

**Teknik Doküman
(Technical Document)**

DKD-R 3-9 Dokümanına Göre Kuvvet Ölçme Cihazlarının Sürekli Kalibrasyonunda Belirsizlik Hesabı ve İrdelenmesi

Doç. Dr. Bülent AYDEMİR, Dr. Haldun DİZDAR, Cemal VATAN
TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (TÜBİTAK UME), Gebze/Kocaeli, TÜRKİYE,
bulent.aydemir@tubitak.gov.tr, haldun.dizdar@tubitak.gov.tr, cemal.vatan@tubitak.gov.tr

Özet

Bu çalışmada, DKD-R 3-9 dokümanına göre kuvvet ölçme cihazının sürekli kalibrasyonu ve belirsizlik hesabı kapsamında bilgilere yer verilmiştir. Kalibrasyon sonucunda elde edilen ölçüm verileri kullanılarak kuvvet ölçme cihazının belirsizliği sayısal bir örnekle hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: DKD-R 3-9, Kuvvet Kalibrasyonu, Ölçüm Belirsizliği

An Investigation and Calculation of Uncertainty in Continuous Calibration of Force-proving Instruments according to DKD-R 3-9

Abstract

In this study, it has been focused on continuous calibration of force-proving instruments concerning to DKD-R 3-9. An investigation and calculation of force-proving instrument calibration uncertainty has been analysed by using real measurement data, in additionally; a numerical sample has been detailed for individuals who perform force-proving instrument calibration.

Keywords: DKD-R 3-9, Force Calibration, Measurement Uncertainty

1. GİRİŞ

Bilim ve teknolojiye paralel olarak, günümüz endüstrisinde yüksek doğruluklu kuvvet ölçme cihazlarının geliştirilmesi sağlanmış ve buna bağlı olarak kuvvet ölçümünün önemi ve kullanımı daha da artmıştır. Yüksek doğruluklu kuvvet ölçme cihazlarının kullanılması ile yapılacak çalışmaların kalitesi, cihazların uluslararası standartlara izlenebilir kalibrasyonlarının yapılmasıyla mümkün olabilmektedir.

Kuvvet ölçümleri, Newton'un ikinci kanunu olan " F (Kuvvet) = m (Kütle) x a (İvme)" prensibinin kullanıldığı statik kuvvet ölçümlerine dayanmaktadır ve böylece standart kuvvetler oluşturulmaktadır. Bu prensibe göre standart kuvvet değerlerini oluşturan sistemlere Kuvvet Standardı Makinaları veya Kuvvet Kalibrasyon Makinaları adı verilir ve bu makinalar kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonunda kullanılırlar.

Türkiye'de yapılan tüm ölçümleri güvence altına almak, bu ölçümlerin uluslararası sisteme entegrasyonunu sağlamak amacıyla kurulan TÜBİTAK'a bağlı Ulusal Metroloji Enstitüsü (TÜBİTAK UME) bünyesinde, kuvvet ölçümleri konusunda, Kuvvet Laboratuvarı kurulmuştur. TÜBİTAK UME Kuvvet Laboratuvarında

Bu yayına atıf yapmak için

Aydemir B., Dizdar H., Vatan C., "DKD-R 3-9 Dokümanına Göre Kuvvet Ölçme Cihazlarının Sürekli Kalibrasyonunda Belirsizlik Hesabı ve İrdelenmesi" Kuvvet Laboratuvarı Teknik Dokümanı, TÜBİTAK UME, S.5, N.1, 2020 (1-13)

In order to cite this publication

*Aydemir B., Dizdar H., Vatan C., "An Investigation and Calculation of Uncertainty in Continuous Calibration of Force-proving Instruments according to DKD-R 3*9" Force Laboratory Technical Document, TUBITAK UME, S.5, N.1, 2020 (1-13)*

0,5 N – 3000 kN aralığında birincil yani en üst seviyede oluşturulan kuvvet standartlarıyla kuvvet ölçme cihazlarının statik ve sürekli kalibrasyonlarını yapılmaktadır.

Bu çalışmada, DKD-R 3-9 dokümanına göre kuvvet ölçme cihazının sürekli kalibrasyonu ve belirsizlik hesabı hakkında bilgilere yer verilmiştir. Kalibrasyon sonucunda elde edilen ölçüm verileri kullanılarak kuvvet ölçme cihazının belirsizliği sayısal bir örnekle hesaplanmıştır [1-5].

2. KUVVET ÖLÇME CİHAZLARININ SÜREKLİ KALİBRASYONU

Kuvvet kalibrasyonunun en genel tanımı, değerleri kesin olarak bilinen kuvvetlerin kuvvet ölçme cihazına uygulanması ve kuvvet ölçme cihazının ayrılmaz bir parçası olarak kabul edilen ölçme sisteminden (gösterge cihazından) verilerin kaydedilmesi şeklinde açıklanmaktadır. DKD-R 3-9 kılavuzunda kuvvet ölçüm cihazlarının sürekli kalibrasyon işlemini tarif eden bir yöntemdir. Cihazın ölçüm kapasitesine kadar rampa şeklinde zamana göre sürekli bir kuvvet değişimi tanımlanır. Bu yükleme şekli yarı statik olarak kabul edilebilir. Genellikle hızlı kuvvet değişimlerini algılama kabiliyeti yüksek olan piezo elektrik kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonunda tercih edilen bir yöntemdir.

