

# BASINÇ TERAZİLERİNİN KALİBRASYONUNDA KARŞILAŞILAN SORUNLAR

*Dr. Şakir Baytaroğlu \**

Nurol Makina ve Sanayi A.Ş.- Danışman

\* Gazi Üniversitesi MMF Makina Mühendisliği Bölümü Dışardan Öğretim Görevlisi

## Özet

Basınç referansının oluşturulması ve basınç biriminin transferinde kullanılan Referans Basınç Terazilerinin (Piston-Silindirli ve Ölü Ağırlıklı Basınç Ölçüm Sistemi-Dead Weight Tester) kalibrasyon işlemi sırasında veya bu terazilerle yapılan kalibrasyonlarda, ölçüm sonucunu doğrudan veya dolaylı olarak etki eden bir çok parametreye dikkat edilmesi gerekmektedir. Basınç ölçümlerinde yüksek doğrulukla kalibrasyonlara ihtiyaç duyulduğunda en çok başvuru- lan kalibrasyon referans sistemi basınç terazileridir. Bu çalışmada basınç terazilerinin kalibrasyonu sırasında dikkat edilmesi gereken hususlar olarak; kalibrasyon/ölçüm üzerine etki eden ağırlıkların yoğunluğu, ölçüm sırasındaki havanın yoğunluğu, denge durumunda pistonun dengede bekletme süresi, havanın kaldırma kuvvetinin etkisi, basınç etkisi altında piston ve silindirde oluşan deformasyonlar ve basınç terazisi ile kalibrasyon yapılırken titreşimlerin etkisi ifade edilmeye çalışılmıştır.

Anahtar kelime: Basınç Terazisi, Kalibrasyon, Ölçüm Hataları,

## Giriş

Her ölçüm sisteminde yüksek doğrulukla ölçümler gerçekleştirmek, ölçme sisteminin giriş değeri ile çıkış değeri arasındaki ilişkinin bilinmesine bağlıdır. Genelde bu ilişki deneysel olarak tespit edilmektedir. Kalibrasyon olarak adlandırılan bu prosesin gerçekleştirilmesi için yüksek doğrulukla değeri bilinen bir ölçü referansına ihtiyaç duyulmaktadır.

Referans standardının seçimi ölçme sisteminin veya referans standardın bir çok karakteristiğinin bilinmesini beraberinde getirmektedir.

Bu karakteristiklerden birkaçı aşağıda sıralanmıştır;

- Referans standardının yeteri kadar doğru olması gerekmektedir. Bu da kalibre edilen/ölçülen büyüklüğün ihtiyaç duyulan veya amaçlanan ölçüm doğruluğuna ve ölçüm sonucu üzerindeki belirsizlik değerine de bağlıdır. Klasik ölçüm-bilimde, referans ölçme sistemi ile kalibre edilen cihaz arasında 10:1 bir doğruluk oranı kullanılmaktadır. Ancak son dönemde teknolojiye ilerlemeler ve ölçme sistemindeki otomatizasyonu bu oranın 4:1'e kadar inmesine sağlanmıştır.

- Referans ölçme standardının belli bir zaman periyodu içerisinde yeteri derecede kararlı olması gerekmektedir.

- Referans standardın işletim özelliklerinin birçok kalibrasyon sistemi ile uyumlu olması gerekmektedir.

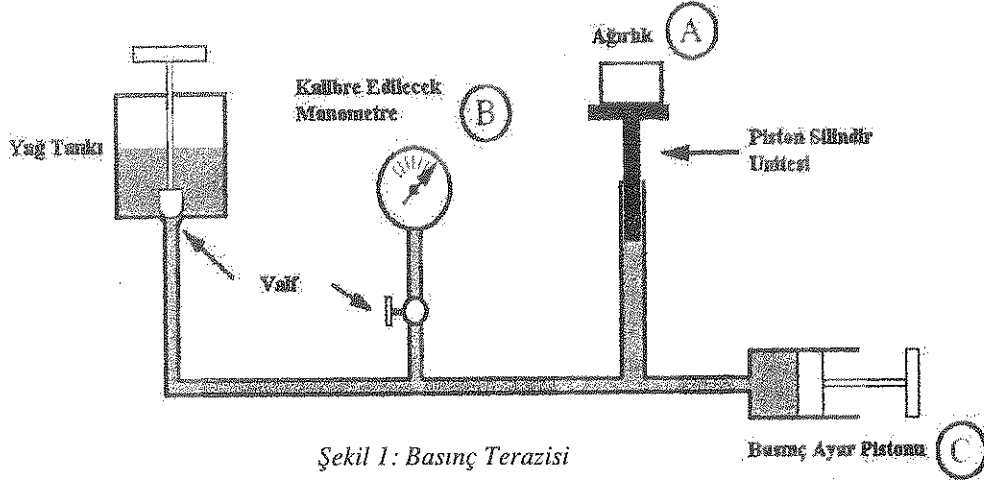
Diğer yandan basınç terazisi ile kalibrasyon işlemi gerçekleştirilirken ortam koşulları (laboratuvar ortam sıcaklığı, ölçümün yapıldığı noktadaki yer çekim ivme değeri, nem değeri, hava akımları, titreşim seviyesi v.s), ölçme sisteminin doğruluğu (ağırlıkların değeri ve belirsizliği, piston-silindir ikilisinin efektif kesit alanı ve bunların deformasyonları gibi) ve ölçümü gerçekleştiren personelin tecrübesi önemli diğer etkenlerdendir. Tüm bu yönler tek bir konsept olan, "ÖLÇÜ" kavramına doğru gitmektedir. Bu çalışmada, basınç kalibrasyonlarında dikkat edilmesi gereken hususlar, kalibrasyon/ölçüm işlemi sırasında karşılaşılan sorunlar konu ile ilgili yayınlar ve literatür taranarak bir araya getirilmeye çalışılmıştır.

## Basınç Terazilerin Kalibrasyonu

Basınç alanında ölçümbilimden söz edebilmemiz için böyle bir ihtiyacın var olması gerekmektedir. Böyle bir ihtiyaç var ise, hangi doğrulukla, hangi ölçüm aralığında, hangi referanslarla ve hangi ölçümbilim altyapısı ile yapılacağıın bilinmesi de gerekmektedir.

