

KUVVET ÖLÇÜM BİRİMİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİNDE ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ

Y.Müh. Hakan Özgür ÖZBAY, Y.Müh. Sinan FANK
TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME)

ÖZET

Kuvvet ölçüm birimi Newton'un "1 kg'lık kütleye 1 m/s² ivme veren etki" şeklindeki dinamik çağrışımlı tanımı birimin gerçekleştirilmesinde kullanılmayan bir yaklaşımdır. Kuvvet biriminin pratik olarak gerçekleştirilmesinde prensip olarak kütleler üzerinde yerçekimi etkisi kullanılır. Kuvvet birimini gerçekleştiren sistemler arasında en küçük belirsizlik değerine, bu prensibi kullanan ve ölü ağırlıklı kuvvet standardı adı verilen sistemlerle ulaşılır. Bu sistemlerin sahip oldukları belirsizlik seviyesinin tayininde deneysel metodlar yanında teorik yaklaşımlarda geliştirilmiştir. Bu tebliğde ölü ağırlıklı sistemlerde ulaşılan belirsizlik seviyesi ve belirsizliğe etkileyen parametreler ile ilgili bilgiler verilmiştir.

1. GİRİŞ

Günümüz genel yaklaşımı ile nispeten hatalı olarak kuvvet ölçüm cihazı adıyla anılan kuvvet dönüştürücüleri, güncel teknolojik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan kuvvet ve yük ölçme sensörleridir. Kullanıldıkları alanlara göre yük hücresi, kuvvet transdüseri, kuvvet dönüştürücüsü, dinamometre, yük reseptörü gibi farklı isimler alan bu elemanlar; küçük terazilerden kantarlara kadar uzanan yük ölçümlerinde ve çok hassas sonuçların beklendiği metrolojik çalışmalarda yoğunlukla kullanılırlar. Gelişen teknoloji ve endüstriyel uygulamalarda bilgisayar kullanımının her geçen gün artması ve yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler elektrik sinyali üreten bu tip elemanlara duyulan ihtiyaçla beraber kuvvet ölçümünde ölçme halkası, hidrolik ölçme cihazları, martens aynalı kuvvet ölçme cihazları gibi 20 yıl öncesinin konvansiyonel ölçme cihazları her geçen gün yaygınlığını yitirmekte, bununla beraber bu cihazlardan beklenen doğruluk seviyesi artmaktadır. Bahsi geçen tüm bu ölçme sistemleri ile doğru ve güvenilir ölçümler yapabilmek için ölçmenin temel şartı olan kalibrasyon ve onun doğal sonucu olarak da ölçüm belirsizliğinin belirlenmesi koşulu geçerlidir.

Kuvvet ölçümü ve kalibrasyon amacı ile inşaa edilmiş hassas sistemler, prensip olarak değeri çok yüksek doğrulukla bilinen kütleler üzerindeki yine değeri çok yüksek doğrulukla bilinen yerçekimi etkisini kullanırlar. Kuvvet birimini bilimsel tanımına uygun olarak oluşturan tüm sistemler arasında en küçük belirsizlik değerine, bu prensibi kullanan ve ölü ağırlıklı kuvvet standardı makinası adı verilen sistemlerle ulaşılır. Büyük kapasiteli sistemler inşaa edildiğinde ortaya çıkan hacimsel ve konstrüktif zorluklardan dolayı büyük kuvvet değerleri mekanik veya hidrolik ara sistem ve mekanizmalar aracılığı ile oluşturulur. Burada kullanılan ara mekanizmaların beraberinde taşıdıkları hatalar ve diğer harici etkilerden dolayı sistemin toplam

belirsizliği, doğrudan kütlelerin kullanıldığı sistemlerin sahip olduğu belirsizlik değerinden daha büyüktür.

Eğer kuvvet ölçüm birimine referans oluşturmak üzere inşaa edilen bu sistemler, Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde, ülkedeki tüm kuvvet ölçümlerine referans teşkil etmek üzere kullanılıyor ise, Kuvvet Standardı Makinası (KSM) olarak adlandırılırlar. Ancak bu makinalar çeşitli imalat ve test noktalarında kullanılıyorlar ve metrolojik karakteristikleri ülkenin Ulusal Metroloji Enstitüsü tarafından belirlenmiş ise, Kuvvet Kalibrasyon Makinası (KKM) olarak anılırlar [3], [12].

