

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BOYUTSAL ÖLÇÜMLER METODU İLE PİSTON SİLİNDİR
ÜNİTELERİNİN EFEKTİF ALANININ BELİRLENMESİ

AHMET TÜRK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE
2019

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BOYUTSAL ÖLÇÜMLER METODU İLE PİSTON
SİLİNDİR ÜNİTELERİNİN EFEKTİF ALANININ
BELİRLENMESİ

AHMET TÜRK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. SAVAŞ BERBER

GEBZE
2019

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**DETERMINATION OF EFFECTIVE AREA
OF PISTON CYLINDER UNITS BY MEANS
OF DIMENSIONAL MEASUREMENT
METHOD**

AHMET TÜRK
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF PHYSICS

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. SAVAŞ BERBER

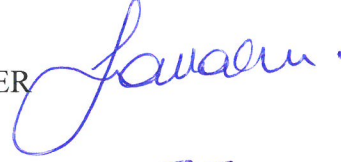
GEBZE
2019

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 23/01/2019 tarih ve 2019/05 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 08/02/2019 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ahmet TÜRK'ün tez çalışması Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Savaş BERBER



ÜYE

: Prof. Dr. Faik MİKAİLZADE



ÜYE

: Prof. Dr. Kemal ÖZDOĞAN



ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

..../..../..... tarih ve/..... sayılı kararı.



DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve/..... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından/...../..... tarihinde tez savunma sınavı yapılan'ın tez çalışması Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) :

ÜYE :

ÜYE :

ÜYE :

ÜYE :

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

Doç. Dr. Arif Çağdaş AYDINOĞLU

Gebze Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

Bu çalışmada basınç metrolojisi alanında referans cihaz olarak kullanılan pistonlu basınç standartlarının boyutsal ölçümler vasıtası ile efektif alanının belirlenmesi incelenmiştir.

İlk aşamada, boyutsal ölçüm cihazları kullanılarak mümkün olan en düşük belirsizlikle piston-silindir ünitesine ait mutlak çap ve form ölçümleri (doğrusallık ve yuvarlaklık ölçümleri) gerçekleştirilmiştir. Boyutsal ölçüm verilerinden elde edilen datalar en küçük kareler yöntemi ile birleştirilerek piston-silindir ünitesine ait kuş kafesi modeli elde edilmiştir. Piston ve silindire ait yarıçap değerleri aynı koordinat düzlemine aktararak, piston ve silindire ait yeni yarıçap değerleri elde edilmiştir. Elde edilen yarıçap değerleri, Dadsons teorisi kullanılarak sayısal integrasyon yöntemi ile piston-silindir ünitesine ait efektif alan değerinin elde edilmesinde kullanılmıştır. Piston-silindir ünitesine ait yarıçap verileri eşit aralıklı olduğundan dolayı sayısal integrasyon yöntemi olarak Simpsons' 3/8 yöntemi kullanılmıştır. Boyutsal ölçümler yöntemi ile hesaplanan efektif alan değeri, aynı piston-silindir ünitesi için karşılıklı akışa dayalı yöntemle elde edilen daha önceki alan değerleri ile kıyaslandığında sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür.

Son aşamada ise boyutsal ölçüm datalarına ait belirsizlik değerleri kullanılarak efektif alan belirsizliği hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Pistonlu Basınç Standartları, Piston-Silindir Ünitesi, Boyutsal Ölçümler Metodu, Karşılıklı Akışa Dayalı Metod, Efektif Alan, Dadsons Teori.

SUMMARY

In this study, the determination of the effective area of pressure balances, which are used as a reference device in the field of pressure metrology, by means of dimensional measurement method are investigated.

In the first stage, absolute diameter and form measurements (straightness and roundness measurements) of the piston-cylinder unit were performed with the lowest possible uncertainty by using dimension measuring devices. The data obtained from the dimensional measurement was combined with the least squares method to get the bird cage model of the piston-cylinder unit. The radius values of the piston and cylinder are transferred to the same coordinate plane and the new radius values of the piston and cylinder are obtained. The radius values were used to obtain the effective area of the piston-cylinder unit by numerical integration method using Dadsons theory. Since the radius data of the piston-cylinder unit are equally spaced, the Simpsons' 3/8 method was used as the numerical integration method. When the effective area value which is determined by means of dimensional measurement is compared with the effective area which was determined by cross-float method in the past, it is seen that the results are consistent with each other.

Then, the uncertainty values of the dimensional measurement data were used to determine the effective area uncertainty.

Key Words: Pressure Balances, Piston-Cylinder Unit, Dimensional Measurement Method, Cross-Float Method, Effective Area, Dadsons Theory.

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimim boyunca yardımlarını esirgemeyen ve bana yol gösteren sayın danışmanım Prof. Dr. Savaş BERBER'e,

Eğitim hayatım boyunca bana her zaman destek olan rahmetli babam Mustafa TÜRK'e, annem Şengül TÜRK'e, rahmetli babaannem Emine TÜRK'e, dedem İsmail TÜRK'e, ağabeyim Halil TÜRK'e ve amcam Mehmet Ali TÜRK'e,

ve varlığıyla bana her zaman güç veren sevgili eşim Halime TÜRK'e, oğullarım Mustafa ve Eymen Kerem TÜRK'e, kızım Amine Eslem Türk'e, en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	2
2. METROLOJİK TERİMLER	3
2.1. İzlenebilirlik	3
2.2. Ölçüm Belirsizliği	3
3. PİSTONLU BASINÇ STANDARTLARI	5
3.1. Akışkan Çeşidine Göre Pistonlu Basınç Standartları	7
3.1.1. Hidrolik Pistonlu Basınç Standartları	7
3.2.2. Pnömatik Pistonlu Basınç Standartları	7
3.2. Konstrüksiyona Göre Pistonlu Basınç Standartları	7
3.2.1. Basit Tip	8
3.2.2. Geri-Girişli Tip	8
3.2.3. Kontrol Edilmiş Boşluklu Tip	9
4. PİSTON-SİLİNDİR ÜNİTESİ EFEKTİF ALANI VE DADSON	10
TEORİ	
4.1. İdeal Piston-Silindir Ünitesi Efektif Alanı	10
4.2. İdeal Olmayan Piston-Silindir Ünitesi Efektif Alanı	12
5. BASINÇ METROLOJİSİNDE EFEKTİF ALAN BELİRLEME	16
YÖNTEMLERİ	
5.1. Karşılıklı Akışa Dayalı Yöntem	16
5.2. Boyutsal Ölçümler Yöntemi	17
5.2.1. Boyutsal Ölçümler	17
5.2.1.1. Mutlak Çap Ölçümleri	17

5.2.1.2. Form Ölçümleri	18
5.2.1.2.1. Yuvarlaklık Ölçümleri	18
5.2.1.2.2. Doğrusallık Ölçümleri	18
5.2.2. Boyutsal Ölçüm Verilerinin Birleştirilmesi	19
5.2.3. Boyutsal Verilerden Efektif Alan Hesaplanması	20
5.3. Boyutsal Ölçümlerle Boyutsal Ölçümler Yöntemi ve Karşılıklı-Akışa Dayalı Yöntemin Karşılaştırılması	20
6. GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR	23
6.1. Seçilen Referans Piston Silindir Ünitesi	24
6.2. Seçilen Piston Silindir Ünitesine Ait Boyutsal Ölçümler	27
6.2.1. Mutlak Çap Ölçümleri	25
6.2.2. Form Ölçümleri	26
6.2.2.1. Yuvarlaklık Ölçümleri	27
6.2.2.2. Doğrusallık Ölçümleri	30
6.3. Boyutsal Ölçüm Verilerinin Birleştirilmesi	35
6.4. Yarıçap Değerlerinin Yeni Koordinat Düzlemine Aktarılması	46
6.5. Efektif Alanın Belirlenmesi	51
6.6. Efektif Alan Belirsizliğinin Hesaplanması	54
6.7. Sonuçların Karşılaştırılması	54
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	57

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
M	: Kütle
ρ_a	: Hava yoğunluğu
ρ_m	: Kütle yoğunluğu
V	: Hacim düzeltmesi
ρ_f	: Akışkanın yoğunluğu
σ	: Yüzey gerilim katsayısı
C	: Piston çevresi
A_0	: 20°C ve atmosferik basınç altındaki efektif alan
λ	: Basınç distorsiyon katsayısı
α	: Piston lineer genleşme katsayısı
β	: Silindir lineer genleşme katsayısı
Δt	: Sıcaklık farkı
CMM	: Koordinat Ölçüm Makinesi
Y	: Yuvarlaklık profili
D	: Doğrusallık profili
Y1	: 1.Yuvarlaklık profili
D1	: 1.Doğrusallık profili
r	: Yarıçap
$u(A_0)$	: Efektif Alan Belirsizlik Değeri
$u(r)$	: Yarıçap Belirsizlik Değeri
LVDT	: Lineer Değişken Fark Transformatörü
TÜBİTAK UME	: TÜRKİYE Ulusal Metroloji Enstitüsü
PTB	: Almanya Ulusal Metroloji Enstitüsü
LNE	: Fransa Ulusal Metroloji Enstitüsü
MIKES	: Finlandiya Ulusal Metroloji Enstitüsü

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
3.1: Kontrüksiyonuna göre pistonlu basınç standartları.	8
4.1: İdeal piston-silindir ünitesi.	10
4.2: İdeal olmayan piston-silindir ünitesi.	13
5.1: Kuş kafesi modeli.	20
6.1: LVDT.	24
6.2: LVDT' ye ait şematik gösterim.	25
6.3: Pistona ait yuvarlaklık sapma profilleri.	28
6.4: Silindire ait yuvarlaklık sapma profilleri.	29
6.5: Pistona ait doğrusallık sapma profilleri.	32
6.6: Silindire ait doğrusallık sapma profilleri.	34
6.7: Piston için kuş kafesi modeli.	38
6.8: Silindir için kuş kafesi modeli.	38
6.9: Pistona ait doğrusallık yarıçap profilleri.	39
6.10: Piston yuvarlaklık yarıçap profilleri.	40
6.11: Silindir doğrusallık yarıçap profilleri.	42
6.12: Silindir yuvarlaklık yarıçap profilleri.	43
6.13: Silindir için referans koordinat düzlemi ve yeni koordinat düzlemi.	46

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
6.1: Pistona ait çap ölçüm değerleri.	26
6.2: Silindire ait çap ölçüm değerleri.	26
6.3: Pistona ait yuvarlaklık sapma değerlerinin bir kısmı.	27
6.4: Silindire ait yuvarlaklık sapma değerlerinin bir kısmı.	29
6.5: Pistona ait doğrusalılık sapma değerlerinin bir kısmı.	31
6.6: Silindire ait doğrusalılık sapma değerlerinin bir kısmı.	33
6.7: 1.dogrusalılık profiline ait yarıçap denklemleri	36
6.8: 1.yuvarlaklık profiline ait yarıçap denklemleri	36
6.9: Piston üzerinde üst üste gelen doğrusalılık ve yuvarlaklık yarıçaplarının farklarının karelerinin toplamı	37
6.10: Pistona ait doğrusalılık yarıçap değerlerinin bir kısmı.	39
6.11: Pistona ait yuvarlaklık yarıçap değerlerinin bir kısmı.	40
6.12: Silindire ait doğrusalılık yarıçap değerlerinin bir kısmı.	41
6.13: Silindire ait yuvarlaklık yarıçap değerlerinin bir kısmı.	42
6.14: Piston doğrusalılık yarıçap değerlerine ait x,y ve z koordinat değerleri.	44
6.15: Silindir doğrusalılık yarıçap değerlerine ait x,y ve z koordinat değerleri.	45
6.16: Piston ve silindire ait katsayılar.	46
6.17: Verilerin yeni koordinat düzlemine taşınması sonucunda elde edilen yeni pistona yarıçap değerleri.	48
6.18: Pistona ait yarıçap verilerinin yeni koordinat düzlemine aktarılmadan önceki ve sonraki değerleri arasındaki farklar.	49
6.19: Verilerin yeni koordinat düzlemine taşınması sonucunda elde edilen yeni silindir yarıçap değerleri.	50
6.20: Silindire ait yarıçap verilerinin yeni koordinat düzlemine aktarılmadan önceki ve sonraki değerleri arasındaki farklar.	51
6.21: Piston ve silindire ait yarıçapların ortalaması	52
6.22: Piston ve silindire ait yarıçapların dairesel fit değerleri	53
6.23: 765 seri numaralı piston silindir ünitesine ait efektif alan değerleri.	55

1. GİRİŞ

Basınç, birim yüzeye etki eden dik kuvvet olarak tanımlanır. SI birim sisteminde kütle, uzunluk, zaman, ışık şiddeti, sıcaklık, madde miktarı ve elektrik akımı olmak üzere 7 adet temel büyüklük tanımlanmıştır. Basınç birimi olan Pascal(Pa), 7 temel büyüklükten uzunluk, kütle ve zamanın etkileşmesi sonucunda elde edilen türetilmiş bir büyüklüktür.

Metroloji ölçüm bilimidir. SI birim sisteminde belirtilen temel büyüklüklerin ve bu büyüklüklerin etkileşimi sonucunda oluşan türetilmiş büyüklüklerin tanımlanması, bilimsel yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmesi ve izlenebilirlik zincirinin oluşturulmasını sağlar [1]. Metroloji bilimi teknolojinin gelişmesiyle beraber daha fazla önem kazanmakta ya da daha doğru bir ifade ile metrolojinin önemi anlaşılmaktadır. Bilim ve teknolojinin ilerlemesi için yüksek doğrulukta ve düşük belirsizlikle yapılan ölçümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle metroloji sürekli gelişmekte, ortaya çıkan ihtiyacın karşılanabilmesi için yeni ölçüm teknikleri geliştirilmektedir. Metrolojinin ilerlemesi hayatı kolaylaştırmakta, üretim kalitesini arttırmakta, maliyetleri azaltmakta, yeni teknolojik gelişmelere yol açmakta ve yeni bilimsel bilgilere ulaşmayı sağlamaktadır.

Basınç metrolojisinde amaç, basınç birimi olan Pascal'ın (Pa) bilimsel yöntemler kullanılarak laboratuvar ortamında gerçekleştirilmesi, ölçülmesi ve ölçülen değerin dağıtılması vasıtasıyla izlenebilirlik zincirinin oluşturulmasını sağlamaktır. Bu amaçla basınç metrolojisinde pistonlu basınç standartları, manometre, basınç dönüştürücü olmak üzere çeşitli cihazlar kullanılmaktadır. Bu cihazlardan pistonlu basınç standartları yüksek metrolojik özelliklerinden dolayı basınç metrolojisinde referans cihaz olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla pistonlu basınç standartlarının izlenebilirliğinin sağlanması basınç metrolojisinde önemli bir yere sahiptir. Bu amaçla ulusal metroloji enstitüleri tarafından farklı yöntemler kullanılarak pistonlu basınç standartlarının kalibrasyonu yapılmakta ve böylelikle izlenebilirlik zinciri sağlanmaktadır.

Pistonlu basınç standartlarının kalibrasyonunda ulusal metroloji enstitüleri tarafından yaygın olarak karşılıklı akışa dayalı metot (cross-float) kullanılmaktadır. Karşılıklı akışa dayalı metotta, kalibre edilmek istenen pistonlu basınç standardı,

efektif alanı ve distorsiyon katsayısı bilinen referans pistonlu basınç standardı ile karşılaştırılarak bu piston-silindir ünitesine ait efektif alan ve basınç distorsiyon katsayısı hesaplanır. Ancak bu yöntemde, kalibre edilmiş bir referans cihaza ihtiyaç duyulduğundan dolayı, bu yöntemi kullanan ulusal metroloji enstitülerinin basınç laboratuvarları, izlenebilirliklerinin sağlanması noktasında yurt dışındaki başka bir enstitüye bağımlıdırlar.

Pistonlu basınç standartlarının kalibrasyonunda kullanılan diğer bir yöntem ise boyutsal ölçümler vasıtası ile efektif alan hesaplanmasıdır. Bu yöntemle, piston ve silindire ait yapılan mutlak çap ve form ölçümlerinden elde edilen boyutsal veriler kullanılarak efektif alan hesaplanabilmektedir[2]. Dünyanın önde gelen ulusal metroloji enstitüleri tarafından kullanılmakta olan bu yöntem ile ulusal metroloji enstitülerinin basınç laboratuvarları izlenebilirliklerini kendi enstitülerinden sağlayabilmektedir.

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Bu çalışmada basınç metrolojisi alanında referans cihaz olarak kullanılmakta olan pistonlu basınç standartlarının boyutsal ölçümler vasıtası ile efektif alanının belirlenmesi ve bu alana ait belirsizlik hesaplamalarının yapılması hedeflenmektedir.

Tez çalışması sonucunda ülkemizdeki basınç ölçümleri alanındaki izlenebilirliğin yurtiçinden sağlanması ve basınç ölçümlerinde daha düşük belirsizlik değeri sağlamak amaçlanmaktadır.

