_{ref,6,0} - p_{ref,5,0})|\} \quad (4.6)$$

4.5. Ölçüm Belirsizliğinin Değerlendirilmesi

Ölçüm Belirsizliği tanım olarak, ölçülen büyüklüğün gerçek değerinin içinde bulunduğu değerler aralığını karakterize eden tahmini değerdir şeklinde verilebilir. Ölçüm belirsizliği bir şüphe kavramı ve yapılan ölçümlerin güvenilirliğinin sorgulanmasıdır. Bilimsel çalışmalarda şüphe ve bu şüphenin ortadan kaldırılması yapılan bilimsel çalışmanın güvenilirliği açısından çok önemlidir. Kalibrasyon işlemi de bir ölçme işlemi olup yapılan ölçümlerin güvenilirliği ölçüm belirsizliği ile birlikte verebildiğimiz ölçüde güvenilir demektir. Ölçüm belirsizliğini hesaplayarak yapılan ölçüm büyüklüğüyle deklere etmek ölçülen büyüklüğün güven derecesine pozitif katkı sağlayacaktır.

Herhangi bir ölçüm sonucunda hesaplanması gereken büyüklük R , bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişken ise; $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ olsun. Bu durumda $R = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ yazılabilir. Ölçümlerde her bir parametreye etki eden bağımsız belirsizlik miktarları ise $\pm u_{x1}, \pm u_{x2}, \pm u_{x3}, \dots, \pm u_{xn}$ olsun. R büyüklüğünün belirsizlik değeri olan $\pm u_R$ şu şekilde hesaplanabilir (EA 4/02, 2021);

$$u_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} u_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} u_{x_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} u_{x_3}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} u_{x_n}\right)^2} \quad (4.7)$$

Bu değer standart belirsizlik olup güvenilirlik aralığını arttırmak için ölçüm sonucu genişletme faktörü k ile çarpılması gerekmektedir. Genişletilmiş ölçüm belirsizliği şu şekilde hesaplanır;

$$U = k \times u_R \quad (4.8)$$

Ölçülen büyüklük normal dağılıma uygunsa genel olarak genişletme faktörü $k=2$ kullanılır. Bu durumda ölçüm sonucunda sunulan genişletilmiş ölçüm belirsizliği güvenilirliği %95 olur.

Kalibrasyonu gerçekleştirilen analog veya sayısal göstergeli basınç ölçer için belirsizlik bütçesi ise aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\Delta P = P_{ind} - P_{ref} + \delta P_{ref} + \delta P_{b'} + \delta P_h + \delta P_r + \delta P_{f_0} \quad (4.9)$$

P_{ind} : Kalibre edilen basınç ölçer göstergesinden okunan değer

P_{ref} : Referans basınç kalibratöründen okunan değer

δP_{ref} : Referans basınç kalibratörünün belirsizliği

$\delta P_{b'}$: Tekrarlanabilirlik belirsizliği

δP_h : Histerizis belirsizliği

δP_r : Çözünürlük belirsizliği

δP_{f_0} : Sıfır hatası belirsizliği

Toplam ölçüm belirsizliği şu şekilde hesaplanır;

$$U = k \cdot \sqrt{u_{ref}^2 + u_b^2 + u_h^2 + u_r^2 + u_{f_0}^2} \quad (4.10)$$

Herhangi bir ölçüm noktası için ölçüm belirsizliği parametreleri, dağılım katsayıları ve belirsizlik katsayıları Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Basınç ölçer için belirsizlik bütçesi

Belirsizlik Bileşeni	Büyüklik	Olasılık Dağılımı	Duyarlılık katsayısı	Kısmi varyans	Varyans
	x_i	n_i	c_i	$u_i(y)$	$u^2_i(y)$
Referans cihaz	δP_{ref}	Normal	1	u_{ref}	u^2_{ref}
Tekrarlanabilirlik	$\delta P_{b'}$	Dikdörtgen	1	$u_{b'}$	$u^2_{b'}$
Histerizis	δP_h	Dikdörtgen	1	u_h	u^2_h
Çözünürlük	δP_r	Dikdörtgen	1	u_r	u^2_r
Sıfır hatası	δP_{f_0}	Dikdörtgen	1	u_{f_0}	$u^2_{f_0}$

4.5.1. Referans Cihazın Belirsizliği

Basınç ölçerin kalibrasyonu için referans olarak kullanılan basınç kalibratörünün kalibrasyonu sonucunda oluşan ölçüm belirsizlik değeri ilgili cihazın sertifikasından alınarak kullanılır. Kalibrasyon sertifikasında belirtilen değer genişletilmiş değer olup belirsizlik bütçesine katmadan önce genişletme katsayısına bölünmesi gerekmektedir. Referans cihazın kalibrasyon sertifikasından gelen belirsizlik bileşeni aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$u_{ref} = \frac{U_{ref,sertifika}}{k} \quad (4.11)$$