2. KUVVET ÖLÇÜM BİRİMİ

Mekanikğin temel büyüklüğü olan kuvvet, türetilmiş vektöriyel bir ölçüm büyüklüğüdür. Newton'un ikinci kanununa göre kuvvet, bir cismin kütlesi [m] ile o cisme etkiyen kuvvetin yarattığı ivmenin [\vec{a}] çarpımı olarak (2.1) no'lu formül ile ifade edilmektedir.

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (2.1)$$

Burada, kütlelerin skalar, ivmenin vektörel birer büyüklük oldukları unutulmamalıdır. Uluslararası Birimler Sistemi, SI'daki kuvvet birimi Newton' dur ve sembolü [N]'dir. Bir Newton, tanım olarak 1 kg'lık kütleyle 1 m/s² 'lik ivme veren kuvvettir.

(2.2)

$$1 \text{ N} = [1 \text{ kg}] \cdot [1 \text{ m/s}^2] = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2$$

Burada açıkça görüldüğü üzere Newton, Uluslararası Birimler Sistemi, SI'da tümleşik (koherent) ölçüm birimidir [10], [11].

Kuvvetin özel bir türevi olan ağırlık \vec{W} , kütle üzerindeki yerçekimi ivmesinin etkisi olarak tanımlanır ve (2.1) no'lu formülün benzeri olarak vakum ortamında (2.3) no'lu formül ile ifade edilir.

$$\vec{W} = m \cdot \vec{g} \quad (2.3)$$

Herhangi bir ortamda, yerçekimi ivmesinin bir kütle üzerindeki etkisinin büyüklüğü ise Arşimed etkisi gözönünde bulundurularak (2.4) no'lu formül ile belirlenir:

$$W = K \cdot g_{\text{yerel}} \cdot (m - V \cdot \rho_{\text{hava}}) \quad (2.4)$$

$$W = K \cdot m \cdot g_{\text{yerel}} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{hava}}}{\rho_{\text{kütle}}}\right) \quad (2.5)$$

- K : Oran katsayısı,
m : Yerçekimi ivmesinin etkilediği cismin kütlesi,
 g_{yerel} : Yerel yerçekimi ivmesi,
 ρ_{hava} : Havanın yoğunluğu,

- V : Yerçekimi ivmesinin etki ettiği cismin hacmi,
 $\rho_{hava} \cdot V$: V hacmine sahip kütle üzerinde ρ_{hava} yoğunluğuna sahip havanın kaldırma etkisi
 $\rho_{kütle}$: Yerçekimi ivmesinin etki ettiği cismin yoğunluğu'dur

(2.5) no'lu formülde belirtilmiş olan K katsayısının, kullanılan birim sistemlerindeki değeri [1], [2], [3], [12] no'lu referanslarda yer almaktadır.

Ağırlık, cismin ağırlık merkezinden yeryüzünün merkezine doğru yönelmiştir. Yerçekiminden dolayı oluşan kuvvetlere yaygın olarak "yük" denilmektedir. Bir noktaya kuvvet uygulamak, o noktayı yüklemek şeklinde de ifade edilebilir. Konuşma dilinde kullanılan kuvvet ve yük tanımları aynı fiziksel büyüklüğü ifade etmektedirler. Uluslararası Birimler Sistemi SI'dan önce ülkemizde de kuvvet birimi olarak kilogramkuvvet [kgf] kullanılmaktaydı. 1 kgf, standard yerçekimi ivmesinin vakum ortamında 1 kg'lık kütle üzerinde oluşturduğu etki olarak tanımlanmıştır. Sanayide halen daha kullanılmakta olan bu birim, çoğu zaman kısaca kilogram olarak ifade edilmektedir. Bu durumda, kg'ın kütle birimi olduğu, ancak kastedilenin kgf olduğu unutulmamalıdır [1], [2].