Pnömatik düşük basınç aralığında kullanılan piston-silindir ünitesine ait boyutsal ölçümler yapılarak buradan elde edilen yarıçap değerleri kullanılarak sayısal integrasyon yöntemi ile efektif alan hesaplanacaktır. Düşük basınç araladığındaki piston-silindir ünitesinin kalibre edilmesi ile izlenebilirlik daha yüksek çalışma basınç aralığına sahip pistonlara karşılıklı akışa dayalı yöntem ile aktarılabilecektir.

2. METROLOJİK TERİMLER

2.1. İzlenebilirlik

Bir ölçüm cihazı ile yapılan ölçüm sonucunun, kesintisiz olarak belgelendirilmiş bir zincir aracılığıyla bir referans cihazla ilişkilendirilebilmesine izlenebilirlik denir [1]. Fiziksel bir büyüklüğün birimi ulusal metroloji enstitüleri tarafından birincil standartlar kullanılarak laboratuvar ortamında gerçekleştirilirler. Gerçekleştirilen fiziksel büyüklük birimi, ulusal metroloji enstitüleri tarafından birincil ve ikincil standartların kalibre edilmesi amacıyla dağıtılırlar. Ulusal metroloji enstitüleri tarafından fiziksel büyüklüğün bir zincir boyunca ikincil standartlara dağıtılması esnasında ilgili belirsizlik de bu zincir boyunca aktarılır.

İzlenebilirlik sayesinde farklı zamanlarda farklı lokasyonlarda yapılan ölçümlerin güvenilir, tekrarlanabilir ve birbirine eşdeğer olması sağlanmış olur. İzlenebilir bir cihazla yapılan ölçüm sonucu, uluslararası kabul görmüş ölçüm referansları ile ilişkilendirilebilir.

Metrolojik ölçümün izlenebilir olmayan bir cihaz ile yapılması sonuçların güvenilir olmaması anlamına gelir. Dolayısıyla metrolojide izlenebilirlik gereklidir.

2.2. Ölçüm Belirsizliği

Ölçüm belirsizliği, kısaca, ölçüm değerinin geçerliliği hakkındaki şüphe olarak tanımlanabilir [2]. Hiçbir ölçüm mükemmel değildir. Ölçüm esnasında çeşitli faktörlerden kaynaklı hatalar söz konusudur. Bu hatalar operatör kaynaklı olabileceği gibi çevresel faktörlerden, ölçüm cihazından, standartlardan, kullanılan yöntemlerden, yaklaşımlardan, tanımlardan da kaynaklanabilir. Ölçüm üzerinde bilinen tüm hata kaynakları belirlenip gerekli düzeltmeler yapılsa dahi ölçüm sonucunda hala şüphe vardır.

Fiziksel bir ölçümün sonucu verilirken, ölçümün kalitesi ve güvenilirliği hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlayan bir parametre ölçüm sonucu ile birlikte verilmelidir. Bu parametre ölçüm belirsizliğidir.

Ölçüm belirsizliğinin birçok bileşeni vardır. Ancak bu bileşenler 2 grupta incelenebilir: A tipi belirsizlik bileşenleri ve B tipi belirsizlik bileşenleri [2]. A tipi belirsizlik bileşeni ölçülen değerin istatistiksel analizi sonucunda elde edilir. Genellikle ölçümün tekrarlanabilirliğinden gelen belirsizlik bileşeni bu grupta yer alır.

İstatistiksel olmayan, genelde tecrübe ve diğer kazanımlara bağlı olarak elde edilen belirsizlik bileşenleri ise B tipi belirsizlik bileşenlerini oluşturur. Cihazın sonlu çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik bileşeni bu gruba örnek olarak verilebilir.

Ölçüm belirsizliğine neden olan bazı faktörler vardır. Bunlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır.

- Ölçülen büyüklüğün tanımındaki eksiklik
- Ölçümün gerçekleştirildiği çevre şartlarındaki değişim
- Operatör kaynaklı hatalar
- Ölçüm yapılan cihazların göstergelerinin sınırlı sayıda çözünürlüğe sahip olması

3. PİSTONLU BASINÇ STANDARTLARI

Pistonlu basınç standartlarının dizayn edilip kullanılması 19.yüzyılın başlarına dayanmaktadır. Bilim ve teknoloji alanında meydana gelen ilerlemeler sonucunda farklı basınç aralıklarında yapılacak basınç ölçümlerine ihtiyaç duyulmuştur. Özellikle buharlı makinelerin geliştirilmesi, sıvıların ve gazların farklı sıcaklık ve basınçlardaki termodinamik özelliklerinin anlaşılma ihtiyacı pistonlu basınç standartlarının doğmasına neden olmuştur. Diğer taraftan, bilim ve teknolojinin gelişmesiyle beraber basınç ölçümlerinde ortaya çıkan ihtiyacı karşılamak için zaman içerisinde pistonlu basınç standartlarında köklü değişiklikler meydana gelmiş ve farklı konstrüksiyonlara sahip pistonlu basınç standartları geliştirilmiştir [3].

Pistonlu basınç standartları, çok iyi derecede işlenmiş yüzeye sahip piston ve silindirden oluşmaktadır. Pistonlu basınç standartlarında, piston ve silindir arasındaki mesafe birkaç mikron mertebesinde olmasına rağmen, piston silindir içerisinde serbestçe hareket edebilmektedir ve dönebilmektedir.

İdeal bir piston-silindir ünitesi elde edebilmek için [4],

- Piston ve silindir üretiminde kullanılan maddenin yüksek basınca dayanıklı olması, basınç altında geometrik özelliklerinin çok fazla değişmemesi ve oldukça düşük lineer genleşme katsayısına sahip olması gerekir.
- Piston silindir ünitesi boyunca, atmosferik basınç altındaki efektif alan değerinin sabit olması gerekir.
- Piston ve silindir arasındaki boşluğun birkaç mikron mertebesinde (genellikle 0,5 μm -1 μm arasında) ve bu boşluğun piston-silindir ünitesi boyunca sabit olması gerekir.
- Pistonun denge durumunda iken sahip olduğu düşme hızının oldukça düşük ve tekrarlanabilir olması gerekir.

Yukarıda ifade edilen özelliklerin sağlanabilmesi için piston ve silindirin düzgün bir geometriye sahip olmalıdır. İstenilen geometrinin elde edilebilmesi için kullanılan malzemenin mikron mertebesinde işlenebilme özelliğine sahip olması gerekir.

Piston-silindir ünitesi üretiminde istenilen özelliklerin elde edilebilmesi için genellikle farklı oranlarda kobalt ya da nikel ile zenginleştirilmiş tungsten-carbide kullanılır. Bunun yanında paslanmaz çelikten ve seramikten üretilmiş piston silindir üniteleri de mevcuttur.

Pistonlu basınç standartlarının çalışma ilkesi, piston-silindir efektif alanına uygulanan akışkan basıncının, piston üzerine konulan kütleler vasıtası ile dengelenerek pistonun akışkan içerisinde yüzdürülmesi prensibine dayanır. Yüzme durumuna getirilmiş olan piston üzerindeki kütleler ile beraber döndürülür. Böylelikle piston ve silindir arasındaki sürtünmeden kaynaklanan kuvvetler minimize edilmiş olur. Bu durumda pistonlu basınç standardı tarafından oluşturulan basınç, (2.1)'de gösterildiği gibi, piston üzerine etki eden kuvvetler toplamının efektif alana bölünmesi ile bulunur.

$$p = \frac{F}{A_e} \quad (2.1)$$

Piston üzerine uygulanan kuvvetler 3 başlık altında toplanabilir. Bunlar;

- Pistonun kendi kütlesi ve piston üzerine konulan diğer kütlelerden kaynaklanan yerçekimi kuvveti,
- Havanın kaldırma kuvveti,
- Pistonun içerisinde yüzdüğü sıvının kaldırma kuvveti ve yüzey geriliminden kaynaklanan kuvvetler.

Piston-silindir ünitesinin A_e efektif alanı ise, atmosfer basıncı ve 20 °C sıcaklıktaki efektif alanına, piston silindir ünitesine etki eden akışkan basıncına ve piston-silindir ünitesinin sıcaklığına bağlıdır.

Pistonlu basınç standartları tarafından oluşturulan basınç hesabında ($p = \frac{F}{A_e}$) kullanılan akışkanın çeşidine göre farklı formlarda yazılır.

3.1. Akışkan Çeşidine Göre Pistonlu Basınç Standartları

Kullanılan akışkan çeşidine göre pistonlu basınç standartları hidrolik ve pnömatik pistonlu basınç standartları olmak üzere ikiye ayrılır.

3.1.1. Hidrolik Pistonlu Basınç Standartları

Hidrolik pistonlu basınç standartlarında akışkan olarak sıvı kullanılır. Bu durumda pistonlu basınç standardı tarafından üretilen basınç (2.2) ile hesaplanır [5].

$$p = \frac{Mg \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right) \pm V(\rho_f - \rho_a) + \sigma C}{A_0(1 + \lambda p)(1 + (\alpha + \beta)\Delta t)} \quad (2.2)$$

Hidrolik pistonlu basınç standartlarında kullanılabilen birçok sıvı vardır. Ancak bun sıvıların içerisinde özellikle sebaceate, yaygın şekilde ülkelerin ulusal metroloji enstitülerindeki basınç laboratuvarları tarafından tercih edilmektedir.

3.1.2. Pnömatik Pistonlu Basınç Standartları

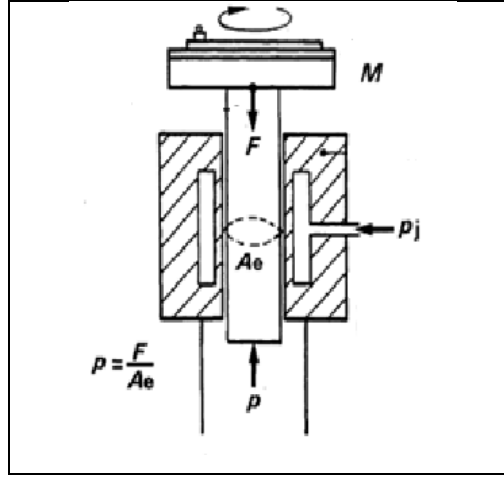
Pnömatik pistonlu basınç standartlarında akışkan olarak gaz kullanılır. Bu durumda pistonlu basınç standardı tarafından üretilen basınç (2.3) ile hesaplanır [5].

$$p = \frac{Mg \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right)}{A_0(1 + \lambda p)(1 + (\alpha + \beta)\Delta t)} \quad (2.3)$$

Pnömatik pistonlu basınç standartlarında genel olarak azot gazı tercih edilir.

3.2. Konstrüksiyonuna Göre Pistonlu Basınç Standartları

3 farklı tipte piston-silindir ünitesi mevcuttur. Bu piston-silindir üniteleri Şekil 3.1'de gösterilmiştir [3].



Şekil 3.1: Konstrüksiyonuna göre pistonlu basınç standartları.

3.2.1. Basit Tip:

Genel olarak basınç metrolojisinde basit konstrüksiyona sahip piston silindir üniteleri kullanılır. Bu piston-silindir ünitelerinde ölçülecek basınç pistonun alt yüzeyine etki eder. ($p_j=0$) Basit konstrüksiyona sahip piston-silindir üniteleri ile 500 MPa basınca kadar olan basınç ölçümleri gerçekleştirilebilir [3]. Genellikle ülkelerin ulusal metroloji enstitülerinde yaygın olarak kullanılmakta olan piston-silindir ünitesi basit tiptir.

3.2.2. Geri-Girişli Tip:

Geri girişli konstrüksiyona sahip piston silindir ünitelerinde aynı basınç hem pistonun alt yüzeyine hem de silindirin dış yüzeyine etki eder ($p_j=p$). Silindirin dış yüzeyine etki eden basınç silindirde deformasyona neden olarak piston ve silindir arasındaki boşluğun değişmesine neden olur. Bu tip piston silindir üniteleri ile basit tipteki piston silindir ünitelerine göre daha yüksek basınçlar elde edilebilir [3][4].

3.2.3. Kontrol Edilmiş Boşluklu Tip:

Kontrol edilmiş boşluklu konstrüksiyona sahip piston silindir ünitelerinde silindirin dış yüzeyine değiştirilebilir bir basınç etki eder ($p_j \neq p$). Burada amaç silindire etki eden ayarlanabilir basınç ile piston-silindir arasındaki boşluğun kontrol altında tutulmasıdır. Bu tip piston-silindir üniteleri ile 500 MPa basınç değerinden daha yüksek basınçlarda ölçümler yapılabilmektedir [4].

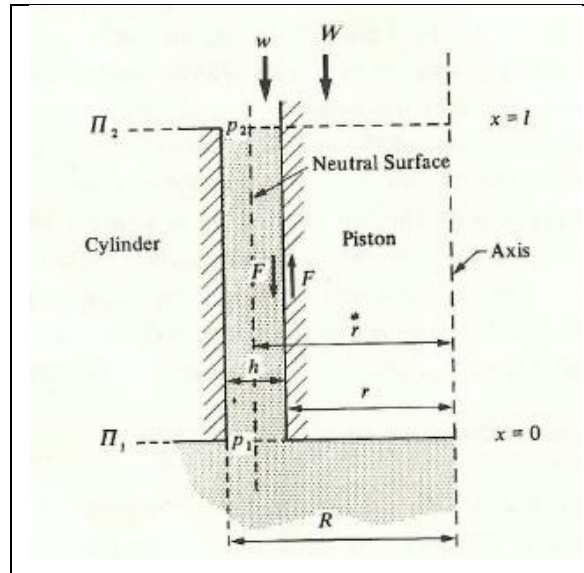
4. PİSTON-SİLİNDİR ÜNİTESİ EFEKTİF ALANI VE DADSON TEORİ

Dadson Teori'ye göre; piston-silindir ünitelerinin efektif alanı piston ve silindirin alanlarından farklı olarak piston ve silindir arasındaki hayali bir alandır. Dadson yaptığı çalışmada öncelikle ideal bir piston-silindir ünitesi için efektif alanın tanımını bulmuş, daha sonra çalışmasını ideal olmayan üniteler için tekrarlamıştır. Bölüm 4.1 ve 4.2'de Dadson Teori açıklanacaktır [6].

4.1. İdeal Piston-Silindir Ünitesi İçin Efektif Alan

İdeal bir piston-silindir ünitesinin aşağıdaki özelliklere sahip olduğu kabul edilir.

- Piston ve silindir kusursuz silindirik yüzeylere sahiptir (herhangi bir girinti ya da çıkıntı bulunmaz),
- Piston ve silindirin kesit alanları tamamen daireseldir,
- Piston ve silindir tam olarak dikey ve çakışık eksenlere sahiptirler.



Şekil 4.1: İdeal Piston-Silindir Ünitesi.

Şekil 4.1’de, ideal bir piston-silindir ünitesine ait şekil verilmiştir. $x=0$ noktasında pistonun alt yüzeyine p_1 basıncı, $x=l$ noktasında ise pistonun üst yüzeyine p_2 basıncı etki etmektedir. Π_1 , $x=0$ noktasındaki atmosfer basıncını, Π_2 ise $x=l$ noktasındaki atmosfer basıncını sembolize etmektedir. Dolayısıyla p_2 basıncı Π_2 basıncına eşittir.

İdeal bir piston-silindir ünitesine yukarı yönlü etki eden kuvvetler şunlardır:

- Pistonun alt ve üst yüzeyine etki eden basınç farkından kaynaklanan yukarı yönlü kuvvet, $\pi r^2(p_1 - p_2)$
- Yukarı yönlü hareket etme eğiliminde olan sıvının, pistonun yan yüzeylerine uyguladığı sürtünme kuvveti, F .

P_1 basıncı altında olan piston, üzerine konulan W ağırlığındaki kütleler vasıtasıyla denge (yüzme) durumuna getirildiğinde, piston üzerindeki kuvvetlerin eşitliği aşağıdaki şekilde yazılır.

$$W = \pi r^2(p_1 - p_2) + F \quad (4.1)$$

Diğer taraftan, piston ve silindir arasındaki boşlukta yer alan akışkanın hız denklemleri incelendiğinde, bu boşluğu çevreleyen yüzeylerde akışkan hızının sıfır, yaklaşık olarak boşluğun ortasında ise akışkan hızının maksimum değere sahip olduğu görülür. Hızın maksimum olduğu noktada bitişik sıvı katmanları arasındaki sürtünme ise sıfırdır.

İdeal piston-silindir ünitesine ait verilen şekilde r^* yarıçapına sahip silindirik yüzey “nötr yüzey” olarak adlandırılır. Piston-silindir ünitelerinde, piston ve silindir arasındaki boşluğun çok küçük olmasından dolayı, nötr yüzeyin bu boşluğun orta noktasında olduğu kabul edilir.

Nötr yüzey ile piston yüzeyi arasında kalan akışkanın ağırlığı w , akışkanı çevreleyen yüzeylerde sıvıya etki eden toplam sürtünme kuvveti F olsun. Bu durumda nötr yüzey ile piston yüzeyi arasında kalan akışkana etki eden kuvvetlerin eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$w + F = \pi(r^{*2} - r^2)(p_1 - p_2) \quad (4.2)$$

4.1 ve 4.2 numaralı denklemler taraf tarafa toplanırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$W + w = \pi r^{*2}(p_1 - p_2) \quad (4.3)$$

Bu durumda ideal piston-silindir ünitesine ait efektif alan denklemi elde edilmiş olur.

$$S = \frac{W + w}{(p_1 - p_2)} = \pi r^{*2} \quad (4.4)$$

Yukarıda verilen (4.4) numaralı denkleme göre piston-silindir ünitelerinin efektif alanı sınırları piston ve silindir arasındaki boşlukta yer alan nötr yüzeyin alanına eşittir.