Basınç terazilerinin çalışma prensibini ifade eden denkleme bakıldığında (1) basınç birimi ve bunun doğruluğu, kütle değerine, kütle ve hava yoğunluk değerlerine, sıcaklık değerine, piston silindir deformasyon katsayısına ve silindir-

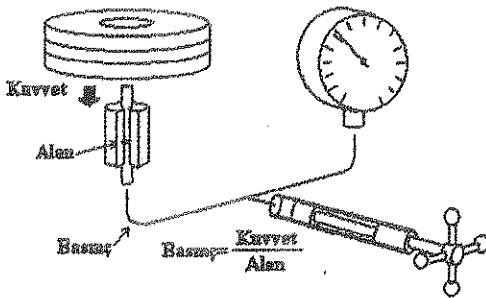
piston ikilisinin uzama katsayısına ve akışkanın özelliklerine bağlı olduğunu kolaylıkla görebilmekteyiz.



Şekil 1: Basınç Terazisi

$$P = \frac{M \cdot g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_M}\right) + \Gamma \cdot C}{S_0 \left[1 + (\alpha_p + \alpha_c)(t - 20)\right] \cdot (1 + \lambda \cdot P')} + \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (1)$$

$P$	Pascal Birimi [Pa]Cinsinden İfade Edilir.
$M$	Pistona Uygulanan Kütlelerin Değeri,
$g$	Yerçekimi İvme Değeri [ $m/s^2$ ]
$\rho_a$	Hava yoğunluk Değeri [ $kg/m^3$ ]
$\rho_M$	Hava yoğunluk Değeri [ $kg/m^3$ ]
$\Gamma$	Kullanılan Yağın Yüzey Gerilimi [N/m]
$C$	Piston Çevresi [m]
$S_0$	"0" Basınç Altında Piston Silindir İkilisinin Efektif Kesit Alanı
$\alpha_p, \alpha_c$	Piston Silindir İkilisinin Linear Uzama Katsayıları
$t$	Piston Silindir İkilisinin sıcaklığı [ $^{\circ}C$ ]
$\lambda$	Piston Silindir İkilisinin Deformasyon Katsayısı [ $Pa^{-1}$ ]
$P'$	Ölçülen Nominal Basınç Değeri, [Pa]
$\rho$	Kullanılan Yağın Yoğunluğu [ $kg/m^3$ ]
$\Delta h$	Ölçüm Noktası İle Basınç Terazisinin Referans Noktası Arasındaki Seviye Farkı [m]



Şekil 2: Basınç Terazisi

Kalibrasyon ve endüstriyel amaçlı basınç ölçümlerinde kullanılan ölçüm teçhizatları, 1-4000 bar aralığında ve %0.015 doğruluğa sahip doğrudan veya fark basınç ölçümleri yapabilen basınç terazileri yardımı ile gerçekleştirilmektedir. Basınç birimi kuvvet biriminin alana bölümü olarak tanımlanmaktadır. Basınç terazisinin çalışma prensibi; pistona etki eden akışkanın basınç değeri, piston çapı ve piston üzerine konulan kütleleri yardımıyla sistem denge konumuna getirilmektedir.

Ancak, pratik uygulamalarda, basınç terazileri ile yapılan ölçümler bu kadar basit değildir. Basınç terazisi üzerine etki eden bir çok parametre vardır. En önemlisi piston ve silindir yüzeylerinin çok iyi işlenmesi gerekmektedir. Ayrıca geometrik toleransların (yuvarlaklık, diklik, eşmerkezlilik, yüzey pürüzlülüğü gibi) çok dar ve bu tol-

eranslar akredite bir laboratuvar tarafından sertifikalandırılması gerekmektedir. Diğer yandan, yer çekimi ivme değeri, kütle değeri, ortam sıcaklığı, hava yoğunluğunun değerleri ve ölçüm üzerindeki etkileri iyi bilinmesi gerekmektedir. Dolayısıyla ölçüm sırasındaki sorunları ön görebilmemiz ölçüm belirsizlik analizi yapılması yarar vardır.

Basınç ölçüm ve kalibrasyonu sırasında ölçüm üzerine etkileyen belirsizlikler ;

## I. A tipi Belirsizlikler

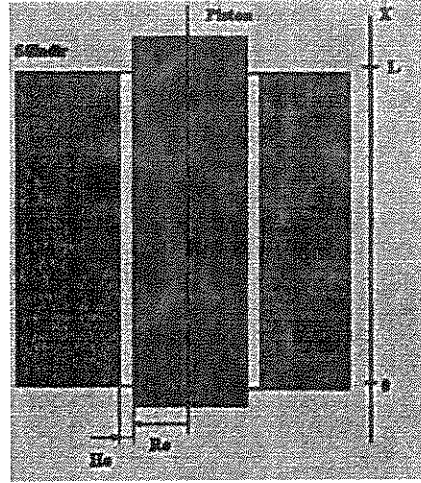
A.1 Tekrarlanabilirlik belirsizliği  $S_0$  efektif kesit alanının tespit yöntemine bağlı bir değerdir. Eğer  $S_0$  değeri iki basınç terazisinin karşılaştırılması ile elde ediliyorsa tekrarlanabilirlik değeri ,deneysel standart sapma değeri dikkate alınarak yapılması gerekmektedir. Bu yöntem ile elde edilen tekrarlanabilirlik belirsizlik değeri,  $\Delta h$  seviye farkı ve piston silindir ikilisinin hareketi üzerindeki belirsizlik değerlerini de içermektedir.

Bu yöntem maliyeti düşük olması sebebiyle sıkça kullanılan bir yöntemdir. Fakat çok yüksek seviyede doğruluk, hassasiyet, ve karalılık kavramları söz konusu olduğunda piston-silindir ikilisinin detaylı boyutsal ve geometrik ölçümlere tabi tutularak tekrarlanabilirlik belirsizlik değeri tespit edilmelidir.