3. KUVVET ÖLÇÜM BİRİMİNDE TEORİK BELİRSİZLİK BİLEŞENLERİ

Kuvvet birimini oluşturan ölü ağırlıklı standart makinaların ürettikleri birimin değeri kütle metrolojisinde kullanılan konvansiyonel tartım değeri üzerinden belirlenmekte olup (3.1) no'lu formül ile hesaplanabilmektedir:

$$F = m_c \cdot g_{yerel} \cdot \left(1 - \frac{1.2}{8000} + \frac{(1.2 - \rho_{hava})}{\rho_{kütle}} \right) \quad (3.1)$$

Kütle kalibrasyonu ve ayar silsilesi neticesinde elde edilen kuvvet değerinin belirsizliği teorik olarak (3.2) no'lu formülle belirlenmekte olup; bugün için, oluşturulan kuvvette deneysel belirsizliği verebilecek metrolojik karakteristiğe sahip bir kuvvet ölçüm cihazı imal edilememiştir [7], [8], [9].

$$\left(\frac{\sigma_F}{F} \right)^2 = \left(\frac{\sigma_{m_c}}{m_c} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_g}{g} \right)^2 + \left(\frac{1.2 - \rho_{hava}}{\rho_{kütle}} \right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma_{\rho_{kütle}}}{\rho_{kütle}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\rho_{hava}}}{\rho_{hava}} \right)^2 \quad (3.2)$$

(3.2) no'lu formülde, σ^2 herbir terimin varyansıdır [7], [8], [9].

Oluşturulan kuvvet değerinin sahip olacağı belirsizlik değeri, her bir parametrenin ne kadar doğru ölçülebildiği ve kontrol edilebildiği ile ilgilidir ve her bir terimin toplam standard sapmaya katkısının belirlenmesi ile hesaplanır.

3.1. Kütlelerin Etkisi

Referans kuvvet değerinin oluşturulmasında kullanılan kütlelerin sahip oldukları değer ve belirsizlik seviyesinin tayini iki aşamalıdır. Referansın yerleştirileceği noktadaki yerel yerçekimi ivmesi ve ortam koşullarının belirlenmesinin ardından, kütleler % 0.1 hatayla üretilirler. Bu aşamada ağırlık merkezlerinin de geometrik merkeze \pm % 0.1 yakınlıkla yer almasına özen gösterilir. İkinci aşamada ise yine aranan belirsizlik seviyesine bağlı olarak ya bir akredite laboratuvarında ya da doğrudan primer bir laboratuvarında ulusal kütle skalasına bağlantısı yapılarak

ayar edilirler. Bu ayar neticesinde primer bir laboratuvarında istenen kütle değerine $\pm 1 \times 10^{-6}$ belirsizlik ile ulaşılabilir.

Korozyona karşı östenitik paslanmaz çelik ve nikel kaplı antimanyetik kütlelerin kullanılması ile 10 yıllık dönemde $\pm 2 \times 10^{-7}$ kararlılığa ulaşılabilir. Kütlelerde kullanımdan doğan aşınmanın yaratacağı değişimin de $\pm 1 \times 10^{-6}$ olduğu kabul edilirse, primer seviyede toplam standard sapmanın $\pm 1.2 \times 10^{-6}$ olduğu görülür [7], [9].

3.2. Yerel Yerçekimi İvmesinin Etkisi

Yerçekimi ivmesinin değeri sabit değildir. Yerel değeri, temel olarak dünya üzerindeki koordinatlar ve yükseklik ile değişmektedir. Bu durum temel olarak üç nedene dayanmaktadır. Dünyanın tam bir küre olmaması, ivme vektörü bileşenlerinin yükseklikle değişmesi ve yeryüzü katmanlarının kimyasal açıdan homojen olmaması yani yeraltında mevcut maden kompozisyonunun değişmesidir. Bundan başka mevsimler ve ayın konumu ile de yerçekimi ivmesinin değerinde küçük değişiklikler gözlenmektedir. Kilogram kuvvet'in tanımında bahsi geçen standart yerçekimi ivmesi, deniz seviyesi ve 45° enlemdeki değere karşılık gelmekte olup; değeri (3.3) no'lu bağıntı ile verilmiştir :

$$g_{\text{standart}} = 9.80665 \text{ m/s}^2 \quad (3.3)$$

Herhangi bir enlemdeki $[\phi]$ yerel yerçekimi ivmesinin $[\text{m/s}^2]$ belirlenmesi amacıyla geliştirilen bir çok ampirik yaklaşımdan bir tanesi de (3.4) no'lu formülde verilmiştir.

$$g_{\text{yerel}} = 9.78049 \cdot (1 + 0.0052884 \cdot \sin^2 \phi - 0.0000059 \cdot \sin^2 2\phi) \quad (3.4)$$