4.5.2. Tekrarlanabilirlik Belirsizliği

Ölçümü yapılacak olan basınç ölçerin montajında herhangi bir değişiklik gerçekleştirilmeden aynı nokta için üç artan ölçüm sonucunda Eşitlik 4.12 kullanılarak elde edilen tekrarlanabilirlik değerinin yarısı alınarak belirsizlik bileşeni olarak kullanılır. Basınç ölçerin belirsizlik hesabı için tekrarlanabilirlik bileşeni şu şekilde hesaplanır (Euramet Cg-17, 2022);

$$u_{b'} = \frac{b'}{2\sqrt{3}} \quad (4.12)$$

4.5.3. Histerizis Belirsizliği

Aynı ölçüm noktasına artarak ve azalarak gerçekleştirilen ölçümler sonucundaki fark olan histerizis Eşitlik 4.13 kullanılarak hesaplanır. Hesaplama sonucunda elde edilen histerizis

değerinin yarısı alınarak belirsizlik bileşeni olarak kullanılır ve aşağıdaki gibi hesaplanır (Euramet Cg-17, 2022);

$$u_h = \frac{h}{2\sqrt{3}} \quad (4.13)$$

4.5.4. Çözünürlük Belirsizliği

Kalibrasyonu gerçekleştirilen analog ya da sayısal basınç ölçerin bölüntü değeri olarak tanımlanır. Bu değer sayısal basınç ölçerler için bölüntü değerinin kendisi iken analog cihazlarda ise bölüntü değerinin bölünebilme sayısına (2,4,5,10 gibi) oranı olarak alınır. Çözünürlükten gelen belirsizlik bileşeni ise bölüntü değerinin (r) yarısı olarak bütçeye katılır ve şu şekilde hesaplanır (Euramet Cg-17, 2022);

$$u_r = \frac{r}{2\sqrt{3}} \quad (4.14)$$

4.5.5. Sıfır Hatası Belirsizliği

Bir basınç ölçer için sıfır hatasından kaynaklanan belirsizlik bileşenin Eşitlik 4.15 yardımıyla hesaplanır ve elde edilen değer yarısı alınarak belirsizlik bütçesine dahil edilir. Sıfır hatası belirsizlik bileşeni şu şekildedir (Euramet Cg-17, 2022);

$$u_{f_0} = \frac{f_0}{2\sqrt{3}} \quad (4.15)$$

5. BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde hava araçlarında en çok kullanılan ve doğruluğunun kalibrasyon ile kontrol edilmesi gereken cihazlardan bir tanesi olan basınç ölçer örnek olarak ele alınmıştır. Bir basınç ölçer için kalibrasyonun nasıl uygulandığı ve sapma değerleri ile belirsizlik değerlerinin nasıl hesaplandığı açıklanmıştır. Bu amaçla bir adet analog basınç ölçer kalibrasyonu gerçekleştirilmiş ve hesaplamaları bölüm içerisinde verilmiştir. Örnek basınç ölçer için kalibrasyon prosedürü, kalibrasyon için kullanılan referans basınç ölçer ile belirsizlik parametreleri detaylandırılmıştır.

5.1. Ölçümlerde Kullanılan Referans Ekipmanlar ve Kalibrasyon Prosedürü

Bu çalışmada uçak bakım onarım faaliyetlerinde kullanılan analog basınç ölçer kalibrasyonu için örnek bir kalibrasyon uygulaması gerçekleştirilmiş, ölçüm sonucunda meydana gelen sapma değerleri ile ölçüm belirsizlikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla aşağıdaki test ve referans cihazlar kullanılmıştır.

5.1.1. Referans Basınç Kalibratörü (Dijital Kalibrasyon Düzeneği)

Kalibrasyon laboratuvarlarında sıklıkla kullanılan dijital basınç kalibratörleri taşıma kolaylığı, hızlı tepkime süreleri ve yüksek doğrulukları nedeniyle tercih edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan referans basınç kalibratörüne ait görsel Şekil 5.1’de sunulmuş olup cihaza ait teknik bilgiler ise Tablo 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Ölçümlerde Kullanılan Dijital Basınç Kalibratörü

Tablo 5.1. Dijital Basınç Dönüştürücü Teknik Bilgileri

Cihazın Adı	:	Dijital Basınç Kalibratörü
Markası	:	Keller
Modeli	:	LEX1
Ölçüm kapasitesi	:	20 bar
Doğruluğu	:	0.05 %FS
Çözünürlüğü	:	0,001 bar

5.1.2. Test Cihazı (Analog Basınç Ölçer)

Bu çalışmada analog bir basınç ölçer kalibrasyonu için Bourdon tüpüne sahip bir manometre kullanılmıştır. Manometreler hidrolik sistemlerde çok fazla kullanılan basit ama dinamik basınç altında etkin çalışan cihazlardır. Kalibrasyonu uygulamasında kullanılan manometreye ait teknik bilgiler Tablo 5.2’de, manometrenin görseli ise Şekil 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2. Test Cihazı Teknik Bilgileri (Manometre)

