

# BİRİNCİL SEVİYE PİSTONLU BASINÇ STANDARTLARI İÇİN YÜKSEK DOĞRULTUDA REFERANS BASINÇ HESABINI ETKİLEYEN PARAMETRELER\*

Dr. İlknur KOÇAŞ\*\*  
Yasin DURGUT  
TÜBİTAK - UME

## ÖZET

Pistonlu basınç standartları birincil seviye referans ölçüm cihazı olarak kullanılmaktadır. 1 GPa basınç değerlerine varan geniş bir basınç ölçüm aralığında kullanılan bu sistemlerde elde edilen basınç değerleri 6-7 ppm belirsizliklere kadar düşebilmektedir.

Piston-silindir ünitesi, kütle seti ve gövde gibi temel elemanlardan oluşan sistemde alanı bilinen piston-silindir ünitesi üzerine kuvvet etki ettirmek suretiyle referans basınç elde edilmektedir. Kütle, piston-silindir malzemesi ısıl genleşme katsayısı, sıcaklık, havanın kaldırma kuvveti etkisi, basınç distorsiyon katsayısı, yerel yer çekimi ivmesi vb. pek çok parametre referans basınç değeri hesabında dikkate alınmalıdır.

Bu çalışmada birincil seviye pistonlu basınç standartlarında referans basıncın yüksek doğrultuda hesaplanabilmesi için dikkate alınması gereken parametreler ve etkileri sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Basınç, pistonlu basınç standardı, piston-silindir ünitesi, belirsizlik, kütle, efektif alan

## Parameters That Affect The Calculation of Reference Pressure Value For High Accuracy Primary Level Pressure Balances

## ABSTRACT

Pressure balances are used as primary level reference measurement instruments. These kinds of instruments have wide pressure ranges up to 1 GPa. In such instruments, the uncertainty of the reference pressure value can be lowered to around 6-7 ppms.

In pressure balance systems which consist of a piston-cylinder unit, mass set and base, reference pressure is obtained by exerting vertical force from the mass set onto the piston with a well-known effective area. There are many parameters to be considered such as mass, the material of the piston-cylinder unit, the thermal expansion coefficient, temperature, air buoyancy effect, the pressure distortion coefficient, local gravity acceleration, etc. during the calculation of reference pressure value.

In this paper, we present and explain the parameters that need to be taken into account in order to accurately calculate the reference pressure value for primary level pressure balances.

**Keywords :** Pressure, pressure balance, piston-cylinder unit, uncertainty, mass, effective area

\*\* İletişim yazarı

\* Bu makale 30 Ekim - 1 Kasım 2008 tarihlerinde Makina Mühendisleri Odası'nca İzmir'de düzenlenen VII. Ulusal Ölçüm Bilim Kongresi'nde bildiri olarak sunulmuştur

## GİRİŞ

**B**asınç ölçümlerinde birincil seviye ölçüm cihazları olarak pistonlu basınç standartları yaygın olarak kullanılmaktadır. Ülkelerin ulusal metroloji enstitüleri başta olmak üzere pek çok akredite laboratuvar da izlenebilirliğin çok düşük belirsizliklerde transfer cihazlara aktarılmasında tercih edilmektedirler.

Farklı tip, model ve tasarımlara sahip pistonlu basınç standartlarında çalışma prensibi temel olarak aynıdır. Yüksek doğrultuda alan değeri bilinen piston-silindir ünitesi üzerine kuvvet etki ettirilmesi suretiyle piston-silindirin altına etki ettirilen akışkan basıncı dengelenir.

