

# ANALOG VE SAYISAL GÖSTERGELİ BASINÇ ÖLÇERLERİN KALİBRASYONU VE BELİRSİZLİK HESAPLARI

*M.Haluk Orhan, Enver Sadikhov, Rifat Kangı  
TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME)*

## ÖZET

*Endüstride üretime yönelik olarak kurulan çeşitli basınç sistemlerinde farklı doğruluk değerlerine sahip analog ve sayısal göstergeli basınç ölçerler kullanılmaktadır. Bu tip cihazların kullanıcı tarafından belirlenen zaman aralıklarında kalibrasyonlarının gerekliliğinin önemi her geçen gün biraz daha artmaktadır. Üretimde bir araç olarak kullanılan ölçüm cihazlarının düzenli aralıklarla gerçekleştirilen kalibrasyonu, toplam kalite kontrol ve güvence sisteminin yapıtaşlarından birisidir. Günümüzde basınç ölçerlerin kalibrasyonu, pnömatik ve hidrolik basınç ortamlarında karşılaştırma yöntemi kullanılarak, kalibrasyon hizmeti veren laboratuvarlar tarafından gerçekleştirilmektedir. Kalibre edilen manometreye veya diğer bir basınç ölçere ait ölçüm belirsizliği, bu ölçer ile gerçekleştirilen her bir ölçümün hatasını belirleyen bir büyüklük olarak kabul edilmektedir. Bu sebeple basınç ölçer kalibrasyonlarındaki belirsizlik hesaplamaları, gözönüne alınabilecek tüm bileşenleri içeren, dünya metroloji sisteminde kabul görmüş modellere uygun olarak yapılmalıdır. Bu bildiri, analog veya sayısal göstergeli basınç ölçerlerin kalibrasyon prosedürü ve kalibrasyon sonrası yapılan belirsizlik hesaplamaları ile ilgili önerileri ve bir örneği içermektedir.*

## 1. GİRİŞ

Bugün, bilim ve teknolojinin ulaştığı seviye gözönüne alındığında büyük ölçüm ve üretim sistemlerinin kurulup, çalıştırılmasında temel parametrelerden biri olan, basınç ve büyüklüğünün kontrolü birçok bilim adamı ve mühendisin karşılaştığı sorunlardan biridir. Toricelli tarafından yaklaşık 300 yıl önce ilk barometrenin gerçekleştirilmesinden günümüze kadar geçen süre içerisinde, bilim ve teknolojideki son gelişmelere paralel olarak hassas basınç ölçümlerinin yapılabilmesi için, birçok komplike basınç ölçme cihaz ve teknikleri referans basınç standartları ile eş zamanlı olarak oluşturulmaktadır.

Hızla gelişen endüstride basınç ölçümleri, üretimin ve sanayinin birçok dalında araştırma-geliştirme faaliyetlerinin ayrılmaz bir parçasını oluşturmaktadır. Buna en çarpıcı örnek olarak basınç kontrollü üretim hatları gösterilebilir. Basınç ölçümlerinin sonucunu güvence altına almak için ölçüm sırasında kullanılan çeşitli basınç ölçerlerin düzenli aralıklarla kalibrasyona tabii tutulması gerekmektedir. Ayrıca günümüzde çok yaygın olan sanayi ortamlarında ISO 9000 ve kalibrasyon laboratuvarlarında akreditasyon çalışmalarını kalibrasyonların yapılmasını mecburi kılmaktadır.

Basınç ölçümlerinde kullanılan çeşitli analog ve sayısal ölçerlerin kalibrasyonlarının gerçekleştirilmesi için, pnömatik ve hidrolik ortamlarda karşılaştırma yöntemi kullanılır. Yapılan

kalibrasyon sonucunda belirlenen belirsizlik değeri, kalibre edilen basınç ölçer ile yapılan ölçümlerde önemli bir faktördür. Bu sebeple kalibrasyonun toplam belirsizlik değeri, gerçekleştirilen kalibrasyonu en uygun şekilde temsil edebilecek yaklaşımlar ve metroloji dünyasında kabul görmüş modeller kullanılarak hesaplanmalıdır. Bu bildiride, UME Basınç ve Vakum Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen analog ve sayısal göstergeli basınç ölçerlerin karşılaştırmalı kalibrasyonlar ve kalibrasyonlarda belirsizlik hesaplamaları sunulmaktadır.