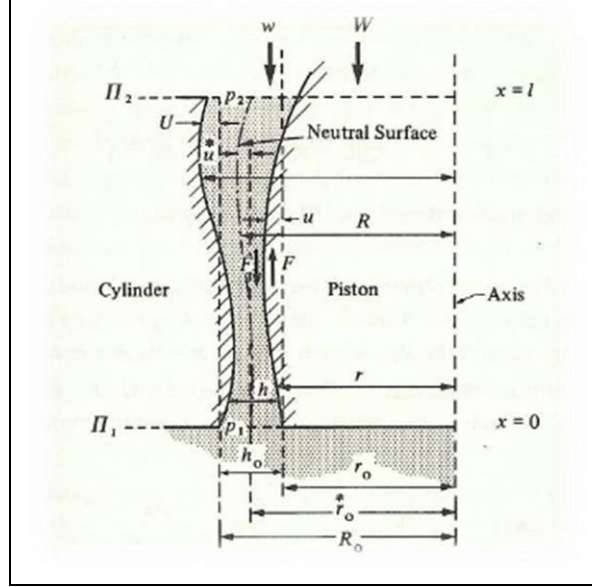
4.2. İdeal Olmayan Piston-Silindir Ünitesinin Efektif Alanı

İdeal olmayan piston-silindir ünitesine ait şekil, Şekil 4.2’de verilmiştir[6]. Gerçek piston-silindir ünitelerinde, piston ve silindir yarıçapı konuma bağlı olarak değişebilmektedir. Dolayısıyla piston ve silindir arasındaki boşluk sabit bir değere sahip olmayıp farklı konumlarda farklı değere sahip olabilmektedir. Bu durum, piston ve silindir arasındaki boşlukta yer alan akışkan basınç dağılımının farklı olmasına neden olmaktadır.

Piston-silindir ünitesine etki eden kuvvetler aşağıdaki gibidir.

- Pistonun alt ve üst yüzeyine etki eden basınç farkından kaynaklanan yukarı yönlü kuvvet, $\pi r_0 p_1 - \pi(r_0 + u)^2 p_2$,
- Yukarı yönlü hareket etme eğiliminde olan sıvının, pistonun yan yüzeylerine uyguladığı sürtünme kuvveti, F.

- Pistonun yan yüzeylerine basınç altında bulunan akışkanın uyguladığı dikey doğrultulu kuvvetlerin toplamı, $2\pi \int_0^l r p \frac{du}{dx} dx$.



Şekil 4.2: İdeal Olmayan Piston-Silindir Ünitesi.

Piston üzerine etki eden yukarı yönlü kuvvetlerin toplamı pistonun ağırlığına eşitlendiğinde aşağıdaki denklem elde edilir.

$$W = \pi r_0^2 (p_1 - p_2) + 2\pi \int_0^l r (p - p_2) \frac{du}{dx} dx + F \quad (4.5)$$

Piston ve nötr yüzey arasında kalan sıvıya etki eden kuvvetlerin eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$w + F + 2\pi \int_0^l r (p - p_2) \frac{du}{dx} dx = \pi (r_0^{*2} - r_0^2) (p_1 - p_2) + 2\pi \int_0^l r^* (p - p_2) \frac{du^*}{dx} dx \quad (4.6)$$

4.5 ve 4.6 numaralı eşitlikler taraf tarafa toplanırsa aşağıda verilen 4.7 numaralı denklem elde edilir.

$$W + w = \pi r_0^{*2} (p_1 - p_2) + 2\pi \int_0^l r^* (p - p_2) \frac{du^*}{dx} dx \quad (4.7)$$

4.7 numaralı denklemin her iki tarafı $p_1 - p_2$ ye bölündüğünde 4.4 numaralı denklemde gösterilmiş olan efektif alan elde edilmiş olur.

$$S = \frac{W + w}{p_1 - p_2} = \pi r_0^{*2} + \frac{2\pi}{p_1 - p_2} \int_0^l r^* (p - p_2) \frac{du^*}{dx} dx \quad (4.8)$$

4.8 numaralı denklemde r^* değeri yerine yazılıp gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra efektif alan için aşağıdaki denklem elde edilir.

$$S = \pi r_0^2 \left\{ 1 + \frac{h_0}{r_0} + \frac{1}{r_0(p_1 - p_2)} \int_0^l (p - p_2) \frac{d(u + U)}{dx} dx \right\} \quad (4.9)$$

Yukarıda verilen 4.9 numaralı denklem, aşağıda verilen 4.10 numaralı denklem şeklinde de ifade edilebilir.

$$S = \pi r_0^2 \left\{ 1 + \frac{h_0}{r_0} - \frac{1}{r_0(p_1 - p_2)} \int_0^l (u + U) \frac{dp}{dx} dx \right\} \quad (4.10)$$

4.10 numaralı denklem kullanılarak efektif alanın belirlenebilmesi için piston silindir ünitesine ait boyutsal ölçümlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Piston ve silindir ünitesine ait mutlak çap, doğrusalılık ve yuvarlaklık ölçümleri yapılması gereken boyutsal ölçümlerdir. Boyutsal ölçüm verilerinin yanı sıra, piston ve silindir arasındaki boşlukta basınç dağılımının x 'e bağlı bir fonksiyon olarak belirlenmesi gerekir. Piston ve silindir arasındaki basınç dağılımı ise kullanılan akışkanın çeşidine göre farklılık gösterir.

Pistonlu basınç standartlarında sıvı kullanılması durumunda piston ve silindir arasındaki boşlukta basınç dağılımı 4.11 numaralı denklemle ifade edilir.

$$\frac{dp}{dx} = -(p_1 - p_2) \frac{1/h^3}{\int_0^l 1/h^3 dx} \quad (4.11)$$

4.11 numaralı denklemin 4.10 numaralı denklemde yerine konulmasıyla beraber 4.12 numaralı denklem elde edilir.

$$S = \pi r_0^2 \left\{ 1 + \frac{h_0}{r_0} + \frac{1}{r_0} \frac{\int_0^l (u + U)/h^3 dx}{\int_0^l 1/h^3 dx} \right\} \quad (4.12)$$

Eğer pistonlu basınç standartlarında kullanılan akışkan gaz ise, bu durumda piston ve silindir arasındaki boşlukta basınç dağılımı 4.13 numaralı denklemle ifade edilir.

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{1}{2} \frac{(p_1^2 - p_2^2)}{h^3} \left/ \int_0^l 1/h^3 dx \right\{ p_1^2 - (p_1^2 - p_2^2) \frac{\int_0^x 1/h^3 dx}{\int_0^l 1/h^3 dx} \right\}^{1/2} \quad (4.13)$$

Pistonlu basınç standardına etki eden basıncın sıfır olması veya ($p_1 - p_2$) $\ll p_1$ durumunda, piston ve silindir arasındaki basınç dağılımı aşağıda verilen 4.14 numaralı denkleme indirgenebilir.

$$\frac{dp}{dx} \rightarrow -\frac{1}{2} \frac{(p_1^2 - p_2^2)}{p_1} \frac{1/h^3}{\int_0^l 1/h^3 dx} \quad (4.14)$$

4.14 numaralı denklemin 4.4 numaralı denklemde yerine konulmasıyla beraber aşağıdaki denklem elde edilir.

$$S = \pi r_0^2 \left\{ 1 + \frac{h_0}{r_0} + \frac{1}{r_0} \frac{\int_0^l (u + U)/h^3 dx}{\int_0^l 1/h^3 dx} \right\} \quad (4.15)$$

Görüldüğü üzere 4.12 ve 4.15 numaralı denklemler birbirinin aynısıdır. Yani hidrolik pistonlu basınç standartları ile atmosfer basıncı altındaki pnömatik pistonlu basınç standartlarının efektif alanları aynı denklemle ifade edilir.

5. BASINÇ METROLOJİSİNDE EFEKTİF ALAN BELİRLEME YÖNTEMLERİ

Bir piston silindir ünitesinde belirlenmesi gereken en önemli parametrelerden birisi efektif alandır. Efektif alanın belirlenmesinde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler karşılıklı-akışa dayalı metot (cross-float) ve boyutsal ölçümler metodudur [5].

5.1. Karşılıklı-Akışa Dayalı Metot

Karşılıklı akışa dayalı metot deneysel bir metottur. Bu metotta test altındaki cihazın efektif alanının belirlenebilmesi için, izlenebilirlik zinciri içerisinde yer alan referans pistonlu basınç standardına ihtiyaç vardır. Referans cihaz ile test cihazı karşılaştırılarak test cihazına ait efektif alan bulunur.

Bu yöntemde referans cihaz ve test cihazı ortak bir hatta borular yardımıyla bağlanır. Her iki pistonlu basınç standardına, hangi basınç noktasında kalibrasyonu yapılacaksa, o basınca karşılık gelen kütleler kabaca yüklenir. Test cihazı ve referans cihaz arasındaki vana kapalı konumda iken her iki cihazın doğal düşme hızları ölçülür. Düşme hızları ölçüldükten sonra test cihazı ve referans cihaz arasındaki vana açılarak tekrar düşme hızlarına bakılır. Eğer yeni durumdaki düşme hızları doğal düşme hızlarından farklı ise küçük ağırlıktaki kütleler kullanılarak her iki sisteminde vana açık konumdayken doğal düşme hızlarına ulaşması sağlanır.

Test cihazı ve referans cihaz arasındaki vana açık konumda iken doğal düşme hızlarına ulaşıldığı anda cihazları birleştiren hatta akış yoktur. Bu durumda, test cihazı ve referans cihaz tarafından ortak hatta oluşturulan basınçlar eşittir. Basınç eşitliğinden yararlanılarak oluşturulan aşağıdaki denklem kullanılarak test cihazına ait efektif alan hesaplanır.

$$\frac{F_{test}}{A_{test}} = \frac{F_{ref}}{A_{ref}} + \Delta h \Delta \rho g \quad (5.1)$$

Karşılıklı akışa dayalı metot, basınç metrolojisi alanında ülkelerin ulusal metroloji enstitüleri tarafından geçerliliği kabul edilen ve yaygın olarak kullanılan

güvenilir bir yöntemdir. TÜBİTAK UME basınç laboratuvarında 20 yılı aşkın süredir efektif alan belirlemede bu yöntem kullanılmaktadır [7].

5.2. Boyutsal Ölçümler Metodu:

Piston-silindir ünitelerinin efektif alanını belirlemede kullanılan bir diğer metot boyutsal ölçümler metodudur. Ulusal metroloji enstitüleri genellikle 0,05 MPa ile 1MPa basınç aralığında çalışan pistonlu basınç standartlarının A_0 efektif alanının belirlenmesini boyutsal ölçümler metodu ile yapmaktadır. Bu yöntemle izlenebilirliği sağlanan pistonlu basınç standartları, adım adım daha yüksek basınç aralığında çalışan pistonlu basınç standartlarının kalibrasyonunda kullanılır. Burada, boyutsal ölçümlerle kalibre edilmiş cihaz deneysel metot (karşılıklı akışa dayalı metot) ile kalibrasyonunun yapılmasını sağlar. Böylelikle tüm basınç aralığında izlenebilirlik sağlanmış olur [8].

Bu metotta hem piston hem de silindir ünitesine ait boyutsal ölçümler gerçekleştirilir. Boyutsal ölçümler mutlak çap ve form ölçümlerini kapsamaktadır. Boyutsal ölçümlerde önemli olan piston ve silindire ait boyutsal dataların yüksek hassasiyet ve çok düşük belirsizlikle elde edilmesidir. Mutlak çap ölçümleri ve form ölçümleri CMM adı verilen tek bir cihazla yapılabilmesine rağmen, bu cihazla elde edilen belirsizliklerin çok yüksek olmasından dolayı, boyutsal ölçümlerde alanında uzmanlaşmış farklı cihazlar tercih edilmektedir [9].

5.2.1. Boyutsal Ölçümler

Boyutsal ölçümler mutlak çap ölçümleri ve form ölçümleri olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmektedir.

5.2.1.1. Mutlak Çap Ölçümleri:

Hem piston çapı hem de silindir iç çapı, piston ve silindir eksenı boyunca farklı seviyelerde çap ölçüm cihazı ile ölçülür. Her seviyede çap birkaç defa ölçülür. Örneğin, EURAMET 740 projesinde [10] ve CCM [8] anahtar karşılaştırmasında

kullanılan pistonlar için en az iki farklı seviyede ve birbirine dik 2 farklı açıda (0° ve 90°) çap ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Böylelikle her piston-silindir ünitesi için en az 4 farklı çap ölçüm değeri elde edilmiştir. Bunun yanında katılımcılardan bazıları fazla sayıda çap ölçümü gerçekleştirmişlerdir [8].

5.2.1.2. Form Ölçümleri:

İdeal piston-silindir üniteleri kusursuz bir geometriye sahiptir. Piston ve silindir, piston silindir eksenini boyunca mükemmel derecede yuvarlaklığa ve doğrusalığa sahiptir. Ancak gerçek piston-silindir ünitelerinde tam olarak ideallikten bahsedilemez. Her ne kadar teknolojinin gelişmesiyle beraber üretim teknikleri gelişse de, piston-silindir ünitelerinin imalatı esnasında kusursuz geometriden sapmalar meydana gelir. Gerçek piston-silindir ünitesi kusursuz bir yuvarlaklığa ya da doğrusalığa sahip olamaz. Dolayısıyla, piston-silindir ünitesinin geometrisini belirlemek için piston ve silindire ait yuvarlaklık ve doğrusalık ölçümleri yapılır.

5.2.1.2.1. Yuvarlaklık Ölçümleri:

Piston ve silindir eksenini boyunca farklı noktalarda hem piston dış yüzeyi hem de silindirin iç yüzeyinin yuvarlaklığına bakılır. CCM anahtar karşılaştırmasında [8] pistonun ortası ve orta noktasına simetrik olan 4 noktada olmak üzere toplam 5 noktada yuvarlaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Her bir yuvarlaklık profilinde birer derecelik farklarla toplam 360 noktada veri alınmıştır.

5.2.1.2.2. Doğrusallık Ölçümleri:

Piston ve silindir eksenini boyunca farklı noktalarda hem piston dış yüzeyi hem de silindirin iç yüzeyinin doğrusalığına bakılır.

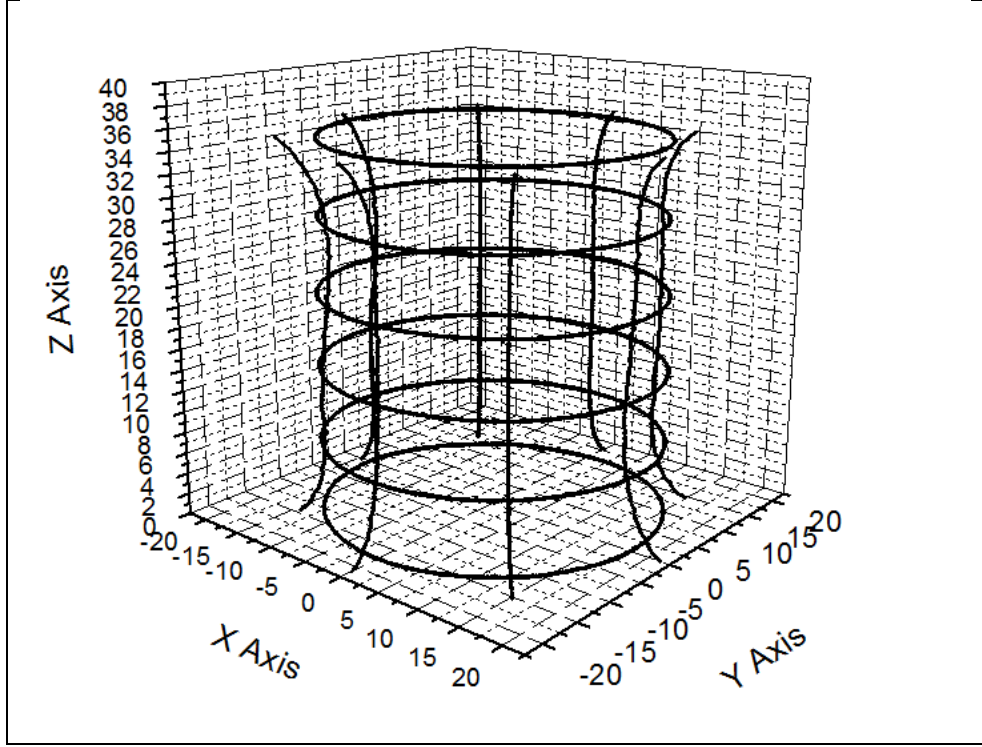
CCM anahtar karşılaştırmasında [8] ve EURAMET 740 projesinde [10] 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , 315° ve 360° olmak üzere, piston-silindir eksenini boyunca, toplam 8 noktada doğrusalık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Genellikle doğrusalık eksenini boyunca 0,5 mm veya 0,1 mm' lik adımlarla veri alınmıştır.

