

**Teknik Doküman
(Technical Document)**

Çekme Deneyinde Belirsizlik Hesabı ve Sayısal Uygulaması

Doç. Dr. Bülent AYDEMİR

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (TÜBİTAK UME), Gebze/Kocaeli, TÜRKİYE,
bulent.aydemir@tubitak.gov.tr

Özet

Günümüzde, yaygın olarak kullanılan çekme deneyi; ürün kabulü, ürün performans testleri ve araştırma kurumları için oldukça önemlidir. Bu deneyler sonucunda elde edilen sonuçların kalitesi ve güvenilirliği de büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada, çekme deneyinde ölçüm kalitesine etki eden parametreler, belirsizlik değerleri ile ifade edilmiştir. Bir örnek deney numunesi için akma gerilmesi, çekme gerilmesi, kopma uzaması, kesit daralması için belirsizlik değerleri hesaplanmış deney sonucuna olan etkisi gösterilmiştir. Doğru çekme deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için, kalibre edilmiş cihazların kullanımı ile belirsizlik değerleri göreceli küçük deney sonuçlarına ulaşmanın gerekliliği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çekme deneyi, belirsizlik, kalibrasyon

Quantitative application and uncertainty calculation in Tensile Test

Abstract

Today, tensile test is widely use for product assurance, product performance testing and research activities which is very important for manufacturers and R&D institutes. Quality and reliability of results of tensile tests also has importance. In this study, the parameters which have effect on measurement quality of tensile test are defined as uncertainty values. Uncertainty values of samples were calculated for measured values of yield stress, tensile stress, elongation and cross-section reduction. Also effects of uncertainty values on test results are shown. To get accurate material tensile test results we should have calibrated testing machine periodically and should get low uncertainty results.

Keywords: Tensile test, uncertainty, calibration

1. GİRİŞ

Çekme deneyi, giriş kalite kontrol faaliyetleri, ürün kabulü, ürün performans testleri ve araştırma çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Artan ticari rekabet nedeniyle deney sonuçlarının daha hassas ve doğru elde edilmesi ön plana çıkmaktadır. İlave olarak, deneyler sonucunda elde edilen sonuçların kalitesi ve güvenilirliği de büyük önem arz etmektedir. Global dünyada deney metotları uluslar arası standartlar ile tanımlanmış durumdadır. Ülkemizdeki standartlar Türk Standartlar Enstitüsü (TSE) tarafından hazırlanarak yayınlanmaktadır. Türkiye bölgesel organizasyon olarak Avrupa Birliği içerisinde yer aldığından, bu bölgede kabul edilen European Norm (EN) standartlarını da ülkemizde kendi dilimize dönüştürülüp değişiklik yapılmadan kullanılmaktadır. Ayrıca dünya çapında kabul edilen ISO (International Organization for Standardization) tarafından yayınlanan tüm standartlarda üye ülkeler tarafından kabul

Bu makaleye atıf yapmak için

Aydemir, B., "Çekme Deneyinde Belirsizlik Hesabı ve Sayısal Uygulaması" Kuvvet Laboratuvarı Teknik Dokümanı, S.3, N.4, 2019 (21-33)

How to cite this article

Aydemir, B., " Quantitative application and uncertainty calculation in Tensile Test " Kuvvet Laboratuvarı Teknik Dokümanı, S.3, N.3, 2019 (21-33)

edilerek kullanılması istenmektedir. Bu sayede tüm dünyadaki deney metodları arasındaki farklılık en aza indirilmesi ve ölçülen değerlerinin karşılaştırılabilirliği hedeflenmiştir[1]-[4].

Yürürlükte olan yaygın olarak kullanılan standartlardan TS EN ISO 6892-1 metalik malzemeler için, TS EN ISO 527-1 plastik malzemeler için çekme deneyini tanımlamaktadır[5],[7]. Bunların dışında farklı malzeme grupları ve şekilleri için farklı standartlarda mevcuttur. Standartları incelediğinde benzer uygulamalar görebilir ancak bu alanda yaygın kullanılanları yukarıda belirtilen çekme deney standartlarıdır.

Çekme deney standardında, deney için gerekli şartlar, kurulum, deney parametreleri ve deney sonuçları ifade edilir. Amaç, farklı deney cihazlarından, metodlardan ve daha pek çok etki eden parametreden gelen etkilerin en aza indirilmesidir. Çekme deneyi sonucunda, malzemelerin mekanik özelliklerini gösteren akma, çekme ve kopma mukavemeti; akma, çekme, kopma uzama değerleri, elastiklik modülü vb. birçok parametre elde edilir. Tüm parametrelerin sonuçlarına etkiyen ölçüm doğruluğu parametreleri rastgele ve sistematik hatalar olarak ifade edilen belirsizlik etkenleridir. Bu değerler, istatistiksel olarak ve/veya deney sırasında hesaplanabilmekte ve deney kalitesinin bir göstergesidir.

Bu çalışmada, çekme deneyi sonucu elde edilen çekme, akma mukavemeti, uzama ve kesit daralması için belirsizlik değerlerinin hesaplanma yöntemi bir uygulama ile verilmiştir. Belirsizlik değerlerine etki eden parametreler ve bunların etki miktarları verilmiştir. Sonuç olarak, belirsizlik değerinin doğru ve daha düşük olarak elde edilmesinin deney kalitesine etkisi özetlenmiştir.