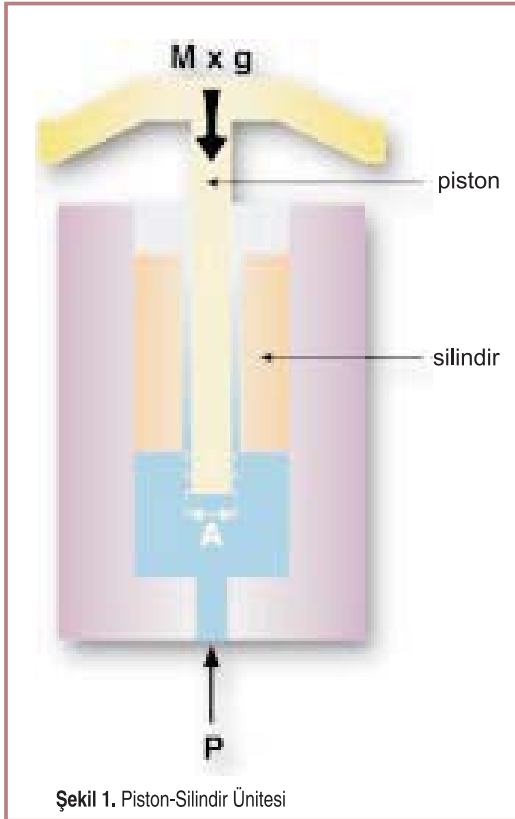
Sistemin en önemli parametresi piston-silindir ünitesi olup, piston ve silindir ünitesi arasındaki boşluk 0,1-0,2 mikron mertebesindedir. Bu nedenle toz vb. yabancı maddelerin yanlış ve kirli kullanımın cihazın

metrolojik özelliklerini doğrudan etkileyeceğini unutmamak gerekir. Aynı şekilde kütle setleri de hassas olarak kalibre edilmeli ve kütle yüzeyi üzerinde çizilmelere neden olmayacak şekilde kullanım gerektirmektedir.

Günümüz teknolojik gelişmelerinin sonucu olarak pistonlu



Şekil 2. TÜBİTAK UME Yüksek Basınç Laboratuvarında 500 MPa Çalışma Aralığına Sahip Pistonlu Basınç Standardı



Şekil 1. Piston-Silindir Ünitesi

basınç standartlarında belirsizlik değerleri 6-7 ppm (part per million) mertebelerine kadar düşürülebilmektedir. Bu derecede düşük belirsizlik değerlerine sahip pistonlu basınç standartları genellikle araştırma amaçlı ve uluslararası karşılaştırmalı ölçümlerde kullanılmaktadır. Akredite laboratuvarlarda yaygın olarak kullanım alanı bulan pistonlu basınç standartları endüstriyel kalibrasyon amaçlı olarak kullanılmakta olup, belirsizlik değerleri genel olarak 50 ppm ve üzeridir.

### PİSTONLU BASINÇ STANDARTLARINDA REFERANS BASINÇIN HESAPLANMASI

Endüstriyel kalibrasyonlarda kullanılan pistonlu basınç standartlarında referans basınç hesabının yapılmadığı, bunun yerine üretici firma tarafından kütle seti üzerinde belirtilen nominal basınç değerlerinin referans basınç olarak alındığı son yıllarda sıklıkla gözlemlenmiştir. Bununla birlikte kalibrasyon sertifikasında kütlelerin oluşturduğu basınç değerlerinin verildiği durumlarda da kullanıcılar verilen bu basınç değerlerini referans basınç değerleri olarak kullanmışlardır. Bu tür sertifikalarda kütle değerlerinin yanı sıra verilen basınç değerleri tamamen kullanıcıya kolaylık sağlaması amacıyla verilmiş olup, referans basınca en yakın

nominal basınç değeri bilgisini kapsar. Çünkü bu değerler cihazın kalibre edildiği laboratuvar ortam şartlarında kalibrasyon sırasında elde edilen veriler kullanılarak hesaplanmıştır.

