

KUVVET DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİ KALİBRASYON PROSEDÜRÜ

Sinan FANK, Hakan Özgür ÖZBAY, Şakir BAYTAROĞLU
TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME), P.K. 21, 41470 Gebze-KOCAELİ

Özet : Bu bildiride, UME Kuvvet Laboratuvarında kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonunda kullanılan prosedür anlatılmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre gerekli parametrelerin hesaplanması ve bu parametrelere göre kuvvet ölçme cihazlarının sınıflandırılması da ele alınmıştır. Prosedür ve sınıflandırma EN 10002-3'e göre yapılmış ve tablosu bildiride verilmiştir. Ayrıca kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonunda kullanılan ve kuvvet birimini gerçekleştiren Ulusal kuvvet standardı makinaları kısaca tanıtılmıştır.

1. Giriş

Dönüştürücünün (transdüser) ölçmedeki tanımı, özel bir büyüklüğe kullanılabilir bir çıkış sağlayan cihaz, olarak yapılmaktadır. Bu açıdan bakıldığında kuvvet dönüştürücüleri, mekanik bir büyüklük olan yük veya kuvvete karşılık, elektriksel çıkış verdikleri için bu adı almaktadırlar. Kuvvetin elektriksel çıkışa dönüşü dirençli, indüktif, kapasitif ve piezoelektrik prensiplere göre gerçekleştirilir. Bu dönüşümün sağlanması için, yükün uygulandığı elastik bir elemanın bulunması ve kiriş, halka, kolon gibi konstrüksiyonlara sahip bu elastik elemanların, yük ile elastik deformasyona uğraması gereklidir. Bu elastik deformasyon ile elemanda meydana gelen çökme, uzama veya kısalma gibi değerler yukarıda belirtilen elektriksel prensiplerden biriyle (en çok kullanılanı dirençli tip strain gage'lerdir) elektrik sinyallerine dönüştürülür. Elastik deformasyonun mekanik veya optik olarak okunabildiği sistemler de mevcuttur. Bu durumda elektriksel çıkış yerine mekanik çıkış alınmaktadır. Günümüzde proses kontrolü, bilgisayarlarla iletişim gibi nedenlerle, kuvvet ölçme cihazlarının tamamına yakını, elektriksel prensiplerle, elastik elemandaki çökmeyi değerlendirmektedirler.

Bu sistemler daha çok yük ölçme sistemlerinde kullanıldıkları için yük hücresi olarak da anılmaktadırlar. Yük hücreleri ile kuvvet dönüştürücüleri, konstrüksiyon ve çalışma prensibi olarak tamamen birbirinin aynı olmalarına rağmen, birincisi yük ölçme sistemlerinde (teraziler, kantarlar, vs.) diğeri ise, kuvvet biriminin transferinde kuvvet standardı olarak kullanıldıkları için, kuvvet dönüştürücüleri daha farklı ve yüksek metrolojik özelliklere sahiptirler.

Kuvvet dönüştürücüleri uygulamada, üretim aşamalarındaki kalite kontrolde (takım tezgahları, robot kolları vs.) , emniyet mühendisliği (otomobil çarpma testleri, belirli kuvvet değerine göre tüm sistemi açma veya kapatma için, vs.), malzeme testlerinde kullanılan makinalarının doğruluğunun belirlenmesine yönelik ölçümlerde, her türlü yük ölçme sistemlerinde, uzay ve askeri çalışmalarda yaygın olarak kullanılmakta, doğru ve hassas olarak ölçüm yapabilmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu nedenle kuvvet dönüştürücülerinin çıkış sonuçlarının belirli bir güvenlikte kullanılabilmesi için belirli aralıklarda kalibre edilmeleri gerekir. Ne kadar sık kalibre edilecekleri ise kullanma sıklığı ve şartlarına bağlıdır. Normal olarak yılda bir kalibre edilmeleri tavsiye edilirken, ağır koşullar, kötü ve çok sık kullanım gibi durumlarda, kalibrasyon süresi kısalabilmektedir. Kalibrasyon işlemi yalnızca bu konuda uzmanlaşmış laboratuvarlar tarafından gerçekleştirilebilir.[1]