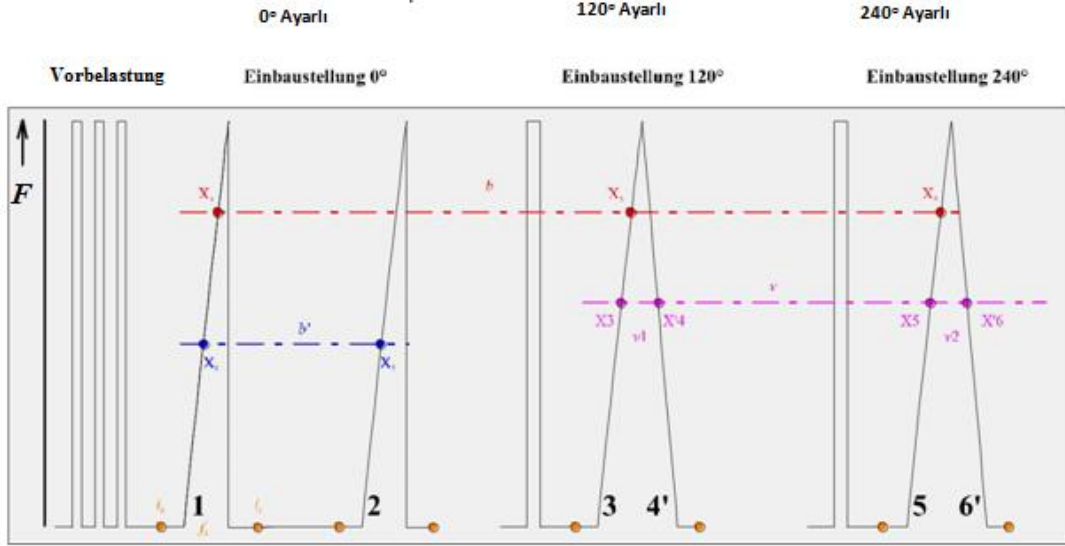
Temel olarak, kalibrasyon işlemi EN ISO 376, yani ön yükler ve montaj konumları standartta tarif edildiği gibi gerçekleştirilir (Şekil 1). Belirli koşullar altında bu işlemler kısaltılabilir. Kısaltma işlemi için ölçüm belirsizliği katkılarının belirlenmesi istenir. Eğer, EN ISO 376'da tarif edilenden daha az montaj pozisyonu ve ölçüm serisi yapılacaksa, yeterli sayıda aynı tipte bir ölçüm belirsizliği tahmini için tekrarlanabilirlik, tekrar gerçekleştirilebilirlik vb. gibi gerekli ölçüm faktörlerinin önceden bir ölçümün parçası olarak yapılmış olması gereklidir.

Kalibrasyon işlemlerinin parametreleri (yükleme hızı, örnekleme hızları, kalibre edilen cihazın kontrol ayarları, vb.) kalibrasyon laboratuvarının kalite dokümanlarında açıklanmalı ve talep üzerine kalibrasyon sertifikası ile birlikte verilebilmelidir. Müşterinin isteği üzerine, kalibrasyon sertifikasına metot ve yükleme hızları ve gerekirse bekleme sürelerini içeren bilgilendirmeler oluşturulabilir. Bir grafik gösterimi de yararlı olabilir.

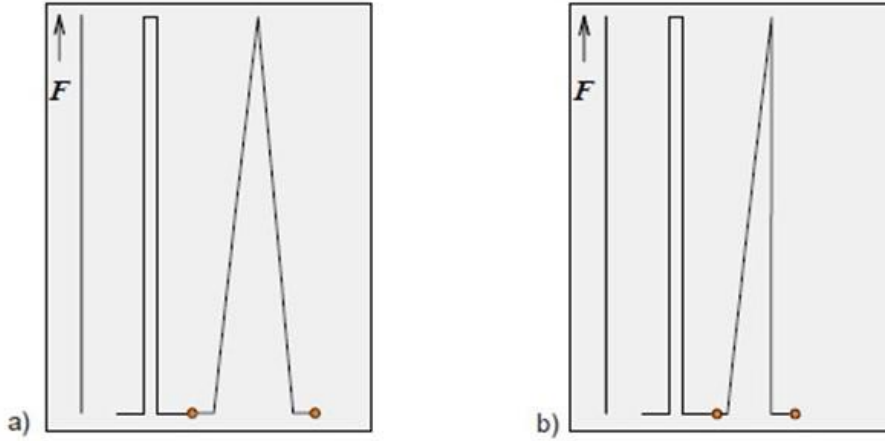
Kuvvet dönüştürücü hangi yönde kalibrasyon yapılacaksa ölçüme başlamadan önce 3 kez kalibrasyon yönünde ön yükleme yapılmalıdır. Her montajda ön yüklemeler tekrarlanmalıdır. Sıfır okuması yük boşaltıldıktan belirli bir sonra yapılmalıdır. İlk ön yük şartlandırma için kullanılır, örneğin, bağlantı aparatlarının kontrolü veya süreçleri ayarlamak için olabilir. Diğer ön yükler ise, kalibrasyon kapasitesini değerlendirmek için kullanılabilir, örneğin, ölçülen değerlerin tekrarlanabilirliğini gözlemleyebilmek için olabilir. Ancak bu durum önyükleme serisi, ölçüm serisiyle aynı kalibrasyon işleminin parametreleri ile gerçekleştiriliyorsa mümkündür. Kalibre edilecek kuvvet ölçüm aralığı ile önyüklemeye uygulanan kuvvet değerleri birbirini karşılanmalıdır. İşleme bağlı olarak kalibrasyon ölçüm aralığının maksimum değeri yaklaşık % 3 kadar aşılabılır. Her bir ilave kuvvet serisi arasında, ölçme cihazı kendi eksenini etrafında simetrik olarak, 360°'ye eşit olarak dağıtılmış konumlara (örneğin, 0°, 120°, 240°) döndürülür.