**Piston-silindir ünitesini sıcaklığı ve malzemenin ısıl genleşme katsayısı:** Ülkemizde pistonlu basınç standartlarının sadece uygun laboratuvar ortam şartlarında kullanılmayıp, saha çalışmalarında mobil cihaz olarak kullanıldığı da göz önüne alındığında referans basıncın mevcut ölçüm koşullarında hesaplanması gerektiğinin önemi ortaya çıkmaktadır. En önemli parametrelerden biri olan efektif alan değeri, piston-silindir ünitesinin ısıl genleşme katsayısına bağlı olarak sıcaklık ile değişmektedir. Isıl genleşme katsayıları üretici firma tarafından verilen sertifikada piston silindir malzemesine bağlı olarak verilmektedir.

$$A_{\text{eff}} = A_{0,20} \cdot (1 + \lambda \cdot p) \cdot [1 + (\alpha + \beta) \cdot (t_{\text{ölçülen}} - 20)] \quad (1)$$

**Basınç distorsiyon katsayısı:** Piston silindir ünitesi efektif alan değeri uygulanan basınç karşısında elastik şekil değişimine maruz kalır. Malzemenin elastisite modülüne bağlı olarak hesaplanabilen basınç distorsiyon katsayısı yukarıdaki formülden de görüleceği üzere efektif alan değerini etkileyen parametrelerden biridir. Basınç distorsiyon katsayısı piston silindir konstrüksiyonuna göre negatif veya pozitif olabilir. Genel olarak üretici firma tarafından verilen sertifika bilgilerinde basınç distorsiyon katsayısı ve belirsizlik değeri yer almaktadır. Basınç distorsiyon katsayısı cihazın kalibrasyonu sırasında deneysel olarak bulunabileceği gibi, piston ve silindir malzemelerine bağlı, teorik olarak hesaplanabilmektedir.

**Havanın kaldırma kuvvetinin kütleler üzerindeki etkisi ve laboratuvar ortam şartları:** Kütleler üzerine etki eden havanın kaldırma kuvvetinin hesaplanabilmesi için hava yoğunluk değeri hesaplanmalıdır. Bu ise ölçümün gerçekleştirildiği ortamdaki ortam basıncı, nem ve sıcaklık parametreleri dikkate alınmak suretiyle teorik olarak hesaplanabilmektedir. Mutlak basınç ölçümlerinde kütleler bir vakum yapılmış kapalı bir hacim içinde bulunduğu için havanın kaldırma kuvveti kütleler üzerinde etkili değildir. Ancak kütlelerin içinde bulunduğu hacmin içinde kalan artık gaz basıncı ( $p_{\text{residual}}$ ) ölçülerek referans basınca dahil edilmelidir.

Titreşim, toz, vb. dış etkiler de cihazın performansını olumsuz yönde etkilemektedir.

**Kütle değeri:** Piston üzerine etkiyen kuvvetin büyüklüğünün doğru tayin edilebilmesi için kütle değerlerinin yüksek doğrulukta bilinmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Kütlelerin yoğunluk değerleri üretici firma tarafından verilen sertifikada

yer alır. Ancak çoğu zaman üretici firma sertifikalarının cihaz kullanıcılarının elinde olmadığı veya kayıp olduğu görülmektedir. Bu durumda en doğru yaklaşım kütlelerin gerçek değerleri yerine konvansiyonel kütle değerlerinin kullanılarak havanın kaldırma kuvvetinin etki ettirilmesidir.

**Piston hacim düzeltmesi:** Pistonlu basınç standartlarında genellikle basit tip olarak bilinen piston silindir üniteleri kullanılmakta olup, bu tür pistonlarda pistonun uzunluğu boyunca herhangi bir çap değişimi gözlenmez. Piston çapından farklı olarak alt kısımda girinti ve/veya çıkıntı şeklindeki hacimlerin piston üzerine etki eden kuvvete dahil edilmesi gerekmektedir.

**Akışkanın yoğunluğu:** Gazların ve sıvıların yoğunluğu basınca ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Sistem içinde ve basınç altında bulunan akışkanın her basınç noktasında yoğunluğu sıcaklığa da bağlı olarak değişeceği için referans basınç hesabında etki edeceği göz önüne alınmalıdır.

