

PISTON SİLİNDİR ÜNİTESİ EFEKTİF ALANININ BOYUTSAL ÖLÇÜMLERLE BELİRLENMESİ

Güler AYYILDIZ, Dr. İlknur KOÇAŞ

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, P.K: 54 41470 Gebze-Kocaeli TÜRKİYE
Tel: 262 679 50 00 e-mail: guler.ayyildiz@ume.tubitak.gov.tr, ilknur.kocas@ume.tubitak.gov.tr

ÖZET

Pistonlu basınç standartları, piston-silindir ünitesi üzerine etki eden kuvvetin dengelenmesi yoluyla doğrudan basınç ölçümlerinin gerçekleştirildiği primer basınç ölçme cihazlarıdır. Çok düşük belirsizliklerde referans basıncın oluşturulabildiği pistonlu basınç standartları basınç metrolojisi alanında önemli bir yere sahiptir. Pistonlu basınç standardının çalışma prensibi, A_{eff} efektif alanına sahip pistonun altına uygulanan akışkan basıncının oluşturduğu kuvvetin, akışkan içerisinde serbestçe yüzen piston üzerindeki kütlelerin oluşturduğu F kuvvetiyle dengelenmesi esasına dayanır. Dolayısıyla bu sistemlerle çok hassas basınç ölçümlerini gerçekleştirebilmek için, piston-silindir ünitesi efektif alanının yüksek doğrulukta bilinmesi gerekmektedir.

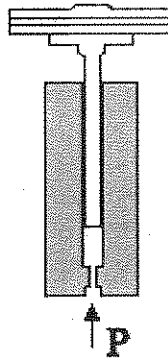
Bu çalışmada piston-silindir ünitelerinin efektif alan değerinin belirlenmesinde kullanılan boyutsal ölçüm yöntemi hakkında bilgi verilecek ve bu konuda UME Basınç Standartları Laboratuvarı'nda yapılan çalışmalar anlatılacaktır.

Anahtar sözcükler: Pistonlu basınç standartları, efektif alan belirlenmesi, boyutsal ölçümler

1. GİRİŞ

Pistonlu basınç standartları, yüksek doğruluk ve çok düşük belirsizlikle basınç ölçüm ve kalibrasyonlarını gerçekleştirme özelliğine sahip olup, basınç metrolojisi alanında referans standart olarak önemli bir yere sahiptirler.

Pistonlu basınç ölçüm sisteminin ana elemanı olan piston silindir ünitesinin şematik çizimi Şekil 1' de gösterilmiştir. Sistemin çalışma prensibi, piston-silindir ünitesi üzerinde oluşturulan kuvvetlerin dengelenmesine dayanır. Buna göre; A_{eff} efektif alanına sahip pistonu uygulanan akışkan basıncının yarattığı kuvvet, akışkan içerisinde serbestçe yüzen piston üzerindeki kütleler yardımıyla oluşturulan F kuvvetiyle dengelenir. Sistemde denge sağlandığı durumda oluşturulan basınç; $p = F / A_{eff}$ 'e eşit olur. Burada piston-silindir ünitesi yüzeyinin çok iyi işlenmiş olması sistem performansını etkileyen en önemli kriterlerden biridir.



Şekil 1: Basit tip piston-silindir ünitesi

Pistonlu basınç standartlarına ait piston-silindir ünitesi efektif alanının belirlenmesinde 3 temel yöntem kullanılmaktadır:

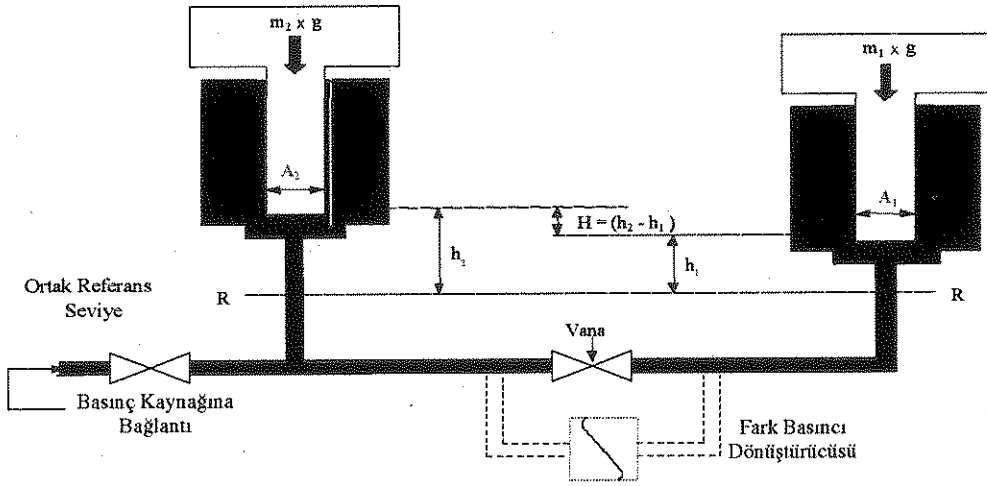
1. İnterferometrik sıvı manobarometre ile yapılan ölçümlerle efektif alanın belirlenmesi
2. Referans pistonlu basınç standardıyla gerçekleştirilen akışa dayalı karşılaştırma yöntemiyle efektif alanın belirlenmesi
3. Boyutsal ölçümler yardımıyla efektif alanın belirlenmesi

İnterferometrik cıvalı manobarometre sistemi, cıva, yağ vb. akışkanlarla oluşturulan sıvı sütunu seviye farkının lazer interferometresiyle belirlendiği, çok düşük belirsizliklerde (5-10 ppm mertebesinde) basınç ölçümlerinin gerçekleştirildiği sistemlerdir. Bu sistemlerin maliyetlerinin yüksek oluşu ve sistem kararlılığının sağlanmasındaki zorluklar sistemin kurulması ve kullanılmasındaki yaygınlık düzeyini azaltıcı bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır.

Basınç metrolojisinde piston silindir ünitesinin efektif alanının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan akışa dayalı karşılaştırma (cross-floating) yönteminde; alanı belirlenmek istenen piston-silindir ünitesi ve referans piston silindir ünitesi ortak bir basınç hattına bağlanır ve her iki piston-silindir ünitesi üzerinde nominal olarak aynı basınç değerleri oluşturulur.

Pistonların silindirler içerisindeki doğal düşme hızları iki ünite arasındaki vana kapalı iken ölçüldükten sonra arasındaki vana açılır ve pistonların vana açılmadan önceki doğal düşme hızlarına erişilinceye kadar, yani denge konumu sağlanıncaya kadar, pistonlardan birisi üzerine kütle değerleri miligramlar mertebesinde olan hassas ağırlıklar ilave edilir. Denge konumuna ulaşıldığında, iki piston silindir ünitesi de ortak bir referans seviyede aynı basıncı ölçer. Bu sırada iki sistemi birbirine bağlayan hatta akış yoktur. (Şekil 2)

UME Basınç Standartları Laboratuvarında gerçekleştirilen pistonlu basınç standardı kalibrasyonlarında bu yöntem kullanılmaktadır.



Şekil 2. Piston Silindirlerin Doğrudan Karşılaştırıldığı Deney Düzenliği

Güvenirliliği ve yüksek hassasiyette sonuçlar sağlanması sayesinde yaygın olarak kullanılan bu metod izlenebilirlik zincirinin oluşturulmasında –zincirin tepesinde yer alan cihazın dışa bağımlı kalibrasyonu sebebiyle- yetersiz kaldığından primer seviyede efektif alan belirlenmesinde başka yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, enstitümüz tarafından dünyanın önde gelen metroloji enstitüleri tarafından da kullanılmakta olan ve karşılaştırmalı ölçümlerle güvenilirliği ispatlanmış olan boyutsal ölçümlerle piston-silindir ünitesi efektif alanının belirlenmesi çalışmalarına başlanmıştır.