Şekil 1 de, EN ISO 376'ya göre gerçekleştirilebilecek sürekli kalibrasyon işlemi göstermektedir. Kalibrasyon ekipmalarına bağlı olarak bazı durumlarda şekilde gösterildiği gibi doğrusal rotalı olmayabilir. Ön yüklemelerin sayısı ve süresi de farklı şekilde gerçekleştirilebilir.

Belirli koşullar altında kalibrasyon işlem, Şekil 2a verildiği gibi önyükleme ve artan ve azalan sıralı bir seri ölçüm şeklinde kısaltılabilir. Ya da Şekil 2b, verildiği gibi önyükleme ve artan bir seri ölçüm şeklinde en basit durum da kısaltılabilir. Ancak kısaltma artıkça, bu kalibrasyon öncesinde yapılması gerekli olan bir tip testinde belirlenecek ölçüm belirsizliği bileşenlerinin sayısının arttığına da dikkat edilmelidir. Çünkü kısaltılmış metotlarda tekrarlanabilirlik, tekrar gerçekleştirilebilirlik ve tersinebilirlik gibi kısaltılmış bir işlemin ölçülen değerlerinden doğrudan belirlenememektedir. Kuvvet ölçme cihazlarının bu metot için tarif edilen tip testleri EN ISO 376'ya göre yapılabilir.



Şekil 1. DKD R 3-9 'a göre EN ISO 376'ya benzer sürekli kalibrasyon için kuvvet zaman grafiği



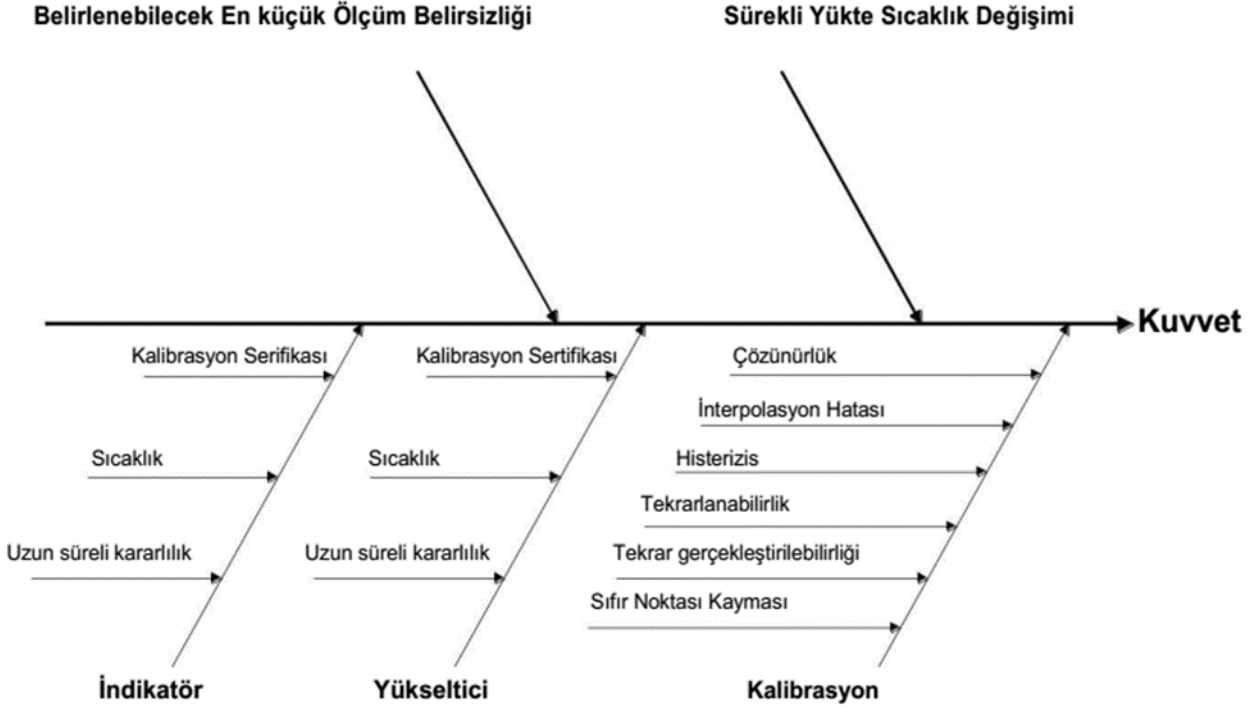
Şekil 2. DKD R 3-9 'a göre kısaltılmış sürekli kalibrasyon için kuvvet zaman grafikleri, a) Artan ve azalan seri, b) Artan seri

Kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonu kapsamındaki belirsizlik hesaplaması, DKD-R 3-9 dokümanında detaylı olarak açıklanmıştır. Bu yayın, bahsi geçen dokümanlar referans alınarak oluşturulmuştur [1,2,4,5,6].

3. KUVVET ÖLÇME CİHAZLARININ SÜREKLİ KALİBRASYONUNDA BELİRSİZLİK HESABI

Kuvvet ölçme cihazının sürekli kalibrasyonu DKD R 3-9 dokümanına göre gerçekleştirilir ve kalibrasyon sonucunda ölçüm verileri elde edilir. Daha sonra bu veriler kullanılarak, Tablo 1 ve Tablo 2’de detaylandırılan ve ölçüm belirsizlik bileşenleri olarak adlandırılan çeşitli (tekrarlanabilirlik, tekrar gerçekleştirilebilirlik, histerisiz-tersinebilirlik, çözünürlük, enterpolasyon vb.) bileşenler hesaplanır.