**Yükseklik farkı:** Pistonlu basınç standartlarında referans seviye ile test cihazı arasındaki seviyeden kaynaklanan yükseklik farkı nedeniyle ortaya çıkan basınç önemli bir parametredir. Genel olarak referans seviye üretici firma tarafından cihaz üzerinde işaretlenmektedir. Ancak referans seviye, piston silindir ünitesi yüzme pozisyonunda iken en alttaki kütle setinin olması gereken seviyeyi gösteren çubuk şeklindeki göstergelerle karıştırılmaktadır. Bu gösterge piston silindir yüzme pozisyonunda iken sahip olduğu seviyeyi göstermez. O nedenle referans seviyenin, piston maksimum ve minimum seviyeleri ve piston uzunluğu dikkate alınarak hesaplanmasında fayda vardır.

**Sıvı yüzey gerilimi:** Kullanılan akışkanın yağ olması durumunda sıvının içinde bulunduğu piston yüzeyine yapmış olduğu etki nedeniyle ilave kuvvet oluşmaktadır. Kullanılan yağın yüzey gerilimi sabit bir değer olup, üretici firmadan temin edilebilir.

**Yerel yer çekimi ivmesi:** Bulunulan bölgenin coğrafi koordinatlarına bağlı olarak hesaplanan yer çekimi ivmesi ayrıca ölçülebilmektedir. Kuvvet değerinin hesaplanmasında önemli bir parametre olup bu değer doğru olarak hesaplara aktarılması önem taşımaktadır.

Tüm bu etkenler göz önünde bulundurularak pistonlu basınç standartlarında farklı basınç ortamları için referans basınç formüllerini yazmak mümkündür.

Pnömatik gage basıncı ölçümlerinde referans basınç değeri

$$P_{\text{ref}} = \frac{m_{\text{gerçek}} \cdot g_{\text{yerel}} \cdot (1 - \frac{P_a}{P_m}) \pm (V \cdot \rho_f \cdot g_{\text{yerel}})}{A_{0,20} \cdot (1 + \lambda \cdot p) \cdot [1 + (\alpha + \beta) \cdot (t_{\text{ölçülen}} - 20)]} \pm (\Delta \rho \cdot g_{\text{yerel}} \cdot h) \quad (2)$$

Pnömatik mutlak basınç ölçümlerinde referans basınç değeri

$$p_{ref} = \frac{m_{gerçek} \cdot g_{yerel} \pm (V \cdot \rho_f \cdot g_{yerel})}{A_{0,20} \cdot (1 + \lambda \cdot p) \cdot [1 + (\alpha + \beta) \cdot (t_{ölçülen} - 20)]} \pm (\Delta p \cdot g_{yerel} \cdot h) + p_{residual} \quad (3)$$

Hidrolik gage basıncı ölçümlerinde referans basınç değeri

$$p_{ref} = \frac{\left[ m_{gerçek} \cdot g_{yerel} \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right) \right] \pm (V \cdot \rho_f \cdot g_{yerel}) + (\sigma \cdot C)}{A_{0,20} \cdot (1 + \lambda \cdot p) \cdot [1 + (\alpha + \beta) \cdot (t_{ölçülen} - 20)]} \pm (\Delta p \cdot g_{yerel} \cdot h) \quad (4)$$

formülleri kullanılarak hesaplanabilir. Formüllerde ;

- $p_{ref}$  : referans basınç değeri
- $m_{gerçek}$  : gerçek kütle değeri (true mass)
- $g_{yerel}$  : yerel yer çekimi ivmesi
- $\rho_a$  : hava yoğunluğu (cihazın bulunduğu ortamda)
- $\rho_m$  : kütle yoğunluk değeri
- $\rho_f$  : kullanılan akışkanın basınç altındaki yoğunluğu
- $V$  : piston hacim düzeltmesi
- $\sigma$  : sıvı yüzey gerilim değeri
- $C$  : pistonun çevresi
- $\Delta_p$  : hava yoğunluğu ve akışkan yoğunluk değeri farkı
- $\alpha$  : piston ısıl genleşme katsayısı
- $\beta$  : silindir ısıl genleşme katsayısı
- $t_{ölçülen}$  : piston-silindir ünitesi sıcaklığı
- $\lambda$  : basınç distorsiyon katsayısı
- $h$  : test ve referans seviyeler arasındaki yükseklik farkı
- $A_{0,20}$  : piston silindir ünitesinin atmosfer basıncında 20°C sıcaklıktaki efektif alan değerini sembolize etmektedir.