## 2. ANALOG VE SAYISAL GÖSTERGELİ BASINÇ ÖLÇERLER

Bilimsel ve endüstriyel uygulamalarda gerekli basınç ölçümlerini gerçekleştirebilmek için analog ve sayısal tipte çeşitli basınç ölçerler kullanılmaktadır. Analog tipteki basınç ölçerler çoğu zaman manometre olarak adlandırılır. Manometrelerin temel çalışma prensibi ise kısaca şu şekilde açıklanabilir; ölçer içerisindeki bourdon tüpü içine bir akışkan basıncı uygulandığında, tüpün imal edildiği malzemenin elastik özelliğinden dolayı tüpte bir deformasyon oluşur. Basınç altında kalan tüpün serbest kapalı ucu deformasyondan dolayı hareket etmeye başlar. Bu hareket, tüpün serbest ucuna bağlı olan mekanik oranlı gösterge cihazı üzerinden basınç birimine çevrilir [1].

Sayısal tipteki basınç ölçerler ise genellikle dönüştürücü (transdüser) duyargası ve gösterge ünitesinden oluşur. Dönüştürücüler, duyargasına uygulanan mekanik basınç kuvvetini, içerisinde bulunan elastik ve elektrik elemanlar yardımıyla orantılı olarak elektriksel çıkış cinsinden üretir. Bu elemanlar piezo direnç, piezoelektrik kristal, çeşitli formlarda diyafram, kapsül ve körük olabilir [2]. Kullanılan elemana göre basınç dönüştürücüsünün mekanik sinyali algılama prensipleri farklıdır. Örneğin, piezo-elektriklik prensibine dayanan dönüştürücülerde, basınç uygulandığında kullanılan elemanda deformasyon meydana gelir. Oluşan deformasyon sonucunda malzemenin kristal yapı özelliğinden dolayı deformasyonun büyüklüğüne bağlı olarak elektriksel yük oluşur. Basınç dönüştürücüsü tarafından üretilen bu sinyal, kullanılacak uygun elektronik elemanlar yardımıyla doğrudan basınç birimi veya gerilim/akım birimi şeklinde göstergeden okunabilir.

Basınç ölçerlerin, doğruluğunu etkileyen temel metrolojik karakteristikler aşağıda sıralanmıştır.

- Doğrusallık
- Sıfır hatası
- Çalışma aralığı hatası
- Histerisiz
- Tekrarlanabilirlik
- Uzun dönem kararlılık

