

KUVVET STANDARDININ OLUŞTURULMASI VE SANAYİYE TRANSFERİ

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

Özet : Bu çalışmada tüm dünyadaki metroloji enstitülerinde, birincil seviyedeki kuvvet standardının tanımına göre nasıl gerçekleştirildiği, UME'de kurulan sistemin açıklanması, üretilen kuvvet değerlerinin uluslararası seviyede olduğunun ispatlanması için gerçekleştirilen uluslararası karşılaştırma yöntemi ve kuvvet biriminin sanayiye transferinin nasıl gerçekleştirildiği anlatılmıştır.

1. Giriş

Üretim aşamalarındaki kalite kontrol ölçümlerinde, üretimde kullanılan makina ve cihazların kontrolünde, robot teknolojisinde, malzeme testlerinde, uçak, inşaat, makina, gemi, otomotiv gibi bir çok mühendislik dalında, emniyet mühendisliğinde, askeri ve uzay çalışmaları gibi bir çok alanda kuvvet ölçümüne ihtiyaç duyulmakta, bu nedenle de doğru ve hassas ölçülmesi büyük önem taşımaktadır.

Endüstri, bilim ve teknolojideki kullanımı ve önemi gün geçtikçe artan kuvvet ölçümü, yüksek doğruluklu kuvvet dönüştürücülerinin üretilmesi ve geliştirilmesini sağlamıştır. Bu konudaki çalışmalar artan doğruluk taleplerine paralel olarak gelişmektedir. Kuvvet dönüştürücülerindeki bu gelişme, doğal olarak daha küçük belirsizliğe sahip kalibrasyon sistemlerine ihtiyacı doğurmuştur.

Kuvvet dönüştürücülerinin kalibrasyonunda kullanılan sistemler, kuvvet standardı makinası (KSM) olarak anılmakta ve ihtiyaç duyulan doğruluk seviyesine göre çeşitli tiplerde bulunmaktadır. KSM'ler içinde en yüksek doğruluğa sahip makineler ölü ağırlıklı olanlardır ve kuvveti birimine göre üretmektedirler. Büyük kuvvet değerlerinde, ölü ağırlıklı makinelerin ekonomik olmaması nedeniyle, ölü ağırlıklar tarafından üretilen kuvveti manivela veya hidrolik olarak büyüten makineler kullanılmakta fakat bunlarda doğruluk bir miktar azalmaktadır.[1]

Kuvvet, 1 kg'lık kütleye 1 m/sn² ivme veren fiziksel büyüklük olarak tanımlanır ve birimi Newton (N)'dur.

Doğrudan yükleme, kuvvet üretme metodları arasında en hassasıdır ve bu metod ile kuvvet, birimin tanımına göre yerel yerçekim ivmesi göz önüne alınarak kalibre edilmiş kütlelerin ağırlıklarıyla üretilir. Kütlelerin bağıl belirsizliği yaklaşık 5·10⁻⁶ civarındadır. Yerel yerçekim

ivmesi de $1 \cdot 10^{-6}$ bağıl belirsizliğinde belirlenir. Havanın kaldırma kuvvetinin kütleler üzerindeki etkisi düşünüldüğünde , yoğunluk belirlemesinden gelen hatanın katılması gerekir ki bu değer $1 \cdot 10^{-6}$ mertebesindedir. Bu durumda ağırlıklarla üretilen kuvvet değerinin teorik bağıl belirsizliği $1 \div 2 \cdot 10^{-5}$ mertebesindedir. Kuvvet değeri aşağıdaki formüle göre oluşturulmaktadır.

$$F = m \cdot g \cdot \left(1 - \frac{d_h}{d_m}\right) \quad (1)$$

Burada, F : Üretilen kuvvet, m : Kütle değeri, g : Yerel yerçekim ivmesi, d_h : Havanın yoğunluğu, d_m : Kütlenin yoğunluğu'dur.

Ağırlıklarla üretilen kuvvet değerleri çoğu zaman hidrolik veya manivelalı sistemlerle büyütülerek yüksek değerlere ulaşılır. Bunun nedeni, ölü ağırlıklarla yüksek değerlere ulaşmanın çok büyük hacimli ve pahalı makinelerin yapılmasını gerektirmesindedir. Hidrolik sistemlerde, piston ile silindir arasındaki boşluklar, sıcaklıkla piston alanının ve yağ viskozitesinin değişmesi, imalattan kaynaklanan hatalar, sızıntılar gibi nedenlerle, hidrolik büyütmeli kuvvet makinelerinin belirsizlik seviyesi $1 \div 2 \cdot 10^{-4}$ olarak gerçekleşebilmektedir.