## BELİRSİZLİK BİLEŞENLERİ

Yukarıdaki formüllerden de görüleceği üzere referans basıncın hesaplanmasında göz önüne alınan tüm parametreler belirsizlik hesaplarında da etkili olmaktadır. Bazı parametreler laboratuvarın beyan ettiği/edeceği belirsizlik değeri üzerinde anlamlı sayılarda etki etmeyebilir. O nedenle öncelikle tüm

**Tablo 1.** Basınç Değerlerinin Standart Sapması

Basınç MPa	Standart sapma MPa
0,0341	9,14E-08
0,0680	2,28E-07
0,0998	2,92E-07
0,1358	3,64E-07
0,1699	2,28E-07

parametreler dikkate alınarak hangi belirsizlik bileşenlerinin ihmal edilebileceği sonucuna varılabilir.

Pistonlu basınç standartları kalibrasyon sertifikaları incelendiğinde bazı sertifikaların sadece efektif alan değeri ve belirsizlik değeri verdiğini, bazı sertifikaların ise efektif alan değeri ve belirsizlik değeri ile birlikte basınç belirsizlik değerini de içerdiği görülmektedir. Bu konuda Ulusal Metroloji Enstitülerinin farklı yaklaşımları bulunmaktadır. Önemli olan kullanıcının sertifikada verilen değerleri doğru yorumlayarak kullanmasıdır.

Bu çalışmada örnek olarak çok düşük belirsizlik değerlerine sahip bir pnömatik pistonlu basınç standardının 34 kPa basınç noktasında belirsizlik bileşenleri incelenmiştir.

$u(p_{ek})$ - Tekrarlanabilirlik

Pistonlu basınç standardının kalibrasyonu sırasında ölçüm alınan her basınç noktasında test ve referans cihazların oluşturduğu basınç değerleri arasındaki farkların standart sapması hesaplanmak suretiyle tekrarlanabilirlikten gelen belirsizlik bileşenleri hesaplanabilir. Bir başka yöntem ise ölçüm alınan her basınç noktasındaki efektif alanların standart sapmasını hesaplamaktır. Pistonlu basınç standardının kalibrasyon sertifikasında verilen efektif alan belirsizlik değeri tekrarlanabilirlikten gelen belirsizlik değerini içerdiği için ayrıca pistonlu basınç standardının tekrarlanabilirliğini hesaplamak kullanıcı için gerekli bir işlem değildir. Cihazın kullanıcısı sadece cihazın tekrarlanabilirliğini merak ettiği veya bilmek istediği için cihazı kalibre eden laboratuvarın bilgi isteyebilir. Bunun dışında pistonlu basınç standardı kullanılarak yapılan kalibrasyonda ister manometre ister basınç dönüştürücü tipi basınç sensörleri kalibre edildiğinde söz konusu ölçümün tekrarlanabilirliğini hesaplamak şarttır.

$$STDSAPMA = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (5)$$

Aşağıdaki tabloda referans basınç değerlerine karşılık elde edilen  $p_{test}-p_{ref}$  değerlerinin standart sapması verilmiş ve tekrarlanabilirlik değeri hesaplanmıştır.

$$u_{tekr} = 0,12 \text{ Pa} + 1,19 \times 10^{-6} \times p \quad (k=1)$$

$$U_{tekr} = 1,6 \times 10^{-1} \text{ Pa} \quad (6)$$

$u(p_A)$ - Efektif alandan gelen belirsizlik değeri

$$u(p_A) = \frac{p}{A} \cdot \frac{u_A}{2} \quad (7)$$

$u(p_s)$ - Basınç distorsiyon katsayısından gelen belirsizlik bileşeni

$$u(p_\lambda) = -p^2 \cdot \frac{u_\lambda}{2} \quad (8)$$

$u(p_M)$ - Kütlelen gelen belirsizlik bileşeni

$$u(p_M) = \frac{p}{M} \cdot \frac{u_M}{2} \quad (9)$$

$u(p_t)$ - Piston-silindir ünitesinin sıcaklığından gelen belirsizlik bileşeni

$$u(p_t) = p \cdot (\alpha + \beta) \cdot \frac{u_t}{\sqrt{2}} \quad (10)$$

$u(p_{\alpha+\beta})$ - Isıl genleşme katsayısından gelen belirsizlik bileşeni

$$u(p_{\alpha+\beta}) = p \cdot \Delta t \cdot \frac{u(\alpha + \beta)}{2} \quad (11)$$