Genel olarak kalibrasyon, farklı sonuçlar ve yorumlar vermeyecek bir çalışmadır. Fakat yine de kalibrasyonda farklı laboratuvarlar tarafından farklı prosedürler ve sınıflandırma kriterleri kullanıldığı için bazı zorluklar la karşılaşılmaktadır. Bu konuda bir birliğe varmak ve tüm kalibrasyonların aynı prosedürle gerçekleştirilmesini sağlamak amacıyla Avrupa'da EN 10002-3 standardı hazırlanmış ve tüm laboratuvarlar tarafından kullanılmaya başlanmıştır. UME'de de bu amaçla, aynı standarda göre kalibrasyonların gerçekleştirilmesi kararlaştırılmıştır. Aşağıda EN 10002-3 standardına göre bir kuvvet ölçme cihazı kalibrasyonunun gerçekleştirilmesi ve sınıflandırılması anlatılmıştır. Buradaki kuvvet ölçme cihazı terimi, yük veya kuvvet uygulandığında elastik deformasyona uğrayan bir eleman ve bu deformasyonun mekanik veya elektriksel olarak okunmasını sağlayan sistemler için kullanılır. [2]

2. Prosedürün Kullanıldığı Alan

Bu prosedür, tek eksenli test makinalarının (çekme-basma test makinaları) statik doğrulanması ve kuvvet biriminin transferinde kullanılan elastik kuvvet ölçme cihazlarının (kuvvet dönüştürücüsü-yük hücresi, ölçme halkası, dinamometre, vs. gösterge cihazı ile birlikte) kalibrasyonunda kullanılır. [3]

Kalibrasyon elastik kuvvet elemanına bilinen kuvvetlerin uygulanması ve gösterge cihazından okunan değerlerin kaydedilmesi prensibine dayanır.

3. Kuvvet Ölçme Cihazının Özellikleri

Kuvvet ölçme cihazı genel olarak iki parçadan oluşur. Bunlardan biri kuvvet dönüştürücüsü, diğeri ise gösterge cihazıdır. Kuvvet dönüştürücüsü ve gösterge cihazı, günümüzde genellikle elektriksel metodları kullanarak ölçüm yapmalarına rağmen, yük uygulanan elemanın çökmesi yeterli doğruluk ve kararlılığa sahip mekanik, optik veya diğer yöntemleri kullanarak ta ölçülebilmektedir. Elektriksel ölçme metodlarını kullanan ölçme cihazları, esas olarak kuvvet dönüştürücüleri için voltaj veya akım kaynağı, sinyal yükseltici, köprü devresi ve gösterge ünitesini içerir. Kuvvet ölçme cihazının parçalarına çekme ve basma için ayrı ayrı kullanılan mekanik bağlantı elemanları, kablolar ve buna benzer ara bağlantı elemanlarında eklemek mümkündür. Kuvvet dönüştürücüsü ve bağlantı elemanları, çekme veya basma yönündeki eksenel kuvvetlerin uygulanmasına uygun olacak şekilde tasarlanırlar.

4. Kuvvet Ölçme Cihazının Doğrulanması

Kalibrasyona başlamadan önce kuvvet ölçme cihazının kalibre edilebilirliğinden emin olunması için bazı ön testlerin ve tespitlerin yapılması gereklidir. İlgili çalışmalar aşağıda anlatılmıştır.

4.1 Aşırı Yükleme Testi

İsteğe bağlı olarak yapılan bu testte, kuvvet ölçme cihazı 4 kez maksimum kuvvetin % 8 ÷ % 12 fazlası bir kuvvetle yüklenir. Bu yükün uygulanma süresi 1 ÷ 1,5 dak. olarak alınır.

4.2 Uygulanan Kuvvetlerle İlgili Doğrulama

Kuvvet ölçme cihazının çekme testi için kullanılacağı bağlantı elemanlarının aksenal yük uygulanmasına imkan tanınmasından ve basma testlerinde kullanılacağı zaman, kuvvet makinası ile kuvvet dönüştürücü arasında etkileşimin olmadığından emin olunmalıdır. Bunun için yükleme elemanlarının ilgili standartta belirtilen özelliklerde olması sağlanır.