Manivelalı sistemlerde ise, manivela boyunun belirlenmesi, maniveladaki sehimler, yataklamadan gelen hatalar ve sürtünmeler nedeniyle bu tip makinelerin belirsizlik seviyesi yine $1 \div 2 \cdot 10^{-4}$ olarak gerçekleşebilmektedir.

Kuvvet metrolojisi alanında uluslararası işbirliği çerçevesinde, çeşitli ülkelerde oluşturulan kuvvet değerleri arasındaki yakınlığın kabul edilebilirliği ve kuvvetlerin hangi belirsizlik seviyesinde gerçekleştirildiği uzun yıllardır tartışılmaktadır. Bu durum uluslararası ticaret açısından büyük öneme sahiptir ve gerçekleştirilen kuvvetlerin standartlaştırılması talebini doğurmuştur. Aynı zamanda bir kuvvet ölçme cihazı (kuvvet dönüştürücüsü ve gösterge ünitesi beraber kullanıldığında kuvvet ölçme cihazı adını almaktadır) tüm ulusal laboratuvarlarda belirtilen belirsizlik sınırları içinde kalibre edildiğinde elde edilen sonuçların aynı olması gereklidir. Bu nedenle ülkeler birbirleri arasında karşılaştırmalı ölçümler yaparak sonuçların birbirlerine olan yakınlığını belirlemektedirler. [2]

Ülkemizde oluşturulan kuvvet standardı ve elde edilen kuvvet değerlerinin belirtilen belirsizlik seviyesinde olduğunun ve doğruluğunun kanıtlanması için UME ile PTB (Alman Metroloji Enstitüsü) arasında karşılaştırmalı ölçümler gerçekleştirilmiştir.