Silindir-Piston Efektif Kesit Alanı,

Basınç terazisi ile gerçekleştirilen kalibrasyon ve ölçümlerin en önemli parametresi piston-silindir ikilisinin efektif kesit alanıdır. Basınç terazisinin doğruluk seviyesi bu alanın değerine bağlıdır. Silindir-Piston efektif alanı; piston ve silindir çaplarına piston ve silindir arasındaki geçme değerine ve basınç değerine bağlı olarak oluşan deformasyon değerlerine ve sıcaklığa bağlıdır. Piston ve silindirin geometrik ve boyutsal özellikleri pistonun ve silindirin özelliklerinin boyutsal olarak ölçülebilecek bir boyutsal ölçümbilim laboratuvarında ölçülmesi ve hesaplanması gerekmektedir. Piston silindir ikilisinin efektif alan ( $S_0$ ) değerinin genel ifadesi;

$$S_0 = \frac{1}{2} \left[ \pi \cdot R_0^2 + \pi (R_0 + H_0)^2 \right] \quad (2)$$



Şekil 3 : Basınç Terazisinin Piston Silindir İkili

$R_0$  : Pistonun Yarı Çapı,  $H_0$  : Piston ve Silindir Arasındaki Boşluğun Yarı Değeri

(2)' numaralı ifadedeki terimler dikkate alınmadığında  $R_0/H_0$  oranı  $1 \times 10^{-4}$  ten küçüktür. Bu durumda piston ve silindir boyutsal olarak  $1 \times 10^{-4}$  den büyük hassasiyetle ölçülmelidir.

## II. B Tipi Belirsizlikler

### B.1 Kütlelerin Belirsizlik Değeri

Basınç kalibrasyonunda kullanılan kütlelerin değerleri Akredite Kütle Laboratuvarları tarafından tespit edilmelidir.

Literatürde, kütle değeri (ulusal referanslar için) üzerindeki belirsizlik değeri  $\pm 1 \times 10^{-6}$  p olduğu ifade edilmektedir. Ayrıca çalışma ve transfer basınç terazileri için kütle belirsizlik değeri basınç terazisinin toplam belirsizlik değerini % 10 ile % 20 aşmamalıdır [1,2,3].

### B.1.1 Kütle Değeri Tespiti

Basınç terazileri basınç değerinin oluşturulmasında kullanılan kütle setinin konvensiyonel kütle değeri dikkate alınarak periyodik olarak kalibre edilmelidir. Kalibrasyon aralığı kullanım sıklığına ve kullanılan kütlelerin referans standardı mı yoksa transfer standardı mı olmasına bağlı olarak 3-5 yıl arasında değişmektedir [1]. İyi bir kalibrasyon için, basınç ölçümlerinde kullanılan kütle setlerinin kütle değerleri ile konvensiyonel kütle değerlerinin bilinmesinde büyük yarar vardır. Kütle değeri; hassas teraziler yardımıyla yapılan ölçümler sonucunda terazide okunan değerdir. Ancak kütle değeri kalibrasyonun yapıldığı ortamın hava yoğunluğuna ve kalibrasyonda kullanılan referans kütlelerin yoğunluğuna bağlıdır. Konvensiyonel kütle değeri sabit bir değer olarak tanımlanmaktadır. 20°C ortam sıcaklığı ve 8000kgm<sup>-3</sup> yoğunluğa sahip malzemenen yapılmış kütleler ve 1.2 kgm<sup>-3</sup> referans hava yoğunluğu için geçerlidir. Konvensiyonel kütle değeri genel ifadesi ;

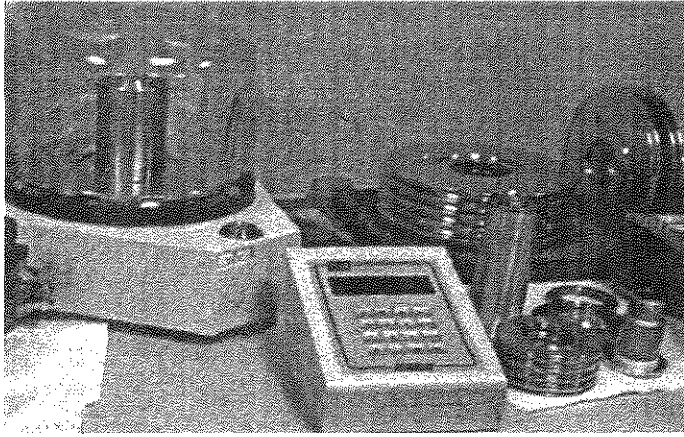
$$m_c = m \frac{1 - \rho_0 / \rho}{1 - \rho_0 / \rho_c} = m \frac{\rho - 1.2}{0.00085 \rho} \quad (3)$$

$\rho_0$  : 1.2 kgm<sup>-3</sup> Referans Hava Yoğunluğu

$\rho_c$  : 8000kgm<sup>-3</sup> Konvensiyonel Kütle Yoğunluğu

$$\frac{m - m_c}{m_c} = \frac{1.2 - 0.00015 \rho}{\rho - 1.2} \quad (4)$$

Kütle değeri ile konvensiyonel kütle değeri arasındaki bağıl farkın  $\pm 5 \times 10^{-5}$  değerini veya basınç terazisinin toplam belirsizlik değerinin %20'sini aşmamasına dikkat edilmelidir. Diğer taraftan kütle değerinin korunması basınç terazisinin güvenilirliği ve uzun zaman kararlılığı için gereklidir. Kütlelerin  $10^{-5}$  kararlılık değeri için herhangi bir önlem alınmaz. Ancak bu değer  $10^{-5}$  'ten büyük ise kütlelerin dikkatle temizlenme (özellikle yağ ve toz izleri olmamalı) veya ayarının yapılması gerekmektedir. Aynı tipte basınç terazileri mukayese edilirken, kütle etkisini bertaraf etmek için kütlelerin yeri değiştirilerek efektif alan hesabı yapılır.



Şekil 4: Basınç Terazisi ve Kütleler

### B.2 Yerel Yerçekimi İvme Değerinin Belirsizliği

Bu etki, yer çekim değerinin tespit yöntemine bağlıdır. Basınç terazileri vasıtasıyla ölçüm ve kalibrasyonların gerçekleştiği basınç (Kütle, Kuvvet Laboratuvarları dahil olmak üzere) laboratuvarlarının bulunduğu mekanın yerçekimi değerinin yüksek doğrulukla bilinmesi gerekmektedir. Eğer yerçekimi değeri yüksek doğrulukla akredite laboratuvarlar tarafından tespit edilmiş ise bu belirsizlik değeri göz ardı edilebilir. Yerçekimi değeri jeofizikçilerin geliştirdiği

ampirik formüller yardımıyla da tespit edilebilmektedir. Yerel yerçekimi değeri "g", basınç terazisi prensibi ile çalışan ölçüm sistemlerinde bir çarpan faktörü olarak karşımıza çıkmaktadır. Dolayısıyla Kolon tipli manometrelerde ve basınç terazilerinde yerel yerçekimi değerinin ve bunun üzerindeki belirsizliğin bilinmesi gerekmektedir.

