

# PİSTONLU BASINÇ STANDARTLARINDA BOYUTSAL ÖLÇÜMLER YÖNTEMİ İLE EFEKTİF ALAN DEĞERİNİN HESAPLANMASI

Ahmet TÜRK  
Murat AKSULU

## ÖZET

Bu çalışmada 9,8 cm<sup>2</sup> nominal alana sahip piston-silindir ünitesinin efektif alanı, boyutsal ölçümler yöntemi ile belirlenmiştir. Boyutsal ölçümler form ölçümleri (yuvarlaklık ve doğrusalılık) ve mutlak çap ölçümleri olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Form ölçümleri ve mutlak çap ölçümlerinde düşük belirsizlik elde edebilmek için alanında uzmanlaşmış cihazlar kullanılmıştır. İlk olarak hem piston hem de silindir için doğrusalılık ve yuvarlaklık ölçümleri yapılmıştır. Yuvarlaklık ve doğrusalılık ölçümlerinin kesiştiği noktalarda mutlak çap değerleri ölçülmüştür. Piston ve silindirin geometrik kalibrasyonundan sonra, tüm boyutsal ölçümlerden elde edilen veriler, en küçük kareler metoduna dayanan bir yöntem kullanılarak birleştirilmiştir. Böylelikle, hem piston hem de silindire ait yarıçap değerleri elde edilmiştir. Elde edilen yarıçap değerleri kullanılarak piston-silindir ünitesinin efektif alan değeri ve bu değere ait belirsizlik hesaplanmıştır. Efektif alan değerinin hesaplanmasında Dadson Teorisi kullanılmıştır.

Sonuç olarak, boyutsal ölçümler yöntemi kullanılarak elde edilen efektif alan değeri ile cross-float adı verilen geleneksel yöntem sonucunda elde edilen efektif alan değeri arasındaki fark 17 ppm'dir. Bu değer, boyutsal ölçümler yöntemi ile cross-float yönteminin birbiriyle uyumlu sonuçlar verdiği şeklinde yorumlanmıştır. Ayrıca daha iyi sonuçlar elde edebilmek için daha düşük belirsizliğe sahip ölçüm cihazlarının kullanılması gereklidir.

**Anahtar Kelimeler:** Efektif Alan, Pistonlu Basınç Standartları, Boyutsal Ölçümler, Dadson Teori.

## ABSTRACT

In this study, effective area of the piston-cylinder unit which has 9,8 cm<sup>2</sup> nominal area is calculated by using dimensional measurement method. Dimensional measurements were performed in two steps; form measurements (straightness and roundness) and absolute diameter measurements. Specialized instruments were used in the form and absolute diameter measurements in order to get minimum possible uncertainty. After finishing geometric calibration of piston-cylinder unit, a method based on least square method was performed to obtain radius values from the deviation values, for both piston and cylinder. Effective area of piston-cylinder unit was calculated by using those radius values and Dadson Theory.

As a result, the difference between the calculated effective areas of same piston-cylinder unit, by means of dimensional measurement method and cross-float method, is 17 ppm. This value indicates that dimensional measurement method may be used to calculate effective area of piston-cylinder unit. In addition, it is required to perform dimensional measurements with the instruments possessing lower uncertainty values to get better results with cross-float method.

**Key Words:** Effective Area, Pressure Balance, Dimensional Measurements, Dadson Theory.

## 1. GİRİŞ

Pistonlu basınç standartları yüksek metrolojik özelliklerinden dolayı basınç metrolojisinde sıklıkla kullanılan referans cihazların başında gelmektedir. Bu cihazlar ile üretilen basınç yüksek doğruluk ve düşük belirsizlik değerine sahiptir. Pistonlu basınç standartları içerisinde yer alan akışkan üzerinde oluşan basıncın hassas bir şekilde hesaplanabilmesi ve izlenebilirlik zincirinin sağlanabilmesi için piston-silindir ünitesinin efektif alanının yüksek doğrulukla belirlenmiş olması gerekmektedir. Bu amaçla basınç metrolojisinde çeşitli yöntemler kullanılabilmektedir.