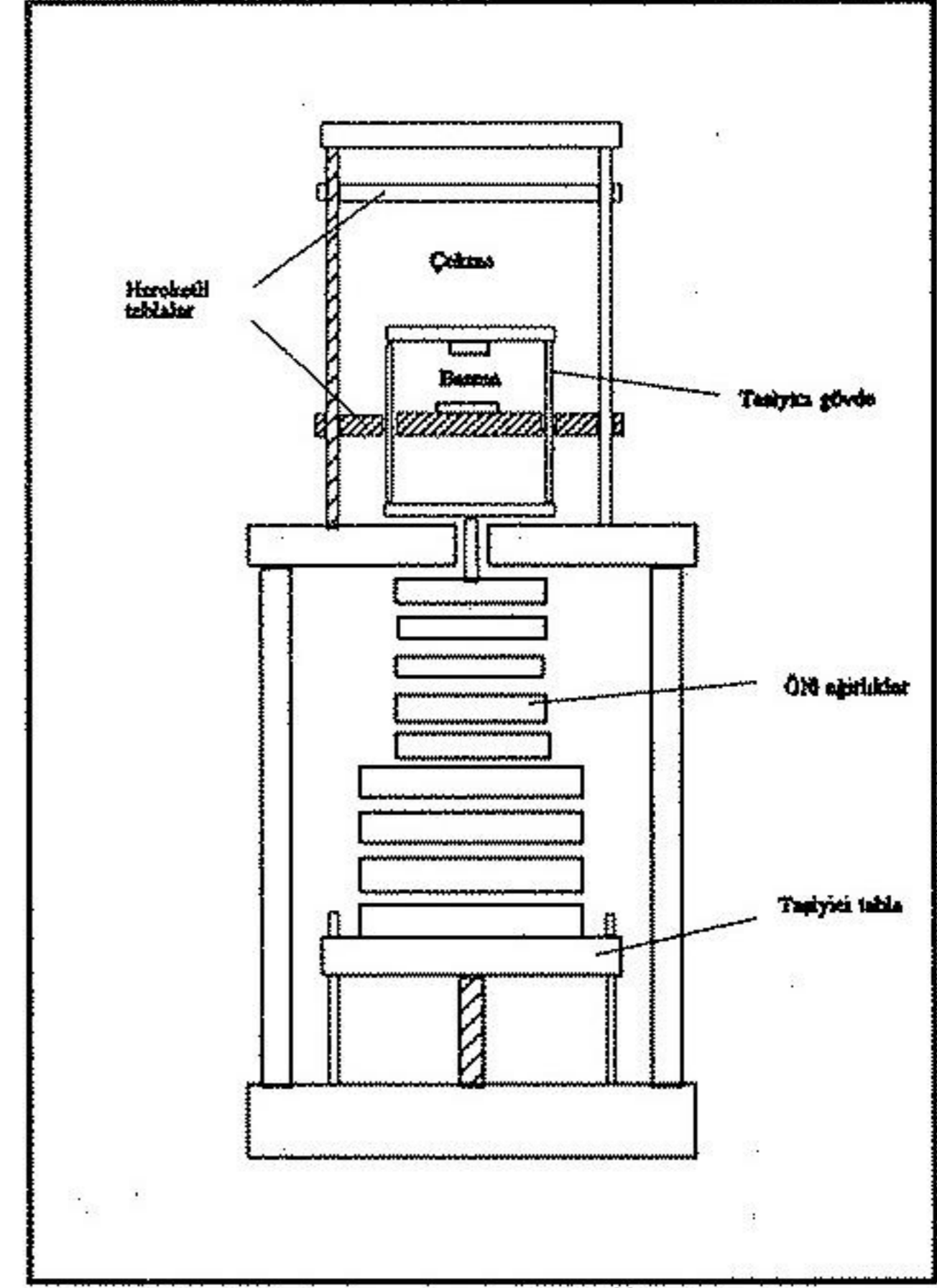
2. UME Kuvvet Standardı Makinaları

Bu kısımda, UME kuvvet laboratuvarında bulunan ve kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonunda kullanılan KSM'ler kısaca tanıtılacaktır.

2.1 11 kN'luk Ölü Ağırlıklı Kuvvet Standardı Makinası

Bu makina, 1 kN, 2 kN, 5 kN, 10 kN'luk kuvvet değerlerini ölü ağırlıklar yardımıyla, % 10 artımlarla 10 adımda gerçekleştirebilmektedir. Ayrıca belirtilen kuvvet değerlerine % 10'luk bir ek yük uygulanabilmekte ve böylece aşırı yükleme testlerine de olanak sağlamaktadır. Bu makinanın şematik resmi şekil.1'de görülmektedir.

Disk şeklindeki ağırlıklar bir yığın halinde taşıyıcı tabla üzerinde oturmaktadır. Bu taşıyıcı tabla servomotor tahrikli bir vida mekanizmasıyla aşağı-yukarı hareket edebilmektedir. Tablanın aşağı hareketi esnasında ilk kütle kuvvet dönüştürücüsünün yüklenmesini sağlayan yükleme gövdesine asılmakta, diğer kütlelerde ara bağlantı elemanları yardımıyla birbirine asılmaktadırlar. Yükleme gövdesinden bağımsız çalışan hareketli ayar tablaları (2 adet), kuvvet dönüştürücüsünün oturtulduğu (basmada) veya asıldığı (çekmede) elemanlar olup dönüştürücünün boyutlarına göre serbest hareket ederek ayar yapmayı sağlarlar. Makina yaklaşık 3.5 m yüksekliğinde ve taban alanı 70 x 70 cm boyutlarındadır. Makinada kuvveti üreten ölü ağırlıklar PTB kütle laboratuvarında kalibre edilmiştir.