Genelde basınç terazileri imal edilirken, imalatçılar nominal yer çekim değerini kullanmaktadırlar. " $g_N$ " değer ise;

$$g_N = 9,80665 \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (5)$$

Daha yüksek hassasiyet ve düşük belirsizlik değerlerine ihtiyaç duyulduğunda ise taşınabilir gravimetreler kullanılarak, gravimetrik ölçümler yapılması gerekmektedir. Bu yöntem kullanılarak  $10^{-8}$  doğrulukla sonuçlar elde edilmektedir. Yerel yerçekimi değeri, jeodezik formüller yardımıyla da hesaplanabilir. En çok kullanılan ifadeler;

$$g_1(\theta) = 9,80602 \left( 1 - 2,6373 \cdot 10^{-3} \cdot \cos 2\theta + 5,9 \cdot 10^{-6} \cdot \cos^2 2\theta \right) \quad (6)$$

veya 160 Km'lik yarı çaplı bir daire içindeki yükseklik farklarını ( $h'$  : ortalama yükseklik değeri) dikkate alan ifade

$$g_1 = g_1(\theta) - 3,086 \cdot 10^{-6} h + 1,118 \cdot 10^{-6} (h - h') \quad (7)$$

kullanılabilir. Bu ifadedeki yerel yerçekimi değeri  $-3 \cdot 10^{-6}$  [m/s<sup>2</sup>] belirsizlik ile tesbit edilebilmektedir[4].

### B.3 Hava Yoğunluğu Üzerindeki Belirsizlik

Hava yoğunluğunun değeri atmosferik basınç değerine, bağıl nem ve hava sıcaklığına bağlıdır.  $\rho_a$  üzerindeki belirsizlik ise toplam belirsizlik değerinden  $\pm\%1$  düşük olmalıdır. Basınç değerinin oluşturulmasında kullanılan kütlelerin yoğunluğu  $\rho_M = 7900 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$  olması durumunda hava yoğunluğundan kaynaklanan belirsizlik değeri ise  $\pm 1,5 \cdot 10^{-6}$  seviyesindedir. Hava yoğunluğunun değeri  $1,2 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$  alınması durumunda ve normal atmosferik basınç değeri üzerinde  $\%10$ 'luk bir değişim dikkate alındığında hava yoğunluğu değeri üzerindeki belirsizlik  $\pm 1,5 \cdot 10^{-5}$  olarak alınabilir.

### B.4 Basınç Terazisinde Kullanılan Akışkandan Kaynaklanan Belirsizlik.

r ve C den kaynaklanan belirsizlik değerleri genelde göz ardı edilmektedir. Ancak bu uygun akışkanın kullanılması ve piston silindir ikilisinin yüzey durumunun iyi olmasına bağlıdır.

### B.5 Sıfır Basınç Altında Efektif Alan Üzerindeki Belirsizlik

Bu belirsizlik değeri, toplam belirsizlik değeri üzerinde en çok etkisi olan değerdir. Bu değer boyutsal ölçüm veya etalon bir basınç terazisi yardımıyla, karşılaştırılma yöntemi kullanılarak tespit edilmektedir. Bu belirsizlik değeri genelde uluslararası olarak yapılan piston silindir ünitelerinin karşılaştırma ölçümleri çerçevesinde tespit edilmektedir. Bu ölçümler aynı zamanda laboratuvarın idari ve teknik kabiliyetini de ortaya koyan bir ölçümdür.

#### B.5.1 Boyutsal Ölçüm

Bu yöntem yalnızca ulusal referansların efektif kesit alanı ölçümü yapılırken kullanılmaktadır. Bu yöntem kullanılarak yapılan boyutsal ölçümler sırasında aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir.

a) Piston veya silindir çapları ölçülürken, boyutsal referanslar (Masterlar, ölçüm cihazları, temas deformasyonları, ölçüm metodu, ayırt edebilirlik vs.) üzerindeki belirsizlikler ve ölçümün yapıldığı ortam şartlarından kaynaklanan belirsizlik değerlerinin dikkate alınması gerekmektedir.

b) Dairesellik, düzlemsellik ve mukayeseli basınç ölçümleri yaparak Piston ve silindirin geometrik hataları.

#### B.5.2

b.1) Etalon Basınç Terazisinin Efektif Alanı üzerindeki belirsizlik değeri,

- b.2) Etalon Basınç Terazisinin Kütle Değeri üzerindeki belirsizlik değeri,
- b.3) Kalibre Edilen Basınç Terazisinin Kütlelerinin belirsizlik değeri,
- b.4) Etalon Basınç Terazisinin sıcaklık değeri üzerindeki belirsizlik,
- b.5) Kalibre Edilen Basınç Terazisinin sıcaklık değeri üzerindeki belirsizlik,

### B.6 Piston Silindir İkilisinin Sıcaklık Uzama Katsayısı Üzerindeki Belirsizlik

Tungsten karbürden imal edilmiş piston ve silindirlerin " $\alpha$ " uzama katsayısı üzerindeki belirsizlik değeri toplam belirsizliğin %2'si düzeyindedir [1,6,10]. 0,5 °C'lik bir sıcaklık değişimi için uzama katsayısı üzerindeki belirsizlik değeri  $\pm 0,1 \cdot 10^{-6}$  düzeyindedir. Piston ve silindir'in farklı malzemelerden imal edilmesi durumunda (Piston: Tungsten ve Silindir: Çelik) uzama katsayıları arasındaki fark değeri üzerindeki belirsizlik değerine bakılır (8).

$$\varepsilon_f = \{(\alpha_1 \cdot \phi_1) - (\alpha_2 \cdot \phi_2)\} \Delta t \quad (8)$$