O enlemdeki yerçekimi ivmesi için ise rakım $[\text{m}]$ düzeltmesi $[\text{m/s}^2]$ (3.5) no'lu formül kullanılarak yapılabilir:

$$\text{Düzeltilme} = -(0.00030855 + 0.00000022 \cdot \cos 2\phi) \cdot h + 0.000072 \cdot \left(\frac{h}{1000}\right)^2 \quad (3.5)$$

(3.4) ve (3.5) no'lu bağıntılardan elde edilebilecek değerlerin doğruluğu referans kuvvet standardının yerleştirileceği noktadaki yerel yerçekimi ivmesinin belirlenmesi için gerekli olan seviyede olmadığından ya enterferometrik metodun uygulandığı mutlak ölçümler ya da gravimetrik haritalarda yer alan referans noktalar yardımıyla bağıl ölçümler yapan gravimetreler kullanılmaktadır. Bu şekilde yerçekimi değerinin referans noktadan ölçümlerin gerçekleştirileceği nihai noktaya taşınması $\pm 1 \times 10^{-6}$ belirsizlik ile sağlanabilmektedir. Bu değerdeki zamanla oluşan değişim de $\pm 2 \times 10^{-6}$ 'den az olmaktadır. Bu aşamadan sonra kuvvet standardını oluşturan kütlelerin yüksekliklerine bağlı olarak her 8 m^3 'de 2.5×10^{-6} değişim olduğu göz önünde bulundurulurken; hedeflenen kuvvet değerini sağlayacak kütle değeri üzerinde gerekli düzeltmeler yapılır [3], [9].

3.3. Kütlelerin Yoğunluğunun Etkisi

Kütlelerin yoğunluk değerinin belirlenmesi için öncelikle imal edilecekleri malzemenin yoğunluğu abaklardan belirlenerek bir ön çalışma ile temel boyutlar belirlenir ve ardından mevcut kütlelerin yoğunluğu alınan çok sayıdaki numune ile ihtiyaç duyulan belirsizlik seviyesine uygun olarak ya bir akredite laboratuvarında ya da primer metroloji laboratuvarında belirlenir. Ortam sıcaklığındaki, dolayısıyla denge koşulu gereği kütlelerin sahip oldukları sıcaklıktaki $\pm 1^\circ\text{C}$ 'lik bir değişim, kütlelerin yoğunluğunda yaklaşık olarak 0.4 kg/m^3 'lük bir değişim yaratmaktadır.

Dolayısıyla bu değişimin toplam belirsizlik üzerindeki etkisi, kuvvet metrolojisinde bugün için kabul edilen hata sınırları dahilinde ihmal edilebilmektedir [7], [9].

3.4. Havanın Yoğunluğunun Etkisi

Havanın yoğunluğunun belirlenmesi amacıyla geliştirilmiş bir çok ampirik formülden bir tanesi de (3.6) no'lu formüldür.

$$\rho_{\text{hava}} = \frac{0.348444 \cdot P - (0.00252 \cdot T - 0.02052) \cdot H}{273.15 + T} \quad (3.6)$$

ρ_{hava} : Havanın yoğunluğu, [kg/m³]

P : Atmosferik basınç, [hPa], [mbar]

H : Bağıl atmosferik nem, [%]

T : Ortam sıcaklığı, [°C]

Bu bağıntıdan da görüldüğü üzere havanın yoğunluğunu belirleyen temel parametreler atmosferik basınç, termodinamik ortam sıcaklığı ve bağıl nemdir. Kütleler üzerindeki Arşimed etkisi'nin belirlendiği andaki değer ile kütlelerin birimin oluşturulması amacıyla kullanıldığı müteakip ortam koşulları arasındaki farklılık bu etkininde değişmesine, dolayısıyla da oluşturulan birimin büyüklüğünün değişmesine neden olmaktadır. Bu kapsamda, UME Ulusal Kuvvet Standardı ve Kuvvet Ölçümleri Laboratuvarı'nda ortam koşulları (21 ± 1)°C ve % (45 ± 5) RH ile oluşturularak kontrol altında tutulmaktadır. Bu durumda hava yoğunluğundaki değişim ± % 3 mertebesinde tutulmaktadır [7], [9].