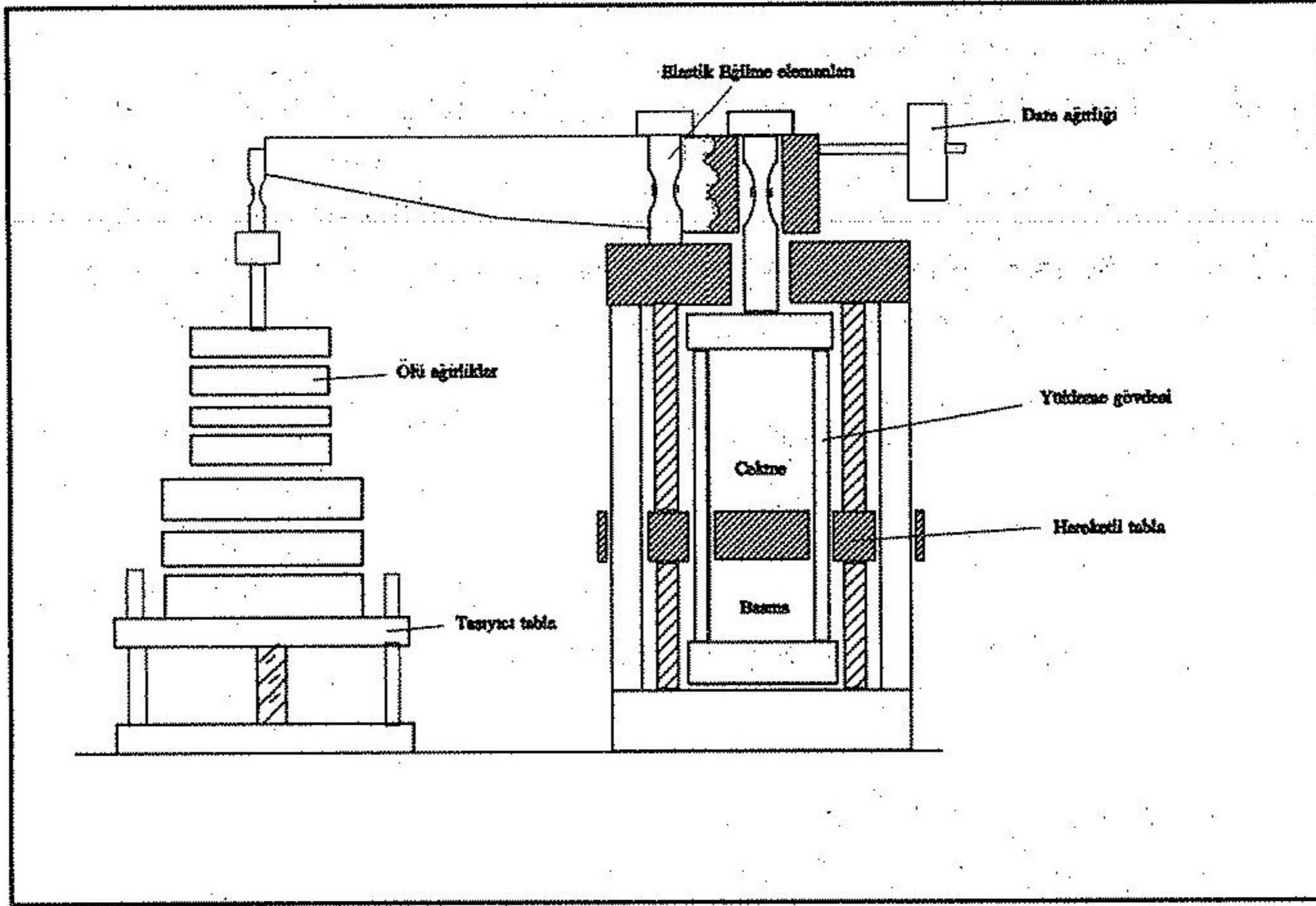
Şekil 1. UME 11 kN Ölü Ağırlıklı KSM'nin Şematik Resmi

Bu makinanın ölçme belirsizliğinin $2 \cdot 10^{-5}$ mertebesinde olduğu tahmin edilmektedir. (Kesin sonuçlar uluslararası ölçümlerden sonra belli olacaktır.)

2.2 1.1 MN (1100 kn) 'luk Kuvvet Standardı Makinası

Bu makina iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım kuvveti, 11 kN'luk makinada olduğu gibi doğrudan yüklemeyle, ölü ağırlıklar kullanarak üretmektedir. 20 kN, 50 kN, 100 kN'luk kuvvet değerleri % 10 artımlarla 10 adımda gerçekleştirilmektedir. Ağırlıkların yüklenmesi ve makinanın çalışma prensibi 11 kN'luk makina ile tamamen aynıdır.

Makinanın ikinci kısmı ise, birinci kısımdaki ölü ağırlıklarla üretilen kuvvet değerlerinin, bir manivela yardımıyla 10 kat büyütüldüğü taraftır. Bu kısımda da 200 kN, 500 kN ve 1000 kN'luk kuvvetler aynı şekilde % 10 artımlarla 10 adımda gerçekleştirebilmektedir. Makinanın her iki kısmında da belirtilen kuvvet değerlerine % 10 'luk bir ek yük uygulanabilmekte ve böylece aşırı yükleme testleri de gerçekleştirilmektedir. Bu makinanın şematik resmi şekil.2'de görülmektedir.



Şekil 2. UME 1.1 MN'luk Kuvvet Standardı Makinasının Şematik Resmi

Makinada, 110 kN'a kadar olan kuvvetler ölü ağırlıklar yardımıyla üretildiği ve manivelalı kısımdan bağımsız olarak kullanılabilirdiği için ayrı bir KSM olarak ele alınabilir. Fakat manivelalı kısım tek başına kuvvet üretememekte ölü ağırlıklara ihtiyaç duymaktadır. Bu makinada ölü ağırlıklı kısımdaki ölçme belirsizliği $2 \cdot 10^{-5}$, manivelalı kısımdaki ölçme belirsizliği ise $1 \cdot 10^{-4}$ mertebesinde olduğu tahmin edilmektedir.

Klasik kuvvet makinalarında, manivelaların mesnet noktalarında bıçak sırtı sistemi kullanılmaktadır. Fakat bu uçların zamanla aşınması, büyütme oranında değişimlere yol açmakta ve üretilen kuvvet değerlerinin sapmasına neden olmaktadır. UME'de kurulan yeni KSM'de bu yataklama yerine, aşınma oluşturmayacak gerinim ölçerli (strain gage) elastik eğilme elemanları kullanılmıştır. Şekil.2'de bu elemanların manivelaya bağlanması gösterilmiştir.