### B.7 Sıcaklık Değeri Üzerindeki Belirsizlik

Sıcaklık değeri, silindir içinde yerleştirilen platin dirençli bir sıcaklık algılayıcısı yardımıyla ölçüm sırasında sürekli izlenebilir. Sıcaklık kararlı hale geldikten sonra ölçüm veya kalibrasyon gerçekleştirilir. Sıcaklık dengeye geldikten sonra silindir ile piston arasındaki sıcaklık farkı  $\pm 0,05$  °C' ye kadar ulaşabilir. Tungsten karbürden imal edilmiş piston silindir ikilisi için, basınç altında, sıcaklık değeri üzerindeki belirsizlikten kaynaklanan belirsizliklerin değeri  $\pm 0,5 \cdot 10^{-6}$  ρ dir. Ancak sıcaklık algılayıcısının uygun aralıklarla kalibre edilmesi gerekmektedir. Sıcaklık algılayıcısı bulunmayan basınç terazilerinde ortam sıcaklığındaki değişimler dikkate alınmalı ve pistonu döndüren motor ayrıca soğutulmalıdır. Çelik pistonlar için sıcaklık üzerindeki belirsizlikten kaynaklanan basınç değeri üzerindeki belirsizlik değeri  $\pm 1 \cdot 10^{-4}$  e kadar ulaşabilmektedir. Ayrıca piston ünitesinin kalibrasyon/ölçüm sırasında yarım saatten fazla döndürülmesi durumunda, kosinüs etkisinden dolayı (9) piston ve silindir arasındaki sürtünmeden dolayı piston silindir ikilisinin sıcaklık değeri yükselecektir dolayısıyla akışkanın viskozitesinde bir değişim ve piston silindir ikilisinde birtakım deformasyonlar ve yüzey aşınmaları ve basınç düşüşleri ortaya çıkacaktır.

Piston Malzemesi	Silindir Malzemesi	Uzama Katsayısı
Volfram Karbür	Volfram Karbür	$9,1 \cdot 10^{-6}$
Çelik	Volfram Karbür	$1,5 \cdot 10^{-5}$
Çelik	Çelik	$2,0 \cdot 10^{-5}$

Tablo 1: Piston Silindir İkilisinin Malzeme Ve Uzama Katsayısı

$$F_a = F \cdot \cos \theta \quad (9)$$

- $F_a$  : Eksen Yöndeki Kuvvet
- $F$  : Dikey Yöndeki Kuvvet ,
- $\theta$  : Pistonun Açısal Kayma Değeri.

### B.8 Deformasyon Katsayısı Üzerindeki Belirsizlik

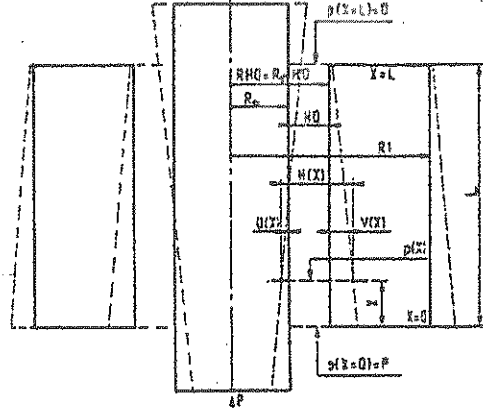
Piston silindir ikilisi farklı konstruktif yapılara sahiptir (serbest deformasyonlu, kontrollü boşluklu, iki kademeli gibi). Bu belirsizlik değeri, kalibrasyon işlemi sırasında tespit edilmekte ve belli bir tecrübeyi gerektirmektedir.

Deformasyon katsayısı üzerindeki belirsizliğin anlaşılması için piston silindir ikilisinde meydana gelen deformasyonların anlaşılması gerekmektedir.

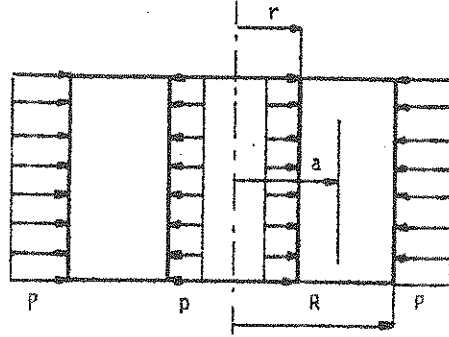
#### B.8.1 Bir Basınç Terazisinde Piston-Silindir İkilisinin Deformasyon Katsayısının Hesabı

Bir piston silindir ikilisinin efektif kesit değeri pistonun ve silindirin geometrik ortalama değeri olarak verilmekte-

dir. Bu tanımlamada, atmosferik basınç altında ve piston silindir ikilisi mükemmel bir silindir oldukları varsayımı yapılmış. Şekil 5'da verilmiş olan terimleri kullanırsak ve  $p$  basınç değeri  $U(x)$  pistonunda bir deformasyon oluşturuyorsa,  $S_0$  sıfır basınç değerinde pistonun efektif alanı ise bir ilk yaklaşımla olarak ve ikinci derecedeki terimleri ihmal edildiği takdirde,  $p$  basınç değerinde, efektif alan değeri aşağıdaki gibi yazılır;



Şekil 5 : Basınç Terazisini Piston-Silindirin İkili.  
Deformasyon Katsayısının Hesabında Kullanılan Terimler



Şekil 6: Basınç Terazisi. Kalın Çeperli Silindirin Deformasyonu

$$S_p = S_0 \left( 1 + \frac{U}{R_0} + \frac{V}{R_0} \right) \quad (10)$$

$p$  basınç değerine bağlı olarak,  $S_p$  değerinin teorik hesabı, pistonun  $U$  ve silindirin  $V$  ortalamalarına göre yapılır. Şayet piston boyunca basınç değerini  $p(x)$  olarak ifade edersek;

$$U = U(0) + \frac{1}{p_0} \int_0^L p(x) \frac{dU}{dx} dx \quad (11)$$

$U(0)$ , pistonun  $x=0$  konumu içindir bu da silindirin alt tabanına karşılık gelmektedir. Silindir deformasyonunun hesabı için mukavemet teorisinden yararlanarak ve Timoschenko'nun silindirler için yazdığı denklemi kullanarak,  $U(a)$  radial deformasyon değeri aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$U(a) = \frac{1-\mu}{E} * \frac{r^2 p - RP}{R^2 - r^2} a + \frac{1+\mu}{E} * \frac{r^2 R^2 * (p-P)}{a(R^2 - r^2)} \quad (12)$$

$\mu$  : Poisson katsayısı,  
 $E$  : Elastisite Modülü

Aynı sistem içerisinde  $P$  basınç etkisinde radial deformasyon değeri  $U(a)$  aşağıdaki gibi yazılır;

$$U'(a) = \frac{a * \mu * P}{E} \quad (13)$$

Dolu Pistonun deformasyonu için

11 ve 12 denklemleri uygulayarak,  $P(r=0, a=R=R_0)$ , pistonun alt yüzeyine basınç uygulandığında, pistonun dış yüzeyinde de  $p(x)$  buna bağlı olarak bir değişim olacaktır;