Bu yöntemlerden ilki cross-float adı verilen karşılıklı akışa dayalı yöntemdir. Karşılıklı akışa dayalı yöntemde efektif alanı çok iyi derecede belirlenmiş olan referans pistonlu basınç standardına ihtiyaç vardır. Bu yöntemde efektif alanı belirlenmek istenilen pistonlu basınç standardı, referans pistonlu basınç standardı ile deneysel ortamda karşılaştırılarak kalibre edilmiş olur. Ülkelerin metroloji enstitüleri tarafından izlenebilirlik zincirinin oluşturulmasında sıklıkla kullanılan bu yöntem oldukça güvenilir ve hassas sonuçlar vermektedir. Ancak izlenebilirlik zincirinin sağlanmasında referans bir pistonlu basınç standardına ihtiyaç olması bu yöntemin en önemli eksikliklerindedir. Ayrıca uzun kalibrasyon süresi, çevresel şartlara ve operatöre bağımlılık bu yöntemin diğer dezavantajları arasında gösterilebilir.

Efektif alan belirlemede kullanılan bir diğer yöntem boyutsal ölçümler yöntemidir. Ulusal metroloji enstitüleri genellikle 0,05 MPa – 1 MPa basınç aralığında ölçüm yapan piston-silindir ünitelerinin efektif alan değerlerini boyutsal ölçümler yöntemi ile hesaplamaktadırlar [1]. Bu yöntemde efektif alanı belirlenmek istenilen piston-silindir ünitesine ait detaylı geometrik ölçümler alanında uzmanlaşmış cihazlar kullanılarak gerçekleştirilir. Geometrik ölçümler sonucunda elde edilen boyutsal verilerden en küçük kareler yöntemine dayalı matematiksel işlemlerle piston ve silindire ait yarıçap değerleri hesaplanır. Hesaplanan yarıçap değerleri ve Dadson teori kullanılarak piston-silindir ünitesine ait efektif alan değeri elde edilir. Boyutsal ölçümler metodunda referans pistonlu basınç standardına ihtiyaç yoktur. Literatürde yapılan çalışmalar, bu yöntemle elde edilen efektif alan değeri ile karşılıklı akışa dayalı yöntemle elde edilen efektif alan değerleri birbiri ile uyumlu olduğunu göstermektedir [2].

Sadece cross-float yöntemini kullanan ülkelerin metroloji enstitüleri, izlenebilirlik zincirinin en tepesindeki pistonlu basınç standardının efektif alan değerinin belirlenmesi noktasında dışa bağımlıdırlar. Bu nedenle boyutsal ölçümlerle efektif alan belirlenmesi ulusal metroloji enstitüleri için dışa bağımlılığın sonlandırılması ve prestij açısından anahtar rol oynamaktadır.

Bu çalışmada TÜBİTAK UME basınç laboratuvarının izlenebilirlik zincirinde yurt dışına bağımlılıktan kurtulabilmesi için boyutsal ölçümler yöntemi ile 9,8 cm<sup>2</sup> nominal efektif alana sahip pistonlu basınç standardı kalibre edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aynı piston için daha önceden yapılmış cross-float sonuçları ile karşılaştırıldığında her iki yöntem sonucunda elde edilen değerlerin birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

## 2. PİSTON-SİLİNDİR ÜNİTESİ

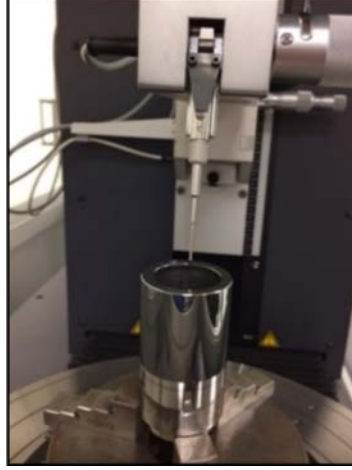
Boyutsal ölçümlerde, pnömatik ortamda çalışabilen 35 mm nominal çapa ve 9,8 cm<sup>2</sup> nominal efektif alana sahip piston-silindir ünitesi kullanılmıştır. 765 seri numarasına sahip olan piston-silindir ünitesi DH Instruments (DHI, USA) tarafından tungsten karbür malzemesinden üretilmiştir. Piston boyu 53,2 mm, silindir boyu ise 35,3 mm'dir. Piston-silindir ünitesi maksimum 0,5 MPa çalışma kapasitesine sahiptir.