2. BOYUTSAL ÖLÇÜMLER

Piston-silindir ünitesinin efektif alanının yüksek doğrulukla belirlenmesi; çap değeri, yüzey pürüzlülüğü, yuvarlaklık değeri ve sapması gibi geometrik özelliklerinin belirlenmesi ile mümkündür.

Piston-silindir ünitesi efektif alanını belirlemek üzere yapılan boyutsal ölçümler 2 grupta toplanabilir:

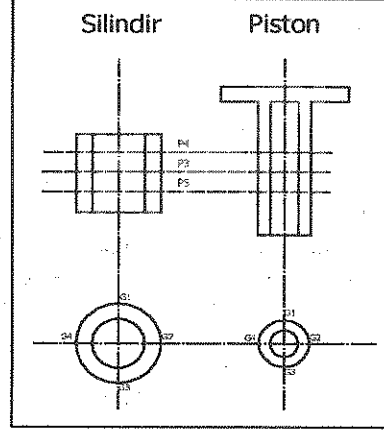
1. Mutlak çap ölçümleri

2. Form ölçümleri

a. Doğrusallık ölçümleri

b. Yuvarlaklık ölçümleri

Mutlak çap ölçümleriyle istenilen kesitlerde piston ve silindir çap değerleri ölçülmektedir. Doğrusallık ölçümleriyle doğrusal bir yüzeyin düz ideal bir doğrudan sapma değerleri, yuvarlaklık ölçümleriyle ise dairesel bir yüzeyin ideal bir daireden sapma değerleri tespit edilmektedir.



Şekil 3 : Piston-silindir ünitesi üzerinde boyutsal ölçümlerin yapıldığı kesitleri gösteren şematik çizim

2.1. Mutlak Çap Ölçümleri

Piston-silindir ünitesi düşey eksenine dik, enine (transverse) kesit (Şekil 3'deki P3, P4, P5 kesitleri) olarak adlandırılan en az üç eksen üzerinden çap ölçümleri yapılır. Bu ölçümlerde, her bir enine kesit üzerinde birbirine dik boylamsal (longitudinal) iki kesit (Şekil 3'teki G1-G3 ve G2-G4 kesitleri) üzerinden iki ölçüm alınarak en az 6 adet çap verisi elde edilmiş olur. Tüm ölçümler piston ve silindir için ayrı ayrı tekrarlanır.

2.2. Doğrusallık Ölçümleri

Doğrusallık ölçümleriyle, piston-silindir ünitesi düşey eksen boyunca boylamsal kesitler (Şekil 3'teki G1-G3 ve G2-G4 kesitleri) arasındaki çap değişimleri verileri elde edilir. Bu ölçümler en az 3 enine kesit aralığı için (Şekil 3'deki P3, P4, P5 kesitleri üzerinden) 2'şer adet olmak üzere piston ve silindir için ayrı ayrı tekrarlanmalıdır. Ölçüm alınacak kesit aralığının küçültülerek ölçüm sayısının artırılması daha hassas sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır.

2.3. Yuvarlaklık Ölçümleri

Enine dairesel kesitler (Şekil 3'deki P3, P4, P5 kesitleri) arasındaki çap değişimi verilerinin elde edildiği yuvarlaklık ölçümleri, boylamsal kesitler (Şekil 3'teki G1-G3 ve G2-G4 kesitleri) üzerinden gerçekleştirilir. Piston ve silindir için ayrı ayrı gerçekleştirilen bu ölçümlerle her bir enine kesitte en az iki olmak üzere toplam 6 adet çap değişimi verisi elde edilmiş olur. Yapılan bu ölçümlerde dairesel kesit üzerinden alınan ölçüm aralığı küçültülerek (örneğin dairesel kesit 1'er derece aralıklarla taranarak 360 adet ölçüm alınabilir) ölçüm sayısının artırılmasıyla ölçüm hassasiyeti artırılmış olur.