Ölü ağırlıkların manivelanın bir ucuna yüklenmesiyle eğilme olacak, bu esnada her üç noktadaki elastik elemanlarda eğilme meydana gelecek ve bu eğilme strain gage'ler tarafından hissedilip sinyal üretilecektir. Bu sinyal bilgisayar tarafından değerlendirilip KSM'nin manivelalı kısmındaki hareketli ayar tablasının aşağı yukarı hareket etmesi için servomotora sinyal gönderilir. Elastik elemanlardaki eğilme momentinin sıfır olduğu konumda, servomotor durup manivelanın yatay pozisyona gelmesi sağlanmış olur. Oluşan kuvvetin daima yere dik olması ve bileşen kuvvet oluşmaması için, manivelanın yere paralel olması gereklidir. Bu sistemin buna imkan tanınması ve tamamen bilgisayarla kontrol edilebilmesi en büyük özelliğidir ve bu sistemle çalışan ilk birincil seviye kuvvet standardı makinası UME kuvvet laboratuvarında kurulmuştur.

Bu makina manivelalı tarafta dahi $1 \cdot 10^{-4}$ 'lük ölçme belirsizliğine sahip olduğu için, Avrupa'da kullanılan EN 10002-3 standardına göre en yüksek doğruluk sınıfına sahip (G00) ve aynı zamanda transfer standardı olarak ta kullanılan kuvvet dönüştürücülerinin, kalibrasyonuna imkan sağlamaktadır.

Her iki KSM'da da yükleme gövdesinin ağırlığı (ölü ağırlıklı makinalarda) ilk kuvvet adımını oluşturacak şekilde imal edilmiş ve kalibrasyonu yine PTB'de gerçekleştirilmiştir.

Bu makina yaklaşık 5 m yüksekliğinde, 160 x 270 cm taban boyutlarında ve 22 ton ağırlığındadır.

3. Uluslararası Karşılaştırmalı Ölçümlerde Kullanılan Yöntem

Her ülke ihtiyaç duyduğu çalışma aralığına ve belirsizliğine göre kuvvet skalasını oluşturur. Skalalarındaki kuvvet değerleri çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilir. Bu gerçekleştirilirken, ihtiyaç duyulan doğruluk seviyesine göre karar verilir. En basit yöntem, referans kuvvet dönüştürücü kullanarak, kuvvet uygulayabilecek bir makina aracılığı ile (hidrolik veya vidalı) daha düşük sınıflı kuvvet dönüştürücülerini kalibre etmektir. Fakat bu sistemlerde ölçme belirsizliği $1 \cdot 10^{-3}$ mertebesinde ve izlenebilirlik bir başka ülke üzerinden sağlanmak zorundadır. Bu sistemler hiç bir zaman birincil seviyede bir kuvvet standardı olarak kabul edilemezler. Fakat düşük doğruluk sınıflı kuvvet dönüştürücülerinin kalibrasyonunda kullanıldıkları için kuvvet kalibrasyon makinası olarak kullanılabilirler.

Birincil seviyede bir kuvvet standardının oluşturulabilmesi için kuvvet biriminin tanımına göre gerçekleştirebilmesi gerekir. Bunun için formül (1)'de de açıklandığı gibi ölü ağırlıkların kullanılması gerekir. Her ülke tanımına göre oluşturduğu kuvvet değerlerinin, diğer ülkelerle uyumlu olmasını sağlamak ve doğruluklarından emin olumak için, karşılaştırmalı ölçümlere girmektedir. Bu konuda son 15 yıldır yoğun bir çalışma gerçekleştirilmektedir. Şu anda Avrupa içinde en geniş kuvvet skalasına sahip ülke Almanya'dır ve bu skalanın 2 MN' kadar olan kısmı ölü ağırlıklı KSM'lerle gerçekleştirilmektedir. ABD'de ise bu değer 4.5 MN'a kadar ölü ağırlıklarla gerçekleştirilmektedir.