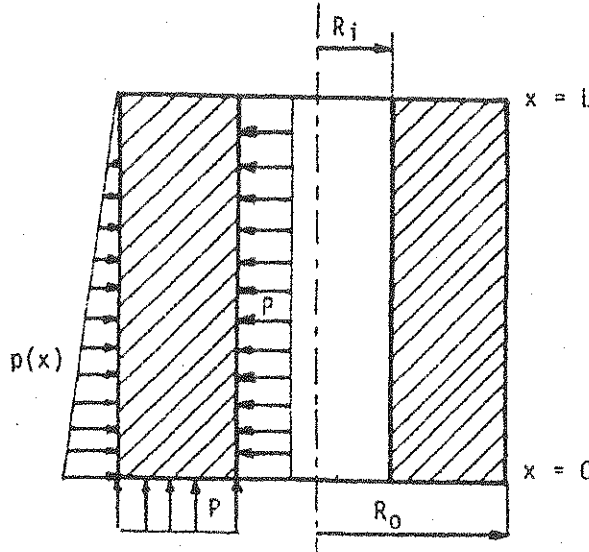
$$U(x) = \frac{R_0}{E} [p(x) * (\mu - 1) + \mu * P] \quad (14)$$

10 No.lu denklem uygulandığında

$$U(x) = \frac{R_0 * P}{2E} (3\mu - 1) \quad (15)$$

ifadesi elde edilir.

İçi Boş Piston için aynı işlemler yapıldığında



Şekil 7 : İçi Boş Piston

11 ve 12 No.lu denklemler, bu piston için uygulanırsa eksen merkezine göre  $R_0$  mesafesindeki deformasyon değeri aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$U(x) = \frac{1 - \mu}{E} * \frac{R_i^2 P - R_0^2 p(x)}{R_0^2 - R_i^2} R_0 + \frac{1 + \mu}{E} * \frac{R_i^2 R_0^2 * (P - p(x))}{R_0 (R_0^2 - R_i^2)} + R_0 * \mu * \frac{P}{E} \quad (16)$$

$$U(x) = \frac{R_0 * P}{E} * \frac{2R_i^2}{R_0^2 - R_i^2} - \frac{R_0 * p(x)}{E} \left\{ \frac{R_0^2 + R_i^2}{R_0^2 - R_i^2} - \mu \right\} + R_0 * \mu * \frac{P}{E} \quad (17)$$

Pistonun  $U$  ortalama deformasyon değerinin hesaplanması (12),  $x=0$  yükseklik değeri için  $U(0)$  hesaplanır;



$$U(0) = \frac{R_0 * P}{E} * \left\{ \frac{2R_i^2}{R_0^2 - R_i^2} + \mu - \frac{R_0^2 + R_i^2}{R_0^2 - R_i^2} + \mu \right\} \quad (18)$$

$$U(0) = \frac{R_0 * P}{E} * \{2\mu - 1\} \quad (19)$$

Aynı şekilde ,

$$\frac{1}{P} \int_0^L p(x) * \frac{dU}{dx} dx = -\frac{R_0}{PE} * \frac{R_0^2 + R_i^2}{R_0^2 - R_i^2} * \int_0^L p \frac{dp}{dx} dx = \frac{R_0 P}{2E} * \left\{ \frac{R_0^2 + R_i^2}{R_0^2 - R_i^2} - \mu \right\} \quad (20)$$

Dolayısıyla Ortası boş bir pistonun ortalama deformasyon değeri ise;

$$U = \frac{R_0 P}{2E} \left\{ 3\mu - 2 + \frac{R_0^2 + R_i^2}{R_0^2 - R_i^2} \right\} \quad (21)$$

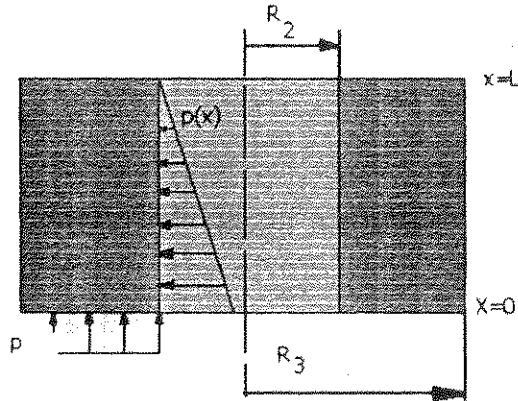
Literatürde montaj şekline bağlı olarak birçok silindir konfigürasyonuna sahip piston silindir üniteleri kullanılmaktadır (Serbest deformasyonlu veya kontrollü boşluklu- Piston silindir arasındaki geçme aralığı). Piston silindir konstrüktif yapısına bağlı olarak efektif alan hesaplamaları her bir sistem için ayrı ayrı olarak yapılmalıdır.

-Basınç Altında Serbest Deformasyonlu Silindirler:

(16) ve (17) denklemleri uygulayarak;

$$V(X) = \frac{1-\mu}{E} * \frac{R_2^2 * p(x)}{R_3^2 - R_2^2} * R_2 + \frac{1+\mu}{E} * \frac{R_2^2 * R_3^2 * p(x)}{R_2 * (R_3^2 - R_2^2)} + \frac{R_2 * \mu * P}{E} \quad (22)$$

$$V(X) = \frac{R_2}{E} \left\{ \frac{R_2^2 + R_3^2}{R_3^2 - R_2^2} + \mu \right\} p(x) + \frac{R_2 \mu P}{E} \quad (22)$$



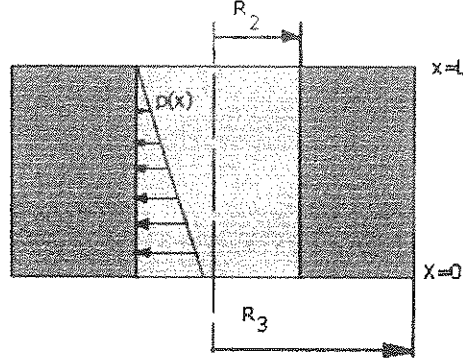
Şekil 8: Basınç Altında Olan Silindir

(10) no.lu ifade silindire uygulandığında , ortalama deformasyon değeri aşağıdaki gibi olur;

$$\bar{V}(X) = \frac{R_2 P}{E} \left\{ \frac{R_3^2 + R_2^2}{R_3^2 - R_2^2} + 3\mu \right\} \quad (23)$$