## 3. BOYUTSAL ÖLÇÜMLER

Boyutsal ölçümlerle piston-silindir ünitesinin efektif alanının hesaplanabilmesi için öncelikle hem piston hem de silindire ait boyutsal ölçümlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Boyutsal ölçümler form ölçümleri ve mutlak çap ölçümleri olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

### 3.1. Form Ölçümleri

Form ölçümlerinde Mahr MFU 800 cihazı kullanılarak hem piston hem de silindir için doğrusalılık ve yuvarlaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Hem piston ve hem de silindir için 45°lik açılarda 8 adet doğrusalılık ölçümü alınmıştır. Doğrusallık ölçümlerinde profil noktaları arası mesafe 0,1 mm olup pistona ait doğrusallık profilleri 532, silindire ait doğrusallık profilleri ise 353 noktadan oluşmaktadır. Piston için eşit aralıklı 8 farklı yükseklik seviyesinde, silindir için ise yine eşit aralıklı 6 farklı yükseklik seviyesinde yuvarlaklık ölçümleri yapılmıştır. Tüm yuvarlaklık profillerinde noktalar arası mesafe 0,1° olup bir profil toplam 3600 noktadan oluşmaktadır. Yuvarlaklık ölçümlerine ait genişletilmiş belirsizlik (k=2) 50 nm, doğrusalılık ölçümlerine ait genişletilmiş belirsizlik (k=2) 100 nm'dir. Şekil 1'de piston-silindir ünitesine ait yuvarlaklık ölçümü görülmektedir.



Şekil 1. MahrForm MFU 800 ile yapılan yuvarlaklık ölçümü.

### 3.2. Mutlak Çap Ölçümleri

Doğrusallık ve yuvarlaklık profilleri, silindirik yüzeylerdeki izafi sapma miktarı olup (yüzeydeki bir noktanın diğerine göre radyal sapması) tek başına bu yüzeylerin gerçek yarıçap değerleri hakkında bilgi vermezler. Bu nedenle form ölçümlerine ilave olarak, doğrusalılık ve yuvarlaklık profillerinin kesişim noktalarında mutlak çap ölçümleri gerçekleştirilir. Bu çalışmada piston için toplamda 32 çap ölçüm verisi, silindir için ise 24 çap ölçüm verisi alınmıştır. Mutlak çap ölçüm verileri CMM cihazında yapılmış olup bu ölçümlere ait genişletilmiş belirsizlik değeri 500 nm'dir.

## 4. BOYUTSAL ÖLÇÜM VERİLERİNDEN YARIÇAP DEĞERLERİNİN ELDE EDİLMESİ

Boyutsal ölçüm verilerinden silindirik yüzeylere ait yarıçap değerinin elde edilmesinde en küçük kareler metoduna dayalı matematiksel bir dizi işlem gereklidir [3]. Bu yöntemde doğrusalılık izafi sapma profilleri piston-silindir ünitesi boyunca uzanan doğru denklemlerine eklenerek doğrusallık yarıçap denklemleri elde edilir. Yuvarlaklık izafi sapma profilleri ise piston-silindir eksenini boyunca farklı kesitlerdeki çember denklemlerine eklenerek yuvarlaklık yarıçap denklemleri elde edilir. Doğrusallık yarıçap ( $r_{\text{dogrusallik},i}$ ) ve yuvarlaklık yarıçap ( $r_{\text{yuvarlaklik},j}$ ) denklemleri (1) ve (2) numaralı formüllerde verilmiştir. Denklemlerde  $S_i$  i.doğrusallık profiline ait izafi sapma değerleri,  $R_j$  ise j.yuvarlaklık profiline ait izafi sapma değerleridir.

$$r_{\text{dogrusallik},i} = S_i(x) + a_i + b_i \cdot x \quad (1)$$

$$r_{\text{yuvarlaklik},j} = R_j(\theta) + P_j + w_j \cdot \cos(\theta) + v_j \cdot \sin(\theta) \quad (2)$$