5.2.2. Boyutsal Ölçüm Verilerinin Birleştirilmesi:

Form ölçümleri sonucunda elde edilen verilerin piston ve silindirin yüzeyi üzerindeki sapmalar hakkında bilgi vermektedir. Bu sapma değerleri piston-silindir ünitesinin çap değerlerini içermez. Form ölçümlerine ait çap değerlerinin elde edilebilmesi için doğrusallık ve yuvarlaklık profillerinin sapma değerlerinin mutlak çap değerleri ile birleştirilmesi gerekmektedir.

Mutlak çap ölçümleri ve form ölçümleri birleştirilerek piston-silindir ünitesine ait kuş kafesi modeli oluşturulur. Bu model piston-silindir ünitesine ait oldukça fazla noktada yarıçap değerini sunduğundan efektif alan belirlenmesinde iyi sonuçlar elde edilmesine olanak sağlar.

Boyutsal verilerin birleştirilmesinde en küçük kareler yöntemi kullanılmaktadır. Bu metotta iki farklı düzlemde ve 2 farklı açıda, 4 adet çap değeri kuş kafesi modelinin koordinat sistemi oluşturmak için kullanılır. Bu çap değerleri referans çap değerleri olarak adlandırılır. Daha sonra mutlak çap değerleri, doğrusallık çap değerleri ve yuvarlaklık çap değerleri arasındaki farkın kareleri alınarak toplanır. Bu toplamın minimize edilmesi ile elde edilen değişkenlere ait değerler, doğrusallık ve yuvarlaklık profillerine ait sapma değerleri ile birlikte kullanılarak, doğrusallık ve yuvarlaklık çap değerleri elde edilir. Böylelikle piston-silindir ünitesine ait kuş kafesi elde edilmiş olur [11].



Şekil 5.2: Kuş Kafesi Modeli.

5.2.3. Boyutsal Verilerden Efektif Alan Hesaplanması:

Piston-silindir ünitesinin efektif alanı Dadson teorisi kullanılarak hesaplanır [6]. Bu yöntemde, piston-silindir ünitesinin kuş kafesi modeli ile oluşturulan veriler, 4.12 numaralı formülde kullanılır ve nümerik integral yöntemi ile efektif alan hesaplanır.

Genellikle yapılan boyutsal ölçümler eşit aralıklı olduklarından dolayı sayısal integrasyon yöntemi olarak Simpson 3/8 kuralı tercih edilmektedir [7].

5.3. Boyutsal Ölçümler Yöntemi ve Karşılıklı-Akışa Dayalı Yöntemin Karşılaştırılması:

[12] de yapılan çalışmada, boyutsal ölçümlerle elde edilen efektif alan değerleri ile, aynı piston-silindir üniteleri için cross-float yöntemi ile elde edilen efektif alan değerleri karşılaştırılmış ve her iki yöntem ile elde edilen alan değerlerinin bir birine eşdeğer olduğu gösterilmiştir..

Karşılıklı akışa dayalı yöntem ile efektif alan belirlenmesi için referans pistonlu basınç standardına ihtiyaç vardır. Efektif alanı belirlenecek olan piston-silindir ünitesi, efektif alanı yüksek doğruluk ve düşük belirsizlikle bilinen referans piston-silindir ünitesi ile karşılaştırılır ve efektif alan hesaplanır. Bu anlamda karşılıklı akışa dayalı metot “bağımlı” bir metottur. Çünkü izlenebilir referans basınç standardına gereksinim vardır.

Diğer taraftan boyutsal ölçümler kullanılarak pistonlu basınç standardının efektif alanının belirlenmesinde referans pistonlu basınç standardına ihtiyaç yoktur. Piston-silindir ünitesine ait mutlak çap ölçümleri ve form ölçümleri gerçekleştirilir. Elde edilen veriler çeşitli matematiksel hesaplamalar ile efektif alan belirlenmesinde kullanılır. Bu anlamda boyutsal ölçümler metodu “bağımsız” bir metottur. Çünkü referans basınç standardına ihtiyaç yoktur.

Karşılıklı akışa dayalı metotta pistonlu basınç standartlarının kalibrasyonu esnasında operatör kaynaklı hatalar oldukça sık rastlanmaktadır. Aynı cihaz için farklı operatörler farklı sonuçlar bulabilmektedir.

Boyutsal ölçümler metodunda ise piston-silindir ünitesine ait ölçümler boyutsal ölçüm makineleri ile otomatik olarak yapıldığından dolayı daha az hata ihtimali vardır. Farklı operatörlerin sonuçlarının birbirine benzemesi çok daha olasıdır.

İzlenebilirliğini karşılıklı akışa dayalı metot ile sağlayan ulusal metroloji enstitüleri belirli periyotlarla cihazlarını başka bir ülkenin ulusal metroloji enstitüsüne kalibrasyon için göndermek zorundadırlar. Dolayısıyla kalibrasyon süresi boyunca cihazlarını kullanamamaktadırlar. Ayrıca piston-silindir ünitesinin taşınması esnasında çeşitli sıkıntılar yaşanabilmektedir. Cihazlar kaybolabilmekte, aldıkları darbelerden dolayı metrolojik özelliklerini kısmen veya tamamen kaybedebilmektedir. Bununla beraber kalibrasyon için ödenen ücret ulusal metroloji enstitüsü için bir yük olmaktadır. Bugün dünyanın birçok yerindeki ulusal metroloji enstitülerinin basınç laboratuvarları izlenebilirliklerini bu şekilde sağlamaktadır.

Diğer taraftan dünyadaki bazı ulusal metroloji enstitülerinin basınç laboratuvarları, izlenebilirliklerini boyutsal ölçümlerle gerçekleştirmektedir. Bu laboratuvarlar kendi enstitüleri bünyesindeki boyutsal laboratuvarları ile iş birliği yaparak izlenebilirliklerini kendi enstitülerinden almaktadırlar. Bu durumda hem ekonomik anlamda hem de cihazların kullanım süreleri anlamında bu laboratuvarlara avantaj sağlamaktadır. PTB ve MIKES bu enstitülere örnek olarak verilebilir [13].

Sonuç olarak, yukarıda saydığımız nedenlerden dolayı, boyutsal ölçümler yöntemi ile efektif alanın belirlenmesi, karşılıklı akışa dayalı yönteme göre ulusal metroloji enstitülerine daha büyük avantaj sağlamaktadır.

6. GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR

Yapılan çalışmalar şunlardır: uygun piston-silindir ünitesinin seçilmesi, bu piston-silindir ünitesine ait boyutsal ölçümlerin gerçekleştirilmesi, boyutsal ölçümlerin birleştirilmesi, verilerin birleştirilmesi sonucunda elde edilen yarıçap değerlerinin yeni koordinat düzlemine aktarılması, elde edilen yarıçap değerlerinden Dadson Theory kullanılarak efektif alanın elde edilmesi ve efektif alan belirsizliğinin hesaplanması.

6.1. Seçilen Referans Piston-Silindir Ünitesi

Boyutsal ölçümlerle efektif alanı belirlenecek olan piston-silindir ünitesi pnömatik olup 35 mm nominal çapa ve 9,8 cm² nominal efektif alana sahiptir. 765 seri numaralı piston-silindir ünitesi DH instruments (DHI, ABD) firması tarafından üretilmiştir. Hem piston hem de silindir tungsten karbürden imal edilmiş olup 5 kPa ile 500 kPa arasında çalışma aralığına sahiptir.

Piston-silindir ünitesine ait özellikler aşağıdaki gibidir.

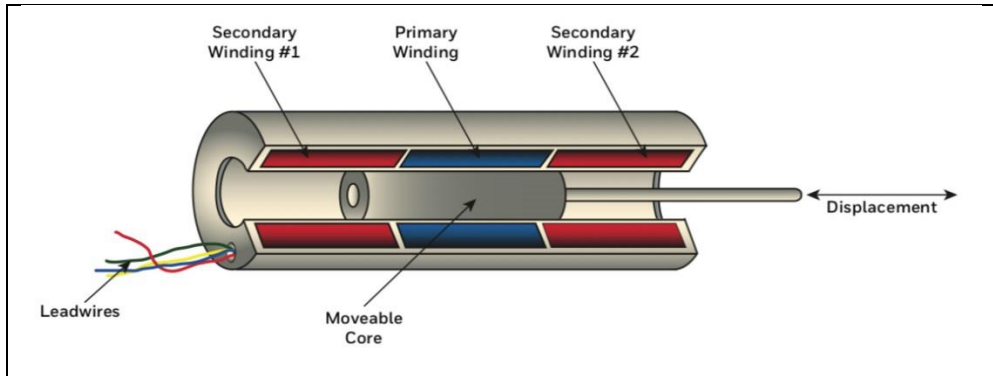
- Üretici: DH Instruments
- Seri no: 765
- Model: PC-7100/7600-10
- Minimum çalışma basıncı: 5 kPa
- Maximum çalışma basıncı: 500 kPa
- Piston-nominal çap: 35 mm
- Piston boyu: 53,2 mm
- Silindir boyu: 35,3 mm
- Piston-silindir ünitesinin yapıldığı materyal: Tungsten karbür
- Young Modulus: 6×10^{11} N/m²
- Poisson Ratio: 0,22
- Lineer ısı genleşme katsayısı: 9×10^{-6} °C⁻¹

6.2. Seçilen Piston-Silindir Ünitesine Ait Boyutsal Ölçümler

765 seri numaralı piston-silindir ünitesinin efektif alanının hesaplanabilmesi için bu pistona ait boyutsal ölçümler TÜBİTAK UME boyutsal laboratuvarı tarafından gerçekleştirilmiştir. Boyutsal ölçümler mutlak çap ölçümleri ve form ölçümleri olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

Boyutsal ölçümlerde en küçük belirsizliğe ulaşabilmek için mutlak çap ölçümleri ve form ölçümleri farklı cihazlarda gerçekleştirilmiştir. Mutlak çap ölçümlerinde CMM form ölçümlerinde ise MahrForm MFU 800 form ölçüm cihazı kullanılmıştır.

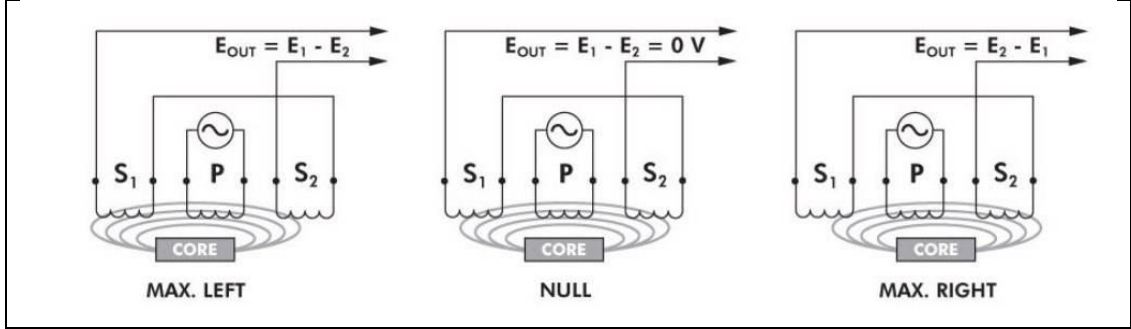
Her iki cihazda da boyutsal ölçümlerde kullanılan prensip LVDT' ye dayanmaktadır. Şekil 6.1' de LVDT gösterilmektedir [14]. Bir LVDT 'nin ana bileşenleri transformatör ve çekirdektir. Transformatör 3 bobinden meydana gelir. Bunlardan bir tanesi birincil bobin (Primary Winding) diğer ikisi ise ikincil bobinlerdir (Secondary Winding #1 ve Secondary Winding #2). Birincil bobin birbirine seri ve zıt olarak bağlanmış ikincil bobinlerin tam olarak ortasında yer alır. Transformatörün ortasındaki delikte rahatça hareket edebilen manyetik geçirgen malzemeden yapılmış çekirdek yer almaktadır.



Şekil 6.1: LVDT.

Transformatörün ortasında serbestçe hareket edebilen çekirdeğin konumu ikincil sarımlar üzerinde farklı gerilimlerin oluşmasına neden olur. İkincil sarımlar arasındaki gerilim farkının büyüklüğü çekirdeğin yer değiştirme miktarını, gerilim farkının işareti ise yer değiştirmenin yönünü verir.

Şekil 6.2’ de LVDT’ ye ait şematik gösterim verilmiştir [14]. Burada çekirdek tam olarak ikincil bobinlere eşit mesafede ise gerilim farkı gözlemlenmez. Bu konumdan uzaklaştığında ise transformatörde gerilim farkı meydana gelir. Örneğin çekirdek S1 olarak etiketlenmiş ikincil sarıma daha yakında iken bu bobinde oluşan gerilim farkı diğerinden daha büyük olacaktır. Gerilim farkı, çekirdeğin orta konumdan uzaklığı ile doğru orantılı olarak artar [14].



Şekil 6.2: LVDT ye ait şematik gösterim.

Piston-silindir ünitesine ait yapılan boyutsal ölçümlerde öncelikle form ölçümleri daha sonra mutlak çap ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Mutlak çap ölçümleri, yuvarlaklık ve doğrusalılık ölçümlerinin kesiştiği noktalarda yapılmıştır. Yapılan ölçümlere ait detaylı bilgi aşağıda verilmiştir.

6.2.1. Mutlak Çap Ölçümleri

Pistona ait mutlak çap ölçümleri, 8 farklı düzlemde ($z_1=0$, $z_2=7.6$ mm, $z_3=15.2$ mm, $z_4=22.8$ mm, $z_5=30.4$ mm, $z_6=38.0$ mm, $z_7=45.6$ mm, $z_8=53.1$ mm) ve 0-180, 45-225, 90-270, 135-315 derecelik açılarda olmak üzere toplam 32 noktada yapılmıştır. Tablo 6.1’ de pistona ait çap ölçüm değerleri verilmiştir.

Tablo 6.1: Pistona ait $\varnothing$ ölçüm değerleri.

Piston Mutlak $\varnothing$ Değerleri							
R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
35,3322	35,3334	35,3332	35,3333	35,3329	35,3330	35,3329	35,3324
35,3324	35,3334	35,3331	35,3332	35,3332	35,3335	35,3335	35,3330
35,3320	35,3328	35,3332	35,3335	35,3334	35,3334	35,3336	35,3332
35,3321	35,3327	35,3331	35,3334	35,3335	35,3330	35,3332	35,3330

Silindire ait mutlak $\varnothing$ ölçümleri ise 6 farklı düzlemde ($z_1=0$, $z_2=7.0$ mm, $z_3=14.0$ mm, $z_4=21.0$ mm, $z_5=28.0$ mm, $z_6=35.0$ mm) ve 0-180, 45-225, 90-270, 135-315 derecelik açılarda olmak üzere 24 noktada yapılmıştır. Tablo 6.2’ de silindire ait $\varnothing$ ölçüm değerleri verilmiştir.

Tablo 6.2: Silindire ait $\varnothing$ ölçüm değerleri.

Silindir Mutlak $\varnothing$ Değerleri					
R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆
mm	mm	mm	mm	mm	mm
35,3360	35,3347	35,3343	35,3339	35,3343	35,3359
35,3356	35,3349	35,3345	35,3347	35,3345	35,3361
35,3353	35,3343	35,3340	35,3341	35,3346	35,3361
35,3358	35,3347	35,3345	35,3346	35,3346	35,3362

Hem piston hem de silindire ait mutlak $\varnothing$ ölçümleri yapılırken düzlemler eşit aralıklı olarak seçilmişlerdir. Silindirin boyu pistona göre daha küçük olduğundan dolayı silindirde 6 farklı düzlemde ölçümler yapılabilmiştir.

Mutlak $\varnothing$ ölçümleri TÜBİTAK UME boyutsal laboratuvarında CMM cihazı kullanılarak yapılmıştır. CMM cihazı kullanılarak yapılan mutlak $\varnothing$ ölçümlerine ait belirsizlik 500 nm dir.

6.2.2. Form Ölçümleri

Form ölçümleri pisto-silindir yüzeyinin girinti ve çıkıntıları hakkında bilgi verir. Bu ölçümler, yuvarlaklık ve doğrusalılık ölçümlerini kapsamaktadır.