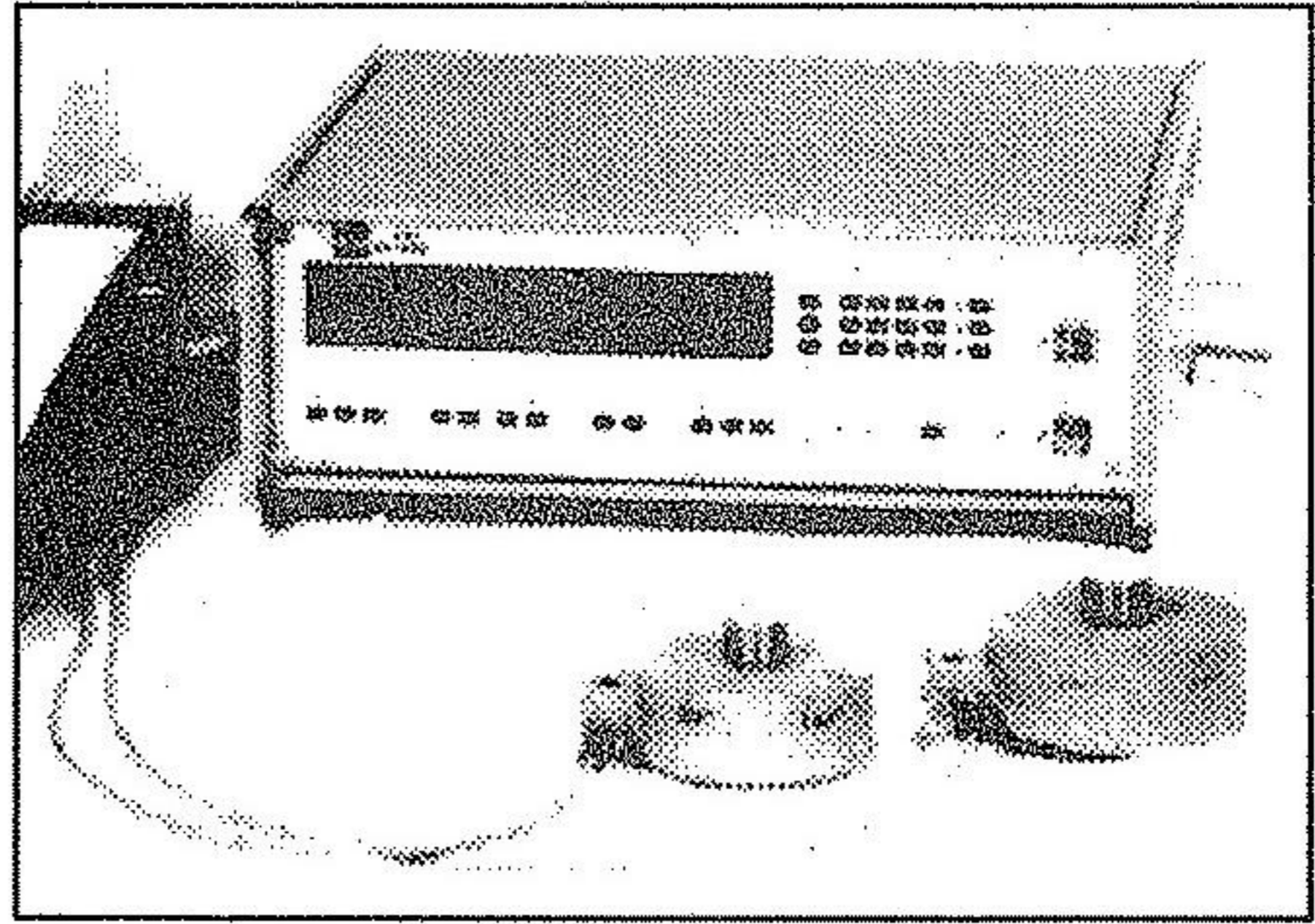
UME'de kurulan kuvvet skalasının doğruluğunun ispatlanması, Almanya ve diğer ülkeler ile kuvvet değerlerinin yakınlığının belirlenmesi amacıyla karşılaştırmalı ölçümlere girilecektir (Ağustos 1995 - Bu bildirin hazırlandığı tarihte henüz ölçümler gerçekleştirilmediği için sonuçlar basılamamıştır, fakat bildiri sunuş tarihinde sonuçlar gösterilecektir). Karşılaştırmalı ölçümler PTB-UME arasında gerçekleştirilmiştir.

Karşılaştırmalı ölçümlerde transfer standardı olarak kullanılan yüksek doğruluk ve kararlılığa sahip kuvvet dönüştürücüleri her iki ülkenin kuvvet standardı makinasında bir seri ölçüme tabi tutulur. Bulunan sonuçlar özel istatistik yöntemlerle değerlendirilerek makina karakteristikleri hakkında karar verilir. [3]

Karşılaştırmalı ölçümlerde 1 kN, 2 kN, 5 kN, 10 kN, 20 kN, 50 kN, 100 kN, 200 kN, 500 kN, 1 MN'luk PTB'ye ait ve uzun yıllardır uluslararası karşılaştırmalı ölçümlerde kullanıldıkları için kararlılığı ispatlanmış kuvvet dönüştürücüleri kullanılmıştır.

Gösterge cihazından gelebilecek belirsizliği en aza indirmek için çok yüksek kararlılık ve çözünürlüklü gösterge cihazı kullanılmıştır.