3. EFEKTİF ALAN VE BELİRSİZLİĞİNİN HESAPLANMASI

Piston-silindir ünitesine ait mutlak çap ve form ölçümleri verileri kullanılarak 3 farklı yöntemle efektif alan hesaplanabilir:

3.1. Mutlak çap ölçümleri ortalaması:

Piston-silindir ünitesi efektif alanının belirlenmesinde kullanılan bu en temel ve basit hesaplama yönteminde mutlak çap ölçümlerinin ortalaması alınarak piston ve silindir yarıçapları bulunur. $A = \pi \cdot r^2$ alan formülüyle piston ve silindir ortalama alan değerleri bulunur. Efektif alan, $A_0 = (A_p + A_s) / 2$ formülüyle hesaplanır.

3.2. Mutlak çap ve form ölçümleri ortalaması:

Mutlak çap ölçümleriyle birlikte form ölçümleriyle elde edilmiş yarıçap değerlerinin ortalaması alınarak piston ve silindirin ortalama yarıçap değerleri bulunur. $A = \pi \cdot r^2$ alan formülüyle piston ve silindir ortalama alan değerleri bulunur. Efektif alan, $A_0 = (A_p + A_s) / 2$ formülüyle hesaplanır.

3.3. Dadson Teori:

Piston-silindir ünitesi üzerine uygulanan basınç 0 olduğu durumda, efektif alan aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$A_0 = \pi r_0^2 \left[1 + \frac{h_0}{r_0} + \frac{1}{r_0} \frac{\int_0^l \frac{(u(x) + U(x))}{h(x)^3} dx}{\int_0^l \frac{1}{h(x)^3} dx} \right] \quad (1)$$

Burada, r_0 , yüzme uzunluğunun alt noktasındaki ($x=0$) piston yarıçapı, h_0 , radyal açıklık değeri ve 1 ise piston-silindir ünitesi yüzme uzunluğudur. $U(x)$ ve $u(x)$ ise sırasıyla silindir ve piston form ölçüleriyle elde edilen yarıçaptan sapma değerlerini, $h(x)$ ise x eksenı boyunca radyal açıklık değerlerini belirtmektedir.

Ölçüm sonuçları sapma değerleri yerine yarıçap cinsinden verilmişse, $u(x)$, $U(x)$ ve $h(x)$ aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$u(x) = r(x) - r_0$$

$$U(x) = R(x) - R_0$$

$$h(x) = R(x) - r(x)$$

Formülde yer alan integral değerleri 3 farklı yöntemle hesaplanabilir:

- $u(x)$ ve $U(x)$ değerlerinin toplanarak $h(x)^3$ 'e bölünmesiyle
- Nümerik integral hesaplama yöntemleri ile
 - o Simpson's 3/8 Kuralı (Bu yöntem form ölçümlerinin eşit aralıklarla yapıldığı piston-silindir üniteleri için kullanılabilir.)
 - o Eşit olmayan aralıklı veriler için nümerik integral yöntemi
- $u(x)$, $U(x)$ ve $h(x)$ bileşenlerinin oluşturduğu fonksiyonlarının x değişkenine bağlı grafiği çizildikten sonra, çıkan eğri 6. derece bir polinomla ifade edilir. (curve fit). Daha sonra analitik integral hesabı yapılır.

3.3.1. Simpson's 3/8 Kuralı:

(1) no.lu denklemde yer alan nümerik integral ifadeleri, 4 noktadan 3. derece Lagrange polinom geçirilmesine dayanan Simpson's 3/8 Kuralı ile hesaplanabilir.

$$I = \frac{\int_0^1 \frac{(u(x) + U(x))}{h(x)^3} dx}{\int_0^1 \frac{1}{h(x)^3} dx} = I_1 / I_2 \quad (2)$$

$$I_1 = \int_0^1 (f_1(x)) dx \quad (3)$$

$$f_1(x) = \frac{u(x) + U(x)}{h(x)^3} \quad (4)$$

$$I_2 = \int_0^1 (f_2(x)) dx \quad (5)$$

$$f_2(x) = \frac{1}{h(x)^3} \quad (6)$$

$$I_1 = w \sum_{i=0}^n \frac{f_1(x_i) + 3f_1(x_{i+1}) + 3f_1(x_{i+2}) + f_1(x_{i+3})}{8} \quad (7)$$

$$I_2 = w \sum_{i=0}^n \frac{f_2(x_i) + 3f_2(x_{i+1}) + 3f_2(x_{i+2}) + f_2(x_{i+3})}{8} \quad (8)$$

Burada w iki nokta arasındaki uzaklığı ($w = x_i - x_{i-1}$), n , nokta sayısını, $f_1(x_i)$ ve $f_2(x_i)$, ise $u(x_i)$, $U(x_i)$ ve $h(x_i)$ bileşenlerinden oluşan fonksiyonları göstermektedir.