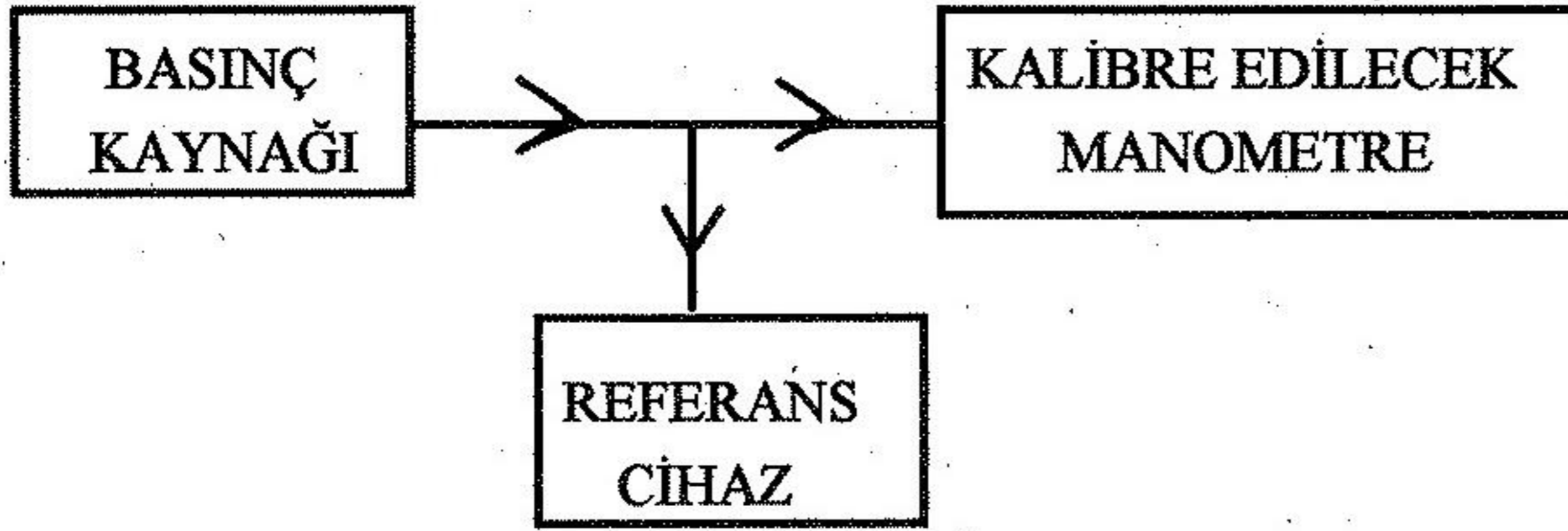
Endüstriyel uygulamalarda basınç ölçümleri için yaygın olarak kullanılan bir basınç ölçerin tipik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir [3].

Tablo 1. Bir basınç ölçer için tipik özellikler

| Özellik                   | Değer       |
|---------------------------|-------------|
| Basınç ölçme aralığı      | 0-10 bar    |
| Doğrusallık ve histerisiz | % 0.5       |
| Tekrarlanabilirlik        | % 0.2       |
| Çözünürlük                | sonsuz      |
| Uzun dönem kararlılık     | % 0.4 /sene |

### 3. KARŞILAŞTIRMA METODU KULLANILARAK MANOMETRE KALİBRASYONU

Kalibrasyonu yapılacak olan manometre, temizleme işleminden geçirildikten sonra, Şekil 1’de şematığı verilmiş olan kalibrasyon düzeneğine basınç bağlantısı yapılır. Kalibrasyona başlamadan önce manometre maksimum gösterge değerine kadar yavaşça yüklenir. Maksimum değerde bir süre beklendikten sonra, yavaşça basınç boşaltılır. Üç kez tekrarlanan bu işlemin amacı, manometrenin mekanik elemanlarını alıştırmak ve sistemde basınç kaçağı gibi bir problemin olup olmadığını gözlemlemektir.



Şekil 1. Basınç ölçer kalibrasyon düzeneği

Kalibrasyonu yapılacak olan manometrenin doğruluk sınıfına göre cihazın tüm ölçme aralığını kapsayacak şekilde eşit aralıklarla dağılmış aşağıda sayıları belirtilen noktalarda hem artan hem de azalan basınç yönünde ölçüm yapılır [4]:

Manometre sınıfı ..... 0.1, 0.2, 0.3, 0.6 ..... en az 10 nokta

Manometre sınıfı ..... 1.0, 1.6, 2.5 ..... en az 5 nokta

Manometre sınıfı ..... 4.0 ..... en az 4 nokta

Ölçüm sırasında her basınç noktasında manometrenin göstergesinden okunan değerler aşağıdaki gibi bir veri tablosu düzenlenerek, bu tablo üzerine kaydedilir. Ölçüm çevriminin üç kez tekrarlanmasında, cihazın tekrarlanabilirlik özelliğinin tespit edilmesi açısından fayda vardır.