6.2.2.1. Yuvarlaklık ölçümleri

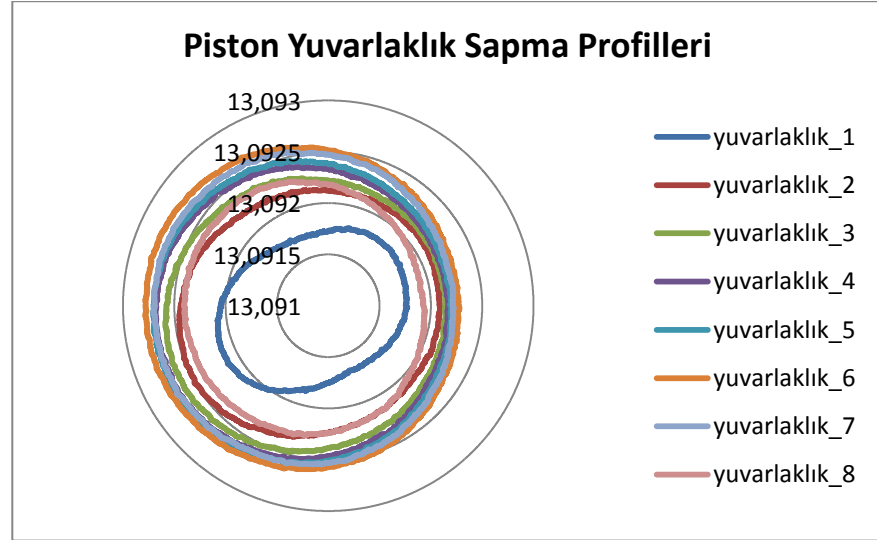
Pistona ait yuvarlaklık ölçümleri 8 farklı düzlemde ($z_1=0$, $z_2=7.6$ mm, $z_3=15.2$ mm, $z_4=22.8$ mm, $z_5=30.4$ mm, $z_6=38.0$ mm, $z_7=45.6$ mm, $z_8=53.1$ mm) gerçekleştirilmiştir. Her düzlemde 0,1 derecelik açılarda yapılan ölçümler sonucunda elde edilen yuvarlaklık profilleri 3600 sapma değeri içermektedir.

Aşağıdaki tabloda pistona ait yuvarlaklık profillerinin bir kısmı gösterilmiştir. Tabloda yer alan veriler MahrForm MFU 800 cihazından alınan sapma değerleri olup yarıçap değerleri değildirler. Daha sonra tüm boyutsal ölçümler kullanılarak tabloda verilen sapma değerleri gerçek yarıçap değerine çevrilecektir.

Tablo 6.3: Pistona ait yuvarlaklık sapma değerlerinin bir kısmı.

Piston Yuvarlaklık Sapma Değerleri				
Açı	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄
derece	mm	mm	mm	mm
0	13,09172	13,09212	13,09222	13,09233
0,1	13,09172	13,09212	13,09222	13,09233
0,2	13,09172	13,09212	13,09222	13,09233
0,3	13,09172	13,09212	13,09221	13,09233
0,4	13,09172	13,09212	13,09221	13,09233
0,5	13,09172	13,09212	13,09221	13,09233
0,6	13,09172	13,09212	13,09221	13,09233
0,7	13,09172	13,09212	13,09221	13,09232
0,8	13,09172	13,09212	13,09221	13,09232
0,9	13,09172	13,09212	13,09221	13,09232
Açı	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈
derece	mm	mm	mm	mm
0	13,09238	13,09251	13,09247	13,09218
0,1	13,09238	13,09251	13,09247	13,09218
0,2	13,09238	13,09251	13,09247	13,09218
0,3	13,09238	13,09251	13,09247	13,09218
0,4	13,09238	13,09251	13,09247	13,09218
0,5	13,09238	13,09251	13,09247	13,09218
0,6	13,09238	13,09251	13,09247	13,09218
0,7	13,09238	13,09251	13,09247	13,09218
0,8	13,09238	13,09251	13,09247	13,09218
0,9	13,09238	13,09251	13,09247	13,09218

Şekil 6.3’ de pistonu ait tüm yuvarlaklık sapma değeri görölmektedir. Yuvarlaklık 1 profili pistonun en altını yuvarlaklık 8 profili ise en üstünü göstermektedir. Grafikten anlaşıldığı gibi piston alt ve üste doğru daralmakta orta kısımlarda ise genişlemektedir. Bu haliyle piston fıçıya benzetilebilir.



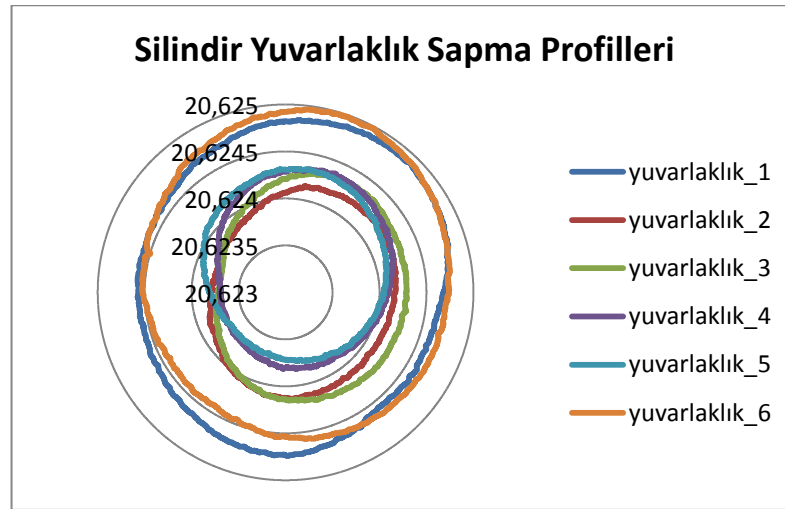
Şekil 6.3: Pistona ait yuvarlaklık sapma profilleri.

Silindire ait yuvarlaklık ölçümleri ise 6 farklı düzlemde ($z_1=0$, $z_2=7.0$ mm, $z_3=14.0$ mm, $z_4=21.0$ mm, $z_5=28.0$ mm, $z_6=35.0$ mm) gerçekleştirilmiştir. Her bir düzlemde 0,1 derecelik açılarla toplam 3600 noktada yuvarlaklık ölçümleri yapılarak silindire ait yuvarlaklık profilleri elde edilmiştir. Tablo 6.4’ de silindire ait yuvarlaklık profillerinin bir kısmı gösterilmiştir. Tabloda yer alan veriler MahrForm MFU 800 cihazından alınan sapma değeri olup yarıçap değeri değildirler. Daha sonra tüm boyutsal ölçümler kullanılarak tabloda verilen sapma değeri gerçek yarıçap değerine çevrilecektir.

Tablo 6.4: Silindire ait yuvarlaklık sapma değerlerinin bir kısmı.

Silindir Yuvarlaklık Sapma Değerleri						
Açı	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆
derece	mm	mm	mm	mm	mm	mm
0	20,62482	20,62406	20,62420	20,62428	20,62431	20,62492
0,1	20,62482	20,62406	20,62420	20,62429	20,62431	20,62492
0,2	20,62482	20,62406	20,62420	20,62429	20,62431	20,62492
0,3	20,62482	20,62406	20,62420	20,62429	20,62430	20,62492
0,4	20,62482	20,62406	20,62420	20,62429	20,62430	20,62492
0,5	20,62482	20,62406	20,62420	20,62429	20,62430	20,62492
0,6	20,62482	20,62406	20,62420	20,62429	20,62430	20,62492
0,7	20,62482	20,62406	20,62420	20,62429	20,62430	20,62492
0,8	20,62482	20,62406	20,62420	20,62429	20,62430	20,62493
0,9	20,62482	20,62406	20,62420	20,62429	20,62430	20,62493

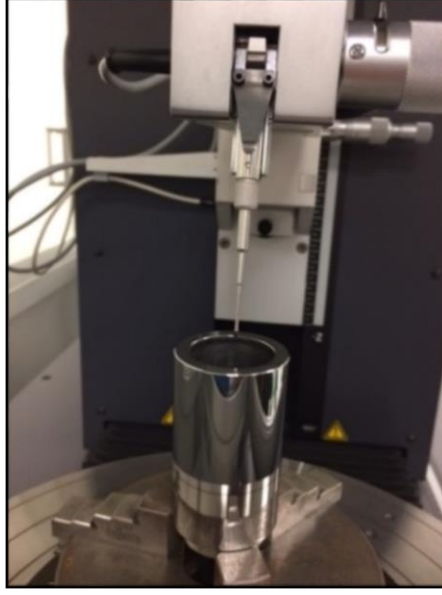
Şekil 6.4 silindire ait tüm yuvarlaklık sapma değerlerini göstermektedir. Yuvarlaklık 1 profili silindirin en altını yuvarlaklık 6 profili ise en üstünü göstermektedir. Grafikten anlaşıldığı gibi silindir, pistonun tersine, alt ve üste doğru genişlemekte orta kısımlarda ise daralmaktadır.



Şekil 6.4: Silindire ait yuvarlaklık sapma profilleri.

Hem piston hem de silindire ait yuvarlaklık ölçümleri yapılırken düzlemler eşit aralıklı olarak seçilmişlerdir. Silindirin boyu pistona göre daha küçük olduğundan dolayı, silindirde 6 farklı düzlemde ölçümler yapılabilmektedir.

Resim 6.1' de MahrForm MFU 800 form cihazı ile yapılan silindire ait form yuvarlaklık ölçümü gösterilmektedir.



Resim 6.1: MahrForm MFU 800 ile yapılan yuvarlaklık ölçümü.

6.2.2.2. Doğrusallık ölçümleri

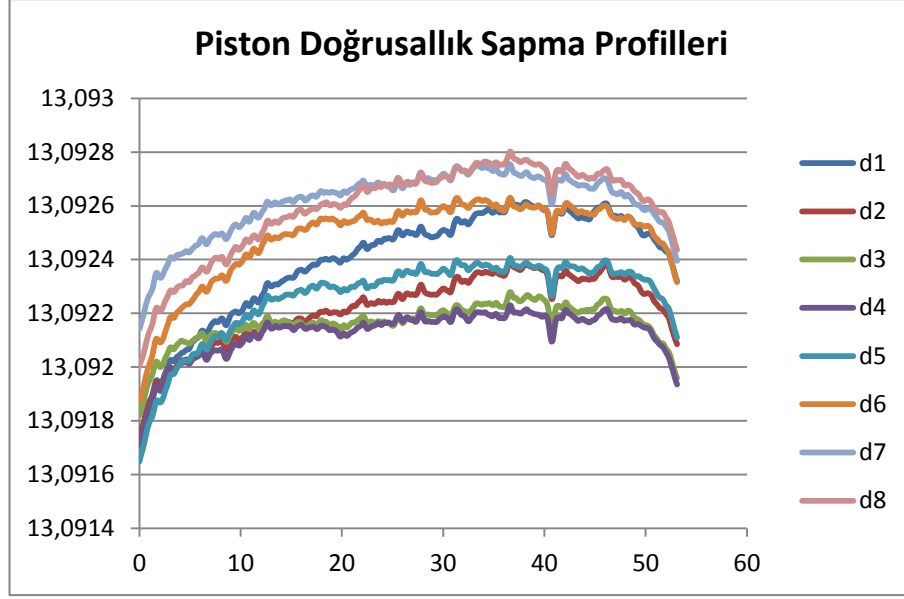
Pistona ait doğrusallık ölçümleri 8 farklı açıda (0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° ve 315°) ve 0,1 mm adımlarla piston-silindir eksenini boyunca gerçekleştirilmiştir. Her bir doğrusallık profili 532 doğrusallık sapma değeri içermektedir.

Tablo 6.5’ de pistona ait doğrusallık sapma profillerine ait ölçüm verilerinin bir kısmı gösterilmektedir. Tabloda yer alan veriler MahrForm MFU 800 cihazından alınan sapma değerleri olup yarıçap değerleri değildirler. Daha sonra tüm boyutsal ölçümler kullanılarak tabloda verilen sapma değerleri gerçek yarıçap değerine çevrilecektir.

Tablo 6.5: Pistona ait doğrusallık sapma değerlerinin bir kısmı.

Piston Doğrusallık Sapma Değerleri				
z	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
mm	mm	mm	mm	mm
0,0	13,09172	13,09175	13,09182	13,09171
0,1	13,09173	13,09176	13,09183	13,09172
0,2	13,09175	13,09177	13,09184	13,09174
0,3	13,09176	13,09178	13,09186	13,09175
0,4	13,09178	13,09179	13,09187	13,09177
0,5	13,09179	13,09181	13,09189	13,09178
0,6	13,09181	13,09182	13,09190	13,09180
0,7	13,09183	13,09184	13,09192	13,09182
0,8	13,09184	13,09185	13,09193	13,09183
0,9	13,09186	13,09187	13,09194	13,09184
z	D ₅	D ₆	D ₇	D ₈
mm	mm	mm	mm	mm
0,0	13,09165	13,09188	13,09214	13,09200
0,1	13,09166	13,09189	13,09215	13,09202
0,2	13,09168	13,09190	13,09217	13,09203
0,3	13,09169	13,09191	13,09218	13,09204
0,4	13,09171	13,09193	13,09219	13,09205
0,5	13,09172	13,09194	13,09221	13,09206
0,6	13,09174	13,09196	13,09223	13,09208
0,7	13,09176	13,09198	13,09224	13,09210
0,8	13,09177	13,09199	13,09225	13,09211
0,9	13,09179	13,09200	13,09226	13,09212

Şekil 6.5 pistona ait tüm doğrusallık sapma değerlerini göstermektedir. Şekilden anlaşıldığı gibi piston alt ve üste doğru daralmakta orta kısımlarda ise genişlemektedir. Bu haliyle doğrusallık ve yuvarlaklık ölçümleri birbiri ile uyuşmaktadır.



Şekil 6.5: Pistona ait doğrusallık sapma profilleri.

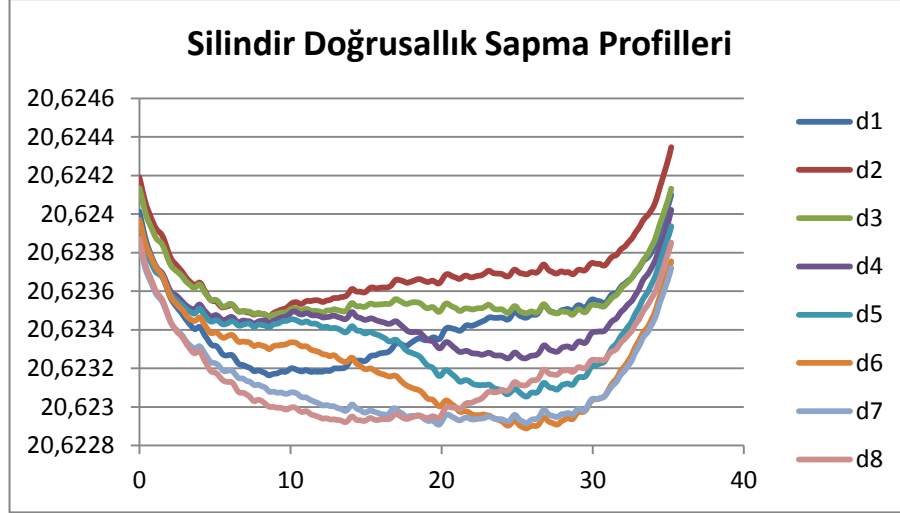
Silindir için yapılan doğrusallık ölçümleri 8 farklı açıda (0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° ve 315°) ve 0,1 mm adımlarla piston-silindir eksenine boyunca gerçekleştirilmiştir. Tüm doğrusallık profilleri 353 veri içermektedir.

Tablo 6.6’ da silindire ait doğrusallık sapma profillerine ait ölçüm verilerinin bir kısmı gösterilmektedir. Tabloda yer alan veriler MahrForm MFU 800 cihazından alınan sapma değerleri olup yarıçap değerleri değildirler. Daha sonra tüm boyutsal ölçümler kullanılarak tabloda verilen sapma değerleri gerçek yarıçap değerine çevrilecektir.

Tablo 6.6: Silindire ait doğrusallık sapma değerlerinin bir kısmı.

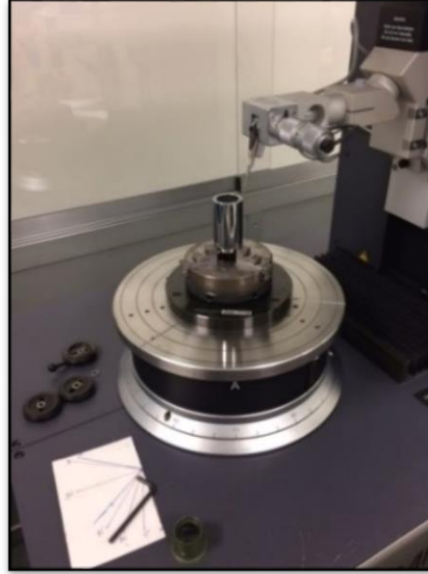
Silindir Doğrusallık Sapma Değerleri				
z	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
mm	mm	mm	mm	mm
0,0	20,62401	20,62419	20,62414	20,62393
0,1	20,62398	20,62416	20,62411	20,62391
0,2	20,62394	20,62412	20,62407	20,62388
0,3	20,62391	20,62409	20,62404	20,62386
0,4	20,62387	20,62406	20,62401	20,62383
0,5	20,62385	20,62404	20,62398	20,62381
0,6	20,62382	20,62402	20,62396	20,62380
0,7	20,62380	20,62400	20,62395	20,62378
0,8	20,62378	20,62398	20,62393	20,62377
0,9	20,62376	20,62396	20,62391	20,62375
z	D ₅	D ₆	D ₇	D ₈
mm	mm	mm	mm	mm
0,0	20,62391	20,62397	20,62384	20,62387
0,1	20,62389	20,62394	20,62381	20,62384
0,2	20,62386	20,62391	20,62378	20,62380
0,3	20,62383	20,62387	20,62375	20,62377
0,4	20,62380	20,62385	20,62372	20,62374
0,5	20,62378	20,62382	20,62369	20,62371
0,6	20,62377	20,62381	20,62368	20,62369
0,7	20,62376	20,62379	20,62366	20,62368
0,8	20,62374	20,62377	20,62364	20,62366
0,9	20,62373	20,62375	20,62362	20,62364

Şekil 6.6 silindire ait tüm doğrusallık sapma değerlerini göstermektedir. Grafikten anlaşıldığı gibi silindir alt ve üste doğru genişlemekte orta kısımlarda ise daralmaktadır. Bu haliyle silindir için yapılan doğrusallık ve yuvarlaklık ölçümleri birbirini desteklemektedir. Piston silindir ünitesine ait doğrusallık ölçümlerinde belirsizlik 50 nm dir.