Cihazın Adı	:	Analog Basınç Ölçer (Manometre)
Markası	:	Pakkens
Ölçüm kapasitesi	:	2,5 bar
Doğruluğu	:	%2,5
Çözünürlüğü	:	0,05 bar



Şekil 5.2. Ölçümlerde Kullanılan Analog Basınç Ölçer

5.2. Kalibrasyon Metodu ve Uygulaması

Basınç ölçer kalibrasyonu örnek uygulaması için seçilen analog cihaz, Avrupa Ulusal Metroloji Enstitüleri Birliği'nin yayımlamış olduğu basınç ölçer kalibrasyon dokümanı Euramet Cg-17'ye göre değerlendirildiğinde tahmin edilen ölçüm belirsizlik değeri 0,2 %FS değerinden daha büyük olacağı için kalibrasyon prosedürü olarak temel prosedür seçilmiştir. Referans cihaz olarak el ile pompa görevi gören (pnömatik) dijital basınç kalibratörü kullanılmış manometre ile dijital kalibratör bağlantıları sızdırmazlık koşulları sağlanacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon için kullanılan basınç ölçüm düzeneği Şekil 5.3'te verilmiştir. Kalibrasyon esnasında ortam şartları kaydedilmiş sıcaklık değişiminin kalibrasyonun başlangıcı ve bitişi arasında 1 °C'den fazla değişmediği görülmüştür.



Şekil 5.3. Basınç Ölçer Kalibrasyon Düzenegi

Ölçümler temel kalibrasyon prosedürüne göre sıfır dahil altı noktada basınç değerinin artan ve azalan aşamalarında elde edilmiştir. Tekrarlanabilirlik değerleri ise 0 %FS ve 60 %FS değerlerinde artan yönde yapılan ölçümlerden hesaplanmıştır. Test edilen cihazın gösterge değeri ölçülecek basınç değerine getirilerek referans basınç ölçerden gerçek basınç değerleri alınmıştır. Ölçümler sonucunda elde edilen ham değerler Tablo 5.3'de sunulmuştur.

Tablo 5.3. Kalibrasyon Ölçümü Ham Verileri

Ölçülen Basınç (bar)	Referans Basınç Ölçer Gösterge Değerleri					
	1. Çevrim		2. Çevrim		3. Çevrim	
	Artan (bar)	Azalan (bar)	Artan (bar)	Azalan (bar)	Artan (bar)	Azalan (bar)
0	0,000	0,002	0,001	-	0,002	-
0,5	0,494	0,498	-	-	-	-
1,0	0,993	0,997	-	-	-	-
1,5	1,488	1,496	1,496	-	1,490	-
2,0	1,984	1,994	-	-	-	-
2,5	2,478	2,485	-	-	-	-

5.3. Kalibrasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Basınç ölçerin kalibrasyonu sonucunda dördüncü bölümde verilen eşitlikler kullanılarak gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda elde edilen değerler Tablo 5.4'te sunulmuştur. Temel kalibrasyon prosedürüne göre basınç ölçer üzerinde toplam altı ölçüm noktası belirlenmiş ve her bir ölçüm noktası için artan ve azalan yönde sapmaları, histerizis ve ölçüm belirsizliği değerleri ayrı ayrı hesaplanmıştır.

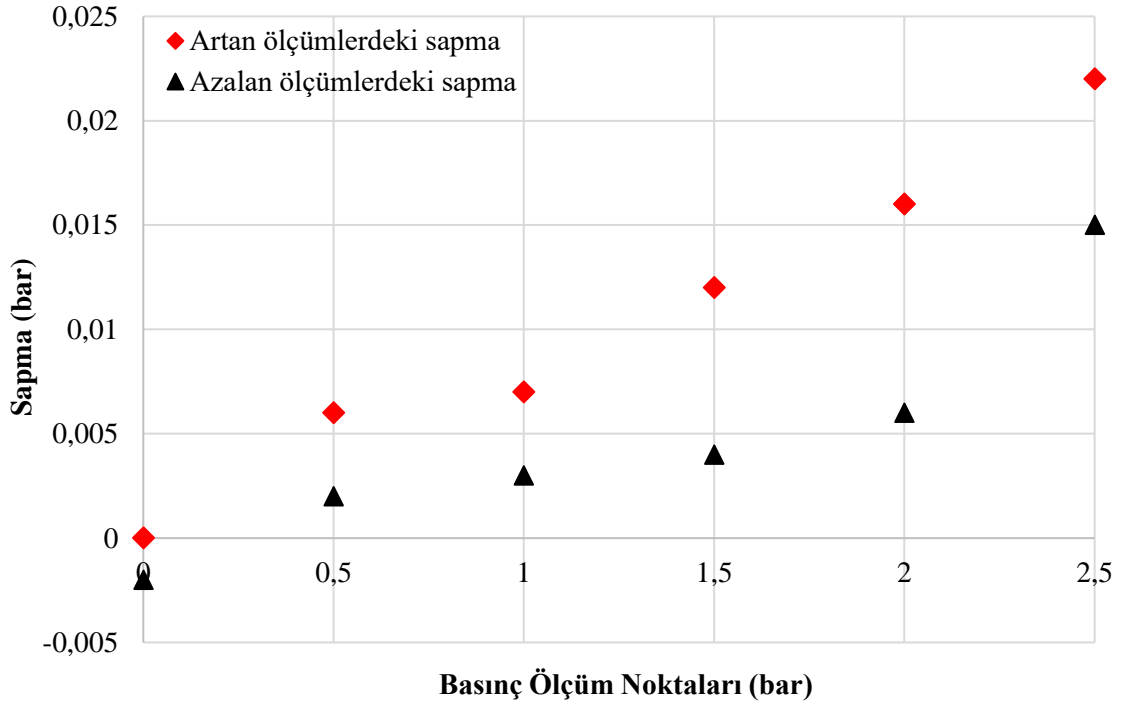
Tablo 5.4. Kalibrasyon Ölçüm Sonucu Hata, Histerizis ve Belirsizlik Değerleri