Bu kuvvet dönüştürücüleri PTB 'de 100 kN ve 1 MN'luk ölü ağırlıklı KSM'lerde ölçülmüş, sonra UME'de anlatılan KSM'lerde ve son olarak tekrar PTB'de aynı ölçümler gerçekleştirilmiştir. Kullanılan ölçme prosedürü, ölçme belirsizliğine katkısı olduğu bilinen parametrelerin etkilerini en aza indirmek için özel olarak geliştirilmiştir. Aşağıdaki alt başlıklar bu parametreleri kısaca tanımlamakta ve etkilerini en aza indirecek yolları göstermektedir.



Şekil 3. Karşılaştırmalı ölçümlerde kullanılan hassas gösterge cihazı ve bir kaç kuvvet dönüştürücünün resmi

3.1 Zaman Aralığı

Her kuvvet dönüştürücüsü farklı sürünme özelliği gösterdiği halde, genel olarak sürünme hızı, yükleme veya boşaltmayı izleyen birkaç dakika içinde hızla düşer. Sürünme etkisini en aza indirmek ve kararlı bir cevap alabilmek için her yükün uygulanma süresi olarak 3 dakikanın yeterli olduğu belirlenmiştir.

3.2 Makina ile Kuvvet Dönüştürücüsü Arasındaki Etkileşim

Bu etkileşim ölçümün belirsizliğini büyük oranda etkilemektedir. Kuvvet dönüştürücüsünün KSM'na yerleştirilmesindeki normal uyumsuzluklar (makinanın yük ekseninden sapmalar, vs.) kuvvet dönüştürücüsünde eğme, kayma, burma gibi bileşenler oluşturabilir ve bu durum sonuçları etkiler. Bu hataları en aza indirmek için dönüştürücünün çeşitli simetrik dönme pozisyonlarında yüklenmesi istenir. Bu nedenle kuvvet dönüştürücüsü, makina eksenine etrafına 0°, 90°, 180°, 270°, 360°'lik açılarda döndürülerek herbir açıda 2'şer

seri ölçüm yapılır. Her açısal dönüşten önce 3 kez ön yükleme yapılarak kararlılık sağlanır. Her bir seri ölçüm kuvvet dönüştürücüsü en yüksek ölçme değerinin (kapasitesinin) % 40'ndan başlamak üzere % 10 artımlarla gerçekleştirilir. Her bir açıdaki yükleme, artan kuvvetler yönünde gerçekleştirilirken, 360° konumundaki 2. seri ölçüm, histeresiz hesabı için azalan kuvvet yönünde de gerçekleştirilir.

3.3 Çevre Koşulları

Sıcaklıktan gelecek hataları en aza indirmek için, ortam koşullarının çok iyi kontrol edilmesi gerekir. Ayrıca PTB ve UME laboratuvar koşullarının aynı olması gerekir. Bu nedenle ölçümlerden önce UME lab. koşulları PTB'nin koşullarına uyacak şekilde klimalar ayarlanmıştır. Ölçümlerden önce kuvvet dönüştürücüleri ve gösterge cihazı, sıcaklık kararlılığının sağlanması için 3 gün laboratuvarında bekletilmiştir.