Şekil 6.6: Silindire ait doğrusallık sapma profilleri.

Resim 6.2’de MahrForm MFU 800 form cihazı ile yapılan silindire ait doğrusallık ölçümü gösterilmektedir.



Resim 6.2: MahrForm MFU 800 ile yapılan doğrusallık ölçümü.

Form ölçümleri esnasında piston ve silindirin üzerine konulduğu tabla kullanılmıştır. Piston ve silindir, tabla üzerindeki kol sıkılarak sabitlenmişlerdir. Sabitleme esnasında tablaya uygulanan kuvvetin fazla olması piston ve silindirin yuvarlaklık ve doğrusallık profilleri üzerinde (özellikle sıkılan bölgeye yakın

kısımlarda) değişimlere neden olmuştur. Piston ve silindirin alt kısımları uygulanan kuvvetin etkisi ile dairesellikten uzaklaşıp elipssel bir şekle yaklaşmıştır. Bu yüzden ölçümler piston ve silindire mümkün olan en küçük kuvvet uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

6.3. Boyutsal Verilerin Birleştirilmesi

Piston-silindir ünitesine ait yapılan yuvarlaklık ve doğrusallık ölçümleri piston ve silindir ünitelerinin yüzeyindeki sapmalar hakkında bilgi verir. Ancak bu değerler tek başlarına piston ve silindir ünitesinin çap değerleri hakkında bilgi vermez. O nedenle yuvarlaklık ve doğrusallık ölçümlerinin mutlak çap değerleri ile birleştirilmesi gerekir. Piston ve silindir ünitesine ait mutlak çap, doğrusallık ve yuvarlaklık ölçümlerinin birleştirilmesinde [11] te belirtilen en küçük kareler metodu kullanılmıştır.

Bu metoda göre öncelikle form ölçümleri sonucunda elde edilen doğrusallık ve yuvarlaklık sapmaları kullanılarak yuvarlaklık ve doğrusallık profillerinin birbirini kestiği noktalardaki yarıçap denklemleri [11] de verilen formüller kullanılarak elde edilmiştir. Bu formüller 6.1 ve 6.2’ de verilmiştir. Formüllerde S_i , i. doğrusallık profiline ait sapma değerlerini, R_j , j.yuvarlaklık profillerine ait sapma değerlerini, a_i , b_i , p_j , w_j ve v_j ise bilinmeyen katsayıları ifade etmektedir.

$$r_{doğrusallık,i} = S_i + a_i + b_i \cdot z \quad (6.1)$$

$$r_{yuvarlaklık,j} = R_j + p_j + w_j \cdot \cos(\theta) + v_j \cdot \sin(\theta) \quad (6.2)$$

Tablo 6.7’ de 1. doğrusallık profilinin yuvarlaklık profillerini kestiği noktaların yarıçap denklemleri verilmiştir. Burada S_{ij} , i. doğrusallık profilinin, j. yuvarlaklık profilini kestiği noktadaki doğrusallık yarıçapıdır.

Tablo 6.7: 1.doğrusallık profiline ait yarıçap denklemleri.

S11	=	$\text{sym}(S1(1), 'r') + a1 + b1 \cdot \text{sym}(z(1), 'r');$
S12	=	$\text{sym}(S1(76), 'r') + a1 + b1 \cdot \text{sym}(z(2), 'r');$
S13	=	$\text{sym}(S1(152), 'r') + a1 + b1 \cdot \text{sym}(z(3), 'r');$
S14	=	$\text{sym}(S1(228), 'r') + a1 + b1 \cdot \text{sym}(z(4), 'r');$
S15	=	$\text{sym}(S1(304), 'r') + a1 + b1 \cdot \text{sym}(z(5), 'r');$
S16	=	$\text{sym}(S1(380), 'r') + a1 + b1 \cdot \text{sym}(z(6), 'r');$
S17	=	$\text{sym}(S1(456), 'r') + a1 + b1 \cdot \text{sym}(z(7), 'r');$
S18	=	$\text{sym}(S1(532), 'r') + a1 + b1 \cdot \text{sym}(z(8), 'r');$

Tablo 6.8’ de ise 1. yuvarlaklık profilinin doğrusallık profillerini kestiği noktaların yarıçap denklemleri verilmiştir. Burada Rij, i. yuvarlaklık profilinin, j. doğrusallık profilini kestiği noktadaki yuvarlaklık yarıçapıdır.

Tablo 6.8: 1.yuvarlaklık profiline ait yarıçap denklemleri.

R11	=	$\text{sym}(R1(1), 'r') + p1 + w1 \cdot \text{sym}(\text{cosd}(0), 'f') + v1 \cdot \text{sym}(\text{sind}(0), 'f')$
R12	=	$\text{sym}(R1(451), 'r') + p1 + w1 \cdot \text{sym}(\text{cosd}(45), 'f') + v1 \cdot \text{sym}(\text{sind}(45), 'f')$
R13	=	$\text{sym}(R1(901), 'r') + p1 + w1 \cdot \text{sym}(\text{cosd}(90), 'f') + v1 \cdot \text{sym}(\text{sind}(90), 'f')$
R14	=	$\text{sym}(R1(1351), 'r') + p1 + w1 \cdot \text{sym}(\text{cosd}(135), 'f') + v1 \cdot \text{sym}(\text{sind}(135), 'f')$
R15	=	$\text{sym}(R1(1801), 'r') + p1 + w1 \cdot \text{sym}(\text{cosd}(180), 'f') + v1 \cdot \text{sym}(\text{sind}(180), 'f')$
R16	=	$\text{sym}(R1(2251), 'r') + p1 + w1 \cdot \text{sym}(\text{cosd}(225), 'f') + v1 \cdot \text{sym}(\text{sind}(225), 'f')$
R17	=	$\text{sym}(R1(2701), 'r') + p1 + w1 \cdot \text{sym}(\text{cosd}(270), 'f') + v1 \cdot \text{sym}(\text{sind}(270), 'f')$
R18	=	$\text{sym}(R1(3151), 'r') + p1 + w1 \cdot \text{sym}(\text{cosd}(315), 'f') + v1 \cdot \text{sym}(\text{sind}(315), 'f')$

Mutlak çap, yuvarlaklık ve doğrusallık yarıçaplarının kesiştiği noktalarda aşağıda verilen hesaplamalar yapılmıştır.

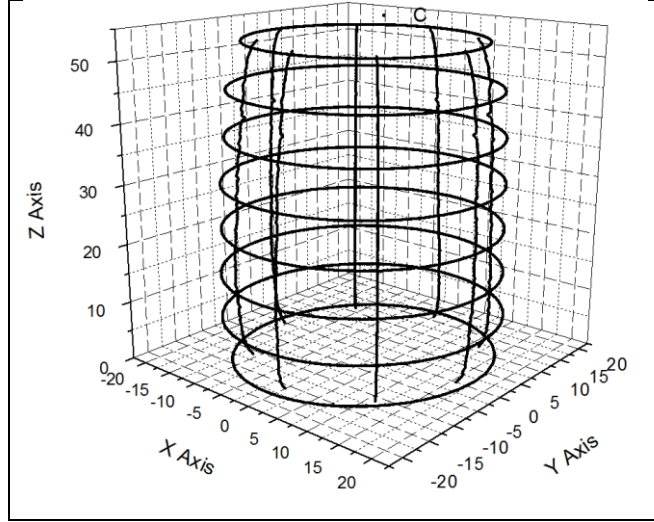
- Yuvarlaklık ve doğrusallık yarıçapları arasındaki farkların toplamı,
- Yuvarlaklık çapları ve mutlak çaplar arasındaki farkların karelerinin toplamı,
- Doğrusallık çapları ve mutlak çaplar arasındaki farkların karelerinin toplamı
- İlk 3 adımda hesaplanan değerlerin toplamı.

Örnek olarak Tablo 6.9’ de üst üste gelen doğrusallık ve yuvarlaklık yarıçaplarının farklarının karelerine ait denklemler gösterilmiştir.

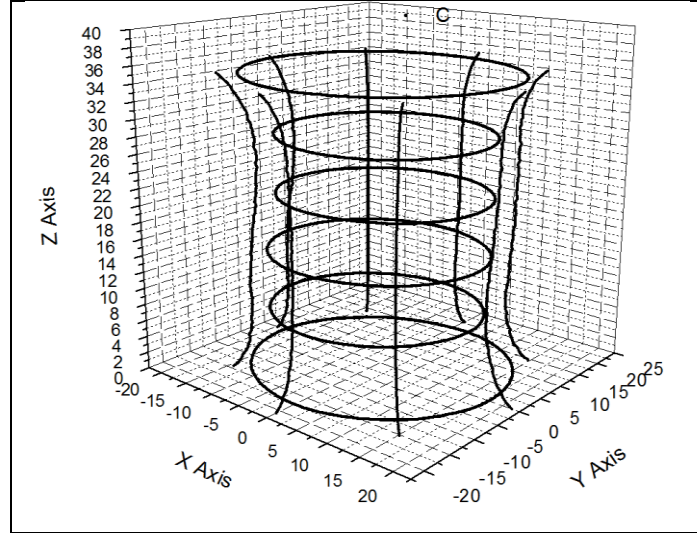
Tablo 6.9: Piston üzerinde üst üste gelen doğrusallık ve yuvarlaklık yarıçaplarının farklarının karelerinin toplamı.

K1	=	(S11-R11) ² +(S21-R12) ² +(S31-R13) ² +(S41-R14) ² +(S51-R15) ² +(S61-R16) ² +(S71-R17) ² +(S81-R18) ²
K2	=	(S12-R21) ² +(S22-R22) ² +(S32-R23) ² +(S42-R24) ² +(S52-R25) ² +(S62-R26) ² +(S72-R27) ² +(S82-R28) ²
K3	=	(S13-R31) ² +(S23-R32) ² +(S33-R33) ² +(S43-R34) ² +(S53-R35) ² +(S63-R36) ² +(S73-R37) ² +(S83-R38) ²
K4	=	(S14-R41) ² +(S24-R42) ² +(S34-R43) ² +(S44-R44) ² +(S54-R45) ² +(S64-R46) ² +(S74-R47) ² +(S84-R48) ²
K5	=	(S15-R51) ² +(S25-R52) ² +(S35-R53) ² +(S45-R54) ² +(S55-R55) ² +(S65-R56) ² +(S75-R57) ² +(S85-R58) ²
K6	=	(S16-R61) ² +(S26-R62) ² +(S36-R63) ² +(S46-R64) ² +(S56-R65) ² +(S66-R66) ² +(S76-R67) ² +(S86-R68) ²
K7	=	(S17-R71) ² +(S27-R72) ² +(S37-R73) ² +(S47-R74) ² +(S57-R75) ² +(S67-R76) ² +(S77-R77) ² +(S87-R78) ²
K8	=	(S18-R81) ² +(S28-R82) ² +(S38-R83) ² +(S48-R84) ² +(S58-R85) ² +(S68-R86) ² +(S78-R87) ² +(S88-R88) ²

Daha sonra 4. adımda elde edilen denklemin minimize edilmesiyle piston ve silindire bilinmeyenler bulunmuştur. Bu bilinmeyenlerin 6.1 ve 6.2 de yerine konulmasıyla beraber doğrusallık ve yuvarlaklık yarıçap değerleri elde edilmiştir. Böylelikle hem piston hemde silindir için detaylı çap haritası (kuş kafesi) elde edilmiştir. Piston ve silindire ait kuş kafesi modellerinin görselleri Şekil 6.7 ve Şekil 6.’ de verilmiştir. Görseller hazırlanırken hatalar 5000 kat büyültmüştür.



Şekil 6.7: Piston için kuş kafesi modeli.



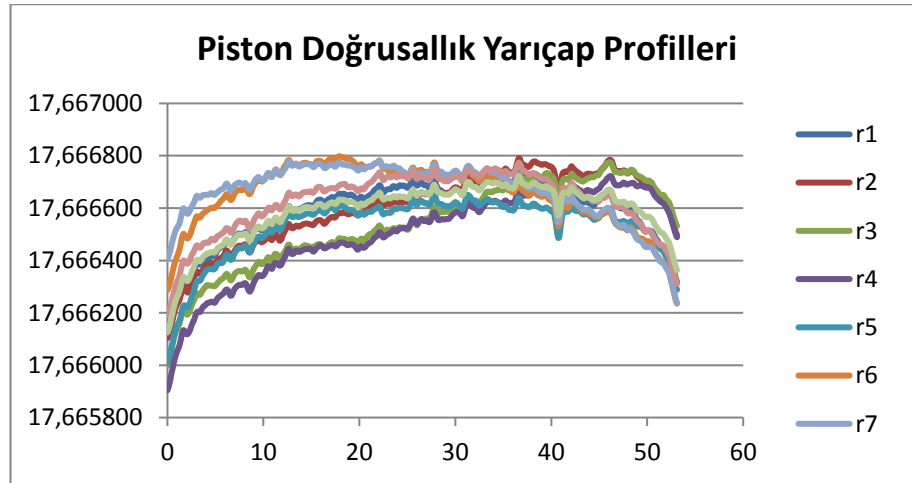
Şekil 6.8: Silindir için kuş kafesi modeli.

Verilerin birleştirilmesi ile ölçümün yapıldığı her bir yuvarlaklık ve doğrusallık noktası için yarıçap değerleri elde edilmiştir. Bu işlem hem piston hem de silindir için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Gerekli matematiksel işlemler Octave hesaplama programında yapılmıştır.

Tablo 6.10' de pistona ait doğrusallık yarıçap değerlerinin bir kısmı, Şekil 6.9' de ise doğrusallık yarıçap profillerine ait grafik verilmiştir.

Tablo 6.10: Pistona ait doğrusallık yarıçap değerlerinin bir kısmı.

Piston Doğrusallık Yarıçap değerleri				
z	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄
mm	mm	mm	mm	mm
0,0	17,666103	17,666097	17,666000	17,665902
0,1	17,666117	17,666106	17,666011	17,665915
0,2	17,666131	17,666116	17,666024	17,665930
0,3	17,666146	17,666128	17,666038	17,665946
0,4	17,666160	17,666141	17,666054	17,665962
0,5	17,666176	17,666156	17,666071	17,665978
0,6	17,666192	17,666173	17,666089	17,665995
0,7	17,666207	17,666190	17,666105	17,666013
0,8	17,666221	17,666203	17,666119	17,666028
0,9	17,666234	17,666214	17,666129	17,666042
z	r ₅	r ₆	r ₇	r ₈
mm	mm	mm	mm	mm
0,0	17,666007	17,666286	17,666406	17,666196
0,1	17,666022	17,666298	17,666417	17,666208
0,2	17,666036	17,666309	17,666429	17,666217
0,3	17,666049	17,666320	17,666442	17,666227
0,4	17,666064	17,666334	17,666455	17,666238
0,5	17,666080	17,666349	17,666469	17,666252
0,6	17,666097	17,666365	17,666484	17,666267
0,7	17,666114	17,666380	17,666497	17,666283
0,8	17,666130	17,666393	17,666509	17,666296
0,9	17,666143	17,666404	17,666518	17,666308

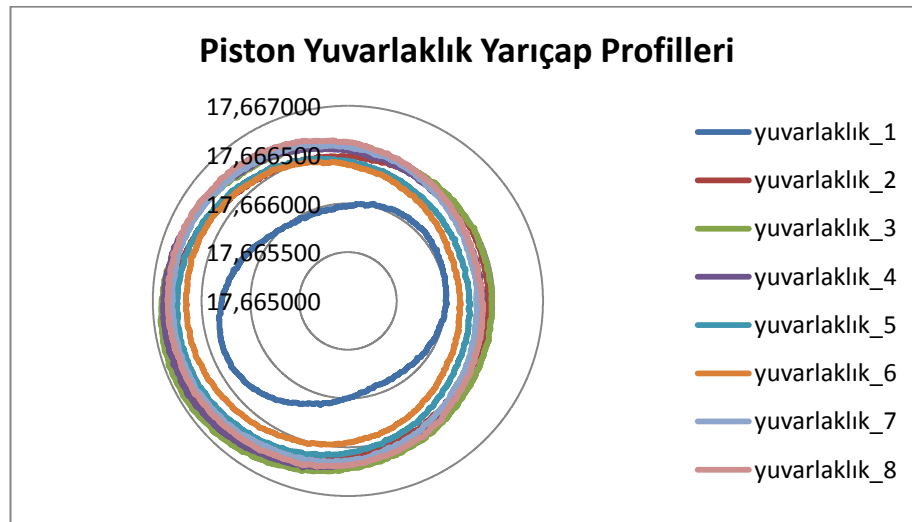


Şekil 6.9: Pistona ait doğrusallık yarıçap profilleri.