Tablo 2. Maksimum 5000 bar basınç ölçen bir manometre için sayısal örnek

| Referans Basınç<br>(bar) | Gösterge Değeri (bar) |          |           |          |           |          |
|--------------------------|-----------------------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
|                          | 1. çevrim             |          | 2. çevrim |          | 3. çevrim |          |
|                          | (Artan)               | (Azalan) | (Artan)   | (Azalan) | (Artan)   | (Azalan) |
| 0                        | 25                    | 25       | 25        | 25       | 25        | 25       |
| 1000                     | 1000                  | 1000     | 980       | 1000     | 980       | 1000     |
| 2000                     | 2000                  | 2000     | 1975      | 2000     | 1980      | 2000     |
| 3000                     | 2980                  | 3000     | 2960      | 3000     | 2960      | 3000     |
| 4000                     | 3980                  | 4000     | 3980      | 4000     | 3980      | 4000     |
| 5000                     | 5000                  | 5000     | 5020      | 5020     | 5020      | 5020     |

#### 4. KARŞILAŞTIRMA METODUNUN KULLANILDIĞI KALİBRASYONLARDA BELİRSİZLİK HESAPLARI

Metroloji laboratuvarlarında gerçekleştirilen kalibrasyonlar için belirsizlik hesapları EAL (WECC) Doc.19'a uygun olarak yapılmalıdır. Buna göre kalibrasyonlarda etkin olan tüm parametreler tespit edilmelidir. Daha sonra bu büyüklüklerin herbirine ait olan belirsizlik bileşeni iki yöntemle belirlenir. Bunlardan birisi A-tipi belirsizlik hesaplama yöntemi olup belirli ölçüm sonuçları topluluğuna uygulanan istatistiksel analiz yöntemidir. Diğeri ise istatistiksel olmayan belirsizlik hesaplama yöntemidir ki, metroloji dünyasında B-tipi belirsizlik hesaplama yöntemi olarak adlandırılır. İki farklı yöntemle bulunan belirsizlik bileşenlerinin değerlerinin birleştirilmesi ile elde edilen bileşik belirsizlik, % 68'lik güvenilirlik düzeyi ile ölçüm sonuçlarının bulunabileceği aralığı belirler. Metroloji dünyasında optimize edilerek belirlenmiş % 95 güvenilirlik düzeyine karşılık gelen belirsizlik değeri, bileşik belirsizliğin  $k = 2.0$  kapsam faktörüyle çarpılarak elde edilir. Bulunan değer genişletilmiş belirsizlik değeri olarak ifade edilir [5,6].

Basınç ölçerlerin karşılaştırma yöntemiyle yapılan kalibrasyonundaki belirsizlik hesaplarını yukarıda verilmiş olan sayısal örnekten faydalanarak gösterelim. Bu hesaplamalar sırasıyla aşağıdaki manometre hata limiti (1), tekrarlanabilirlik hata limiti (3) formülleri kullanılarak gerçekleştirilir. Manometrelerin hata değerinin ölçüm aralığının yüzdesi (% fs) cinsinden verilmesi oldukça yaygındır.

$$u(p_1) = E_j = \frac{P_{gösterge} - P_{referans}}{\text{ölçüm aralığı}} \times 100 \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de  $p_{gösterge}$  manometrenin göstergesinden okunan basınç değerine,  $p_{referans}$  ise referans olarak kullanılan basınç kaynağında oluşturulan basınç değerine karşılık gelir.

$$E_{ort} = \frac{E_{mi} + E_{md}}{2} \quad (2)$$

Burada,  $E_{mi}$  ve  $E_{md}$  sırasıyla herbir çevrimdeki artan (i) ve azalan (d) basınç ölçüm noktasına karşılık gelen ortalama hata değerleridir.

$$u(p_2) = E_{tekrar.} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (E_j - E_{ort})^2}{\text{ölçüm çevrim sayısı}}} \quad (3)$$

Bu tür kalibrasyonlarda tekrarlanabilirlik hata limiti hesabının klasik deneysel standart sapma şeklinde yapılmadığı ilgi çekicidir. Daha kaba manometreler için tekrarlanabilirlik hata limiti yerine artan ve azalan basınçlara karşılık gelen hata değerlerinin farkına eşit olan histerisiz değeri alınır.