Ölçülen Basınç (bar)	Referans Basınç Gösterge Değeri		Sapma (hata)		Histerizis (bar)	Ölçüm Belirsizliği (\pm bar)
	Artan (bar)	Azalan (bar)	Artan (bar)	Azalan (bar)		
0	0,000	0,002	0,000	-0,002	0,002	0,0890
0,5	0,494	0,498	0,006	0,002	0,004	0,0892
1,0	0,993	0,997	0,007	0,003	0,004	0,0894
1,5	1,488	1,496	0,012	0,004	0,008	0,0902
2,0	1,984	1,994	0,016	0,006	0,010	0,0908
2,5	2,478	2,485	0,022	0,015	0,007	0,0899

Basınç ölçerin her bir ölçüm noktası için artan ve azalan yönlerde referans basınç kalibratörü gösterge değerinden farklılıkların belirlendiği sapma değerleri Şekil 5.4'te sunulmuştur. Şekil 5.4 incelendiğinde sapma miktarlarının artan ve azalan yönlerde 0 bar ile 0,022 bar arasında değişim gösterdiği görülmektedir. Basınç ölçerde en yüksek sapma miktarı 0,022 bar olarak maksimum ölçüm noktası olan 2,5 bar için artan yönde gerçekleştirilen ölçümlerde elde edilmiştir.

Artan yönde gerçekleştirilen ölçümler için değerlendirme yapıldığında sapma değerlerinin 0 bar, 0,006 bar, 0,007 bar, 0,012 bar, 0,016 bar ve 0,022 bar olarak artarak gittiği görülmektedir. Basınç ölçerin maksimum kapasitesine yaklaşıldıkça sapma değerleri de artış göstermektedir. Azalan yöndeki ölçümler incelendiğinde ise sapma miktarlarının -0,002 bar, 0,002 bar, 0,004 bar, 0,004 bar, 0,008 bar, 0,010 bar ve 0,007 bar olarak değiştiği görülmektedir. Azalan yönde de artan yöndeki ölçümlere benzer şekilde sapma miktarlarının basınç ölçerin artan değerleri artış gösterdiği görülmektedir. Sadece maksimum ölçüm noktası olan 2,5 bar için azalan yönde sapma değerinin bir

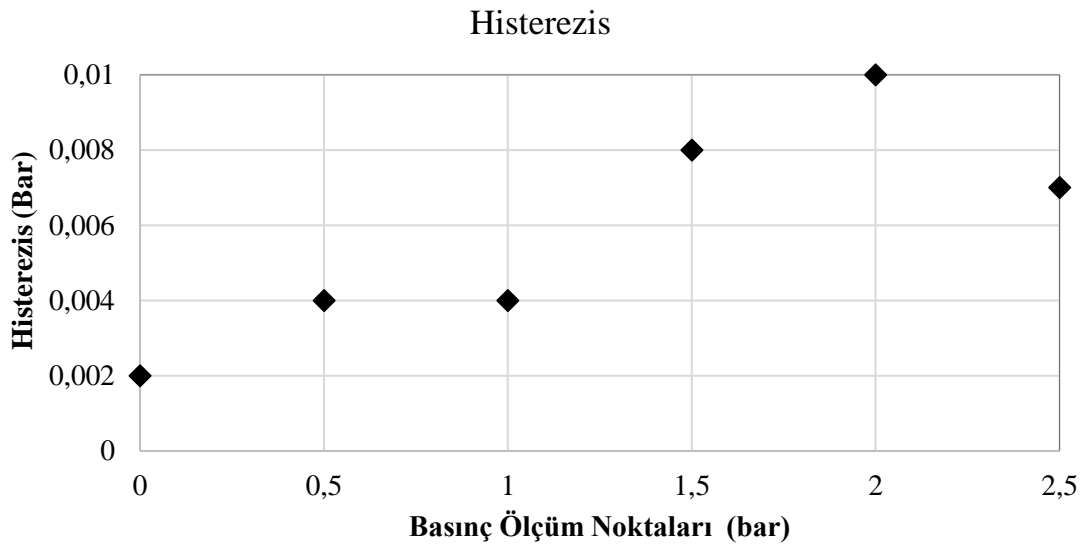
önceki basınç ölçüm değeri 2,0 bar noktasındaki sapmaya göre azaldığı görülmektedir. Bu durum maksimum basınç noktasında beklenen süre dahilinde basınç değerinde azalma olmasından kaynaklanabilmektedir.