3.3.2. Eşit olmayan aralıklı veriler için nümerik integral yöntemi:

Form ölçümlerinin eşit aralıklarla alınmadığı durumlarda (1), (2), (3), (4), (5), ve (6): nolu denklemleri takip eden nümerik integral hesaplamaları aşağıdaki formüller kullanılarak yapılabilir:

$$I_1 = \sum_{i=1}^n h_i \frac{f_1(x_i) + f_1(x_{i-1})}{2} \quad (9)$$

$$I_2 = \sum_{i=1}^n h_i \frac{f_2(x_i) + f_2(x_{i-1})}{2} \quad (10)$$

burada h_i , kesitten kesite değişen iki nokta arasındaki mesafeyi vermektedir. ($h = x_i - x_{i-1}$)

3.4. Belirsizlik Hesaplamaları

Mutlak çap, doğrusallık ve yuvarlaklık ölçümlerinden gelen belirsizlik bileşenlerine dayalı olarak efektif alan belirsizliği aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\frac{u(A_0)}{A_0} = \frac{2u(r)}{(A_0/\pi)^{0.5}} \quad (11)$$

$$u(r) = [(u(r_{mutlak}))^2 + (u(r_{doğrusallık}))^2 + (u(r_{yuvarlaklık}))^2]^{0.5} \quad (12)$$

4. UME BASINÇ STANDARTLARI LABORATUVARI'NDA BU KONUDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

UME Basınç Standartları Laboratuvarı'nda kullanılmakta olan pistonlu basınç standartlarına ait piston-silindir ünitelerinin efektif alanının belirlenmesinde akışa dayalı karşılaştırma yöntemi kullanılmaktadır. Laboratuvarın hem iç izlenebilirlik zinciri ölçümleri hem de endüstriyel hizmetler kapsamındaki efektif alan belirlenmesi ölçümleri bu yöntemle gerçekleştirilmektedir.

UME'de piston-silindir ünitesi efektif alanının nümerik yöntemlerle belirlenmesiyle ilgili ilk çalışma EUROMET 463 Projesiyle başlatılmıştır. 1998 yılında çalışmalarına başlanan, Almanya Ulusal Metroloji Enstitüsü'nün (PTB) koordinatörlüğünü yürüttüğü bu projeye Almanya (PTB), İtalya (IMGC-CNR), İngiltere (NPL), Fransa (BNM-LNE) ve Türkiye (TÜBİTAK-UME) katılmıştır. Projeye PTB'ye ait 1 GPa basınca kadar çalışan piston-silindir ünitesine ait basınç distorsiyon katsayısının sonlu-elemanlar yöntemiyle hesaplanması amaçlanmıştır. UME bu projenin 1. fazındaki çalışmalara katılmıştır.

UME'de boyutsal ölçümler yardımıyla piston-silindir ünitesi efektif alanının belirlenmesiyle ilgili şimdiye kadar yürütülen en önemli çalışma EUROMET 740 Projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. 2004 yılı başlarında İtalya (IMGC-CNR), Fransa (BNM-LNE), Almanya (PTB), Hollanda (NMI), Slovakya (SMU) ve Türkiye (TÜBİTAK-UME)'nin katılımcı olarak başlattığı proje aynı yıl sonunda tamamlanmıştır. İtalya Ulusal Metroloji Enstitüsü (IMGC-CNR)'nün proje koordinatörlüğünü üstlendiği projede ideal geometriye sahip olmayan, boyutsal ölçüm verileri mevcut 6 farklı piston-silindir ünitesinin atmosferik basınç altında efektif alanının ve belirsizliğinin hesaplanması hedeflenmiştir. Proje sonunda 6 katılımcı ülkenin efektif alan ve belirsizlik hesaplaması yöntemlerinin ve sonuçlarının karşılaştırılabilir bir şekilde yer aldığı bildiri 19-21 Nisan 2005'te Londra'da gerçekleştirilen 4. Uluslararası CCM Ultra Yüksek Vakumdan Çok Yüksek Basınca (10^9 Pa – 10^9 Pa) Basınç Metrolojisi Konferansı'nda sunulmuştur.