3.5. Diğer Etkenler

Kuvvet biriminin gerçekleşmesinde göz önünde bulundurulması gereken bir diğer parametre de aerodinamik etkilerdir. Birimin gerçekleştirildiği ortamda, gerekli atmosferik koşulların elde edilmesi esnasında kullanılan ekipmanın yaratacağı hava akımının sonuçları göz önünde bulundurularak kütlelerin bir muhafaza içinde tutulmaları şarttır. Hava akımının yaratacağı etki (3.7) no'lu "Eiffel formülü" ile hesaplanabilir [8];

$$R = K \times S \times V^2 \quad (3.7)$$

R : Hava akımına gösterilen direnç, [N]

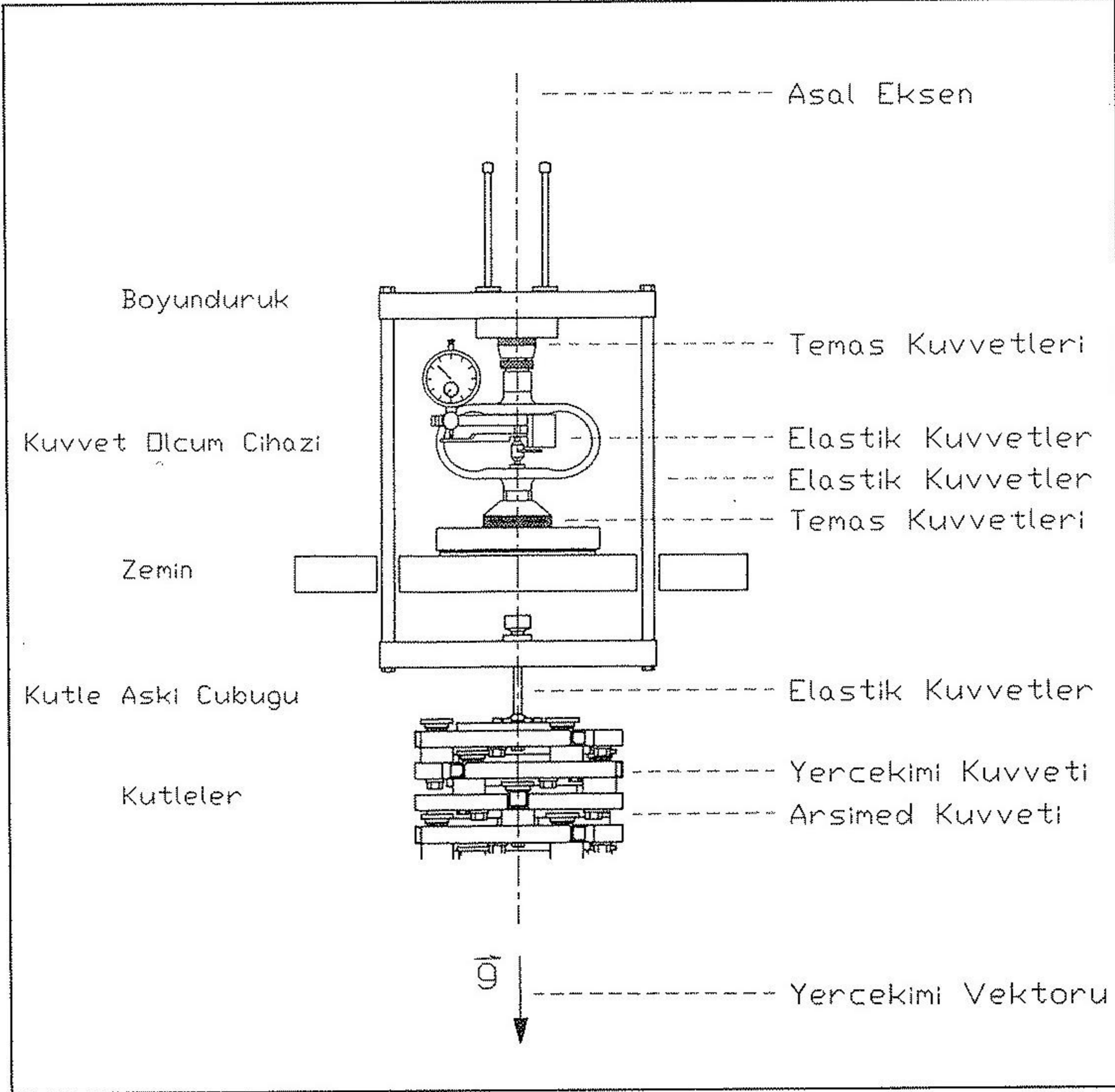
S : Hava akımına dik yüzey, [m²]

V : Hava akımının hızı, [m/s]

K : Şekil ve yüzey katsayısı, [kg/m³]

Yüksek kapasiteli ölü ağırlıklı makinalarda kütleler oldukça büyük ve aralarındaki mesafe de oldukça küçüktür. Bu nedenle kütleler arasındaki manyetik kuvvetlerin varlığı kontrol edilmesi gereken parametrelerdendir. Östenitik paslanmaz çelikden imal kütleler kullanılarak ve yüzey manyetikliğine etki ettiği bilinen imal usullerinden uzak durularak bu etkinin toplam belirsizlik üzerindeki payının ± 2 x 10⁻⁶'dan az olması sağlanır [6].