Analog veya sayısal basınç ölçerlerin kalibrasyonlarındaki belirsizlik bütçesi özet şeklinde Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Manometre kalibrasyonu için belirsizlik bütçesi

| $u(p_i)$ | Belirsizlik Bileşeni               | $u(p_i)$ 'nin değeri (% fs) | Olasılık dağılımı | k değeri | $u_i(p)$ 'nin değeri (% fs) |
|----------|------------------------------------|-----------------------------|-------------------|----------|-----------------------------|
| $u(p_1)$ | Maksimum hata limiti               | 0.80                        | dikdörtgen        | 1.73     | 0.46                        |
| $u(p_2)$ | Maksimum tekrarlanabilirlik limiti | 0.21                        | dikdörtgen        | 1.73     | 0.12                        |
| $u(p_3)$ | Okuma belirsizliği                 | 0.40                        | dikdörtgen        | 1.73     | 0.23                        |
| $u(p_4)$ | Referans standardın belirsizliği   | 0.05                        | normal            | 2.0      | 0.025                       |
| $u_c(p)$ | Bileşik belirsizlik                | -                           | normal            | 1.0      | 0.53                        |
| $U(p)$   | Genişletilmiş belirsizlik          | -                           | normal            | 2.0      | 1.06                        |

Yukarıdaki tablodan görüldüğü gibi belirsizlik hesaplamalarında dikkate alınan dört bileşenden ilk ikisi, maksimum hata limiti ve maksimum tekrarlanabilirlik limiti, kalibrasyon sırasında elde edilen veriler değerlendirilerek belirlenir. Okuma belirsizliği kalibre edilen basınç ölçere ait olan bir bileşendir ve değeri manometrenin göstergesinde işaretlenmiş en küçük değer kaçta kaçının okunabileceğine karar verilerek hesaplanır (örneğin bölüntüsü 100 bar olan örnekteki manometreden bölüntünün beşte birindeki değerler okunabiliyorsa, bu manometre için okuma belirsizliği  $[(100 \times 5) / 5000] \times 100 = \% 0.4$ 'dür). Sonuncu bileşen ise kalibrasyonda referans olarak kullanılan pistonlu basınç standardının sertifikasından alınan belirsizlik değerine karşılık gelmektedir. Tablo 3'den görüldüğü gibi, sadece maksimum tekrarlanabilirlik hata limiti A-tipi hesaplama yöntemiyle bulunmuştur. Bunun nedeni, belirli sayıdaki ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi ve istatistiksel modelin kullanılmasıdır.

Tablo 3'de verilmiş olan belirsizlik bütçesi metroloji uygulamalarında kullanılmaktadır. Buna karşılık, istatistiksel hata analizinde yaygın olarak kullanılmakta olan diğer bir hesaplama modeli de vardır. Bu modele göre herbir bileşenin değeri % 95 güvenilirlik düzeyinde belirlenir. Daha sonra toplam belirsizlik bu bileşenlerin adi (basit) toplamı ile elde edilir (ADD Modeli - Toplama Modeli) [7]. Bu şekilde elde edilen son değer güvenilirlik düzeyi % 99'dur.