4.3 Değişken Voltaj Testi

Bu test kalibrasyon yapan kuruluşun insiyatifine bırakılmıştır. Elektrik devresine bağlanan kuvvet ölçme cihazının $\pm 10\%$ 'luk voltaj değişimlerine karşında önemli bir etkinin görülmediği, kuvvet dönüştürücüsü simülatörü veya uygun olan diğer bir yöntemle belirlenir.

4.4 Gösterge Cihazının Çözünürlüğü

Eğer mekanik bir gösterge cihazı kullanılıyorsa ibrenin genişliği skala çizgisi genişliği ile aynı olmalıdır. İbre genişliği ile iki skala arasındaki mesafe oranının (r) 1:10, 1:5, 1:2 olması tavsiye edilir.

Dijital göstergelerde ise, en son sayıdaki 1 artım çözünürlük olarak alınır. Fakat cihaz yüksüz durumdayken 1 artımdan fazla dalgalanmamalıdır. Eğer dalgalanma fazlaysa çözünürlük dalgalanmanın yarısına eşit alınır.

5. Uygulanacak En Küçük Kuvvet Değeri

Kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonu veya test makinalarının doğrulanma ölçümlerindeki kullanımı esnasındaki doğruluğu göz önüne alındığında uygulanacak en küçük kuvvet aşağıdaki koşulları sağlamalıdır;

- En küçük kuvvet aşağıdaki değerlere eşit veya büyük olmalıdır;

G 00 sınıfı için $4000 \times r$
G 0.5 sınıfı için $2000 \times r$
G 1 sınıfı için $1000 \times r$
G 2 sınıfı için $500 \times r$

- En küçük kuvvet $0.02 F_f$ 'ye eşit veya büyük olmalıdır.

6. Kalibrasyon Prosedürü

6.1 Ön Yükleme

Kalibrasyon kuvvetleri uygulanmadan önce verilen kuvvet yönünde (çekme-basma), maximum yük, cihaza 3 kez uygulanır. Her bir kuvvetin uygulanma süresi $1 \div 1,5$ dakika olarak alınır.

Bu testin amacı kuvvet dönüştürücüsünün bağlantı parçalarıyla uyumunu sağlamak, yük etkisiyle deformasyona uğrayan malzemede iç sürtünmelerden dolayı oluşan sıcaklık yükselmesini kararlı hale getirmek ve histeresiz etkisini en aza indirmek için uygulanır.

6.2 Yüklerin Uygulanması

Kuvvet ölçme cihazına sadece artan yük yönünde, döndürme yapmadan iki seri kalibrasyon kuvveti uygulanır. Sonra, azalan kuvvet yönlerini içeren en az 2 seri daha kalibrasyon kuvveti uygulanır. Kuvvet ölçme cihazı, her bir seri arasında kendi eksenini etrafında döndürülür. Bu döndürme kalibrasyon esnasında düzenli olarak dağıtılmış en az üç pozisyonda gerçekleştirilir. Örneğin $0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ 'lik bir döndürme sağlanır. Eğer bu mümkün değilse $0^\circ, 180^\circ, 360^\circ$ derecelik döndürmeye de izin verilebilmektedir. Her bir döndürmeden sonra 1 kez ön yükleme ayrıca yapılmaktadır.

İnterpolasyon eğrisinin çıkarılabilmesi için, her bir seride uygulanan yük sayısı 8'den az olmamalıdır ve mümkün olduğu kadar eşit dağıtılır. Eğer kuvvet ölçme cihazı hem çekme hemde basma kuvvetlerini ayrı ayrı ölçebiliyorsa ve çekme-basma için ayrı kalibrasyon isteniyorsa, bu işlem sırayla gerçekleştirilir. Bir yönde kalibrasyon bittikten sonra diğer yöndeki kalibrasyona başlanır. Fakat diğer yöndeki kalibrasyona başlanmadan önce yine 3 kez ön yükleme yapılır.