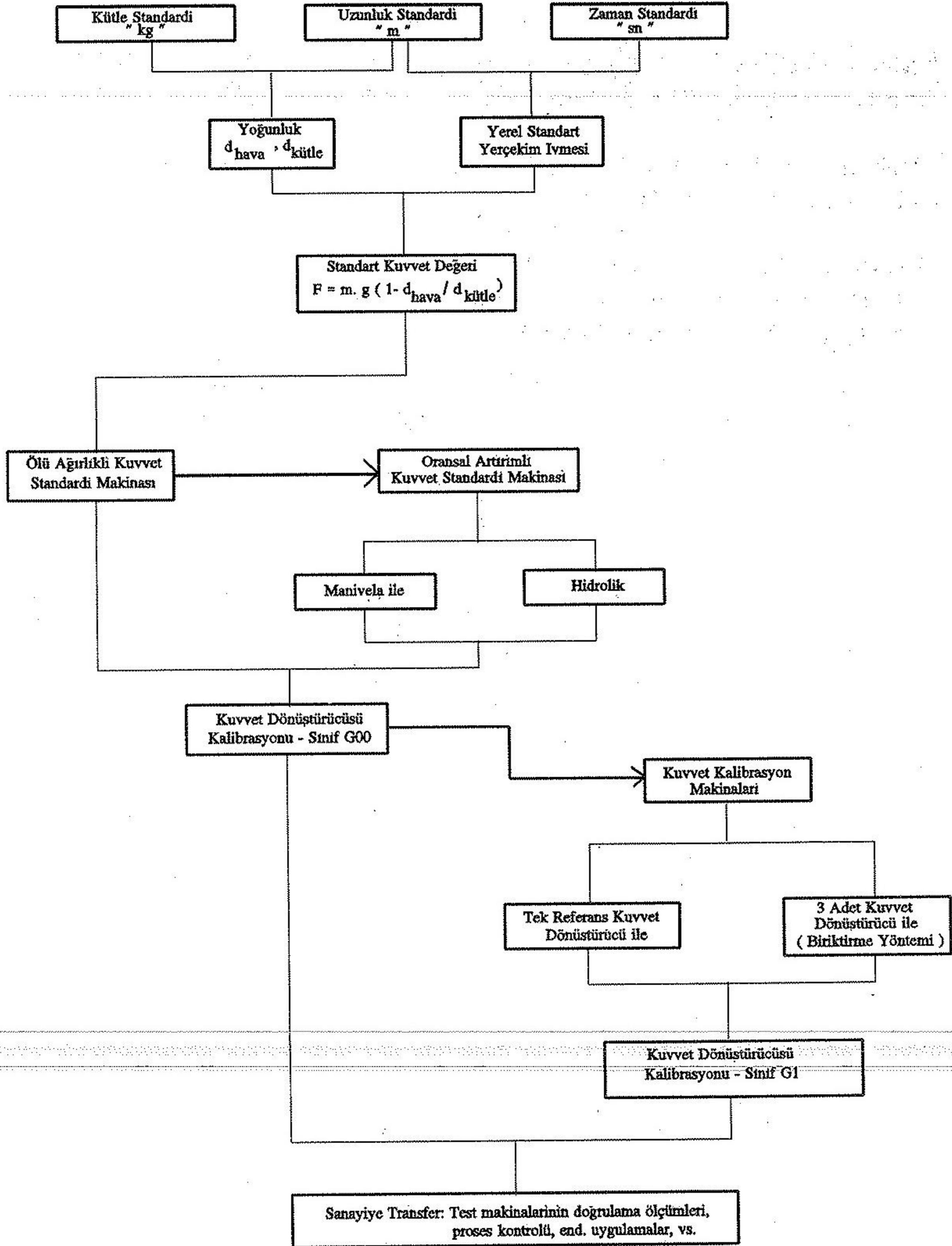
4. Ölçüm Sonuçları

Bildiri hazırlandığı esnada ölçümlerin henüz bitirilmemiş olması nedeniyle sonuçlar verilememiştir. Fakat sunuş esnasında anlatılacaktır.

5. Kuvvet Biriminin Sanayiye Transferi

Ölü ağırlıklı kuvvet standardı makinalarında tanımına göre üretilen kuvvet değerleri, ya doğrudan ya da büyütülerek (Hidrolik veya manivellalı sistemle) kuvvet dönüştürücülerinin kalibrasyonunda kullanılır. Kalibre edilen kuvvet dönüştürücüleri sanayinin ihtiyaç duyduğu tüm alanlarda kullanılabilir. Örnek olarak, malzeme test makinalarında çekme-basma kuvvetlerinin kontrolü veya kalibrasyonu için, kalibre edilmiş yüksek doğruluk sınıfına sahip kuvvet dönüştürücüleri kullanılır. Burada test makinasında, numune bağlanan kısma yerleştirilen kuvvet dönüştürücüsüne, makina tarafından yük uygulanır. Kuvvet dönüştürücüsünün göstergesinden okunan kuvvet değeriyle test makinasının göstergesinden okunan kuvvet değerleri karşılaştırılarak değerlendirme yapılmaktadır. Aynı şekilde bu konuda ihtiyaç duyulan tüm alanlarda bu prensibe göre değerlendirme yapılmakta veya bu şekilde kuvvet birimi sanayiye transfer edilmektedir.

Şekil 4'te kuvvet skalasının oluşturulması ve sanayiye transferi ile ilgili akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 4. Kuvvet Skalasının Oluşumu ve Sanayiye Transferi Akış Şeması

Kaynaklar:

1. " Mekanik Metroloji Laboratuvarlarının Mevcut Kalibrasyon İmkanları ve Kısa Dönem Amaçları", Mekanik Metroloji Grubu, TÜBİTAK-MAM/UME, Gebze-KOCAELİ, 1995.
2. "Realization of forces up to 1 MN on an international level", M. Peters, IMEKO TC-3 on Measurement of Force and Mass, Kobe, Japan, 1984.
3. "Summary of the Intercomparison of the National Institute of Standards and Technology, USA and Physikalisch-Technische Bundesanstalt, S.L. Yaniv, A. Sawla, M. Peters, Germany", J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 96, 529, (1991).