2. ÇEKME DENEYİNDE BELİRSİZLİK HESABI

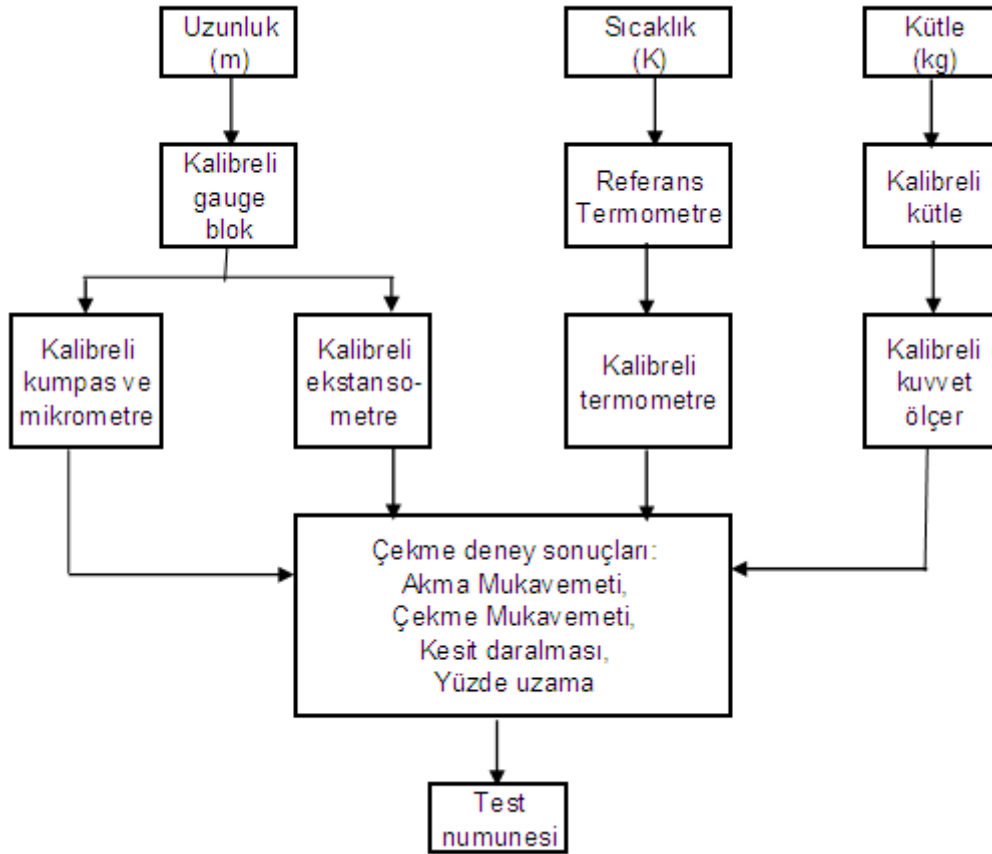
Çekme deneyi, malzemenin uygulanan kuvvetle uzaması sonrası, gerilme(σ) ve birim deformasyon(ϵ) ilişkisinin göstergesidir. Malzemeleri tanımak ve tanımlamak için oldukça yaygın kullanılan bir deneydir.

Çekme deneyi esnasında ölçülen ve elde edilen değerlerin doğruluğu deney cihazın kalibrasyonu ile sağlanır. Kalibrasyon işlemi ölçülen büyüklüklerin uluslararası birim sistemi olan SI uygun olarak kalibreli cihazlar ile sağlanır ki buna izlenebilirlik denir. Çekme cihazı kalibrasyonun izlenebilirlik zincirini Şekil 1 de gösterilmiştir.

Bilindiği gibi, ölçüm kalitesinin ve ölçüm sonuçlarının güvenilirliğinin göstergesi belirsizlik değeridir. Kalibre edilen her bir cihaz için sertifikasında o cihaza ait bir belirsizlik değeri tanımlanır. Bu değerlere göre deney sonucu elde edilen sonuçlar içinde bir belirsizlik değerinin hesaplanması yapılması gereklidir. Çekme deney sonuçları için belirsizlik hesaplaması, tanımlamalar, hesaplama formülleri ve örnek sayısal hesaplama olarak aşağıda verilmiştir. Bu örneğe farklı personeller kullanılıyorsa personel etkisi, sıcaklık etkisi vb. başka parametrelerde eklenebilir. Çalışmada bu etkiler dikkate alınmamıştır.

2.1. Çekme deneyi belirsizliğinin tahmininde tanımlı parametreler

Öncelikle belirsizlik değeri hesaplanması gerekli büyüklükler (belirlenenler) listelenmelidir. Bunlar genellikle çekme deneyi sonucunda verilen parametrelerdir. Parametrelerin belirlenmesi için yapılan ölçümler ve belirlenenler Tablo 1 de verilmiştir[5-6].