Ölçüm sonuçlarına yansiyabilecek bir diğer etki de elektrostatik etkidir. Yapılan çalışmalar ve incelemeler neticesinde bu etkinin gerekli önlemler alındıktan sonra bugünkü teknolojik seviyede ihmal edilebilir olduğu görülmüştür [8].



Şekil 1. Basma Tipi Kuvvet Ölçme Cihazı Örneğinde Oluşturulan Birimin Cihaza Aktarımı

Birimin gerçekleştirilmesi esnasında teorik hesaplamalara katılması oldukça güç olan ancak uygulamada sonuçları bu konuda çalışan uzmanlara zor anlar yaşatan bir diğer parametre de makina ile kuvvet ölçme cihazı arasındaki ilişkidir. Şekil 1’de gösterildiği üzere kuvvetin kütleler yardımıyla oluşturulmasının ardından, bu etki elastik ve temas kuvvetleri dönüşümü boyunca cihaz üzerine taşınır. Kalibre veya ölçüm amacıyla yerleştirilmiş olan kuvvet ölçme cihazının gerek yüksüz koşulda ilk yerleştirildiği andaki pozisyonu, gerekse kuvvet uygulandıktan sonraki tüm sistemin pozisyonu göz önünde bulundurulduğunda her bir bileşenin geometrik merkezinin daima asal eksen üzerinde yer alması gerektiği açıktır. Aksi takdirde oluşan eğme momentleri dolayısıyla ortaya çıkan etkiler ölçüm sonuçlarında kendisini göstermektedir [8].

4. SONUÇ

Boyunduruk ve kütlelerin oluşturduğu toplam dik kuvvet

$$F_T = F_G + F_A + F_M \quad (4.1)$$

F_G : yerçekimi ve arşimed etkisi ile oluşan kuvvet

F_A : aerodinamik kuvvetler

F_M : manyetik etkilerden kaynaklanan kuvvetler

Bunların varyansları alındığında

$$\sigma_{F_T}^2 = \sigma_{F_G}^2 + \sigma_{F_A}^2 + \sigma_{F_M}^2 \quad (4.2)$$

Şu ana kadar açıklanmış olan parametrelerin hesaba katılması sonucu primer seviyede kuvvet ölçüm biriminin teorik ölçüm belirsizliği $\pm 1 \times 10^{-5}$ mertebesindedir. Ancak, oluşturulan kuvvette deneysel belirsizliği verebilecek metrolojik karakteristiğe sahip bir kuvvet ölçüm cihazı henüz imal edilememiştir. Bu aşamada yapılan hesaplamaların doğruluğunu kontrol edebilmek amacıyla ya aynı kuvvet makinasında aynı değeri verecek kütlelerin aynı kuvvet ölçme cihazına yüklenmesi ya da aynı kuvvet değerlerini oluşturan iki ayrı kuvvet standardının ardıl mukayesesi ile gerçekleştirilebilecek deneysel metodlar geliştirilmiştir. Bu aşamada en önemli noktalar kuvvet ölçme cihazlarının makinanın asal eksenine oturacak şekilde yerleştirilmeleri, mukayesede kullanılan standard prosedür ve ortam koşullarıdır. Bu amaçla UME Ulusal Kuvvet Standardı ve Kuvvet Ölçümleri Laboratuvarı ile Almanya PTB'deki dengi laboratuvar arasında yapılan çalışmalar sonucunda Türkiye'nin ulusal kuvvet standardının ölü ağırlıkla oluşturulduğu 1 kN - 110 kN aralığında deneysel standard sapma $\pm 2 \times 10^{-5}$ olarak belirlenmiş ve deklare edilmiştir [4], [6], [9].