Şekil 5.4. Basınç Ölçer İçin Artan ve Azalan Yöndeki Sapma Değerleri Değişimi

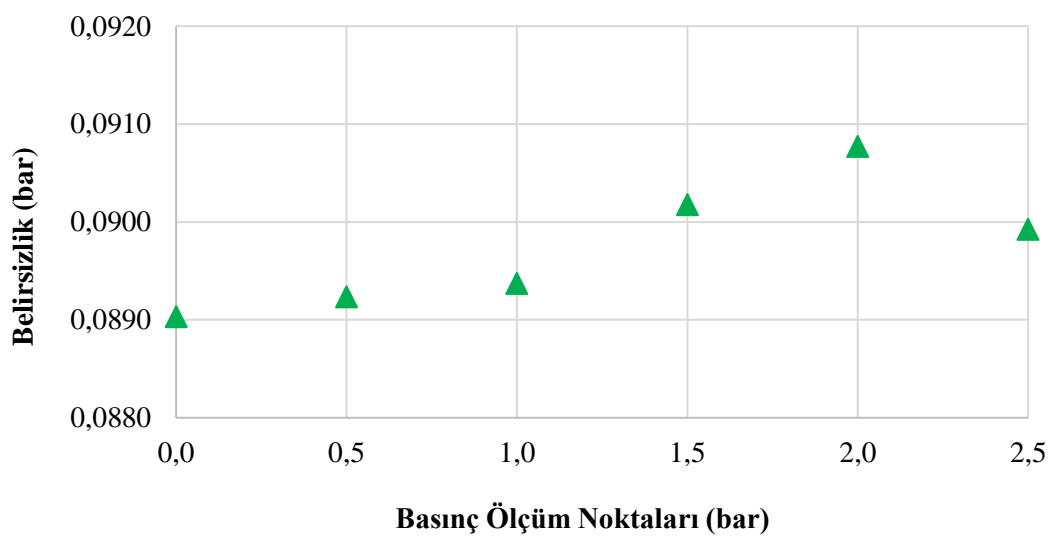
Basınç ölçerin ölçüm noktaları için artan ve azalan yöndeki histerizis değişimi Şekil 5.5'te verilmiştir. Şekil 5.5 değerlendirildiğinde her bir ölçüm noktası için histerizis değerlerinin 0,002 bar ile 0,010 bar arasında değişim gösterdiği görülmektedir. En yüksek histerizis değeri 2.0 bar ölçüm noktası için elde edilirken en düşük histerizis değeri ise 0 bar ölçümü için elde edilmiştir.

Kalibrasyonu gerçekleştirilen bütün ölçüm noktalarında elde edilen histerizis değerlerinin ortalaması 0,006 bar olarak elde edilmiştir. Bu da ölçüm cihazının geri dönüş hatasının düşük seviyede olduğunu ve ölçüm performansının yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.5. Basınç Ölçer İçin Histerizis Değerleri Değişimi

Ölçüm belirsizliğinin kalibrasyonu yapılan basınç ölçerin ölçüm noktalarına göre değişimi Şekil 5.6’te verilmiştir. Ölçüm belirsizlikleri incelendiğinde bütün ölçüm noktalarındaki genişletilmiş ölçüm belirsizlik ortalamasının 0,09 bar olduğu Şekil 5.6’dan anlaşılmaktadır. En yüksek belirsizlik değeri 0,0908 bar ile 2.0 bar ölçüm noktasından elde edilirken en düşük ölçüm belirsizliği değeri ise 0,0890 bar ile 0 bar derinde elde edilmiştir.



Şekil 5.6. Basınç Ölçer İçin Ölçüm Belirsizliği Değerleri Değişimi

Ölçüm belirsizliği parametrelili her ölçüm noktası için genel olarak aynı olsa da belirsizliği değiştiren en büyük parametre histerizis değerleri olmaktadır. 2,0 bar ölçüm noktası için histerizis değerli maksimum seviyesi olan 0,010 bar değerini almaktadır. Buradaki değişim ölçüm belirsizliğini etkilemekte ve en yüksek değerli oluşturmaktadır.