Şekil 1. Çekme cihazı kalibrasyonun izlenebilirlik zinciri

Tablo 1. Çekme deneyinde belirlenen ve ölçülen değerler

Belirlenen	Birimi	Sembolü
Kesit alanı	mm ²	S ₀
Elastisite modülü	GPa	E
Akma Gerilmesi	MPa	R _{p0,2}
Üst Akma Gerilmesi	MPa	R _{eH}
Alt Akma Gerilmesi	MPa	R _{eL}
Çekme Gerilmesi	MPa	R _m
Yüzde kalıcı uzama	%	A
Yüzde kesit daralması	%	Z

Ölçümler	Birimi	Sembolü
Numune Kalınlığı (dikdörtgen numune)	mm	a ₀
Numune Genişliği (dikdörtgen numune)	mm	b ₀
Numune Çapı (silindirik numune)	mm	d ₀
İlk ölçüm boyu	mm	L ₀
Test esnasında uygulanan Kuvvet	N	F
Test esnasında ölçülen eksenel uzama	mm	ΔL
Kopma sonrası kalıcı uzama	mm	L _u
Kopma sonrası silindirik numunenin çapı	mm	d _u

Belirlenenlerin hiçbiri doğrudan ölçülmeden aşağıdaki formüller yardımı ile hesaplanırlar ve belirsizlik hesaplamalarında model fonksiyon denklemleri olarak alınacaklardır.

$S_0 = a_0 b_0$	(dikdörtgen numune) (1a)
$S_0 = \pi d_0^2 / 4$	(silindirik numune) (1b)
$E = (\Delta F \cdot L_0) / (\Delta L \cdot S_0)$	(2)
$R_p = F_{Rp} / S_0$	(3)
$R_{eH} = F_{eH} / S_0$	(4)
$R_m = F_m / S_0$	(5)
$A = (L_u - L_0) 100 / L_0$	(6)
$Z = (S_0 - S_u) 100 / S_0$	(7)

2.2. A tipi ve B tipine göre belirsizliklerin sınıflandırılması

Ölçüm belirsizliği hesabında, numunelerinin ölçüm belirsizliği üzerinde “numune malzemesine bağlı” olan ve “numune malzemesine bağlı olmayan” etkenler söz konusudur. Genel olarak, örneğin bir parti içinden alınan numuneler yaklaşık olarak homojen olsalar dahi bir başka partide malzeme karışım ve alaşım oranlarındaki farklılıklar, döküm içindeki farklı yığılmalar, haddeleme yönü, soğuma hız farklılığı, soğuma ve ısıtıl işlem sıcaklık ve zaman farklılıkları gibi pek çok parametre malzemenin homojenliği bozmaktadır. Bu durumda numuneler arasında farklı sonuçların alınması kaçınılmaz olmaktadır. Bunun için mümkün olduğunca aynı şartlarda elde edilmiş homojen numunelerin kullanılması, farklı laboratuvarlarda farklı makinelerle yapılacak ölçümlerin karşılaştırılabilmesi ve sonuçlar arasında büyük farklılıkların görülmeyeceği saçılmaların önüne geçilebilmesi açısından çok önemlidir.

Ölçüm belirsizliği, A tipi belirsizlik bileşeni olarak, numunelerin ölçüm verilerinden elde edilen büyüklük değerlerinin istatistiksel dağılımından belirlenir ve standart sapma ile nitelendirilir. B tipi belirsizlik bileşenleri ise belirlenen diğer bileşenlerden, tecrübe ve diğer bilgilere dayalı olasılık yoğunluk fonksiyonlarından (PDF) elde edilen standart sapma ile nitelendirilebilir. B-tipi belirsizlik hesaplama yönteminde farklı dağılım yöntemleri kullanılır. Bunlardan yaygın kullanılan dağılımlar:

- ✓ Dikdörtgen dağılım
- ✓ Üçgen dağılım
- ✓ U-tipi dağılım

Bunların detaylarına çeşitli belirsizlik hesaplama kaynaklarından ulaşılabilir[8]-[13], [2]-[6].

2.3. Birleşik Belirsizlik hesabı

Bileşik belirsizlik, bir ölçümün pek çok sayıda başka değerlerden elde edilmiş sonucunun standart belirsizliği olup, bu değerlerdeki değişimin ölçüm sonucunu nasıl etkilediği göz önüne alınarak hesaplanan varyans ifadeleri toplamının pozitif karekökü ile ifade edilir. Birleşik belirsizliğin (u_c) hesabı, her bir parametrenin belirsizlik kaynaklarının karelerinin toplamının karekök olup aşağıdaki genel formül yardımı ile belirlenir.

$$u_c(y) = \sqrt{u(x_1)^2 + u(x_2)^2 + \dots + u(x_n)^2}$$

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i \cdot u(x_i))^2}$$

$$u_c(y) = \sqrt{(c_1 \cdot u(x_1))^2 + (c_2 \cdot u(x_2))^2 + \dots + (c_n \cdot u(x_n))^2} \quad (8)$$

Burada c_i duyarlılık katsayısı, $u(x_i)$ ise belirsizlik bileşenidir. Duyarlılık katsayısı ilgili model fonksiyonun kısmi türevinden elde edilir ve girdi parametresinin esas parametreye etkisine birimi dönüştürmek için hesaplanırlar.

Bileşik belirsizlik $u_c(y)$ ölçümlerdeki belirsizliği tanımlamasına rağmen, bu değer ölçülen büyüklüğün dağılımı gösterdiğinde güvenilirlik düzeyi sadece % 68,27'dir. Diğer bir ifadeyle, aynı büyüklük herhangi bir şartlar altında ölçülürse sonuç % 68,27'lik olasılıkla $u_c(y)$ ile belirlenen aralıkta olacaktır. Pratikte ise endüstriyel uygulamalarda daha yüksek güvenilirlik düzeylerine gereksinim vardır. Bu durumlarda ölçümlerdeki belirsizliği tanımlamak için genişletilmiş belirsizlik olarak adlandırılan diğer bir terim kullanılır. Genişletilmiş belirsizlik U , bileşik standart belirsizlik $u_c(y)$ ile kapsam faktörü k 'nin çarpımıdır:

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (9)$$

Faktör, bir ölçüm modelinin çıktı büyüklüklerinin olasılık dağılımlarının tipine ve seçilen kapsam olasılığına bağlıdır. Bu tanımdaki "faktör" terimi kapsam faktörünü ifade eder. Kapsam faktörünün değeri hedeflenen güvenilirlik düzeyine göre seçilir. Metroloji uygulamalarında $k=2,0$ kullanılır. Bu değere karşılık gelen güvenilirlik düzeyi % 95,45'tir.

2.4. Her bir belirsizlik kaynağı için Standard belirsizliğin tahmini

2.4.1. Numunelerin belirsizlik hesabı

MTM'de test edilen deney numunelerin ölçüm sonuçlarından hesaplanan A Tipi ölçüm belirsizliği olup tamamen numune sayısına bağlı olarak istatistiksel yöntemler kullanılarak gerçekleştirilir ve (10) nolu denklem yardımıyla hesaplanır.

$$u_N = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

s : standart sapma

n : testi yapılan numune sayısı

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{ort})^2}{n-1}} \quad (11)$$

X_i : Ölçüm değeri

X_{ort} : Ölçümlerin ortalama değeri

2.4.2. Kesit alanı ölçümlerindeki belirsizlik hesabı

Dikdörtgen numune için model fonksiyonu (1a) denkleminden, duyarlılık katsayıları ise matematiksel olarak ilgili model fonksiyonun kısmi türevinden elde edilir. Duyarlılık katsayıları:

$$c_{a_0} = \frac{\partial \mathcal{S}_0}{\partial a_0} = b_0 \quad (12)$$

$$c_{b_0} = \frac{\partial \mathcal{S}_0}{\partial b_0} = a_0 \quad (13)$$

S_0 belirsizlik hesabı formül 9 yardımıyla aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$u_{S_0} = \sqrt{u_N^2 + (b_0)^2 u_{a_0}^2 + (a_0)^2 u_{b_0}^2} \quad (14)$$

Silindirik numune için:

$$S_0 = \pi d_0^2 / 4 \quad (1b)$$

Duyarlılık katsayısı:

$$c_{d_0} = \frac{\partial S_0}{\partial d_0} = \frac{\pi d_0}{2} \quad (15)$$

S_0 belirsizlik hesabı:

$$u_{S_0} = \sqrt{u_N^2 + \frac{d_0^2 \pi^2 u_{d_0}^2}{4}} \quad (16)$$

2.4.3. Elastisite modülü belirsizlik hesabı

Elastisite modülü belirsizlik hesap formülü aşağıda verilmiş formüller ile hesaplanabilir. Ancak bu çalışmada sayısal hesaplama örneği verilmemiştir. Model fonksiyon:

$$E = \frac{FL_0}{eS_0} = m_e \frac{L_0}{S_0} \quad (17)$$

Duyarlılık katsayıları:

$$c_{m_e} = \frac{\partial E}{\partial m_e} = \frac{L_0}{S_0} \quad (18)$$

$$c_{L_0} = \frac{\partial E}{\partial L_0} = \frac{m_e}{S_0} \quad (19)$$

$$c_{S_0} = \frac{\partial E}{\partial S_0} = -\frac{m_e L_0}{S_0^2} \quad (20)$$

Belirsizlik hesabı:

$$u_E = \sqrt{u_N^2 + \left(\frac{L_0}{S_0}\right)^2 S_{m_e}^2 + \left(\frac{m_e}{S_0}\right)^2 u_{L_0}^2 + \left(\frac{m_e L_0}{S_0^2}\right)^2 u_{S_0}^2} \quad (21)$$

2.4.4. Akma gerilmesi belirsizlik hesabı

Akma gerilmesi sadece üst akma gerilmesi için ele alınacaktır. Alt akma gerilmesi değeri hesaplanması gerekirse yine aynı parametreler kullanılmalı ama formül alt simgeleri değiştirilmelidir.

Model fonksiyon:

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} \quad (14)$$

Duyarlılık katsayıları:

$$c_{F_{eH}} = \frac{\partial R_{eH}}{\partial F_{eH}} = \frac{1}{S_0} \quad (22)$$

$$c_{S_0} = \frac{\partial R_{eH}}{\partial S_0} = -\frac{F_{eH}}{S_0^2} \quad (23)$$

Belirsizlik hesabı:

$$u_{R_{eH}} = \sqrt{u_N^2 + \left(\frac{1}{S_0}\right)^2 u_{F_{eH}}^2 + \left(-\frac{F_{eH}}{S_0^2}\right)^2 u_{S_0}^2} \quad (24)$$

2.4.5. Çekme gerilmesi belirsizlik hesabı

Model fonksiyon:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (5)$$

Duyarlılık katsayıları:

$$c_{F_m} = \frac{\partial R_m}{\partial F_m} = \frac{1}{S_0} \quad (25)$$

$$c_{S_0} = \frac{\partial R_m}{\partial S_0} = -\frac{F_m}{S_0^2} \quad (26)$$

Belirsizlik hesabı:

$$u_{R_m} = \sqrt{u_N^2 + \left(\frac{1}{S_0}\right)^2 u_{F_m}^2 + \left(-\frac{F_m}{S_0^2}\right)^2 u_{S_0}^2} \quad (27)$$

2.4.6. Yüzde uzamanın belirsizlik hesabı

Kumpas yardımıyla el ile yapılan ölçümlere göre aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

Model fonksiyon:

$$A = \left(\frac{L_u - L_0}{L_0} \right) \times 100 \quad (6)$$

Duyarlılık katsayıları:

$$c_{L_u} = \frac{\partial A}{\partial L_u} = \frac{1}{L_0} \quad (28)$$

$$c_{L_0} = \frac{\partial A}{\partial L_0} = \frac{1}{L_0} - \frac{L_u - L_0}{L_0^2} \quad (29)$$

Belirsizlik hesabı:

$$u_A = \sqrt{u_N^2 + \left(\frac{1}{L_0}\right)^2 u_{L_u}^2 + \left(\frac{1}{L_0} - \frac{L_u - L_0}{L_0^2}\right)^2 u_{L_0}^2} \quad (30)$$

2.4.7. Yüzde kesit daralmasının belirsizlik hesabı

Kumpas yardımıyla el ile yapılan ölçümlere göre aşağıdaki şekilde hesaplanabilir. Dikdörtgen numune için model fonksiyon:

$$S_u = a_u b_u \quad (31)$$

Duyarlılık katsayıları:

$$c_{a_u} = \frac{\partial S_u}{\partial a_u} = b_u \quad (32)$$

$$c_{b_u} = \frac{\partial S_u}{\partial b_u} = a_u \quad (33)$$

S_u belirsizlik hesabı:

$$u_{S_u} = \sqrt{(b_u)^2 u_{a_u}^2 + (a_u)^2 u_{b_u}^2} \quad (34)$$

Silindirik numune için model fonksiyon:

$$S_u = \pi d_u^2 / 4 \quad (35)$$

Duyarlılık katsayısı:

$$c_{d_u} = \frac{\partial S_u}{\partial d_u} = \frac{\pi d_u}{2} \quad (36)$$

S_u belirsizlik hesabı:

$$u_{S_u} = \sqrt{\frac{d_u^2 \pi^2 u_{d_u}^2}{4}} \quad (37)$$

Model fonksiyon:

$$Z = \left(\frac{S_0 - S_u}{S_0} \right) \times 100 \quad (7)$$

Duyarlılık katsayısı:

$$c_{S_0} = \frac{\partial Z}{\partial S_0} = \frac{S_u}{S_0^2} \quad (38)$$

$$c_{S_u} = \frac{\partial Z}{\partial S_u} = -\frac{1}{S_0} \quad (39)$$

Belirsizlik hesabı:

$$u_Z = \sqrt{u_N^2 + \left(\frac{S_u}{S_0^2} \right)^2 u_{S_0}^2 + \left(-\frac{1}{S_0} \right)^2 u_{S_u}^2} \quad (40)$$

3. SAYISAL OLARAK HATA PARAMETRELERİ VE BELİRSİZLİK HESABI

Bu çalışmada, çekme deneyleri Zwick model Z250 cihazda gerçekleştirilmiştir. Cihazın kuvvet ölçüm sistemi EN ISO 7500-1 standardına göre doğruluk sınıfı 1 olarak sertifikalandırılmıştır. Uzama ölçüm sistemi de EN ISO 9513 standardına göre kalibre edilmiş ve cihazın sınıfı 0.5 olarak belirlenmiştir.

Çekme deney numuneleri EN ISO 6892-1 metaller için çekme test standardı uygun olarak aynı hazırlanmıştır. Çekme deney hızı 1 mm / dak olarak alınmıştır. Ortam sıcaklığı 23 °C ± 1 °C ve nem % 50 ± 10 % de deneyler gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları tablo 2 de verilmiştir.

Belirsizlik hesabı için bilinen parametreler şu şekilde verilmiştir. Çekme deneyi makinası kuvvet sertifikasından gelen belirsizlik $U_f = \% 0.12$, deney numunelerinin ilk ölçü boyu $L_0 = 50$ mm, kopma sonrası ölçüm boyu $L_u = 55.96$ mm, kopma sonrası kesit boyutları $a_u = 0.974$ mm, $b_u = 15.98$ mm olup buradan kesit alanı $S_u = 19.50$ mm² olarak belirlenmiştir.

Tablo 2 deki standard sapma değerleri denklem 11 ve belirsizlik denklem 8 ve genişletilmiş belirsizlik değeri ise denklem 9 kullanılarak hesaplanır. Aşağıda verilen belirsizlik hesap tablolarında tüm numune değerleri tablo 2 deki genişletilmiş belirsizlik değerlerinden alınmıştır.

Boyutsal ölçümlerde kullanılan kumpasın belirsizlik değeri sertifikasından alınabilir ya da çözünürlük değerinin 1/3 olarak hesaba katılabilir. Bu çalışmada kumpasın belirsizliği 2. yönteme göre aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır. Tablo 3 teki hesaplamalar aşağıda özetlenmiştir.

$$u_{a0} = \text{kumpas çözünürlüğü} / 3 = 0.01 / 3 = 0.003 \text{ mm}$$

$$u_{b0} = \text{kumpas çözünürlüğü} / 3 = 0.01 / 3 = 0.003 \text{ mm}$$

$$\text{Denklem 12 den } c_{a0} = 20.02 \text{ mm}$$

$$\text{Denklem 13 den } c_{b0} = 1.22 \text{ mm}$$

$$\text{Denklem 14'ün karekökünü almadan 2. ifadesinin dağılım katsayısına bölümü} = 0.003^2 \times 20.02^2 / \sqrt{3} = 2.57\text{E-}03 \text{ mm}^2$$

$$\text{Denklem 14'ün karekökünü almadan 3. ifadesinin dağılım katsayısına bölümü} = 0.003^2 \times 1.22^2 / \sqrt{3} = 9.55\text{E-}06 \text{ mm}^2$$

$$\text{Denklem 14'ün 1..2. ifadesi ile 3. ifadesinin toplamının karekökü} = \sqrt{1.\text{ifade} + 2.\text{ifade} + 3.\text{ifade}} = 9.62\text{E-}02 \text{ mm}^2 \text{ ve 2 ile çarpılarak } 1.92\text{E-}01 \text{ mm}^2 \text{ olarak genişletilmiş toplam belirsizliği bulunur.}$$

Tablo 2. Çekme deney sonuçları ve numune belirsizlik değerleri

No	a ₀	b ₀	S ₀	R _{eH}	R _m	A	Z
	mm	mm	mm ²	MPa	MPa	%	%
1	1,22	20,01	24,41	733,2	1034,2	11,5	20,7
2	1,22	20,02	24,42	740,1	1026,0	11,0	20,1
3	1,22	20,01	24,41	732,2	1051,2	12,1	19,9
4	1,22	20,04	24,45	738,5	1031,4	12,2	20,8
5	1,22	20,02	24,42	746,1	1047,3	11,2	19,8
Ortalama	1,22	20,02	24,42	738,02	1038,02	11,60	20,26
Standart sapma			0,015	5,634	10,756	0,534	0,462
Belirsizlik, %			0,007	2,519	4,810	0,239	0,206
Genişletilmiş Belirsizlik, %, k=2 ile			0,013	5,039	9,620	0,477	0,413

Tablo 3. Kesit alanı belirsizliği hesap tablosu

Sembol	Ölçümler	Belirsizlik sembolü	Değeri	Tip	Dağılım	Dağılım katsayısı	Hassasiyet katsayısı, c _i	u(xi)	Birimi
-	Numune Değeri	u _N	0,013	A	Normal	2	1	6,68E-03	mm ²
a ₀	Numune kalınlığı	u _{a0}	0,003	B	Dikdörtgen	√3	20,02	2,57E-03	mm ²
b ₀	Numune genişliği	u _{b0}	0,003	B	Dikdörtgen	√3	1,22	9,55E-06	mm ²
S ₀	Kesit alanı	u _{S0}	Toplam belirsizlik					9,62E-02	mm ²
		U _{S0}	Genişletilmiş Toplam belirsizlik, k=2					1,92E-01	mm ²

Tablo 4. Akma gerilmesi belirsizliği hesap tablosu

Sembol	Ölçümler	Belirsizlik sembolü	Değeri	Tip	Dağılım	Dağılım katsayısı	Hassasiyet katsayısı, c _i	u(xi)	Birimi
-	Numune Değeri	u _N	5,039	A	Normal	2	1	2,52E+00	MPa
F _{ReH}	Kuvvet	u _{FeH}	21,631	B	Normal	2	0,04	3,92E-01	MPa
S ₀	Kesit alanı	u _{S0}	0,192	B	Normal	2	-30,22	1,69E+01	MPa
R _{eH}	Akma Gerilmesi	u _{ReH}	Toplam belirsizlik					4,45E+00	MPa
		U _{ReH}	Genişletilmiş Toplam belirsizlik, k=2					8,91E+00	MPa

Tablo 5. Çekme gerilmesi belirsizliği hesap tablosu

Sembol	Ölçümler	Belirsizlik sembolü	Değeri	Tip	Dağılım	Dağılım katsayısı	Hassasiyet katsayısı, c_i	$u(x_i)$	Birimi
-	Numune Değeri	u_N	9,620	A	Normal	2	1	4,81E+00	MPa
F_{Rm}	Kuvvet	u_{FRm}	30,424	B	Normal	2	0,04	7,76E-01	MPa
S_0	Kesit alanı	u_{S0}	0,192	B	Normal	2	-42,50	3,35E+01	MPa
R_m	Çekme Gerilmesi	u_{Rm}	Toplam belirsizlik					6,25E+00	MPa
		U_{Rm}	Genişletilmiş Toplam belirsizlik, $k=2$					1,25E+01	MPa

Tablo 6. Yüzde uzama belirsizliği hesap tablosu

Sembol	Ölçümler	Belirsizlik sembolü	Değeri	Tip	Dağılım	Dağılım katsayısı	Hassasiyet katsayısı, c_i	$u(x_i)$	Birimi
-	Numune Değeri	u_N	0,477	A	Normal	2	1	2,39E-01	%
L_u	Kırılma sonrası kalıcı uzama	u_{Lu}	0,003	B	Dikdörtgen	$\sqrt{3}$	0,020	2,57E-09	%
L_0	İlk ölçüm boyu	u_{L0}	0,003	B	Dikdörtgen	$\sqrt{3}$	0,018	2,01E-09	%
A	Yüzde uzama	u_A	Toplam belirsizlik					4,89E-01	%
		U_A	Genişletilmiş Toplam belirsizlik, $k=2$					9,77E-01	%

Tablo 7. Yüzde kesit daralması belirsizliği hesap tablosu

Sembol	Ölçümler	Belirsizlik sembolü	Değeri	Tip	Dağılım	Dağılım katsayısı	Hassasiyet katsayısı, c_i	$u(x_i)$	Birimi
-	Numune Değeri	u_N	0,413	A	Normal	2	1	8,52E-02	%
S_u	Kırılma sonrası kesit daralması	u_{Su}	0,041	B	Dikdörtgen	$\sqrt{3}$	-0,04	1,59E-06	%
S_0	Kesit alanı	u_{S0}	0,192	B	Normal	2	0,03	2,28E-05	%
Z	Yüzde kesit daralması	u_Z	Toplam belirsizlik					2,92E-01	%
		U_Z	Genişletilmiş Toplam belirsizlik, $k=2$					5,84E-01	%

Tablo 4 teki hesaplamalar aşağıda özetlenmiştir.

u_{eH} = kuvvet sertifikasından gelen belirsizlik x ortalama akma gerilmesi kuvveti = $0.0012 \times 18025 = 21.631 \text{ N}$

u_{S0} = tablo 3 ten = 0.192 mm^2

Denklem 22 den $c_{feH} = 0.04 \text{ mm}^{-2}$

Denklem 23 den $c_{S0} = -18025/24.42^2 = -30.22 \text{ N/mm}^2$

Denklem 24'nin karekökünü almadan 2. ifadesinin dağılım katsayısına bölümü = $21.631^2 \times 0.04^2 / 2 = 3.92E-01 \text{ MPa}$

Denklem 24'nin karekökünü almadan 3. ifadesinin dağılım katsayısına bölümü = $0.192^2 \times -30.22^2 / 2 = 1.69E+01 \text{ MPa}$

Denklem 24'nin 1..2. ifadesi ile 3. ifadesinin toplamının karekökü = $\sqrt{1.\text{ifade} + 2.\text{ifade} + 3.\text{ifade}} = 4.45 \text{ MPa}$ ve 2 ile çarpılarak 8.91 MPa olarak genişletilmiş toplam belirsizliği bulunur.

Tablo 5 teki hesaplamaların detayları aşağıda özetlenmiştir.

u_{eH} = kuvvet sertifikasından gelen belirsizlik x ortalama çekme gerilmesi kuvveti = $0.0012 \times 25353 = 30.424$ N

u_{s0} = tablo 3 ten = 0.192 mm^2

Denklem 25 den $c_{feH} = 0.04 \text{ mm}^{-2}$

Denklem 26 dan $c_{s0} = -25353/24.42^2 = -42.50 \text{ N/mm}^2$

Denklem 27'nin karekökünü almadan 2. ifadesinin dağılım katsayısına bölümü = $30.424^2 \times 0.04^2 / 2 = 7.76\text{E-}01 \text{ MPa}$

Denklem 27'nin karekökünü almadan 3. ifadesinin dağılım katsayısına bölümü = $0.192^2 \times -42.50^2 / 2 = 3.35\text{E+}01 \text{ MPa}$

Denklem 27'nin 1..2. ifadesi ile 3. ifadesinin toplamının karekökü = $\sqrt{1.\text{ifade} + 2.\text{ifade} + 3.\text{ifade}} = 6.25 \text{ MPa}$ ve genişletilmiş toplam belirsizliği 2 ile çarpılarak 12.5 MPa olarak bulunur.

Tablo 6 daki hesaplamalar aşağıda özetlenmiştir.

u_{Lu} = kumpas çözünürlüğü/3 = $0.01/3 = 0.003 \text{ mm}$

u_{L0} = kumpas çözünürlüğü/3 = $0.01/3 = 0.003 \text{ mm}$

Denklem 28 den $c_{Lu} = 1/50 = 0.02 \text{ mm}^{-1}$

Denklem 29 dan $c_{L0} = 1/50 - (55.96-50)/50^2 = 0.018 \text{ mm}^{-1}$

Denklem 30'un karekökünü almadan 2. ifadesinin dağılım katsayısına bölümü = $0.003^2 \times 0.02^2 / \sqrt{3} = 2.57\text{E-}09 \%$

Denklem 30'un karekökünü almadan 3. ifadesinin dağılım katsayısına bölümü = $0.003^2 \times 0.018^2 / \sqrt{3} = 2.01\text{E-}09 \%$

Denklem 30'un 1..2. ifadesi ile 3. ifadesinin toplamının karekökü = $\sqrt{1.\text{ifade} + 2.\text{ifade} + 3.\text{ifade}} = 0.489 \%$ ve 2 ile çarpılarak 0.977 % olarak genişletilmiş toplam belirsizliği bulunur.

Tablo 7 deki hesaplamaların detayları aşağıda özetlenmiştir.

u_{Su} belirsizlik değeri Tablo 3 te verilen hesaplamalara benzer olarak verilen a_u , b_u ve S_u değerlerinden denklem 35ten hesaplanır. $u_{Su} = \sqrt{(15.98^2 + 0.003^2 / \sqrt{3}) + (0.974^2 + 0.003^2 / \sqrt{3})} = 0.041 \text{ mm}^2$

u_{s0} = tablo 3 ten = 0.192 mm^2

Denklem 38 den $c_{s0} = 19.50/24.42^2 = 0.03 \text{ mm}^{-2}$

Denklem 39 dan $c_{Su} = -1/24.42 = -0.04 \text{ mm}^{-2}$

Denklem 40'nin karekökünü almadan 2. ifadesinin dağılım katsayısına bölümü = $0.041^2 \times -0.04^2 / \sqrt{3} = 1.59\text{E-}06 \%$

Denklem 40'nin karekökünü almadan 3. ifadesinin dağılım katsayısına bölümü = $0.192^2 \times 0.03^2 / 2 = 2.28\text{E-}05 \%$

Denklem 40'nin 1..2. ifadesi ile 3. ifadesinin toplamının karekökü = $\sqrt{1.\text{ifade} + 2.\text{ifade} + 3.\text{ifade}} = 0.292 \%$ ve 2 ile çarpılarak 0.584 % olarak genişletilmiş toplam belirsizliği bulunur.

Çekme deneyi sonucunda edilen ortalama ölçüm sonuçları ve genişletilmiş belirsizlik değeri Tablo 8 de verilmiştir.

Tablo 8. Çekme deney sonuçları ve genişletilmiş belirsizlik değeri özet tablosu

Sembol	Parametre	Sonuç	Belirsizlik Değeri. (k=2)
R_{eH}	Akma Gerilmesi	738.02 MPa	$\pm 8.91 \text{ MPa}$
R_m	Çekme Gerilmesi	1038.02 MPa	$\pm 12.5 \text{ MPa}$
A	Yüzde uzama	11.6 %	$\pm 0.98\%$
Z	Yüzde kesit daralması	20.26 %	$\pm 0.58\%$

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elde edilen değerler incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Mekanik özelliklerin belirsizlik değerine etki eden en önemli parametre numune değerlerindeki saçılma olduğu görülmüştür. Bu saçılma, uygun test yöntemi, aynı özellikte hazırlanmış numune, minimum operatör etkisi ve uygun cihaz ile minimuma indirilebilir.
2. Akma ve çekme gerilmesi belirsizlik hesaplamalarında ana unsur kuvvet ölçme sisteminin belirsizliğidir. Bu belirsizlik değerini azaltmak ve daha güvenilir sonuçlar elde etmek için malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonu ilgili EN ISO 7500-1 [14] standardına göre tavsiye olarak yılda 1 periyodik olarak yaptırılmalıdır. Cihazın kuvvet sapma değerlerinin her yıl kontrol edilmelidir.
3. Numune uzama ölçümleri EN ISO 6892-1 standardına göre ekstansometre cihazı ile yapılmalıdır. Bu çalışmada uzama ölçümleri kırılma sonrası numune üzerinde kumpas ile belirlemeye göre hesaplama yapılmıştır. Ekstansometre cihazı numune üzerinden ve kumpasa göre daha yüksek çözünürlük ve hata değerine sahip olduğundan belirsizlik değerinin düşürülmesinde önemli katkı sağlayacaktır. Ekstansometre cihazın kalibrasyonu da ilgili standard EN ISO 9513 [15] uygun olarak yılda 1 defa yapılması tavsiye edilmektedir.

Bu çalışma ile çekme deneyinde belirsizlik değerlerinin hesabı açıklanmış ve hesapta etkili parametreler gözlenmiştir. Kaliteli ve homojen deney sonuçlarına ulaşmak için ilgili standarda uygun test yöntemi, düzenli kalibre edilmiş ekipman kullanımı, iyi hazırlanmış deney numuneleri belirsizlik değerini önemli ölçüde düşürecektir. Ancak test cihazını kullanan operatörlerinde belirli bir eğitim ile test üzerinde etki edebilecek parametrelerinin minimuma indirilmesi sağlanmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1]. Adams T.M., “Guide for Estimation of Measurement Uncertainty in Testing”, A2LA, 2002
- [2]. Aydemir, B., Çal, B., 5th International Quality Conference konferansı dahilinde "5th International Quality Conference" bildiri kitapçığındaki "Quality of material tensile test", 331-336 pp., Kragujevac, Dubrovnik, May 20th 2011
- [3]. Roebben G., Linsinger T., Lamberty A. and Emons H., “Metrological traceability of the measured values of properties of engineering materials”, Metrologia 47, S23–S31, 2010
- [4]. Silva L.R.O., “Evaluation of the uncertainty of measurement of mechanical properties”, Simposio de Metrologia 2004
- [5]. TS EN ISO 6892-1, Metalik malzemeler - Çekme deneyi - Bölüm 1: Oda sıcaklığında deney metodu, 2011
- [6]. EN ISO 6892-1, “Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature”, 2016
- [7]. TS EN ISO 527-1, Plastikler-Çekme özelliklerinin tayini-Bölüm 1: Genel prensipler, 2012
- [8]. Gabauer, W., The Determination of Uncertainties in Tensile Testing, UNCERT COP 07: 2000
- [9]. GUM, JCGM 100, “Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement”, 2008
- [10]. ISO/IEC Guide 98, “Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)”, 1993
- [11]. ISO/IEC Guide 99, “International vocabulary of metrology -- Basic and general concepts and associated terms (VIM)”, 2007
- [12]. VIM, JCGM 200, “International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)”, 2008
- [13]. Aydemir, B. “Metalik Malzemelerin Çekme Deney Standardı EN ISO 6892-1’in Getirdiği Değişiklikler” Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2009, 6(1) 1-9

- [14]. EN ISO 7500-1, “Metallic materials -Verification of static uniaxial testing machines - Part 1: Tension/compression testing machines - Verification and calibration of the force-measuring system”, 2015
- [15]. EN ISO 9513, “Metallic materials – Calibration of extensometers used in uniaxial testing”, 2012