Burada bilinmeyenler  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $P_j$ ,  $w_j$  ve  $v_j$ 'dir. Yuvarlaklık yarıçap denklemleri, doğrusallık yarıçap denklemleri ve mutlak çap değerlerinin kesiştiği noktalardaki farkların kareleri toplamı minimize edilerek yuvarlaklık ve doğrusallık yarıçap denklemlerinde yer alan bilinmeyenler çözülür:

$$\chi^2 = \sum_{i,j} (\Delta_{ij}^2 + \mu_{ij}^2 + \nu_{ij}^2 + \sigma_{ij}^2 + \tau_{ij}^2) \rightarrow \min \quad (3)$$

Burada;

$\Delta_{ij}$ : Doğrusallık ve yuvarlaklık profilleri kesişme noktalarında radyal koordinat fark

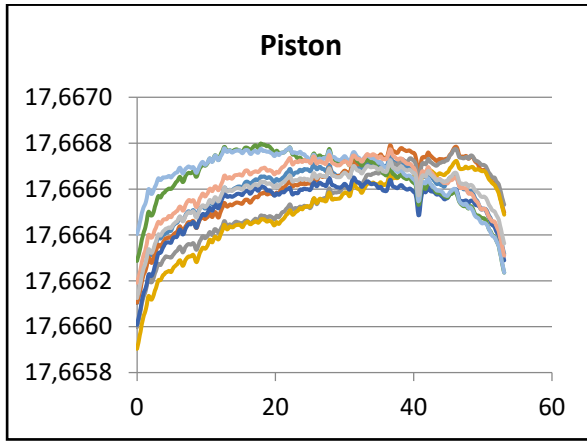
$\mu_{ij}$ : Doğrusallık profilleri ve referans olmayan çap ölçümleri kesişme noktalarında radyal koordinat farkı

$\nu_{ij}$ : Yuvarlaklık profilleri ve referans olmayan çap ölçümleri kesişme noktalarında radyal koordinat farkı

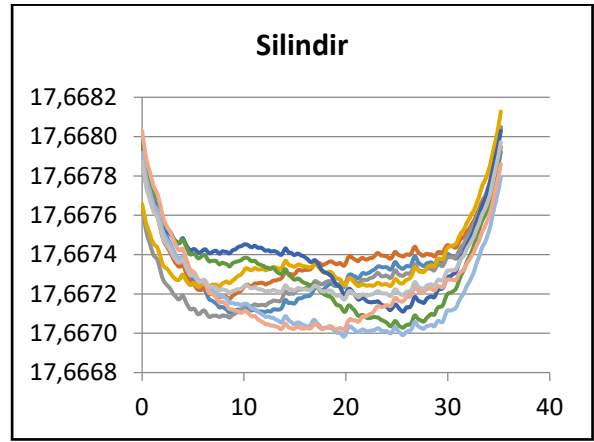
$\sigma_{ij}$ : Doğrusallık profilleri ve referans çap ölçümleri kesişme noktalarında radyal koordinat farkı

$\tau_{ij}$ : Yuvarlaklık profilleri ve referans çap ölçümleri kesişme noktalarında radyal koordinat fark

Çözülen bilinmeyenlerin doğrusallık ve yuvarlaklık yarıçap denklemlerinde yerine konulması sonucunda, piston ve silindire ait tüm doğrusallık ve yuvarlaklık izafi sapma profilleri gerçek yarıçap ve gerçek eğim değerine sahip olarak elde edilmiş olur. Bu profillerden piston ve silindire ait doğrusallık profilleri Şekil 2a ve Şekil 2b' de verilmiştir.

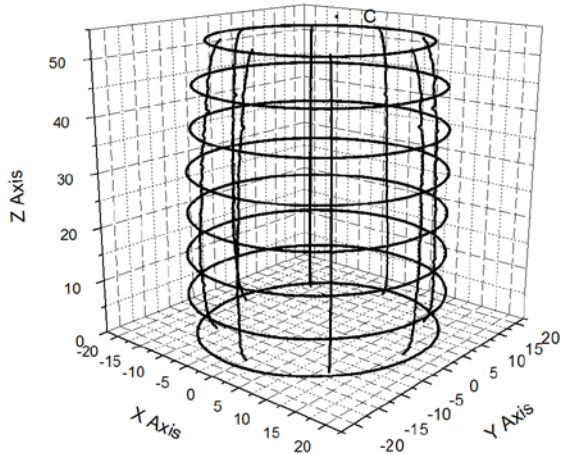


Şekil 2a. Piston doğrusallık yarıçap profilleri.