Kuvvet ölçme cihazlarının DKD R 3-9 dokümanında sürekli kalibrasyon kapsamındaki belirsizlik hesaplamaları tanımlanmıştır. Belirsizlik model fonksiyonu ve tüm belirsizlik parametreleri tanımlanmıştır. Şekil 3 de bir kuvvet ölçme cihazı için DKD R 3-9’a göre belirsizlik bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 3. Bir kuvvet ölçme cihazının sürekli kalibrasyonunda ölçüm belirsizliği hesabındaki etken büyüklükler

Kuvvet ölçme cihazlarının sürekli kalibrasyonu sonucunda belirsizlik hesaplamalarında DKD R 3-9 dokümanına göre iki model tanımlanmıştır. Bunlar:

1. “Transfer katsayılı” model
2. “Kuvvet” model (3. dereceden polinom katsayılı, EN ISO 376 ya göre)

olarak tanımlanır. Bu modellere göre belirsizlik hesabı aşağıda tek tek ele alınmıştır.

“Transfer katsayılı” modele göre belirsizlik hesabı

“Transfer katsayılı” model yöntemine göre kuvvet kalibrasyonların da belirsizlik modeli aşağıda (1) numaralı eşitlikteki gibidir.

$$E_{KG} = \frac{V_{Anz}}{F_{bmc,kont} \cdot (G \cdot V_{Sp})} \cdot \prod_{i=1}^5 K_i \quad (1)$$

Bu denklemde;

$$\prod_{i=1}^5 K_i = K_T \cdot K_{zer} \cdot K_{rep} \cdot K_{rot} \cdot K_{rev} \quad (2)$$

ile gösterilir. Bu eşitlikte kullanılan sembollerin açıklamaları aşağıda verilmiştir.

E_{KG} : Çıkış büyüklüğü, Kalibrasyonu yapılan kuvvet sensörünün transfer katsayısı veya hassasiyet değeri

V_{Anz} : Göstergeden okunan gerilim değeri

G : Kalibrasyonu yapılan kuvvet sensörünün şarj yükselticisinin kazanım katsayısı

V_{Sp} : Kalibrasyonu yapılan kuvvet sensörünün besleme gerilimi

$F_{bmc,kont}$: Referans kuvvet değeri

K_T : Sürekli yükte bağıl sıcaklık değişimi için düzeltme faktörü

K_{zer} : Sıfır yükte bağıl değişim için düzeltme faktörü

K_{rep} : Tekrarlanabilirlik bağıl değişimi için düzeltme faktörü

K_{rot} : Tekrar gerçekleştirilebilirlik bağıl değişimi için düzeltme faktörü

K_{rev} : Tersinebilirlik bağıl değişim için düzeltme faktörü

Belirsizlik yaklaşımında doğrusal model kullanılması ve bağıl ölçüm belirsizliğinin uygulanması nedeniyle, belirsizlik hesabında yer alan duyarlılık veya hassasiyet katsayıları 1 olarak hesaba konacaktır. Buna göre; ölçüm sonucuna etki eden her bir bağıl belirsizlik bileşeninin $w_i(y)$, karelerinin karekökleri alınarak ölçümün standart bağıl ölçüm belirsizliği aşağıdaki (3) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$w(E_{KG}) = \sqrt{w^2(V_{Anz}) + w^2(G) + w^2(V_{Sp}) + w^2(F_{bmc,kont}) + w^2(K_T) + w^2(K_{zer}) + w^2(K_{rep}) + w^2(K_{rot}) + w^2(K_{rev})} \quad (3)$$

Kuvvet sensörlerinin “Transfer katsayılı” model yöntemine göre sürekli kalibrasyonunun belirsizlik modeli kapsamında, dağılım fonksiyonları ve bağıl varyansları ise aşağıda Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Belirsizlik değişkenleri, dağılım fonksiyonları ve bağıl varyanslar

Değişken	Dağılım	Bağıl Varyans $w(x_i)$
Göstergede okunan voltaj değerindeki değişmeden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	Normal	$w^2(V_{Anz})$ Sertifikadan Alınır
Şarj yükselticisinden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	Normal	$w^2(G)$ Sertifikadan Alınır
Kuvvet sensörünün besleme gerilimindeki değişimden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	Normal	$w^2(V_{Sp})$ Sertifikadan Alınır
Referans kuvvet değerinden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	Normal	$w^2(F_{bmc,kont})$ Sertifikadan Alınır
Sürekli yükte sıcaklık değişiminden kaynaklanan bağıl belirsizlik değişkeni	Dikdörtgen	$w^2(K_T) = \frac{a_T^2}{3}$
Kuvvet sensörünün sıfır yükteki değerinin değişiminden kaynaklanan bağıl belirsizlik değişkeni	Dikdörtgen	$w^2(K_{zer}) = \frac{a_{zer}^2}{3}$

Kuvvet sensörünün tekrarlanabilirliğinden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	Dikdörtgen	$w^2(K_{rep}) = \frac{a_{rep}^2}{3}$
Kuvvet sensörünün tekrar gerçekleştirilebilirliğinden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	U Dağılımı	$w^2(K_{rot}) = \frac{a_{rot}^2}{2}$
Kuvvet sensörünün tersinebilirliğinden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	Dikdörtgen	$w^2(K_{rev}) = \frac{a_{rev}^2}{3}$

“Kuvvet” modeline göre belirsizlik hesabı

“Kuvvet” model yöntemine göre kuvvet kalibrasyonların da belirsizlik modeli aşağıda (4) numaralı eşitlikteki gibidir.

$$F_{KG} = F_{bmc,kont} \cdot \prod_{i=1}^8 K_i \quad (4)$$

Bu denklemde;

$$\prod_{i=1}^8 K_i = K_T \cdot K_{anp} \cdot K_{anz} \cdot K_{zer} \cdot K_{rep} \cdot K_{rot} \cdot K_{inp} \cdot K_{rev} \quad (5)$$

ile gösterilir. Bu eşitlikte kullanılan sembollerin açıklamaları aşağıda verilmiştir.