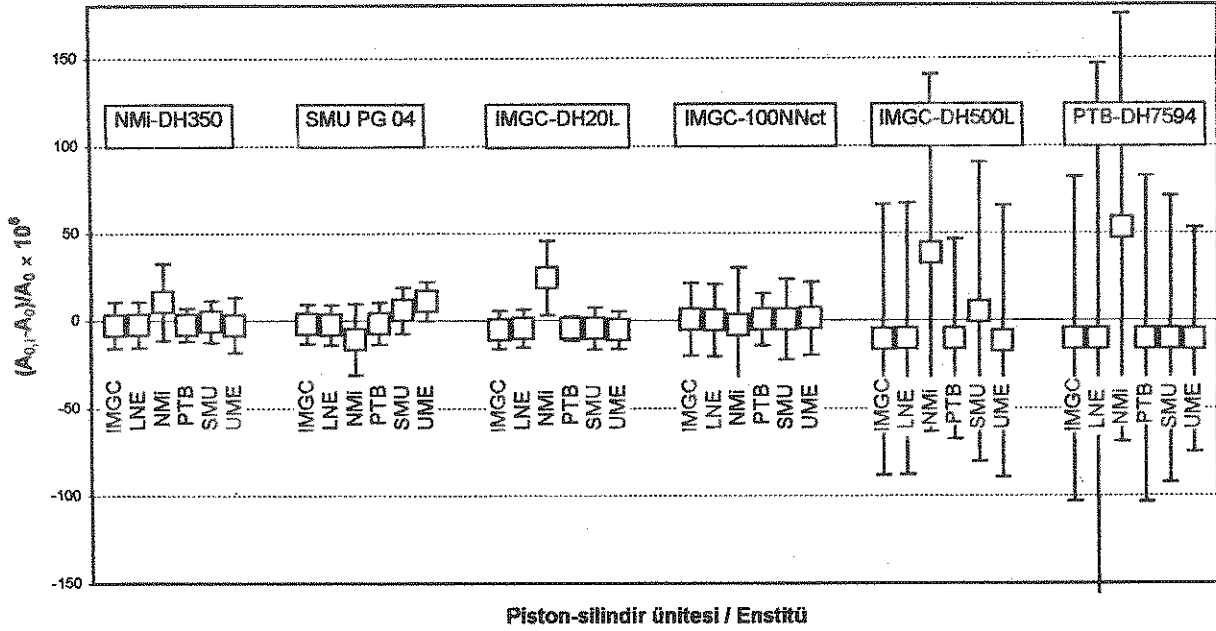
Aşağıdaki tablolarda (Tablo 1 ve Tablo 2) ve Şekil 4 de EUROMET 740 projesi kapsamında boyutsal ölçümler kullanılarak hesaplanan 6 farklı piston-silindir ünitesine ait efektif alan ve belirsizlik değerleri verilmiştir. Tablolarda projenin katılımcısı tüm ülkelerin sonuçları karşılaştırmalı bir şekilde yer almaktadır.