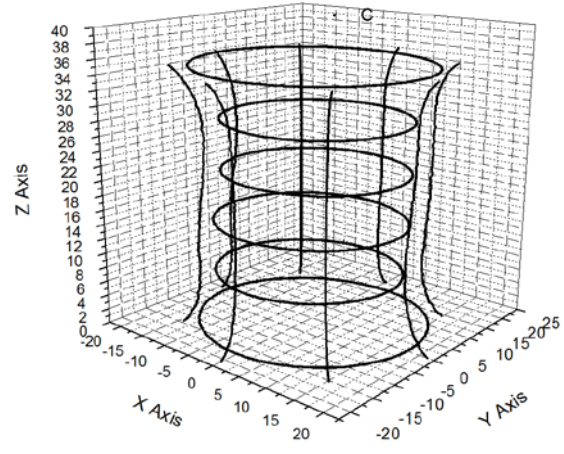


Şekil 2b. Silindir doğrusallık yarıçap profilleri.

Piston ve silindire ait kuş kafesi modelleri Şekil 3a ve Şekil 3b'de sırasıyla verilmiştir.



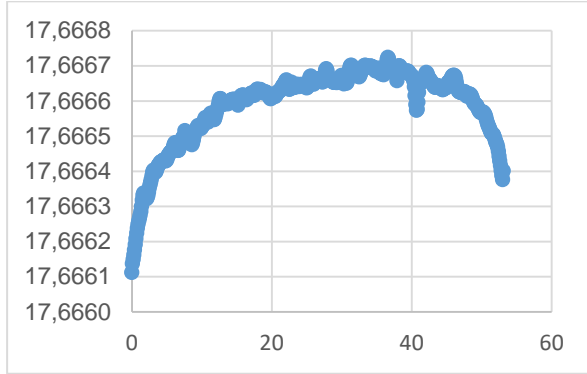
Şekil 3a. Piston için kuş kafesi modeli.



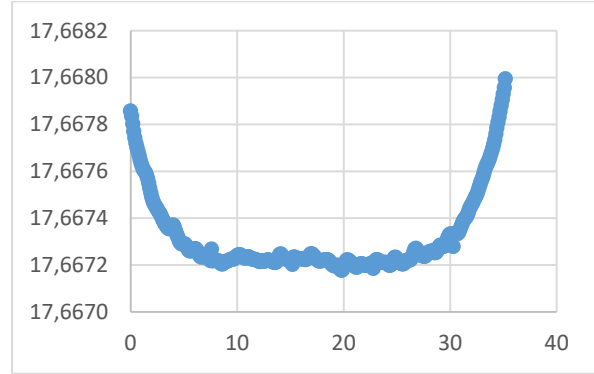
Şekil 3b. Silindir için kuş kafesi modeli.

Yukarıda verilen kuş kafesi modelleri; tüm radyal sapmalar, doğrusallık profil eğimleri ve yuvarlaklık profillerinin merkezlerinin birbirine göre radyal sapmaları 5000 kat abartılarak görselleştirilmiştir. Bu modellere göre piston orta kısımlarına doğru, silindir ise uç kısımlarına doğru genişlemektedir.

Şekil 4a ve Şekil 4b'de, sırasıyla, piston ve silindire ait ortalama yarıçap değerleri grafikler halinde verilmiştir. Piston için maksimum ortalama yarıçap değeri 17,666724 mm, minimum ortalama yarıçap değeri ise 17,666112 mm'dir. Piston tüm yarıçap değerlerinin ortalaması 17,666589 mm ve yarıçap değerlerinin standart sapma değeri 0,000109 mm'dir. Silindir için maksimum ortalama yarıçap değeri 17,667994 mm, minimum yarıçap değeri ise 17,667176 mm'dir. Silindir tüm yarıçap değerlerinin ortalaması 17,667314 mm ve standart sapma değeri 0,000160 mm'dir.