F_{KG} : Çıkış büyüklüğü, Kalibrasyonu yapılan kuvvet sensöre etkiyen kuvvet değeri

$F_{bmc,kont}$: Referans kuvvet değeri

K_T : Sürekli yükte bağıl sıcaklık değişimi için düzeltme faktörü

K_{anp} : Adaptör için düzeltme faktörü

K_{anz} : Gösterge için düzeltme faktörü

K_{zer} : Sıfır yükte bağıl değişim için düzeltme faktörü

K_{rep} : Tekrarlanabilirlik bağıl değişimi için düzeltme faktörü

K_{rot} : Tekrar gerçekleştirilebilirlik bağıl değişimi için düzeltme faktörü

K_{inp} : Enterpolasyon hatası bağıl değişimi için düzeltme faktörü

K_{rev} : Tersinebilirlik bağıl değişimi için düzeltme faktörü

Belirsizlik yaklaşımında bağıl ölçüm belirsizliğinin kullanılması nedeniyle, belirsizlik hesabında yer alan duyarlılık veya hassasiyet katsayıları 1 olarak hesaba konacaktır. Buna göre; ölçüm sonucuna etki eden her bir bağıl belirsizlik bileşeninin $w_i(F_{KG})$, karelerinin karekökleri alınarak ölçümün standart bağıl ölçüm belirsizliği aşağıdaki (6) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanır.

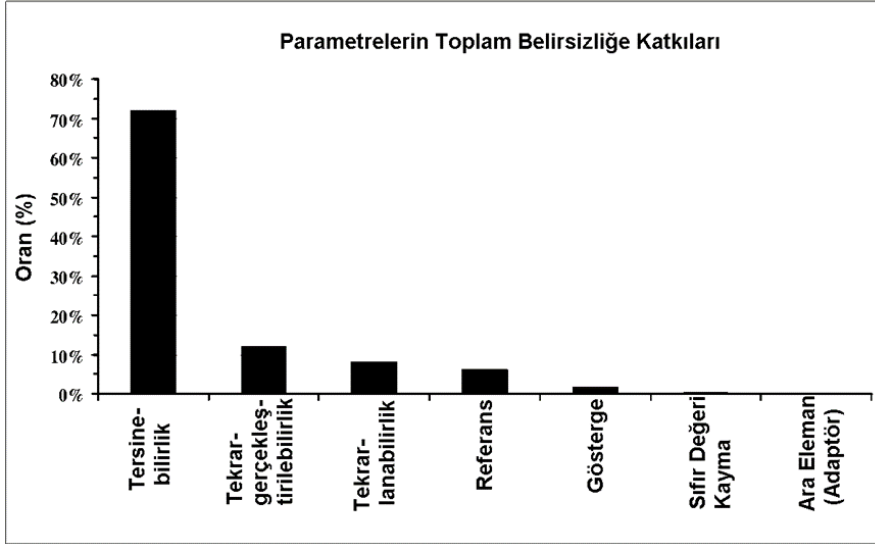
$$w(F_{KG}) = \sqrt{w^2(F_{bmc,kont}) + w^2(K_T) + w^2(K_{anp}) + w^2(K_{anz}) + w^2(K_{zer}) + w^2(K_{rep}) + w^2(K_{rot}) + w^2(K_{inp}) + w^2(K_{rev})} \quad (6)$$

Kuvvet sensörlerinin “kuvvet” modeli yöntemine göre sürekli kalibrasyonunun belirsizlik modeli kapsamında, dağılım fonksiyonları ve bağıl varyansları ise aşağıda Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Belirsizlik değişkenleri, dağılım fonksiyonları ve bağıl varyanslar

Değişken	Dağılım	Bağıl Varyans $w^2(x_i)$
Referans kuvvet değerinden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	Normal	$w^2(F_{bmc, kont})$ Sertifikadan Alınır
Sürekli yükte sıcaklık değişiminden kaynaklanan bağıl belirsizlik değişkeni	Dikdörtgen	$w^2(K_T) = \frac{a_T^2}{3}$
Adaptör değişiminden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	Normal	$w^2(K_{anp})$ Sertifikadan Alınır
Gösterge sistemi bağıl belirsizlik değişkeni	Normal	$w^2(K_{anz})$ Sertifikadan Alınır
Kuvvet sensörünün sıfır yükteki değerinin değişiminden kaynaklanan bağıl belirsizlik değişkeni	Dikdörtgen	$w^2(K_{zer}) = \frac{a_{zer}^2}{3}$
Kuvvet sensörünün tekrarlanabilirliğinden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	Dikdörtgen	$w^2(K_{rep}) = \frac{a_{rep}^2}{3}$
Kuvvet sensörünün tekrar gerçekleştirilebilirliğinden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	U Dağılımı	$w^2(K_{rot}) = \frac{a_{rot}^2}{2}$
Kuvvet sensörünün enterpolasyon hatası kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	Üçgen	$w^2(K_{inp}) = \frac{a_{inp}^2}{6}$
Kuvvet sensörünün tersinebilirliğinden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni	Dikdörtgen	$w^2(K_{rev}) = \frac{a_{rev}^2}{3}$

Kuvvet sensörlerinin sürekli kalibrasyonunun ölçüm belirsizliği hesabında etkin olan parametrelerin grafiksel gösterimi aşağıda Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. Sürekli kalibrasyondaki belirsizlik parametrelerinin toplam ölçüm belirsizliğine etkilerinin grafiksel gösterimi