Yükler arasındaki sıfır yükte en az 30 sn. beklenip gösterge değeri not edilir. Ayrıca kalibrasyona başlamadan önce sıfır sinyali not edilir.

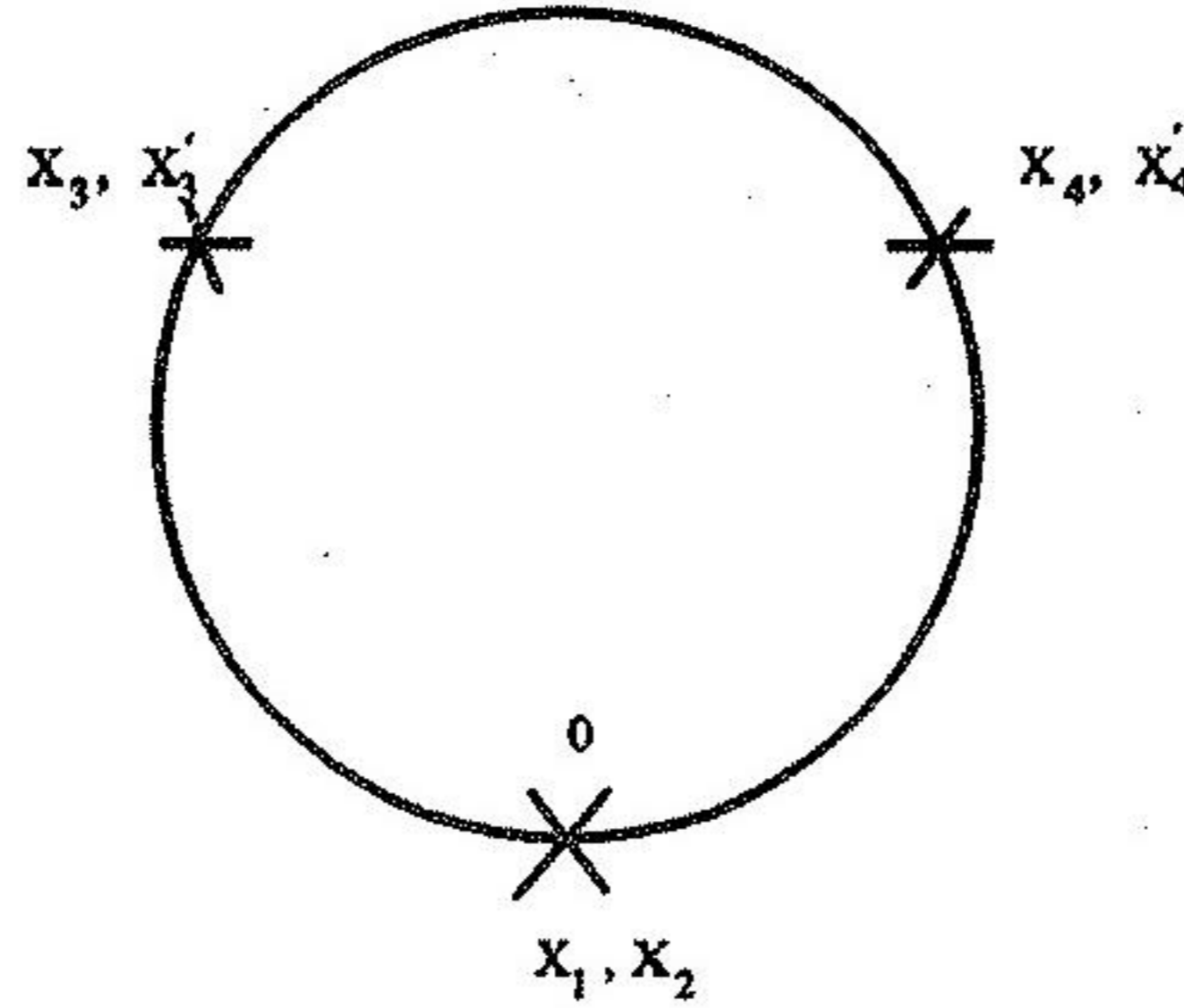
6.3 Yükleme Koşulları

Peşpeşe uygulanan yükler arasındaki zaman aralığı mümkün olduğunca eşit uygulanır ve her bir yükün uygulanma süresi 30 saniyeden daha az olmayacak şekilde seçilir.