SONUÇ

Uçak bakım ve onarım süreçlerinde kullanılan basınç ölçerlerin kalibrasyonu hem uçuş emniyetinin sağlanmasında hem de bakım maliyetlerinin optimize edilmesinde stratejik bir role sahiptir. Basınç ölçerlerin doğru ve güvenilir ölçüm yapabilmesi, özellikle hidrolik, pnömatik ve yakıt sistemlerinde hassas basınç değerlerinin izlenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, cihazların uluslararası izlenebilirliği sağlanmış referans standartlarla belirli periyotlarda kalibre edilmesi zorunluluk taşımaktadır.

Kalibrasyon işlemlerinin yalnızca cihazın ölçüm doğruluğunu doğrulamakla kalmayıp, aynı zamanda ölçüm belirsizliklerinin hesaplanması ve bu belirsizliklerin sistem güvenilirliği üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi açısından da önemli olduğu görülmektedir. Belirsizlik analizi, bakım mühendislerinin cihaz seçimi, yedek parça planlaması ve bakım stratejileri gibi karar süreçlerini desteklemektedir. Ayrıca, kalibrasyonun sertifikalı ve izlenebilir yöntemlerle yapılması, havacılık sektöründe uluslararası kabul gören kalite standartlarının (ISO/IEC 17025, EASA Part-145 vb.) gerekliliklerinin yerine getirilmesine de katkı sağlamaktadır.

Bu kapsamda, uçak bakım ve onarım süreçlerinde yaygın olarak kullanılan basınç ölçerlerin kalibrasyonu örnek çalışma olarak ele alınmıştır. Çalışma, uluslararası standartlara uygun temel prosedürler (ISO 17025 ve havacılık bakım otoritelerinin tavsiye ettiği metodolojiler) doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon sürecinde, basınç ölçer referans standart ile karşılaştırılmış ve 0 bar ile 2,5 bar arasında çeşitli basınç noktalarında ölçümler yapılmıştır. Elde edilen veriler ışığında her ölçüm noktasındaki sapmalar belirlenmiştir. Sonuçlara göre en yüksek sapma 2,5 bar basınç seviyesinde yaklaşık 0,022 bar olarak tespit edilmiştir. Bu sapma, ölçüm cihazının üst çalışma aralığında belirgin bir hata eğilimine sahip olabileceğini göstermektedir.

Ölçüm belirsizliği açısından yapılan analizde, en yüksek belirsizliğin 2,0 bar seviyesinde olduğu ve bu değer için cihazın maksimum basınç aralığında ölçüm doğruluğunu koruma

konusunda sınırlı bir performans sergileyebileceğini ortaya koyduğu görülmüştür. Buna karşın, en düşük belirsizlik düşük basınç seviyelerinde elde edilmiş, bu da cihazın özellikle düşük basınç ölçümlerinde daha kararlı ve güvenilir çalıştığını göstermektedir.

Düzenli ve planlı kalibrasyon uygulamaları, ölçüm hatalarından kaynaklanabilecek operasyonel aksaklıkların önlenmesine ve gereksiz bileşen değişikliklerinin minimize edilmesine olanak tanımaktadır. Bunun yanı sıra, doğru kalibrasyon sayesinde sistem performansının sürekli izlenmesi mümkün olmakta, böylece bakım faaliyetlerinde süreklilik ve maliyet etkinliği sağlanmaktadır. Sonuç olarak, basınç ölçerlerin kalibrasyonu yalnızca bir teknik gereklilik değil, aynı zamanda havacılık bakım yönetiminin temel bileşenlerinden biri olarak stratejik bir önem taşımaktadır. Bu nedenle kalibrasyon faaliyetlerinin sürekli iyileştirilmesi, uluslararası standartlara uyumun artırılması ve otomasyon tabanlı kalibrasyon yönetim sistemlerinin yaygınlaştırılması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

1. ICAO 2014. Airworthiness Manual (Doc 9760). Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü.
<https://www.icao.int>
2. JCGM 2012. International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM). Joint Committee for Guides in Metrology.
3. CAA 2022. Calibration of Test Equipment in Aircraft Maintenance. UK Civil Aviation Authority. <https://publicapps.caa.co.uk>
4. SHGM 2023. SHT-145 Onaylı Bakım Kuruluşları Talimatı. T.C. Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü. <https://web.shgm.gov.tr>
5. ICAO 2014. Airworthiness Manual (Doc 9760). Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü.
<https://www.icao.int>
6. FAA 2005. AC 43-215: Calibration of Aircraft Magnetic Compasses. Federal Aviation Administration. https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/ac_43-215.pdf
7. CAAS 2020. Calibration Requirements for Maintenance Tools. Civil Aviation Authority of Singapore. <https://www.caas.gov.sg>
8. TÜBİTAK UME. 2013. Metroloji. TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü.
9. BIPM 2012. International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM). **Joint Committee for Guides in Metrology** (JCGM 200:2012). https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_200-2012-.pdf
10. EA (European co-operation for Accreditation). 2022. EA-4/02 M: Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration. <https://european-accreditation.org>
11. CAAS (Civil Aviation Authority of Singapore). 2020. Calibration Management and Quality Assurance in Maintenance Systems. <https://www.caas.gov.sg>
12. NATO 2019. AQAP-2070: NATO Mutual Government Quality Assurance (GQA) Process. North Atlantic Treaty Organization Standardization Office.
[https://nso.nato.int/nsohttps://www.msb.gov.tr/Content/Upload/Docs/kalite/AQAP-2070%20\(Bask%C4%B1-B,%20S%C3%BCr%C3%BCm-4\).pdf](https://nso.nato.int/nsohttps://www.msb.gov.tr/Content/Upload/Docs/kalite/AQAP-2070%20(Bask%C4%B1-B,%20S%C3%BCr%C3%BCm-4).pdf)
13. US Department of Defense 2020. Metrology and Calibration Program Handbook (TO 00-20-14). U.S. Air Force.