Yukarıdaki şekilde yer alan parametrelerin kalibrasyonun toplam belirsizliğine etkisi incelendiğinde, tersinebilirlik parametresinden kaynaklı bağıl belirsizlik bileşeninin toplam ölçüm belirsizliği yaklaşımının % 70’ini kapsamakta olduğu ve kalibrasyon belirsizlik bütçesindeki baskın değişkeni oluşturduğu görülmektedir. Öte yandan sensörün ölçümdeki farklı konumlarından kaynaklı tekrar gerçekleştirilebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği değişkeni toplam ölçüm belirsizliğinin % 12’sini, tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm

belirsizliği değişkeni toplam ölçüm belirsizliğinin % 8'ini, kalibrasyonda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazından ve göstergedeki kaynaklı bağıl ölçüm belirsizliği değişkenleri ise toplam ölçüm belirsizliğinin sırasıyla % 5 ve % 2,5'ini oluşturmaktadır. Kalibrasyonu yapılan sensörün sıfır değerindeki kaymadan ve ölçüm düzeneğinde kullanılan aparatlardan kaynaklı bağıl belirsizlik değişkenlerinin toplam ölçüm belirsizliği bütçesine etkisinin son derece düşük olduğu yukarıdaki grafikten görülebilmektedir.

Bağıl belirsizlik değerleri kullanılarak birleştirilmiş bağıl ölçüm belirsizliği karelerinin toplamının karekökü olarak aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$w_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i^2}$$

% 95 güvenilirlik seviyesi için kapsam faktörü ($k=2,0$) alınır, bu durumda kuvvet ölçme cihazının genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$U = k \cdot w_c$$

Belirsizliğin Raporlanması

Kuvvet ölçme cihazlarının sürekli kalibrasyon işleminin değerlendirmesi sürecinde, yukarıda verilen formüller kullanılarak belirsizlik bileşenleri ve genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği hesaplanır. Hesaplanan belirsizlik değerleri ölçüm noktalarına göre sertifikada raporlanır. DKD-R 3-9 dokümanında verilen aşağıdaki tablo 3 formatında raporlanması daha uygun olur [1,2].

Tablo 3. DKD-R 3-9 göre verilen sonuçların raporlanması tablosu

Kuvvet Değeri	Ölçümü Yapılan Sensörün Duyarlılığı	Ölçümün Bağıl Genişletilmiş Belirsizliği	Ölçümün Bağıl Enterpolasyon Hatası	Belirsizlik Aralığı
$F_{ref,i}$	S_{KG}	W	D_{inp}	W'

4. KUVVET ÖLÇME CİHAZLARININ SÜREKLİ KALİBRASYONUNDA BELİRSİZLİK ÖRNEK HESABI

Kuvvet ölçme cihazının, DKD R 3-9 dokümanına uygun olarak EN ISO 376 standardına benzer şekilde yükleme uygulanarak gerçekleştirilen kalibrasyonu neticesinde elde edilen ölçüm verileri aşağıda Tablo 2.'de verilmiştir.

Kalibrasyon EN ISO 376 standardına benzer şekilde yapıldığı için belirsizlik hesaplamasında kuvvet modeli yaklaşımı esas alınacaktır.

Tablo 4. Örnek kalibrasyon ölçüm verileri

Nominal Kuvvet Değerleri	0° Konum		120° Konum	240° Konum
	1. Seri	2. Seri	3. ve 4. Seri	5. ve 6. Seri
kN	pC	pC	pC	pC
0	0	0	0	0
1	-3902	-3905	-3913	-3893
2	-7806	-7809	-7794	-7765
3	-11696	-11700	-11725	-11686
4	-15582	-15585	-15608	-15597
5	-19504	-19507	-19496	-19506
6	-23399	-23402	-23408	-23438
7	-27345	-27348	-27356	-27367
8	-31275	-31277	-31304	-31269
9	-35185	-35189	-35218	-35197
10	-39140	-39143	-39154	-39174
9			-35165	-35187
8			-31221	-31212
7			-27270	-27271
6			-23384	-23295
5			-19465	-19454
4			-15504	-15528
3			-11632	-11591
2			-7741	-7736
1			-3867	-3840
0	-2	-3	-1	-2

Tablo 4’de yer alan 4 kN kuvvet basamağı için bağıl ölçüm belirsizliğinin hesaplanması aşağıda detaylandırılmıştır. Bununla birlikte, diğer basamaklardaki kuvvet değerleri içinde benzer şekilde hesaplama yapılmalıdır ve hesaplamalar sonucu elde edilen en büyük bağıl ölçüm belirsizliği değeri, kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonu sonucu, elde edilen bağıl ölçüm belirsizliği değeri olarak sertifikada beyan edilmelidir.

Kuvvet ölçme cihazının sürekli kalibrasyonunda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının belirsizlik değeri için DKD R 3-9 dokümanın Ek A kısmında aşağıda verilen tablo belirtilmiştir. Bu tabloya uygun referans kuvvet dönüştürücülerin kullanılması istenmektedir [1,2].

Tablo 5. Referans ve transfer kuvvet dönüştürücü belirsizlik değerleri için öneriler

Tip	$W_{bmc,kont}$	Kuvvet Kalibrasyon Makinasının Referans Kuvvet Dönüştürücüsü		Transfer Kuvvet Dönüştürücüsü
		Minimum sınıflandırma EN ISO 376 göre	W_{ref}	W_{tsd}
A	$0,10 \% \leq W \leq 0,25 \%$	00	$W \leq 0,06 \%$	$W \leq 0,04 \%$
B	$0,25 \% < W \leq 0,5 \%$	0,5	$W \leq 0,12 \%$	$W \leq 0,08 \%$
C	$0,5 \% < W$	1	$W \leq 0,24 \%$	$W \leq 0,16 \%$