$u(p_g)$ - Yerel yer çekimi ivmesinden gelen belirsizlik bileşeni

$$u(p_g) = \frac{p}{g} \cdot \frac{u_g}{3} \quad (12)$$

$u(p_{\rho_a})$ - Havanın kaldırma kuvveti etkisinden gelen belirsizlik bileşeni

$$u(p_{\rho_a}) = \frac{p}{\rho_M - \rho_a} \cdot \frac{u_{\rho_a}}{3} \quad (13)$$

$u(p_{\Delta h})$ - Yükseklik farkından gelen belirsizlik bileşeni

$$u(p_{\Delta h}) = \rho_f \cdot g \cdot \frac{u_{\Delta h}}{3} \quad (14)$$

$u(p_\theta)$ - Piston üzerine etki eden kuvvetin dikliğinden gelen belirsizlik bileşeni

$$u(p_\theta) = p \cdot \sin \theta \cdot \frac{u_\theta}{3} \quad (15)$$

Bileşik belirsizlik değeri

$$U_{bil} = \sqrt{u(p_{tekr})^2 + u(p_A)^2 + u(p_M)^2 + u(p_t)^2 + u(p_{\alpha+\beta})^2 + \dots} \quad (16)$$

34 kPa basınçtaki genişletilmiş belirsizlik değeri;

**Tablo 2.** 34 kPa İçin Belirsizlik Bileşenleri

Belirsizlik bileşeni	Büyüklik (Pa)
$u(p_A)$	$1,6 \times 10^{-1}$
$u(p_\lambda)$	$5,61 \times 10^{-1}$
$u(p_M)$	$4,10 \times 10^{-2}$
$u(p_t)$	$7,67 \times 10^{-3}$
$u(p_{\alpha+\beta})$	$4,3 \times 10^{-2}$
$u(p_g)$	$6,37 \times 10^{-5}$
$u(p_{\rho_a})$	$7,28 \times 10^{-7}$
$u(p_{\Delta h})$	$6,82 \times 10^{-3}$
$u(p_\theta)$	$6,82 \times 10^{-3}$
$U_{bil}$	0,6 Pa
$U(p)$	1,2 Pa

$U(p) = 2xU_{bil} = 1,2$  Pa olarak hesaplanmıştır. Tablo 2'de belirsizlik bileşenleri verilmiştir.

## SONUÇ

Yaygın kullanım alanına sahip pistonlu basınç standartlarında referans basınç değerlerinin yüksek doğrulukta hesaplanması büyük önem taşımaktadır. Söz konusu cihazlar başta ulusal metroloji enstitüleri olmak üzere akredite laboratuvarlarda izlenebilirliğin sağlanması ve böylelikle ölçümlerin güvence altına alınması amacıyla tercih edilmektedirler. Yüksek metrolojik vasıflara sahip hassas pistonlu basınç standartlarında oluşturulan referans basınç değerlerinin doğru hesaplanması ve cihazın çalışma prensibinin doğru yorumlanmış ve uygulanmış olması büyük önem taşımaktadır.

## KAYNAKÇA

1. TÜBİTAK UME EĞİTİM DOKÜMANI "Pistonlu Basınç Standartlarında Referans Basınç Oluşturulması ve Belirsizlik Bileşenleri"
2. Kocas, I., Durgut Y. "Calculation of the Effective Area of the Piston Cylinder Assembly in the Pressure Measurement", International Metrology Conference CAFMET 2008-09-16
3. EAL-G26, Calibration of Pressure Balances, Edition 1, July 1997
4. EA-4/02 (rev 00), Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, 1999