14. EASA 2022. Continuing Airworthiness Requirements – AMC M.A.614 & M.A.605. European Union Aviation Safety Agency. <https://www.easa.europa.eu/en>
15. EASA (European Union Aviation Safety Agency). 2022. Aircraft Maintenance Requirements – AMC M.A.614 & Related Material.
16. ICAO 2020. Manual on Testing of Ground-Based Instrument Flight Procedure Validation Systems. International Civil Aviation Organization. <https://www.icao.int>
17. NIST 2020. Calibration Guidelines for Aerospace Systems. National Institute of Standards and Technology.
18. FAA (Federal Aviation Administration). 2023. Ground Support Equipment Maintenance Standards.
19. EASA (European Union Aviation Safety Agency). 2022. Flight Inspection Considerations – AMC to Part SPA.FI.
20. Lauber, J. K. 1993. Foreword for Wiener, E.L., Helmreich, R.L., Kanki, B.G., Cockpit Resource Management, San Diego, CA: Academic Press.
21. Wiener, E.L., Helmreich, R.L., Kanki, B.G. 1993. Cockpit Resource Management, San Diego, CA: Academic Press.
22. Kanki, B.G., Helmreich, R.L., Anca, J. 1993. Crew Resource Management, San Diego, CA: Academic Press.
23. NIST (National Institute of Standards and Technology). 2020. Fundamentals of Metrology: Direct vs Indirect Calibration Methods. <https://www.nist.gov>
24. EURAMET. 2013. Calibration Guide No. 13: Guidelines on the Calibration of Thermometers. <https://www.euramet.org/publications-media-centre/calibration-guidelines/>
25. ISO. 2012. ISO 16063-21: Methods for the Calibration of Vibration Transducers – Comparison Method. <https://www.iso.org>
26. JCGM. 2008. Evaluation of Measurement Data — Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). <https://www.bipm.org/en/publications/-guides/gum.html>
27. NIST (National Institute of Standards and Technology). 2020. Guidelines for Indirect Calibration in Complex Measurement Systems. <https://www.nist.gov>

28. EURAMET (European Association of National Metrology Institutes). 2013. Calibration Guide No. 14: Guidelines on the Calibration of Pressure Transducers. <https://www.euramet.org/publications-media-centre/calibration-guidelines/>
29. ISO. 2012. ISO 16063-11: Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers – Part 11: Testing of Transducers Using a Comparison Method. <https://www.iso.org>
30. NIST (National Institute of Standards and Technology). 2020. Measurement Assurance and Calibration Best Practices. <https://www.nist.gov>
31. ISO. 2017. ISO/IEC 17025:2017 – General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/66912.html>
32. ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation). 2021. Why Accreditation is Important.
33. TÜRKAK (Türk Akreditasyon Kurumu). 2023. Akreditasyon Nedir ve Neden Gereklidir? <https://www.turkak.org.tr>
34. ISO. 2015. ISO 9001:2015 – Quality management systems – Requirements. <https://www.iso.org/standard/62085.html>
35. SAE International. 2016. AS9100D: Quality Management Systems – Requirements for Aviation, Space and Defense Organizations. <https://www.sae.org/standards-content/as9100d/>
36. NPL (National Physical Laboratory, UK). 2021. Good Practice Guide: Traceability and Calibration.
37. EASA (European Union Aviation Safety Agency). 2022. Part-145 and Continuing Airworthiness Standards – AMC M.A.614. <https://www.easa.europa.eu/en>
38. ICAO (International Civil Aviation Organization). 2020. Manual on Aircraft Maintenance Documentation and Quality Control (Doc 9760). <https://www.icao.int>
39. FAA (Federal Aviation Administration). 2023. Advisory Circular 120-17A – Maintenance Control by Reliability Methods.
40. EASA (European Union Aviation Safety Agency). 2022. Continuing Airworthiness – Part M Guidelines. <https://www.easa.europa.eu/en>
41. NLR (Netherlands Aerospace Centre). 2018. Aircraft Maintenance Optimization for Safety and Cost Efficiency. <https://www.nlr.org>