Bu örnek için, referans kuvvet değerinden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni değeri ($W_{Fbmc,kont}$) % 0,1 ($k=2$ için) olarak alınmıştır. Bu durumda, kalibrasyon kuvvetinin bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni ($w_{Fbmc,kont}$), aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w(F_{bmc,kont}) = \frac{W_{bmc,kont}}{2} = \frac{0,1}{2}$$

$$w(F_{bmc,kont}) = \% \mathbf{0,05} \text{ olarak ve } w^2(F_{bmc,kont}) = \% \mathbf{0,0025} \text{ olarak bulunur.}$$

Sıcaklık değişimi bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_{KT}) için, kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonundaki sıcaklık değişimi 0,5 °C'yi aşmadığı ve sıcaklık değişim katsayısının (K) da 0,0015 % / C alındığında aşağıdaki işlemler gerçekleştirilir.

$$w^2(K_T) = \frac{a_T^2}{3} = \frac{(K \cdot \Delta T)^2}{3} = \frac{(100 \cdot 0,0015 \cdot 0,5)^2}{3}$$

$$w^2(K_T) = \% \mathbf{0,0019} \text{ olarak bulunur.}$$

Adaptör değişiminden kaynaklı bağıl belirsizlik değişkeni $w^2(K_{anp})$ ve gösterge sistemi bağıl belirsizlik değişkeni $w^2(K_{anz})$ değerleri bu örnek için % 0,0001 olarak hesaplanmıştır. Bunların sertifikada verilen belirsizlik değerleri % 0,02 olarak verilmiş ve bu değerlerin yarısının karesi hesaplanarak belirsizlik değişkeni değeri bulunmuştur.

Kuvvet sensörünün sıfır yükteki değerinin değişiminden kaynaklanan bağıl belirsizlik değişkeni $w^2(K_{zer})$, hesabı için, sıfır değeri kayma hatasının maksimum değeri hesaplanmalıdır. Bu kapsamda aşağıdaki işlemler yapılır;

$$a_{zero\ max} = \frac{i_f - i_0}{X_N} \cdot 100 = \frac{-3 - 0}{-39143} \cdot 100 = 0,0077 \%$$

$$w^2(K_{zer}) = \frac{a_{zer}^2}{3} = \frac{0,0077^2}{3}$$

$$w^2(K_{zer}) = \% \mathbf{0,00002} \text{ olarak bulunur.}$$

Kuvvet sensörünün tekrarlanabilirliğinden kaynaklı bağıl belirsizlik bileşeninin $w^2(K_{rep})$ hesabı için, öncelikle 4 kN kuvvet basamağı için dönümsüz gösterge değerlerinin ortalama değeri (X_{wr}), aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$\overline{x_{wr}} = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{-15582 + (-15585)}{2} = -15583,5$$

Ardından, 4 kN kuvvet basamağı için dönümsüz bağıl tekrarlanabilirlik hatası değeri (a_{rep}) aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$a_{rep} = \frac{|x_2 - x_1|}{\overline{x_{wr}}} \cdot 100 = \frac{|-15585 + (-15582)|}{-15583,5} \cdot 100 = -0,0187 \%$$

Böylece, tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni $w^2(K_{rep})$ aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w^2(K_{rep}) = \frac{a_{rep}^2}{3} = \frac{(-0,0187)^2}{3}$$

$$w^2(K_{rep}) = \% \mathbf{0,00012} \text{ olarak bulunur.}$$

Kuvvet sensörünün tekrar gerçekleştirilebilirliğinden kaynaklı bağıl belirsizlik bileşeninin $w^2(K_{rot})$ hesabı için, öncelikle 4 kN kuvvet basamağı için dönümlü gösterge değerlerinin ortalama değeri (X_r), aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$\bar{x}_r = \frac{x_1 + x_3 + x_5}{3} = \frac{-15582 + (-15608) + (-15597)}{3} = -15595,7$$

Ardından, 4 kN kuvvet basamağı için dönümlü bağıl tekrarlanabilirlik veya tekrar gerçekleştirilebilirlik hatası değeri (a_{rot}) aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$a_{rot} = \left| \frac{x_{max} - x_{min}}{\bar{x}_r} \right| \cdot 100 = \left| \frac{(-15582) - (-15608)}{(-15595,7)} \right| \cdot 100 = 0,1651 \%$$

Böylece, tekrarlanabilirlik hatası bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni $w^2(K_{rot})$ aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w^2(K_{rot}) = \frac{a_{rot}^2}{3} = \frac{(0,1651)^2}{2}$$

$w^2(K_{rot}) = \% 0,01363$ olarak bulunur.

Kaynaklarda [7] ve [8] numaralı dokümanlarda künye bilgilerine yer verilen yayınlarda, hesapla bulunmuş cihaz gösterge değerinin (X_a) ayrıntılı olarak matematiksel çıkarımı ifade edilmektedir. Bu örnekte (X_a) değeri için -15599,1 pC kullanılarak kuvvet sensörünün enterpolasyon hatası değeri (a_{int}) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$a_{int} = \left| \frac{\bar{x}_r - x_a}{x_a} \right| \cdot 100 = \left| \frac{(-15595,7) - (-15599,1)}{(-15599,1)} \right| \cdot 100 = 0,0220 \%$$

Böylece, enterpolasyon hatası bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni $w^2(K_{int})$ aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w^2(K_{int}) = \frac{a_{int}^2}{6} = \frac{(0,0220)^2}{6}$$

$w^2(K_{int}) = \% 0,0008$ olarak bulunur.

Tersinebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin $w^2(K_{rev})$ hesabı için, öncelikle 4 kN kuvvet basamağı için bağıl tersinebilirlik hatası (a_{v1} , a_{v2} , a_{rev}) ifadelerinin, aşağıdaki gibi hesaplanması gerekmektedir.

$$a_{v1} = \left| \frac{x_4' - x_3}{x_3} \right| \cdot 100 = \left| \frac{-15504 - (-15608)}{(-15608)} \right| \cdot 100 = 0,667 \%$$

$$a_{v2} = \left| \frac{x_6' - x_5}{x_5} \right| \cdot 100 = \left| \frac{-15528 - (-15597)}{(-15597)} \right| \cdot 100 = 0,441 \%$$

$$a_{rev} = \frac{a_{v1} + a_{v2}}{2} = \frac{0,667 + 0,441}{2} = 0,554 \%$$

Böylece, tersinebilirlik hatası bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni $w^2(K_{int})$ aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w^2(K_{rev}) = \frac{a_{int}^2}{6} = \frac{(0,554)^2}{6}$$

$w^2(K_{rev}) = \% 0,1023$ olarak bulunur.

Kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda etkin olan tüm bağıl ölçüm belirsizliği bileşenleri kullanılarak birleştirilmiş belirsizlik aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$w_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i^2} = \sqrt{w^2(F_{bmc,kont}) + w^2(K_T) + w^2(K_{anp}) + w^2(K_{anz}) + w^2(K_{zer}) + w^2(K_{rep}) + w^2(K_{rot}) + w^2(K_{inp}) + w^2(K_{rev})}$$

$$w_c = \sqrt{0,0025 + 0,0019 + 0,0001 + 0,0001 + 0,00002 + 0,00012 + 0,1363 + 0,0008 + 0,1023}$$

$w_C = \% 0,348$ olarak bulunur.

% 95 güvenilirlik seviyesi için kapsam faktörü $k=2,0$ alınır ve bu durumda kuvvet ölçme cihazının genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği ise;

$$U = k \cdot w_C = 2 \cdot 0,348$$

W = % 0,696 olarak bulunur.

Kalibrasyon sertifikası için diğer kuvvet basamakları da benzer şekilde hesaplanmalı ve en büyük değer cihazın belirsizlik değeri olarak sertifikada belirtilmelidir. Kuvvet ölçme cihazının ölçüm aralığı, maksimum kapasitenin % 20'si ile % 100'ü arasında belirlenirse bu cihaz için 2 kN ile 10 kN ölçüm aralığında her kuvvet basamağı için hesaplanan en büyük belirsizlik değeri sertifikada cihazın belirsizlik değeri olarak beyan edilir.

Örneğin: 2 kN - 10 kN ölçüm aralığı için $\pm \% 0,696$ ölçüm belirsizliğidir.

Ayrıca DKD-R 3-9 dokümanında verilen yukarıda verilen tablo 3 formatında sonuçların raporlanması uygun olacaktır.

Tablo 6. DKD-R 3-9 göre verilen sonuçların raporlanması örnek tablosu

Kuvvet Değeri	Ölçümü Yapılan Sensörün Duyarlılığı	Ölçümün Bağıl Genişletilmiş Belirsizliği	Ölçümün Bağıl Enterpolasyon Hatası
$F_{ref,i}$	S_{KG}	W	D_{inp}
N	pC/N	$\%$	$\%$
4000	-3,899	0,695	0,022

Bu tabloda verilen S_{KG} değeri aşağıdaki formül yardımı ile belirlenir.

$$S_{KG} = \frac{X_r}{F_{ref}} = \frac{-15595,7}{4000} = -3,899 pC/N$$

olarak hesaplanarak tabloda verilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma ile kuvvet ölçme cihazlarının sürekli kalibrasyonu ve belirsizlik hesabı DKD R 3-9 dokümanına uygun olacak şekilde açıklanmış ve hesapta etkili parametreler verilmiştir. Verilen sayısal örnek ile de hesaplamalarda belirsizlik parametrelerin hesaba nasıl dahil edildikleri gösterilmiştir. Kuvvet ölçme cihazı kalibrasyonu yapan, akredite veya akreditasyona hazırlanan laboratuvarların belirsizlik hesaplamasına yardımcı olmak amacıyla bu çalışma hazırlanmıştır. Bu sayede, konu ile ilgili kişilere belirsizlik hesabı hakkında detaylı ve doğru bir bilgi iletilmesi hedeflenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] DKD R 3-9, 2020, Continuous calibration of force transducers according to the comparison method
- [2] DKD-R 3-9, 2018, Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren

- [3] EN ISO 376:2011, Metallic Materials-Calibration of Force-proving Instruments Used for the Static Verification of Uniaxial Testing Machines.
- [4] Dizdar, H., Aydemir, B., 2019, Piezo Elektrik Kuvvet Sensörlerinin kalibrasyonu ve belirsizlik hesabı, International Marmara Sciences Congress (Autumn) 2019, S.323-329
- [5] Aydemir, B., Dizdar, H., Vatan, C., 2017, “Genel Kuvvet Metrolojisi Eğitim Dokümanı”, TÜBİTAK UME Gebze-Kocaeli, Mayıs 2017
- [6] Aydemir, B., Ayan, E., Elmas, B.S., Dizdar, H., (2019), Piezoelektrik Kuvvet Ölçme Cihazlarının Yapısı, Avantajları ve Kalibrasyonu”, IMSEC 2019, p. 1054-1060
- [7] Dizdar, H., Vatan, C., Aydemir, B., 2015, “Bağıl Enterpolasyon Hatasının Farklı Matematiksel Yöntemlerle Hesaplanması ve Sayısal Örneklenmesi Teknik Raporu”, TÜBİTAK UME, Ocak 2015
- [8] Dizdar, H., Vatan, C., Aydemir, B., 2016, “Kuvvet Ölçümlerinde Bağıl Enterpolasyon Hatasının Farklı Matematiksel Yöntemlerle Hesaplanması ve Sayısal Örneklenmesi”, IMSTEC 2016, October 26-28, 2016, Adana/TURKEY, p.197-205