Şu ana kadar açıklanan parametreler en küçük ölçüm belirsizliğinin elde edilebildiği ölü ağırlıklı makinelerin incelenmesi aşamasında ele alınmıştır. Büyük kapasiteli sistemlerin inşaatında ortaya çıkan hacimsel ve konstrüktif sınırlamalardan dolayı büyük kuvvet değerleri mekanik veya hidrolik ara sistemler aracılığı ile oluşturulur. Burada kullanılan ara sistemlerin beraberinde taşıdıkları hatalar ve diğer harici etkilerden dolayı sistemin toplam belirsizliği, doğrudan kütlelerin kullanıldığı sistemlerin sahip olduğu belirsizlik değerinden daha büyüktür. Bu konuda UME Ulusal Kuvvet Standardı ve Kuvvet Ölçümleri Laboratuvarı ile Almanya PTB'deki dengi laboratuvar arasında yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen bulgular, Türkiye'nin ulusal kuvvet standardının manivela ile kuvvetin büyütüldüğü 100 kN - 1.1 MN aralığında deneysel standard sapmanın $\pm 1 \times 10^{-4}$ değerine sahip olduğunu göstermiştir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar deklare edilmektedir [4], [5], [6].

Çok büyük doğruluk seviyelerinin beklendiği özel uygulamalarda atmosferik basınç, ortam sıcaklığı ve nemin ayrı ayrı ölçülerek hava yoğunluğunun hesaplanması mümkündür. Böylelikle toplam belirsizliğe etkiyen en büyük bileşenlerden birisi olan Arşimed etkisinin payı azaltılarak toplam belirsizlik daha düşük seviyelere indirilebilir. Fakat bu konudaki çalışmalar uluslararası çalışmalarda dahi çok nadir olup; henüz UME Ulusal Kuvvet Standardı ve Kuvvet Ölçümleri Laboratuvarı'na bu yönde bir başvuru olmamıştır.

KAYNAKLAR

- [1] BAUMANN, E., 1976. Elektrische Kraftmeßtechnik, VEB Verlag Technik Berlin, Germany
- [2] BAUSCHKE, H., 1968. Kraftmeßtechnik, Deutsches Amt für Meßwesen und Warenprüfung, Berlin-Bereich Metrologie, DDR
- [3] BRAY, A., BARBATO, G., LEVI, R., 1990. Theory and Practice of Force Measurement, Academic Press, ISBN 0-12-128453-0
- [4] FANK, S., ÖZBAY, H.Ö., BAYTAROĞLU, Ş., "Kuvvet Standardının Oluşturulması ve Sanayiye Transferi", I. Ulusal Ölçümbilim Kongresi Bildiriler Kitabı, Ekim 1995, Eskişehir
- [5] FANK, S., SAWLA, A., ÖZBAY, H.Ö., "Long-term Observation of Newly Developed 110 kN/1.1 MN Lever Amplification Dead Weight Force Standard Machine", Proceedings of the 14th IMEKO World Congress, New Measurements - Challenges and Visions, June 1997, Tampere, Finland
- [6] FANK, S., SAWLA, A., ÖZBAY, H.Ö., GASSMANN, H., "Establishment on National Force Scale at UME and Results of Intercomparison Measurements Between UME and PTB", Proceedings of the 15th International Conference, Accuracy, Assurance in Force, Torque and Mass Measurements, October 1996, Madrid, Spain
- [7] GIZMAJER, A., "Nominal Value and Conventional Density of the Primary Force Standard", Proceedings of the 14th International Conference, State of the Art in Force and Mass Measurement, September 1995, Warsaw, Poland
- [8] GOSSET, A., AVERLANT, P., "Workshop on Statement of Uncertainty of Force Standard Machines" Agreed EUROMET Project No 310, December 1994, LNE-Paris, France
- [9] KNOTT, A., J., "The Accuracy of the NPL 1.2 MN Deadweight Force Standard Machine", Proceedings of the 14th International Conference, State of the Art in Force and Mass Measurement, September 1995, Warsaw, Poland
- [10] ÖZBAY, H.Ö., 1996. Metrolojide Kullanılan Temel ve Genel Terimler Sözlüğü, 2. Basım, UME 97-004
- [11] TOK, T., ÖZBAY, H.Ö., 1994. SI-Uluslararası Birimler Sistemi, UME 94-007
- [12] WEILER, W., 1994. Handbuch der Physikalischen-Technischen Kraftmeßung, Verlag, ISBN 3-528-08945-8