$$U_{ADD} = u^*(p_1) + u^*(p_2) + u^*(p_3) + u(p_4) \quad (4)$$

Eşitlik (4)'de,  $u^*(p_1)$ ,  $u^*(p_2)$ ,  $u^*(p_3)$  Tablo 3'de verilmiş olan belirsizlik bileşenlerinin % 95 güvenilirlik düzeyindeki değerleridir. Yine aynı tabloda verilmiş olan belirsizlik bileşenleri için Toplama Modeli'ne göre yapılmış olan hesaplamalar sonucunda toplam belirsizlik değeri için %1.67 fs bulunur. Bu değer, genişletilmiş belirsizlik değerinden daha yüksek olmasının nedeni, daha yüksek güvenilirlik düzeyi ve model içerisinde tüm hataların aynı yönde değişim göstereceğinin tahmin edilmesidir.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada, UME Basınç ve Vakum Laboratuvarı'nda karşılaştırma metodu kullanılarak gerçekleştirilen analog ve sayısal göstergeli basınç ölçerlerin kalibrasyonu anlatılmıştır. Metroloji dünyası tarafından kabul edilmiş kalibrasyon prosedürü ve hesaplama modeli kullanılarak manometre kalibrasyonu ile ilgili sayısal bir örnek verilmiştir. Bu örnek içerisinde kalibrasyonu

etkileyen tüm parametrelerin göz önünde bulundurulduğu belirsizlik bütçesi ayrıntılı olarak irdelenmiştir. Ayrıca, istatistiksel hata analizinde kullanılan diğer bir model ile karşılaştırma yapılmıştır.

#### **KAYNAKÇA**

1. Pressure Gauge Handbook, Ametek U.S. Gauge Division, Marcel Dekker, INC., s. 38-40, 1985
2. H. Orhan, Primer Basınç Standardının Kayıt Sistemi, İ.T.Ü. Yüksek Lisans Tezi, Şubat 1995
3. Pressure Measurement Catalogue, Druck Limited, 1993
4. DIN 16005, Pressure Gauges with Elastic Element for General Application, Şubat 1987
5. WECC doc. No. 19, Guidelines for the Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibrations, 1990
6. E. Sadikhov, R. Kangı, S. Uğur, Ölçüm Belirsizliği, Ulusal Metroloji Enstitüsü Döküman no. 1995-014
7. R.P. Benedict, Fundamentals of Temperature, Pressure and Flow Measurements, John Wiley & Sons, INC., 1984

#### **Yazarların Özgeçmişleri**

**M. Haluk Orhan, yüksek fizik mühendisi**

İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği programından yüksek lisans derecesi ile 1995 yılında mezun olmuştur. 1993 yılından itibaren UME Basınç ve Vakum Laboratuvarı'nda çalışmaktadır. Basınç ve vakum metrolojisi konusunda biri uluslararası olmak üzere 4 adet bildirisi yayınlanmıştır.

**Enver Sadikhov, fizikçi**

Bakü Devlet Üniversitesi'nden 1992'de optoelektronik dalında master derecesi alarak mezun olmuştur. Çoğunlukla optoelektronik ve metroloji dallarında olmak üzere 7'si uluslararası makale toplam 22 adet makale, bildiri ve rapor yayınlamıştır. Türk Akustik Derneği üyesidir. 1993 yılından beri UME Akustik ve Titreşim Laboratuvarı'nda çalışmaktadır.

**Dr. Rifat Kangı, fizik doktoru**

Novosibirsk (Rusya) İnorganik Kimya Enstitüsünden 1991 yılında doktora derecesini almıştır. 1984-1992 yılları arasında adı geçen enstitüsünde vakum tekniği kullanılarak gerçekleştirilen ince film yapımı, ince film analizi ve manyetik ölçüm konularında araştırmalar yapmıştır. Bu konularla ilgili 6'sı uluslararası olmak üzere toplam 10 adet makale ve bildirisi yayınlanmıştır. 1993 yılından itibaren UME Basınç ve Vakum Laboratuvarında çalışmaktadır.

**Yazışma Adresi**

TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü Basınç ve Vakum Laboratuvarı

P.K. 21, 41470, Gebze, Kocaeli

Tel : 262 646 6355 Faks : 262 646 5914