Tablo 6.11’ de pistona ait yuvarlaklık yarıçap değerlerinin bir kısmı, Şekil 6.10’ de ise yuvarlaklık yarıçap profillerine ait grafik verilmiştir.

Tablo 6.11: Pistona ait yuvarlaklık yarıçap değerlerinin bir kısmı.

Piston Yuvarlaklık Yarıçap Değerleri				
Açı	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄
derece	mm	mm	mm	mm
0	17,665969	17,666428	17,666558	17,666732
0,1	17,665970	17,666427	17,666557	17,666731
0,2	17,665970	17,666428	17,666555	17,666730
0,3	17,665972	17,666427	17,666554	17,666728
0,4	17,665972	17,666427	17,666553	17,666727
0,5	17,665973	17,666426	17,666552	17,666727
0,6	17,665975	17,666426	17,666552	17,666727
0,7	17,665975	17,666426	17,666552	17,666726
0,8	17,665977	17,666426	17,666552	17,666725
0,9	17,665978	17,666426	17,666553	17,666725
Açı	r ₅	r ₆	r ₇	r ₈
derece	mm	mm	mm	mm
0	17,666823	17,666969	17,667032	17,666852
0,1	17,666822	17,666968	17,667031	17,666850
0,2	17,666821	17,666966	17,667030	17,666849
0,3	17,666819	17,666965	17,667030	17,666848
0,4	17,666819	17,666965	17,667030	17,666847
0,5	17,666818	17,666964	17,667029	17,666846
0,6	17,666818	17,666965	17,667029	17,666846
0,7	17,666818	17,666964	17,667027	17,666847
0,8	17,666818	17,666964	17,667027	17,666846
0,9	17,666819	17,666965	17,667027	17,666847

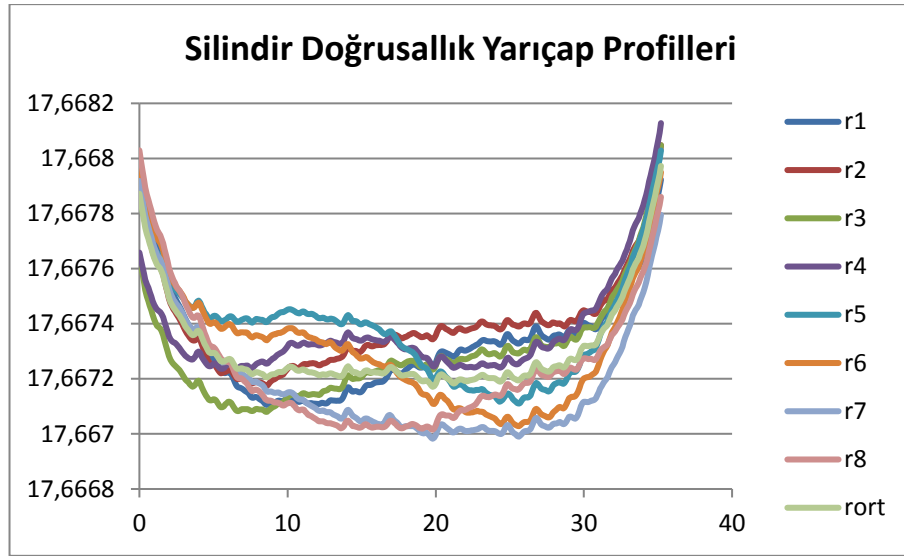


Şekil 6.10: Piston yuvarlaklık yarıçap profilleri.

Tablo 6.12’ de silindire ait doğrusallık yarıçap değerlerinin bir kısmı, Şekil 6.11’ de ise doğrusallık yarıçap profillerine ait grafik verilmiştir.

Tablo 6.12: Silindire ait doğrusallık yarıçap değerlerinin bir kısmı.

Silindir Doğrusallık Yarıçap Değerleri				
Z	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄
mm	mm	mm	mm	mm
0,0	17,667993	17,667896	17,667647	17,667650
0,1	17,667958	17,667863	17,667618	17,667627
0,2	17,667921	17,667829	17,667586	17,667600
0,3	17,667885	17,667795	17,667552	17,667574
0,4	17,667853	17,667765	17,667521	17,667552
0,5	17,667824	17,667740	17,667499	17,667535
0,6	17,667801	17,667720	17,667481	17,667522
0,7	17,667779	17,667700	17,667465	17,667507
0,8	17,667759	17,667680	17,667449	17,667491
0,9	17,667739	17,667662	17,667432	17,667475
Z	r ₅	r ₆	r ₇	r ₈
mm	mm	mm	mm	mm
0,0	17,667863	17,667944	17,667906	17,668021
0,1	17,667839	17,667915	17,667875	17,667986
0,2	17,667810	17,667882	17,667842	17,667951
0,3	17,667781	17,667850	17,667809	17,667916
0,4	17,667757	17,667823	17,667780	17,667885
0,5	17,667738	17,667802	17,667757	17,667860
0,6	17,667726	17,667785	17,667739	17,667841
0,7	17,667713	17,667769	17,667721	17,667823
0,8	17,667700	17,667752	17,667704	17,667804
0,9	17,667683	17,667735	17,667685	17,667784

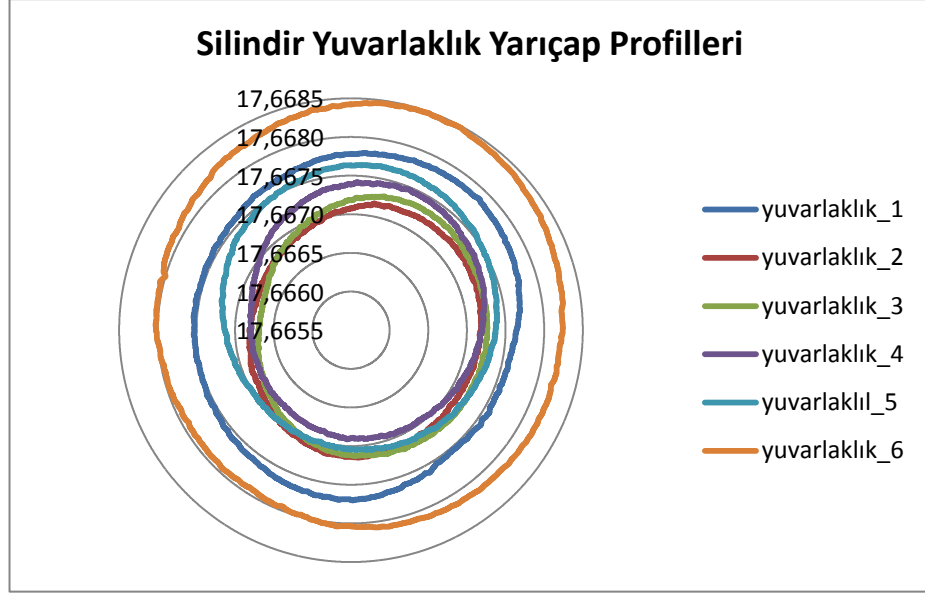


Şekil 6.11: Silindir doğrusallık yarıçap profilleri.

Tablo 6.13’ de silindire ait yuvarlaklık yarıçap değerlerinin bir kısmı, Şekil 6.12’ de ise yuvarlaklık yarıçap profillerine ait grafik verilmiştir.

Tablo 6.13: Silindire ait yuvarlaklık yarıçap değerlerinin bir kısmı.

Silindir Yuvarlaklık Yarıçap Değerleri						
Açı	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆
derece	mm	mm	mm	mm	mm	mm
0	17,667782	17,667063	17,667135	17,667436	17,667617	17,668223
0,1	17,667782	17,667063	17,667135	17,667436	17,667615	17,668224
0,2	17,667781	17,667061	17,667135	17,667437	17,667615	17,668223
0,3	17,667781	17,667062	17,667135	17,667437	17,667614	17,668223
0,4	17,667781	17,667060	17,667136	17,667437	17,667613	17,668224
0,5	17,667781	17,667061	17,667136	17,667437	17,667613	17,668225
0,6	17,667781	17,667061	17,667137	17,667438	17,667612	17,668225
0,7	17,667780	17,667062	17,667138	17,667439	17,667611	17,668225
0,8	17,667780	17,667063	17,667139	17,667439	17,667612	17,668225
0,9	17,667780	17,667064	17,667140	17,667439	17,667611	17,668225



Şekil 6.12: Silindir yuvarlaklık yarıçap profilleri.

Bundan sonraki aşamada yarıçap değerlerinden her z noktası için x ve y koordinat değerleri elde edilmiştir. Burada x ve y değerleri elde edilirken aşağıdaki 6.1 ve 6.2 numaralı formüller kullanılmıştır.

$$x = r \cos(\theta) \quad (6.3)$$

$$y = r \sin(\theta) \quad (6.4)$$

Buradan elde edilen x ve y değerleri piston ve silindire ait verilerin eş merkezli hale getirilmesinde kullanılacaktır.

Tablo 6.14 ve Tablo 6.15’ da sırasıyla piston ve silindir doğrusallık yarıçaplarına ait x, y ve z koordinatlarının bir kısmı verilmiştir.

Tablo 6.14: Piston doğrusallık yarıçap değerlerine ait x,y ve z koordinat değerleri.

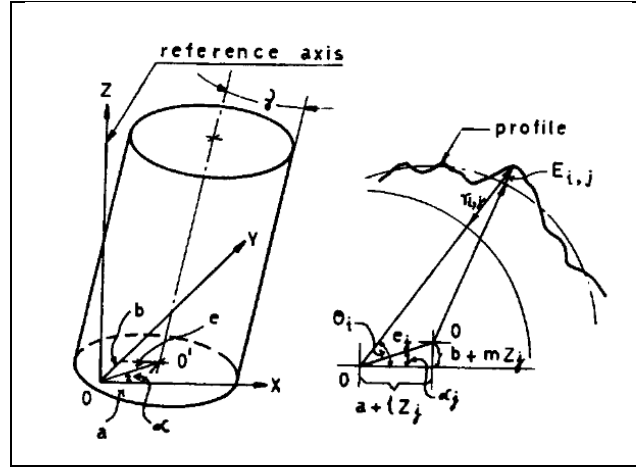
Piston Doğrusallık Yarıçap Koordinatları								
z	x	y	x	y	x	y	x	y
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
	D ₁		D ₂		D ₃		D ₄	
0	17,666103	0	12,491817	12,491817	0	17,666000	-12,491679	12,491679
0,1	17,666117	0	12,491824	12,491824	0	17,666011	-12,491688	12,491688
0,2	17,666131	0	12,491831	12,491831	0	17,666024	-12,491699	12,491699
0,3	17,666146	0	12,491839	12,491839	0	17,666038	-12,491710	12,491710
0,4	17,666160	0	12,491848	12,491848	0	17,666054	-12,491722	12,491722
0,5	17,666176	0	12,491859	12,491859	0	17,666071	-12,491733	12,491733
0,6	17,666192	0	12,491871	12,491871	0	17,666089	-12,491745	12,491745
0,7	17,666207	0	12,491883	12,491883	0	17,666105	-12,491758	12,491758
0,8	17,666221	0	12,491892	12,491892	0	17,666119	-12,491769	12,491769
0,9	17,666234	0	12,491900	12,491900	0	17,666129	-12,491778	12,491778
	D ₅		D ₆		D ₇		D ₈	
0	-17,666007	0	-12,491950	-12,491950	0	-17,666406	12,491887	-12,491887
0,1	-17,666022	0	-12,491959	-12,491959	0	-17,666417	12,491895	-12,491895
0,2	-17,666036	0	-12,491967	-12,491967	0	-17,666429	12,491902	-12,491902
0,3	-17,666049	0	-12,491975	-12,491975	0	-17,666442	12,491909	-12,491909
0,4	-17,666064	0	-12,491984	-12,491984	0	-17,666455	12,491917	-12,491917
0,5	-17,666080	0	-12,491995	-12,491995	0	-17,666469	12,491927	-12,491927
0,6	-17,666097	0	-12,492006	-12,492006	0	-17,666484	12,491937	-12,491937
0,7	-17,666114	0	-12,492017	-12,492017	0	-17,666497	12,491949	-12,491949
0,8	-17,666130	0	-12,492027	-12,492027	0	-17,666509	12,491958	-12,491958
0,9	-17,666143	0	-12,492034	-12,492034	0	-17,666518	12,491966	-12,491966

Tablo 6.15: Silindir doğrusallık yarıçap değerlerine ait x,y ve z koordinat değerleri.

Silindir Doğrusallık Yarıçap Koordinatları								
z	x	y	x	y	x	y	x	y
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
	D ₁		D ₂		D ₃		D ₄	
0	17,667993	0	12,493089	12,493089	0	17,667647	-12,492915	12,492915
0,1	17,667958	0	12,493066	12,493066	0	17,667618	-12,492899	12,492899
0,2	17,667921	0	12,493042	12,493042	0	17,667586	-12,492880	12,492880
0,3	17,667885	0	12,493017	12,493017	0	17,667552	-12,492862	12,492862
0,4	17,667853	0	12,492996	12,492996	0	17,667521	-12,492846	12,492846
0,5	17,667824	0	12,492979	12,492979	0	17,667499	-12,492834	12,492834
0,6	17,667801	0	12,492964	12,492964	0	17,667481	-12,492825	12,492825
0,7	17,667779	0	12,492950	12,492950	0	17,667465	-12,492814	12,492814
0,8	17,667759	0	12,492936	12,492936	0	17,667449	-12,492803	12,492803
0,9	17,667739	0	12,492923	12,492923	0	17,667432	-12,492792	12,492792
	D ₅		D ₆		D ₇		D ₈	
0	-17,667863	0	-12,493123	-12,493123	0	-17,667906	12,493177	-12,493177
0,1	-17,667839	0	-12,493102	-12,493102	0	-17,667875	12,493153	-12,493153
0,2	-17,667810	0	-12,493079	-12,493079	0	-17,667842	12,493128	-12,493128
0,3	-17,667781	0	-12,493057	-12,493057	0	-17,667809	12,493103	-12,493103
0,4	-17,667757	0	-12,493037	-12,493037	0	-17,667780	12,493082	-12,493082
0,5	-17,667738	0	-12,493022	-12,493022	0	-17,667757	12,493064	-12,493064
0,6	-17,667726	0	-12,493011	-12,493011	0	-17,667739	12,493050	-12,493050
0,7	-17,667713	0	-12,492999	-12,492999	0	-17,667721	12,493038	-12,493038
0,8	-17,667700	0	-12,492987	-12,492987	0	-17,667704	12,493024	-12,493024
0,9	-17,667683	0	-12,492975	-12,492975	0	-17,667685	12,493010	-12,493010

6.4. Yarıçap Değerlerinin Yeni Koordinat Düzlemine Aktarılması

Piston ve silindire ait ölçüm verilerinin birleştirilmesinden sonra hem piston hem de silindire ait birleştirilmiş verilerin aynı koordinat düzlemine aktarılması gereklidir [11]. Yeni koordinat eksenini belirlenmesinde [15] de belirtilen genel metot uygulanmıştır. Bu metoda göre hem piston hem de silindire ait yuvarlaklık değerleri piston ve silindirin aynı eksene oturtulmasında kullanılır.



Şekil 6.13: Silindir için referans koordinat düzlemi ve yeni koordinat düzlemi.

Şekil 6.13' de görüldüğü üzere boyutsal verilerin yeni koordinat düzlemine aktarılabilmesi için a, b, m ve l katsayılarının belirlenmesi gereklidir [15]. Octave ortamında hem piston hemde silindir için yapılan hesaplamalar sonucunda piston ve silindire ait elde edilen katsayılar Tablo 6.16' de verilmiştir.

Tablo 6.16: Piston ve silindire ait katsayılar.

Katsayılar	Piston	Silindir
a	1,55E-04	1,23E-05
b	-2,25E-04	1,30E-05
l	7,26E-06	1,86E-06
m	-7,64E-06	-5,88E-07

Katsayılar belirlendikten sonra aşağıda verilen denklem uygulanarak, her z noktasındaki mevcut yarıçap değerlerinden yeni koordinat düzlemindeki yarıçap değerleri elde edilir.

$$x' = x - (a + l * z) \quad (6.3)$$

$$y' = y - (b + m * z) \quad (6.4)$$

Burada yeni koordinat sistemindeki yarıçap değerlerinin belirlenmesinde gerekli matematiksel işlemlerin yapılabilmesi için Octave kullanılmıştır. Matematiksel analiz sonucunda elde edilen verilerin en küçük kareler metodu ile elde edilen yarıçap değerlerine uygulanması ile piston ve silindire ait yeni yarıçap değerleri elde edilmiştir.

Tablo 6.17' de pistonu ait yarıçap değerlerinin yeni koordinat düzlemine taşınması sonucunda elde edilen yeni yarıçap değerleri gösterilmektedir.

Tablo 6.17: Verilerin yeni koordinat düzlemine taşınması sonucunda elde edilen yeni pistonu yarıçap değerleri.