Tablo 1. EUROMET 740 Projesi kapsamında katılımcı ülkeler tarafından hesaplanan 6 farklı piston silindir ünitesine ait efektif alan değerleri

	NMI-DH350	SMU PG04	IMGC-DH20L	IMGC-100NNct	IMGC-DH500L	PTB-DH7594
IMGC	980.52682	982.33058	49.02504	20.00057	1.961043	4.902139
BNM-LNE	980.52710	982.33000	49.02507	20.00056	1.961044	4.902139
NMI	980.540	982.322	49.0265	20.0005	1.96114	4.90245
PTB	980.52712	982.33088	49.02506 ₆	20.00056 ₇	1.961043 ₆	4.902139 ₂
SMU	980.5289	982.3383	49.02507	20.00057	1.961074	4.902139
UME	980.52682	982.34345	49.02503	20.00058	1.961041	4.902137

Tablo 2. EUROMET 740 Projesi kapsamında katılımcı ülkeler tarafından hesaplanan 6 farklı piston silindir ünitesine ait efektif alan belirsizliği değerleri

	NMI-DH350	SMU PG 04	IMGC-DH20L	IMGC-100NNct	IMGC-DH500L	PTB-DH7594
IMGC	13.2	11.3	10.8	20.8	77.5	92.7
BNM-LNE	13.2	11.3	10.8	20.8	77.5	157.0
NMI	22.1	20.3	21.4	33.0	102.0	122.0
PTB	9.5	12.0	6.9	15.0	57.0	93.0
SMU	12.0	13.2	12.0	23.0	85.5	81.8
UME	15.8	11.3	10.8	20.8	77.5	64.0



Şekil 4. 6 farklı piston-silindir ünitesine ait her enstitünün hesaplamış olduğu efektif alan değerlerinin ortalama alan değerlerine göre sapma değerleri

5. SONUÇ

EUROMET 740 Projesi, boyutsal ölçümler yardımıyla piston-silindir efektif alanının belirlenmesi konusunda UME Basınç Standartları Laboratuvarı'nda yürütülen uluslararası nitelikte ilk çalışma olması açısından oldukça önemlidir. Bu projeye birlikte, boyutsal ölçümler yardımıyla piston-silindir ünitesi efektif alanının belirlenmesiyle ilgili olarak hesap algoritmalarının oluşturulması konusunda ciddi bir altyapı oluşturulmuştur. Bulunan sonuçların dünyanın önde gelen ulusal metroloji enstitüleriyle oldukça yakın olması sevindiricidir. (Hesaplanan efektif alan değerleri arasında 2 ppm mertebesinde farklılıklar bulunmaktadır) Bu konudaki çalışmaların sürdürülerek geliştirilmesi gerekliliği açıktır.

Gelecekte yapılacak çalışmalar içerisinde basınç metrolojisindeki önemli parametrelerden biri olan basınç distorsiyon katsayısının boyutsal ölçümler kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi vb. yöntemlerle hesaplanması hedeflenmektedir.

UME Boyutsal Laboratuvarı ile koordineli yürütülen çalışmalarla piston-silindir ünitesi boyutsal ölçümlerinin istenilen belirsizliklerde UME'de gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Böylece UME Basınç Standartları Laboratuvarı'nın şu an yurtdışına bağlı olan izlenebilirliği artık UME üzerinden sağlanabilecektir.

6. REFERANSLAR

1. Dadson, R.S., Lewis, S.L., Peggs, G.N., "The Pressure Balance Theory and Practice", HMSO, London, 1982
2. Sabuga W., Jusko O., "Effective Area of the DH Instruments Piston-cylinder, Piston P0107 and cylinder C0107, Calculated From the Dimensional Measurement Data. Phase A1 of the CCM Comparison in Gas Media up to 1MPa", PTB-Bericht ThEx-6, 1999
3. Molinar G. F., Magiera A., Rebaglia B., Sacconi A., "Dimensional Characterization and Calculations of the Effective Area of a Piston-Cylinder Unit (Number 6040) of CEM-Spain to be Used in a EEC Intercomparison of Pressure Measurement in Gas up to 1 MPa", Rapporto Tecnico Interno - R383, Torino, 1994
4. Molinar G. & al., "Calculation of Effective area A0 for Six Piston-cylinder Assemblies of Pressure Balances. Results of the EUROMET Project 740", The 4th CCM International Conference on Pressure Metrology from Ultra-High Vacuum to Very High Pressures (10⁻⁹ Pa - 10⁹ Pa), London, 2005