Şekil 4a. Piston ortalama yarıçap değerleri.



Şekil 4b. Silindir ortalama yarıçap değerleri.

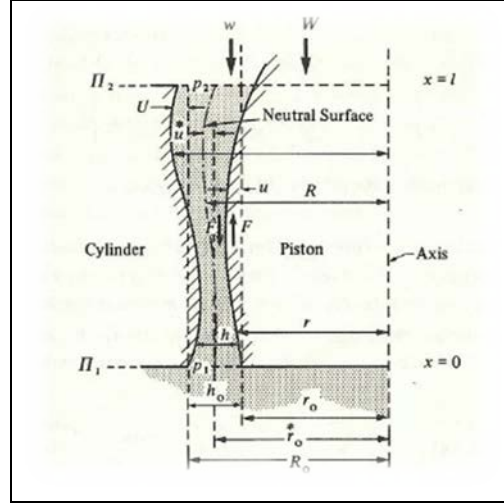
## 5. YARIÇAP DEĞERLERİNİN YENİ KOORDİNAT DÜZLEMİNE AKTARILMASI

Silindirik yüzeylerin yarıçap değerlerinin hesaplanmasından sonra silindirik yüzeylere ait yuvarlaklık yarıçap değerleri kullanılarak bu yüzeylerin merkezleri belirlenir. Belirlenen yeni merkez üzerine oturtulan koordinat düzlemine göre yarıçap değerleri tekrar hesaplanır. Bu hesaplamaların yapılmasında [4] 'de belirtilen Murty yöntemi kullanılmıştır. Hesaplamaların sonucunda doğrusallık ve yuvarlaklık profillerindeki yarıçap değerlerinin değiştiği ancak ortalama yarıçap değerlerindeki değişiminin 1 ppm den az olduğu görülmüştür.

## 6. EFEKTİF ALAN DEĞERİNİN HESAPLANMASI

İdeal olmayan bir piston-silindir ünitesine ait şematik gösterim Şekil 5'te verilmiştir. Dadson teoriye göre ideal olmayan piston-silindir ünitelerinin atmosfer basıncındaki efektif alan değeri (4) numaralı formül ile hesaplanır [5]. Bu formülde x piston-silindir ünitesinin aksel koordinatını temsil etmektedir. r, R ve h, sırasıyla, herhangi bir x noktasındaki piston yarıçapına, silindir yarıçapına ve piston-silindir arasındaki radyal açıklık değerine,  $r_0$ ,  $R_0$  ve  $h_0$  ise, sırasıyla, x = 0 noktasındaki piston yarıçapına, silindir yarıçapına ve piston-silindir arasındaki radyal açıklık değerlerine karşılık gelmektedir. U silindir R<sub>0</sub> değerinden sapma miktarı olup  $U = R - R_0$  şeklinde, u ise pistonun r<sub>0</sub> değerinden sapma miktarı olup  $u = r - r_0$  şeklinde hesaplanır. Ayrıca  $h_0 = R_0 - r_0$  ve  $h = R - r$  formülleri ile bulunur.

765 seri numaralı piston-silindir ünitesine ait efektif alan değerinin hesaplanabilmesi için (4) numaralı formül Labwiev 2015 ortamında oluşturulmuştur. Formülde yer alan integral hesaplamalarında veriler eşit aralıklı olduğundan dolayı Simpsons 3/8 sayısal integrasyon kuralı uygulanmıştır.



**Şekil 5.** İdeal Olmayan Piston-Silindir Ünitesi [5].

$$A_0 = \pi r_0^2 \left\{ 1 + \frac{h_0}{r_0} + \frac{1}{r_0} \frac{\int_0^l (u + U)/h^3 dx}{\int_0^l 1/h^3 dx} \right\} \quad (4)$$

Labview ortamında yapılan efektif alan hesaplaması için her x noktası için algoritmaya bir yarıçap değerinin verilmesi gerekmektedir. Ancak piston ve silindir her x noktasında en az 8 yarıçap değerine sahiptir. Yuvarlaklık profillerinin yapıldığı noktalarda ise bu değer 3608 tanedir. Bu nedenle her x noktasına karşılık gelen tüm yarıçap değerlerinin ortalaması alınmıştır. Ortalama yarıçap değerleri (4) numaralı formülde yerine konulduğunda elde edilen alan değeri  $980,557546 \text{ mm}^2$ 'dir.