Piston									
Z	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	r ₇	r ₈	r _{ort}
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
0,0	17,665948	17,665879	17,665845	17,665902	17,666161	17,666505	17,666561	17,666196	17,666124
0,1	17,665962	17,665886	17,665856	17,665915	17,666177	17,666518	17,666573	17,666208	17,666137
0,2	17,665975	17,665895	17,665868	17,665930	17,666192	17,666530	17,666585	17,666217	17,666149
0,3	17,665989	17,665906	17,665881	17,665946	17,666205	17,666542	17,666599	17,666227	17,666162
0,4	17,666002	17,665918	17,665896	17,665962	17,666221	17,666556	17,666613	17,666238	17,666176
0,5	17,666018	17,665932	17,665913	17,665978	17,666238	17,666573	17,666628	17,666252	17,666191
0,6	17,666033	17,665948	17,665930	17,665995	17,666257	17,666590	17,666643	17,666267	17,666208
0,7	17,666047	17,665964	17,665945	17,666013	17,666274	17,666606	17,666657	17,666283	17,666224
0,8	17,666060	17,665976	17,665958	17,666028	17,666291	17,666620	17,666669	17,666296	17,666237
0,9	17,666073	17,665986	17,665968	17,666041	17,666305	17,666633	17,666679	17,666308	17,666249

Tablo 6.18: Pistona ait yarıçap verilerinin yeni koordinat düzlemine aktarılmadan önceki ve sonraki değerleri arasındaki farklar.

FARK									
z	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	r ₇	r ₈	r _{ort}
mm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
0,0	8,8	12,4	8,8	0,0	-8,8	-12,4	-8,8	0,0	0,0007
0,1	8,8	12,4	8,8	0,0	-8,8	-12,4	-8,8	0,0	0,0007
0,2	8,8	12,5	8,8	0,0	-8,8	-12,5	-8,8	0,0	0,0000
0,3	8,9	12,6	8,9	0,0	-8,9	-12,6	-8,9	0,0	-0,0007
0,4	8,9	12,6	8,9	0,0	-8,9	-12,6	-8,9	0,0	0,0007
0,5	9,0	12,7	9,0	0,0	-9,0	-12,7	-9,0	0,0	-0,0007
0,6	9,0	12,7	9,0	0,0	-9,0	-12,7	-9,0	0,0	0,0007
0,7	9,0	12,8	9,0	0,0	-9,0	-12,8	-9,0	0,0	-0,0007
0,8	9,1	12,8	9,1	0,0	-9,1	-12,9	-9,1	0,0	-0,0014
0,9	9,1	12,9	9,1	0,0	-9,1	-12,9	-9,1	0,0	0,0014

Tablo 6.18’ de pistona ait yarıçap değerlerinin yeni koordinat düzlemine aktarılmadan önceki ve sonraki ilk 10 değer karşılaştırılması ppm cinsinden verilmiştir. Tabloya göre en büyük fark ikinci ve altıncı doğrusallık profillerinde sırasıyla -13 ppm ve 13 ppm olarak görülmektedir. Pistona ait tüm doğrusallık profillerine ait yarıçap değerleri incelendiğinde yarıçap değerleri arasındaki en büyük farkın 43 ppm olduğu ancak ortalama yarıçap değerleri arasında anlamlı bir farkın (maksimum 0,00283 ppm) olmadığı görülmüştür.

Tablo 6.19’ de silindire ait yarıçap değerlerinin yeni koordinat düzlemine taşınması sonucunda elde edilen yeni yarıçap değerleri gösterilmektedir.

Tablo 6.19: Verilerin yeni koordinat düzlemine taşınması sonucunda elde edilen yeni silindir yarıçap değerleri.

Silindir									
Z	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	r ₇	r ₈	r _{ort}
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
0	17,667981	17,667878	17,667635	17,667650	17,667876	17,667962	17,667918	17,668021	17,667981
0,1	17,667945	17,667845	17,667606	17,667627	17,667851	17,667933	17,667887	17,667986	17,667945
0,2	17,667909	17,667811	17,667573	17,667600	17,667823	17,667899	17,667855	17,667951	17,667909
0,3	17,667872	17,667776	17,667539	17,667574	17,667794	17,667869	17,667822	17,667916	17,667872
0,4	17,667839	17,667746	17,667508	17,667552	17,667770	17,667841	17,667793	17,667885	17,667839
0,5	17,667811	17,667721	17,667485	17,667535	17,667752	17,667821	17,667771	17,667860	17,667811
0,6	17,667787	17,667701	17,667467	17,667522	17,667739	17,667804	17,667752	17,667841	17,667787
0,7	17,667766	17,667680	17,667451	17,667507	17,667727	17,667788	17,667734	17,667823	17,667766
0,8	17,667745	17,667660	17,667435	17,667491	17,667713	17,667771	17,667718	17,667804	17,667745
0,9	17,667725	17,667642	17,667418	17,667476	17,667697	17,667754	17,667699	17,667784	17,667725

Tablo 6.20: Silindire ait yarıçap verilerinin yeni koordinat düzlemine aktarılmadan önceki ve sonraki değerleri arasındaki farklar.

FARK									
z	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	r ₇	r ₈	r _{ort}
mm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
0,0	0,7	1,0	0,7	0,0	-0,7	-1,0	-0,7	0,0	-0,0007
0,1	0,7	1,0	0,7	0,0	-0,7	-1,0	-0,7	0,0	0,0000
0,2	0,7	1,0	0,7	0,0	-0,7	-1,0	-0,7	0,0	0,0000
0,3	0,7	1,0	0,7	0,0	-0,7	-1,0	-0,7	0,0	0,0014
0,4	0,7	1,0	0,7	0,0	-0,7	-1,0	-0,7	0,0	0,0007
0,5	0,8	1,1	0,8	0,0	-0,8	-1,1	-0,8	0,0	-0,0014
0,6	0,8	1,1	0,8	0,0	-0,8	-1,1	-0,8	0,0	0,0014
0,7	0,8	1,1	0,8	0,0	-0,8	-1,1	-0,8	0,0	-0,0007
0,8	0,8	1,1	0,8	0,0	-0,8	-1,1	-0,8	0,0	0,0000
0,9	0,8	1,1	0,8	0,0	-0,8	-1,1	-0,8	0,0	-0,0007

Tablo 6.20’ de silindire ait yarıçap değerlerinin yeni koordinat düzlemine aktarılmadan önceki ve sonraki ilk 10 değer karşılaştırılması ppm cinsinden verilmiştir. Tabloya göre en büyük fark ikinci ve altıncı doğrusallık profillerinde sırasıyla -1,1 ppm ve 1,1 ppm olarak görülmektedir. Silindire ait tüm doğrusallık profillerine ait yarıçap değerleri incelendiğinde yarıçap değerleri arasındaki en büyük farkın 6.2 ppm olduğu ancak ortalama yarıçap değerleri arasında anlamlı bir farkın (maksimum 0,0042 ppm) olmadığı görülmüştür.

Hem pistona hemde silindire ait veriler incelendiğinde piston-silindir ünitesinin üretim kalitesinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

6.5. Efektif Alanın Belirlenmesi

Piston ve silindir aynı uzunluğa sahip olmadığından dolayı, silindire ait yarıçap değerleri ekstrapole edilmiştir. Ekstrapolasyon işlemi Octave ortamında gerçekleştirilmiş olup, lineer ekstrapolasyon yöntemi kullanılmıştır. Ancak ekstrapolasyon işleminde belirli bir noktadan sonra piston yarıçap değerlerinin silindir yarıçap değerlerinden daha büyük olduğu görülmüştür. Bu nedenle ekstrapolasyonda elde edilen değerler kullanılmamıştır.

Boyutsal ölçüm verilerinden piston-silindir ünitesine ait efektif alan değerinin hesaplanmasında Dadson teorisi kullanılmıştır. Bu amaçla 4.15 numaralı formül

labview ortamında simule edilmiştir. Sayısal integrasyon yöntemi olarak Simpson 3/8 yöntemi kullanılmıştır.

Yapılan işlemler sonucunda hem piston hem de silindire ait her z noktasında 8 adet yarıçap değeri doğrusallık profillerinden elde edilmiştir. Ayrıca yuvarlaklığın yapıldığı z noktalarında ise, 8 adet doğrusallık çap verisine ilave olarak 3600 adet çap verisi mevcuttur. Oluşturulan algoritmada efektif alanın hesaplanmasında her z noktası için tek bir silindir yarıçapı ve tek bir piston yarıçapına ihtiyaç vardır. Bu nedenle piston ve silindir eksenı boyunca her z noktasına karşılık gelen birden fazla yarıçap değerinden iki farklı yöntem kullanılarak tek bir yarıçap değeri elde edilmiştir.

Birinci metotta her z noktasındaki sekiz farklı yarıçapın ortalaması alınmıştır. Böylelikle hem silindir hem de piston için her z noktasına karşılık gelen tek bir yarıçap değeri elde edilmiştir. Tablo 6.16’ da piston ve silindire ait ilk 10 ortalama yarıçap değerleri verilmiştir.

Tablo 6.21 : Piston ve silindire ait yarıçapların ortalaması.

z	r	R
mm	mm	mm
0	17,666124	17,667865
0,1	17,666137	17,667835
0,2	17,666149	17,667803
0,3	17,666162	17,667770
0,4	17,666176	17,667742
0,5	17,666191	17,667719
0,6	17,666208	17,667702
0,7	17,666224	17,667685
0,8	17,666237	17,667667
0,9	17,666249	17,667649

İkinci yöntemde ise sekiz adet yarıçap değeri labview ortamında dairesel fit yöntemiyle daireye fit edilmiştir. Hem piston hem de silindir için aynı işlem

tekrarlanarak her z noktasında tek bir yarıçap değeri elde edilmiştir. Tablo 6.17’ de piston ve silindire ait ilk 10 dairesel fit yarıçap değerleri verilmiştir.

Tablo 6.22: Piston ve silindire ait yarıçapların dairesel fit değerleri.

z	r	R
mm	mm	mm
0	17,666124	17,667865
0,1	17,666137	17,667835
0,2	17,666149	17,667803
0,3	17,666162	17,667770
0,4	17,666176	17,667742
0,5	17,666191	17,667719
0,6	17,666208	17,667702
0,7	17,666224	17,667685
0,8	17,666237	17,667667
0,9	17,666249	17,667649

Tablo 6.21 ve Tablo 6.22 ‘da verilen ortalama yarıçap ve dairesel fit yarıçap değerleri arasında anlamlı bir fark yoktur. Bu durum piston-silindir ünitesinin yüksek üretim kalitesini göstermektedir.

Labview ortamında oluşturulan algoritmada sayısal integrasyon yöntemi olarak, verilerin eşit aralıklı olmasından dolayı Simpsons’ 3/8 yöntemi kullanılmıştır.

Ortalama yarıçap değerlerinin algoritmada kullanılması sonucunda elde edilen efektif alan değeri $980,557589 \text{ mm}^2$ olarak hesaplanmıştır. Dairesel fit sonucunda elde edilen yarıçap değerlerinin algoritmada kullanılması sonucunda elde edilen efektif alan değeri ise $980,557546 \text{ mm}^2$ dir.

İki farklı yarıçap değerleri ile elde edilen efektif alanlar arasında ki fark 0,04 ppm olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla her iki yöntem ile elde edilen efektif alan değerleri arasında önemli bir fark yoktur.

6.6. Efektif Alanın Belirsizliğinin Hesaplanması

Efektif alana ait belirsizliğin hesaplanmasında yarıçap belirsizliği kullanılmıştır. Doğrusallık ve yuvarlaklık ölçümlerine ait belirsizlik 50 nm, mutlak çap ölçümlerine ait belirsizlik ise 500 nm'dir. Bu belirsizlik değerleri, (6.5) numaralı formül kullanılarak, toplam yarıçap belirsizliği değerinin elde edilmesinde kullanılmıştır.

$$u(r) = \sqrt{u(r_{\text{doğrusallık}})^2 + u(r_{\text{yuvarlaklık}})^2 + u(r_{\text{mutlak}})^2} \quad (6.5)$$

Burada elde edilen yarıçap belirsizlik değeri $u(r)=5,05E-7$ m'dir.

Elde edilen yarıçap belirsizlik değeri (6.6) numaralı formülde kullanılarak efektif alana ait belirsizlik değeri elde edilmiştir [10].

$$\frac{u(A_0)}{A_0} = \frac{2u(r)}{(A_0/\pi)^{0.5}} \quad (6.6)$$

Formülde $A_0=9,8055755E-04$ m² değeri kullanılarak $u(A_0)= 5,6057387E-08$ m² olarak hesaplanmıştır.

6.7. Sonuçların Karşılaştırılması

765 seri numaralı piston-silindir ünitesine ait farklı zamanlarda yapılan kalibrasyonlarda elde edilen efektif alan değerleri Tablo 6.23 'de verilmiştir. Burada verilen efektif alan değerleri cross-float adı verilen karşılıklı akışa dayalı yöntem ile elde edilmiş değerlerdir.

Tablo 6.23: 765 seri numaralı piston silindir ünitesine ait efektif alan değerleri.

Kalibrasyon Tarihi	Kalibrasyonu Yapan Kuruluş	A0 (mm ²)
22.10.2005	DHI Fluke (Üretici Firma)	980,540
20.11.2005	PTB	980,541 ± 0,015
2010	LNE	980,538 ± 0,009

Yukarıda verilen karşılıklı akışa dayalı yöntem (cross-float) ile belirlenmiş efektif alan değerleri ile bu çalışmada boyutsal ölçümler vasıtası ile elde edilen efektif alan değerleri arasında maksimum 19 ppm, minimum ise 17 ppm fark vardır. Bu veriler ışığında boyutsal ölçümlerle efektif alan hesaplanması yönteminin başarılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] JCGM, (2012), International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM 3rd edition), Joint Committee for Guides in Metrology.
- [2] JCGM, (2008), Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, Joint Committee for Guides in Metrology.
- [3] Molinar G., (1993), “An old instrument in the new technological scenery: The piston gauge in liquid media up to 1 GPa”, *Metrologia*, 30, 615-623.
- [4] Franco P., Molinar G., (1992), “Modern Gas-Based Temperature and Pressure Measurements”, Plenum Press (New York).
- [5] EURAMET (2011), Calibration of Pressure Balances, EURAMET cg 3, European Association of National Metrology Institutes.
- [6] Dadson R. S., Lewis S. L., Peggs G. N., (1982), “The Pressure Balance: Theory and Practice”, London: HMSO.
- [7] Ayyıldız G., Koçuş İ., (2005), “Piston Silindir Ünitesi Efektif Alanının Boyutsal Ölçümlerle Belirlenmesi”, TMMOB Makina Mühendisleri Odası VI. Ulusal Ölçüm Bilim Kongresi, 117-122, Eskişehir, Türkiye, 17-18 Kasım.
- [8] Molinar G., Rebaglia B., Sacconi A., Legras J. C., Vailleau G. P., Schmidt J. W., Stoup J. R., Flack D. R., Sabuga W., Jusko O., (1999), “CCM key comparison in the pressure range 0.05 MPa to 1 MPa (gas medium, gauge mode). Phase A1: Dimensional measurements and calculation of effective area”, *Metrologia*, 36, 657-662.
- [9] Jusko O., Bastam D., Neugebauer M., Reinmann H., Sabuga W., Priruenrom T., (2010), “Final results of the geometrical calibration of the pressure balances to be used for the new determination of the Boltzmann constant”, *Key Engineering Materials*, 437, 150-154.
- [10] Molinar G., Bergoglio M., Sabuga W., Otal P., Ayyıldız G., Verbeek J., Farar P., (2005), “Calculation of effective area A0 for six piston-cylinder assemblies of pressure balances. Results of the EURAMET Project 740”, *Metrologia*, 42, 197-201.
- [11] Sabuga W., Priruenrom T., (2007), “An approach to the evaluation of dimensional measurements on pressure measuring piston-cylinder assemblies”, IMEKO 20th TC3, 3rd TC16 and 1st TC22 International Conference, 1-8, Merida, Mexico, 27-30 November.

- [12] Legras J. C., Sabuga W., Molinar G., Schmidt J. W., (1999), “CCM key comparison in the pressure range 50 kPa to 1000 kPa (gas medium, gauge mode). Phase A2: Pressure Measurements”, Metrologia, 36, 663.
- [13] Saxholm S., Hemming B., Heinone M., Otal P., Rantanen M., Esala V., Lassila A., (2011), “Traceability of the pressure balance effective area at MIKES”, Proceedings of the 5th CCM International Conference on Pressure and Vacuum Metrology and the 4th International Conference IMEKO TC16, 284-287, Berlin, Germany, 2-15 May.
- [14] Web 1, (2018), <https://www.motioncontroltips.com/what-is-an-lvdt-linear-variable-differential-transformer/>, (Erişim Tarihi: 20/02/2019).
- [15] Murty T. S. R., Rao S. Y., (1981), “A Simple Approach for Evaluation of Cylinder Surfaces”, Annals of the CIRP, 30 (1981), 441-444.

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet TÜRK 1984 yılında Bozüyük'te doğdu. 2002 yılında başladığı Boğaziçi Üniversitesi Fizik Öğretmenliği Bölümünü 2007 yılında dereceyle bitirdi. 2015 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilimdalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2014 yılından bu yana TÜBİTAK UME Basınç Laboratuvarında basınç metrolojisi üzerine araştırmacı olarak çalışmaktadır.