42. Boeing Commercial Airplanes. 2020. Maintenance Engineering Overview and Planning Document.
43. FAA (Federal Aviation Administration). 2023. Calibration Requirements in Aircraft Maintenance Systems. https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory-circular/ac_43-215.pdf
44. EASA (European Union Aviation Safety Agency). 2022. Continuing Airworthiness Guidelines – Measurement Tools and Calibration Standards. <https://www.easa.europa.eu/en/document-library>
45. NIST (National Institute of Standards and Technology). 2020. Measurement Assurance for Aerospace Calibration Systems.
46. FAA (Federal Aviation Administration). 2023. Aircraft Pressure Measurement and Calibration Procedures.
47. NIST (National Institute of Standards and Technology). 2020. Guidelines for Pressure Sensor Calibration in Aerospace Systems.
48. CAAS (Civil Aviation Authority of Singapore). 2020. Calibration of Pressure Measuring Devices in Aircraft Maintenance.
49. FAA (Federal Aviation Administration). 2023. Aircraft Maintenance and Environmental Monitoring Standards.
50. EASA (European Union Aviation Safety Agency). 2022. Guidance on Temperature Monitoring and Calibration – AMC M.A.614.
51. NIST (National Institute of Standards and Technology). 2020. Calibration of Temperature Sensors in Aerospace Systems.
52. FAA (Federal Aviation Administration). 2023. Electrical Systems Monitoring and Calibration Standards.
53. EASA (European Union Aviation Safety Agency). 2022. Guidance on Calibration of Electrical Test Equipment – AMC M.A.614.
54. NIST (National Institute of Standards and Technology). 2020. Calibration of Electrical Measurement Instruments in Aerospace Systems.
55. EURAMET. 2013. Calibration Guide No. 15: Calibration of Electrical Measuring Instruments.
56. ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation). 2021. The Role of Accreditation in Electrical Testing and Calibration. <https://ilac.org>

57. Polat, Y. U. 2015. Adli bilimler laboratuvarlarında kullanılan ölçüm cihazlarının kalibrasyon parametrelerinin belirlenmesi ve kalibrasyon prosedürlerinin oluşturulması [Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, Adli Tıp Enstitüsü].
58. Arpacık, H. 2019. ISO/IEC 17025:2017 standardına göre kalibrasyon laboratuvarı modellenmesi ve adli bilimler laboratuvarlarında kullanılan sıcaklık cihazlarının uygunluğu [Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Adli Tıp ve Adli Bilimler Enstitüsü].
59. Tuğcu, M. B. 2018. Tork dönüştürücü kalibrasyonu ve çevresel koşulların ölçüm belirsizliği üzerindeki etkilerinin incelenmesi [Yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
60. Özal, A. S. 2023. Dinamik basınç dönüştürücülerinin laboratuvar ortam sıcaklığı ve basıncındaki değişikliklere tepkisinin yarı statik/yarı dinamik ve tam dinamik kalibrasyon yöntemleriyle incelenmesi [Yüksek lisans tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
61. Karakoç, Ö. 2022. İvmeölçer hata parametrelerinin analizi, kalibrasyonu ve modellenmesi [Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
62. NIST (National Institute of Standards and Technology). 2020. Calibration for Aerospace Measurement Systems.
63. FAA (Federal Aviation Administration). 2023. Aircraft Maintenance and Calibration Standards.
64. EASA (European Union Aviation Safety Agency). 2022. AMC M.A.614 – Performance-Based Maintenance and Calibration. <https://www.easa.europa.eu/en>
65. NIST (National Institute of Standards and Technology). 2020. Cost Impacts of Measurement System Calibration in Aerospace Maintenance.
66. FAA (Federal Aviation Administration). 2023. Economic Assessment of Aircraft Maintenance Practices.
67. DKD-R 6-1. 2014. Calibration of Pressure Gauges. Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB). Germany.
68. Euramet Cg-17 Ver.4.1. 2022. Guidelines on the Calibration of Electromechanical and Mechanical Manometers. The European Association of National Metrology Institutes.

69. EA-4/02. 2021. Evaluation of the uncertainty of measurement in calibration,
European co-operation of Accreditation, Paris.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Sevim DURMUŞ
Uyruğu: Türkiye (T.C.)

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	MSÜ Hava Harp Okulu Havacılık ve Uzay Müh.	2018

YAYINLAR

- 1- Durmuş, S., & Demir, L. (2023, 22-23 Haziran). Havacılıkta alternatif yakıt kullanımı. 3. Rumeli Mühendislik Eğitimi Sempozyumu, Silivri, İstanbul.
- 2- Durmuş, S., & Ata, İ. (2025, July 4). Calibration applications for aircraft maintenance. 16th International Istanbul Congress, Istanbul, Turkey.