Kalibrasyon $18 \div 28$ °C sıcaklık aralığında ± 1 °C sıcaklık kararlılığında gerçekleştirilmelidir.

Kalibrasyon esnasında sıcaklık elastik cihaza mümkün olduğu kadar yakın bir yerden ölçülerek kaydedilmeli ve izlenmelidir. Elektriksel kuvvet ölçme cihazları sıcaklık kompanzasyonuna sahip olmalarına rağmen mekanik kuvvet ölçme cihazlarında bu özellik bulunmadığından, standartlarda verilen katsayılar veya tablolara göre, başka sıcaklıklarda kullanılacaklarsa düzeltme yapılmalıdır.

Kalibrasyon esnasında cihazdan kararlı bir cevap alabilmek için, cihazın ortam sıcaklığına ulaşması gerekir. Bu yüzden cihaz, kalibrasyona başlamadan önce ölçüm yapılacak ortamda belirli bir süre bekletilmelidir. Ayrıca, strain gageli dönüştürücü kullanılması durumunda, kararlılık için kalibrasyona başlamadan en az 30 dakika önce, dönüştürücü devreye bağlanarak beslenmelidir.



Şekil 1. Kuvvet ölçme cihazının döndürme konumları

7. Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

7.1 Bağıl Tekrarlanabilirlik Hatası

Her bir farklı "i" kuvveti için bağıl tekrarlanabilirlik hatası $b_{rg,i}$, kuvvet ölçme cihazının değişmeyen (döndürmenin olmadığı) konumu için 1 ve 2 serilerinden % olarak aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$b_{rg,i} = \frac{|x_2 - x_1|}{\bar{x}_{g,i}} \times 100$$

$$\bar{x}_{g,i} = \frac{1}{2}(x_{1,i} + x_{2,i})$$

Her bir farklı "i" kuvveti için bağıl tekrarlanabilirlik hatası $b_{rv,i}$ kuvvet dönüştürücüsünün döndürülerek değiştirilen konumları için 1,3,4 serilerinden % olarak aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$b_{rv,i} = \frac{x_{i,max} - x_{i,min}}{\bar{x}_{v,i}} \times 100$$

$$\bar{x}_{v,i} = \frac{1}{3}(x_{1,i} + x_{3,i} + x_{4,i})$$

7.2 Bağıl İnterpolasyon Hatası

Bu hata kuvvet dönüştürücüsünün döndürülen konumlarından alınan ölçümlerin ortalaması ve kalibrasyon kuvvetlerinin bir fonksiyonu olarak sapmayı veren 1.,2.veya 3. dereceden bir eğri denklemi ile hesaplanır. bu eğri denklemi kalibrasyon raporunda gösterilmelidir.

$$f_{x,i} = \frac{\bar{x}_{v,i} - x_{a,i}}{x_{a,i}} \times 100$$

$x_{a,i}$: Bulunan denklem yardımıyla hesaplanan kuvvet değerleri

7.3 Bağıl Histeresiz Hatası

Her bir farklı kuvvet değeri için artan ve azalan yüklerde okunan değerler arasındaki fark histeresiz hatasını, U_i , verir.

$$U_i = \frac{x_i' - x_i}{x_i} \times 100$$

x_i' : Göstergeden okunan azalan yöndeki kuvvet değeri

x_i : Göstergeden okunan artan yöndeki aynı kuvvet değeri

7.4 Bağıl Sıfır Hatası

Sıfır değeri her bir ölçme serisinden sonra kaydedilmeli ve diğer seriye başlamadan önce ayarlanmalıdır. Sıfır değeri kuvvet tamamen kaldırıldıktan yaklaşık 30 saniye sonra okunmalıdır. Bağıl sıfır hatası f_o , aşağıdaki formüle göre hesaplanır;

$$f_o = \frac{x_f - x_o}{x_N} \cdot 100$$

- x_f : Yükler kaldırıldıktan sonra göstergeden okunan değer
- x_o : Yükler uygulanmadan önce göstergeden okunan değer
- x_N : Maksimum kapasitedeki çıkış değeri

8. Kuvvet Ölçme Cihazının Sınıflandırılması

Kuvvet ölçme cihazı tablo 1'de belirlenen koşulları, kuvvet ölçme cihazının maksimum değeri olan F_E 'nin % 50'si ile % 100'ü arasında karşılamalıdır.