## 7. EFEKTİF ALAN BELİRSİZLİK DEĞERİNİN HESAPLANMASI

Efektif alana ait belirsizliğin hesaplanması için öncelikle yarıçap belirsizlik değeri hesaplanmıştır. Yapılan ölçümlerde form ölçümlerine ait belirsizlik 50 nm ve mutlak çap ölçümlerine ait belirsizlik ise 500 nm'dir.

Bu belirsizlik değerleri (5) numaralı formülde yerine konulduğunda elde edilen yarıçap belirsizlik değeri  $5,1 \times 10^{-7} \text{ m}$ 'dir.

$$u(r) = \sqrt{u(r_{\text{doğrusallık}})^2 + u(r_{\text{yuvarlaklık}})^2 + u(r_{\text{mutlak}})^2} \quad (5)$$

Elde edilen yarıçap belirsizlik değeri piston-silindir ünitesinin ortalama yarıçap değerlerine eklenir ve (4) numaralı formülde yerine konularak efektif alan değerinin en büyük değeri hesaplanır. Daha sonra yarıçap belirsizlik değeri ortalama yarıçaplardan çıkarılır ve (4) numaralı formülde yerine konularak efektif alan değerinin en küçük değeri hesaplanır. Maksimum ve minimum efektif alan değerlerinin arasındaki farkın 2'ye bölünmesi sonucunda efektif alana ait belirsizlik değeri bulunur. Yapılan hesaplamalar sonucunda maksimum efektif alan değeri  $980.61364 \text{ mm}^2$ , minimum efektif alan değeri  $980.50154 \text{ mm}^2$  ve efektif alan belirsizlik değeri ise  $0,056051 \text{ mm}^2$  olarak hesaplanmıştır.

## 6. SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

765 seri numaralı cihaza ait üretici sertifikasında yer alan efektif alan değeri ile boyutsal ölçümler sonucunda elde edilen efektif alan değeri arasında 17 ppm fark vardır.

## KAYNAKLAR

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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
- [4] Murty T. S. R., Rao S. Y., (1981), "A Simple Approach for Evaluation of Cylinder Surfaces", Annals of the CIRP, 30 (1981), 441-444. DIN 4109, "Schallschutz im Hochbau; Anforderung und Nachweise", 1989.
- [5] Dadson R. S., Lewis S. L., Peggs G. N., (1982), "The Pressure Balance: Theory and Practice", London: HMSO.
- [6] Ayyıldız G., Koçaş 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.

## ÖZGEÇMİŞ

### Ahmet TÜRK

1984 Bozüyük doğumludur. 2007 yılında Boğaziçi Üniversitesi Fizik Öğretmenliği bölümünden dereceyle mezun olmuştur. 2014 yılında TÜBİTAK UME Basınç laboratuvarında araştırmacı olarak çalışmaya başlamıştır. 2018 yılında uzman araştırmacı ünvanını almıştır. 2019 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümünden Yüksek lisans derecesiyle mezun olmuştur.

### Murat AKSULU

1990 yılında İTÜ Makine Mühendisliğinden mezun olmuştur. Aynı Üniversiteden 1993 yılında Yüksek Lisans derecesi, 2008 yılında Doktora derecesi almıştır. 1996 yılında TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü Boyutsal Laboratuvarında araştırmacı olarak çalışmaya başlamıştır. 2008 yılında uzman araştırmacı, 2013 yılında başuzman araştırmacı ünvanını almıştır. Ana çalışma konusu Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ve Form ölçümleridir. Boyutsal metroloji alanında çeşitli Avrupa birliği projelerinde, TÜBİTAK 1001 projesinde ve TÜBİTAK iç projelerinde çalışmıştır. Halen boyutsal laboratuvarında başuzman araştırmacı olarak çalışmaktadır