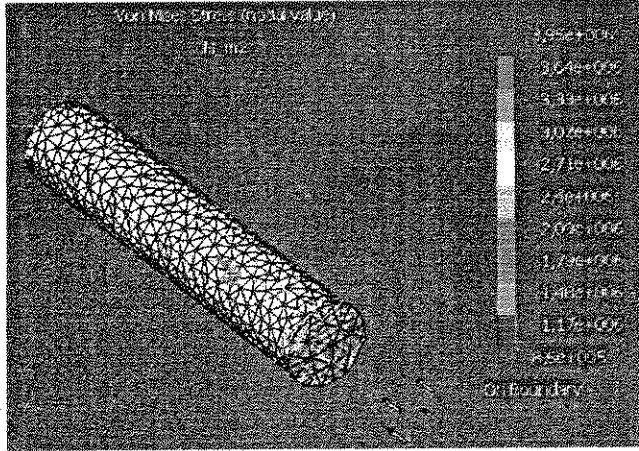
- Serbest deformasyonlu basınç altında olmayan Silindir

$$\bar{V}(X) = \frac{R_2 P}{E} \left\{ \frac{R_3^2 + R_2^2}{R_3^2 - R_2^2} + \mu \right\} \quad (24)$$

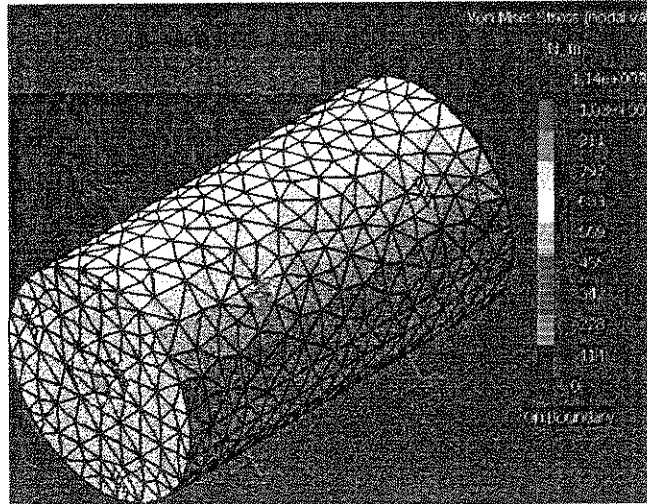


Şekil 9: Basıncısız Silindir

Basınç terazisi imalatçıları, piston silindir ikilisini matematiksel analizlerle incelemenin yanı sıra sonlu elemanlar yöntemi (FEA) kullanarak piston silindir ikilisinde oluşan deformasyonları sanal ortamda analiz edebilmektedir. Şekil 10 ve 11'de CATIA yazılımı altında bulunan FEA modülü kullanılarak piston ve silindirin deformasyon analizleri sunulmuştur.



Şekil 10: Piston Von Mises Stress Sonuçları



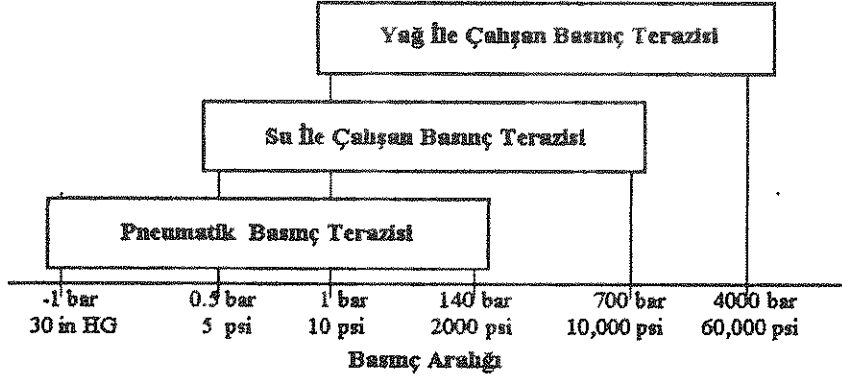
Şekil 11: Silindirin Von Mises Stress Analizi

Bu yöntem yalnızca tasarım aşamasında değil, yüksek doğruluklu basınç terazilerinin kalibrasyonunda da bir doğrulama yöntemi olarak kullanılabilir.

### B.9 Akışkan Sütunu Üzerindeki Belirsizlik

Bu tip belirsizlik değerini anlayabilmemiz için basınç terazilerinde kullanılan akışkanların özelliklerinin bilinmesinde yarar vardır.

Akışkan tipi; eğer pneumatik kalibrasyon/ölçüm yapılacaksa, pneumatik akışkan olarak kuru hava, azot, gibi akışkanlar kullanılmalıdır. Eğer hidrolik ölçüm/kalibrasyon yapıyorsa basınç terazisinin uygun hidrolik akışkan ile çalışması gerekmektedir (yağ, su vs). Bazı durumlar için, pneumatik basınç terazilerinin, hidrolik basınç terazileri yardımıyla kalibre edilmesi gerekmektedir. Bu durumda iki terazi arasında uygun pneumatik/hidrolik ara birim kullanılması gerekmektedir.



Şekil 12: Basınç Terazilerinin Ölçüm Aralığı

Diğer taraftan ölçüm noktası ile kütlelerin konumu arasındaki seviye farkından dolayı bu seviye farkının değeri kadar bir gaz veya bir sıvı akışkan sütununun oluşturduğu bir fazla basınç değeri oluşmaktadır. Bu değer aşağıdaki ifade ile gösterilmektedir;

$$\rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (25)$$

Bu değer üzerindeki belirsizlik, akışkan sütununun ölçüm yöntemine ve referans seviyesinin hassasiyetine bağlıdır. Akışkan sütununun  $\Delta h=1$  mm'lik bir belirsizlik ile yapıldığını varsayarsak ;

$$\text{Azot İçin} \quad : \pm 1,3 \cdot 10^{-7} \cdot P$$

$$\text{Yağ Basıncı İçin} \quad : \pm 8,5 \text{ [Pa]} \text{ değerinde bir belirsizlik etkisi oluşmaktadır.}$$

### 8.10 Elektro-Manyetik Alan Etkisi

Ölçüm veya kalibrasyonun yapıldığı mekanın yakınında yüksek değerlerde elektro-manyetik alan bulunmaması gerekmektedir. Son yıllarda yapılmış olan araştırmalarda yeni tip basınç terazilerinin elektromanyetik alan etkisinin toplam belirsizlik değeri üzerindeki etkisi göz ardı edilecek düzeyde olduğunu göstermektedir [10,11].

### Doğruluk Ve İzlenebilirlik

Basınç terazisi kullanılarak gerçekleştirilen ölçüm ve kalibrasyonların geçerliliği, referans standarda atfedilen toplam belirsizlik değerine, izlenebilirlik zincirine, cihazın linearitesine, tekrarlanabilirlik ve histerezis gibi parametrelere de bağlıdır. Her doğruluk seviyesinde karşılaştırma ölçümleri yaparak ölçüm zincirinin sürekliliği sağlanmalıdır. Diğer önemli bir faktör ise insan faktörü ve operatörden kaynaklanan hatalardır. Bu sebeple kalibrasyon ve ölçüm için kullanılan basınç terazilerinin seçimi yapılırken hedeflenen doğruluk değeri dikkate alınmalıdır. Referans cihaz (etalon) ve kalibre edilen cihazların doğruluk seviyelerinin oranı 4 ile 10 arasında olması gerekmektedir. Hassas basınç ölçerlerinin (Manometreler, elektronik manometreler vs.) doğruluk sınıfları %0.25-0.05 aralığında , basınç terazilerinin doğruluk aralığı ise %0.01-0.015 aralığında olmalıdır.

### Titreşim

Basınç terazisi ile yapılan ölçüm ve kalibrasyon işlemi sırasında basınç laboratuvarı için öngörölmüş titreşim

değerleri dikkate alınarak titreşim izolasyonu yapılmalıdır. Ancak izolasyon düzeyi laboratuvarın beyan ettiği kalibrasyon doğruluk seviyesine göre ayarlanmalı ve ölçümlerin titreşimlerden etkilenmediğini deneysel ölçümler ile ispat etmelidir. (bkz: Basınç Laboratuvarlarının Akreditasyon İçin Gerekli Şartlara).

### Sonuç

Basınç terazilerinin ve basınç ölçüm cihazlarının kalibrasyon sonuç raporları ve sertifikalar detaylı olarak verilmelidir. Özellikle belirsizlik sonucu, laboratuvarın güvenilirliği açısından tüm belirsizlik bileşenleri dikkate alınarak verilmesinde yarar vardır. Belirsizlik sonucu bir tablo şeklinde verilmelidir (Bkz. Tablo 1)

Belirsizlik Türü	Tipi	Belirsizlik Değeri
Tekrarlanabilirlik	A1	2.6
Kütle	B1	2.50
Kütle Yoğunluğu	B2	2.37
Hava Yoğunluğu	B3	1.00
Piston Silindir Sıcaklığı	B4	0.45
Diklik	B5	0.08
Efektif Alan	B6	13.00
Hassasiyet	B7	1.00
Elastik Deformasyon	B8	0.00
Uzama Katsayısı	B9	0.26
Sistemin Kararlılığı	B10	2.50
Toplam Belirsizlik		13.8+10,4 mPa
Geniştirilmiş Toplam Belirsizlik (K=2)		28+21 mPa

Tablo 2: Belirsizlik Tablosu

Basınç terazileri ile gerçekleştirilen ölçüm ve kalibrasyonlarda insan faktörü önemli bir etkidir. Dolayısıyla ölçümlerin doğruluğu ve güvenilirliği için ölçümler farklı zamanlarda ve farklı personel tarafında, ölçümün tekrar gerçekleştirilebilirlik özelliğini kontrol etmek üzere yapılmalıdır.

Laboratuvar veya sanayi kuruluşu sahip olduğu basınç terazilerini, uygun bir referans ile kalibre etmelidir. Örneğin basınç terazisini doğrudan ulusal referans ile karşılaştırmak maliyeti yükeltmekten başka bir yarar sağlamayacaktır. Aynı zamanda ülkenin sahip olduğu ölçüm kalibrasyon altyapısını tanımalı ve kalibrasyon hizmetini buna göre organize etmelidir.

Kuruluşlar mutlaka akredite laboratuvarlar vasıtasıyla izlenebilirliklerini sağlamalı ve sürekliliğini temin etmelidir.

Basınç terazilerinin kullanıcıları, piston silindir üniteleri kalibrasyon öncesi temizlemeli, uygun viskozitede akışkan kullanılmalı ve piston döndürme süresini tavsiye edilen değerden (max.35dak.) fazla tutmamalıdır [1].

Kalibrasyon sertifikası ile ilgili diğer önemli bir konu laboratuvar ortam koşulları ve yerel yer çekim ivme değeri ile ilgili bilgiler sertifikalarda ve raporlarda yer almasıdır.

### Referanslar,

1. DESGRANGES et HUOT " Etudes Et Realisation De La Référence Nationale De Pression 2-50 Baré BNM- Marché no. 74, 1 911 800 221 75 01.
2. J.-C. Legras " La Mesure Des Pressions Statiques" Edition Chiron" Paris 1986.
3. Baytaroğlu Ş. " Ölçübilim Ders Notları"
4. Yerel Yerçekim Deri NF X 02-011 Fransız Standardı. Kasım 1974.
5. M.OGIER " Le nouveau Réseau Gravimétrique Française. Bulletin D'Information Du B.N.M. No. 41, Juillet 1980.
6. Brigdman, P.W., "The Physics Of High Pressure", G.Bell&Sons, London, 1952
7. Kirk K. Mosher, Ruska Instrument Corporation, "The Traceability Chain Of The Piston Pressure Gage To NIST", 1991.
8. P. Delajoud, M. Girard, " A Forced Balance Piston For Low Gauge and Absolute Pressures" August 2002
9. ISO/TAG/WG3 "Guide To The Expression Of Ucertinty in Measurement", June 1992
10. Pressure Calibration System MODEL 248 USER'S MANUAL RUSKA INSTRUMENT CORPORATION Release: 2485-1D02 Revision C, September 30, 1993
11. P. Delajoud, M. Girard, "A Forced Balance Piston Gauge for Very Low Gauge and Absolute Pressures", August 2002
12. R. Haines, M. Bair, "Application of a New Method for the Automated of Very Low Gauge and Absolute Pressures in a Commercial Calibration Laboratory", January 2002