9. UME Kuvvet Laboratuvarı Kalibrasyon İmkanları

UME kuvvet laboratuvarında kalibrasyonları gerçekleştirebilmek için kullanılan kuvvet standardı makinaları hakkında kısa bilgiler aşağıda verilmiştir.

9.1 11 kN'luk Ölü Ağırlıklı Makina

1, 2, 5, 10 kN'luk kuvvet değerleri % 10 artımlarla 10 adımda gerçekleştirebilmektedir. Ayrıca belirtilen kuvvet değerlerine % 10'luk bir ek yük uygulayabilmekte ve böylece aşırı yükleme testlerine olanak sağlamaktadır.

Ölçüm belirsizliği 2×10^{-5} mertebesindedir ve tüm sınıflardaki kuvvet dönüştürücülerini kalibre edebilmektedir.

9.2 110 kN'luk Ölü Ağırlıklı Makina

20, 50, 100 kN'luk kuvvet değerleri % 10 artımlarla 10 adımda gerçekleştirebilmektedir. Ayrıca belirtilen kuvvet değerlerine % 10'luk bir ek yük uygulayabilmekte ve böylece aşırı yükleme testlerine olanak sağlamaktadır.

TABLO 1-Kuvvet Ölçme Cihazlarının Sınıflandırma Tablosu

Cihazın sınıfı	Kuvvet makinasında olması gereken özellik	Gösterge biriminin minimum sayısı	Bağıl sıfır hatası	Döndürme yapılmayan konumda	Döndürme yapılan konumda	Bağıl interpolasyon hatası	Bağıl histeresiz hatası
	Hata sınırı %	(adım)	%	Bağıl tekrarlanabilirlik hatası	Bağıl tekrarlanabilirlik hatası	%	%
G 00	±0.01	4000	±0.012	0.025	0.05	±0.025	0.07
G 0.5	±0.02	2000	±0.025	0.05	0.10	±0.05	0.15
G 1	±0.05	1000	±0.05	0.10	0.20	±0.10	0.30
G 2	±0.10	500	±0.10	0.20	0.40	±0.20	0.50

Ölçüm belirsizliği 2×10^{-5} mertebesindedir ve tüm sınıflardaki kuvvet dönüştürücülerini kalibre edebilmektedir.

9.3 1100 kN'luk (1.1 MN) Manivelalı Makina

200, 500, 1000 kN'luk kuvvet değerleri % 10 artımlarla 10 adımda gerçekleştirile-bilmektedir. Ayrıca belirtilen kuvvet değerlerine % 10'luk bir ek yük uygulayabilmekte ve böylece aşırı yükleme testlerine olanak sağlamaktadır.

Bu makina ölü ağırlıklı makina ile birlikte çalışabilmekte ve ölü ağırlıklar ile üretilen kuvvet değerlerini 1:10 büyütme oranı ile büyüterek uygulayabilmektedir.

Ölçüm belirsizliği 1×10^{-4} mertebesindedir ve tüm sınıflardaki kuvvet dönüştürücülerini kalibre edebilmektedir.

Kaynaklar

1. P.J. Brandenburg, J.M. Appsis, J.M. Loemens and H.Wieringa, "Calibration and classification of force transducers by using traceable set of high-performance facilities", IMEKO Conference, Amsterdam, The Netherland, May 1986.
2. " Mekanik Metroloji Laboratuvarlarının Mevcut Kalibrasyon İmkanları ve Kısa Dönem amaçları", Mekanik Metroloji Grubu, TÜBİTAK-MAM/UME, Gebze-KOCAELİ, 1995
3. EN 10002-3 , Metallic Materials, Tensile test-Part3: Calibration of force proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines.