

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/335082798>

Çekme Deneyinde Elastisite Modülü Hesap Yöntemleri ve Hata Kaynakları

Conference Paper · April 2019

CITATIONS
0

READS
4,460

3 authors, including:



Bulent Aydemir

The Scientific & Technological Research Council of Turkey

69 PUBLICATIONS 259 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



ortodonti, orthodontic [View project](#)



Tensile testing [View project](#)

Çekme Deneyinde Elastisite Modülü Hesap Yöntemleri ve Hata Kaynakları

Bülent Aydemir¹, Burak Samet Elmas², Esra Ayan³

¹TÜBİTAK UME, KOCAELİ, TÜRKİYE; email: bulent.aydemir@tubitak.gov.tr

²Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, KOCAELİ, TÜRKİYE; email: buraksametelmas@gmail.com

³Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, KOCAELİ, TÜRKİYE; email: ayanesra13@gmail.com

Özet

Elastisite, Young veya elastiklik modülü; malzemenin şekil değişimine karşı direncini nitelendiren yapısal bir özelliktir. Malzemenin rijitliğinin ölçüsü olarak da kabul edilmektedir. Mühendislik çalışmalarında elastisite modülünün farklı ölçüm ve hesap yöntemleri mevcuttur. Literatürde gerilme-birim uzama eğrisi olarak da bilinen çekme deneyi, statik elastisite modülü ölçüm yöntemlerinden olup yaygın olarak kullanılan bir metottür. Çekme deneyi metoduna göre elastisite modülü matematiksel olarak gerilmenin birim uzamaya oranlanması ile elde edilir. Deney verilerinin kullanımına göre farklı hesap yöntemleri mevcuttur. Kullanılan hesap yöntemine göre sonuç değişebilmektedir. Bununla birlikte ölçüm yöntemi, gerekliliklerin sağlanma durumu ve muhtemel hata kaynakları da sonuçlar üzerinde etkili olmaktadır. Bu çalışmada malzemelerin elastisite modülünün belirlenmesinde en çok tercih edilen çekme deneyi metodunun farklı hesaplama yöntemleri, gereklilikleri ve hata kaynakları incelenmiştir. Sonuç olarak çekme deneyi metodu vasıtasıyla elastisite modülü değerinin tespitindeki farklılıkların sebepleri ve değerin doğru olarak elde edilebilmesi için gerekli şartlar verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elastisite modülü, Gerilme-birim uzama eğrisi, Çekme deneyi, Elastisite modülü ölçüm yöntemleri, Elastisite modülü hesaplama yöntemleri.

Elastic Modulus Measurement Methods and Error Sources in Tensile Testing

Abstract

Modulus of elasticity, Young or elastic modulus; is an intrinsic property that characterizes the resistance of the material to deformation. It is also accepted as a measure of the rigidity of the material. There are different measurement and calculation methods of elastic modulus in engineering studies. Also known as stress-per units of strain curve in the literature, the tensile testing is one of the commonly used methods for measuring the static elastic modulus. According to the tensile testing method, the elastic modulus is obtained mathematically by proportioning the stress to unit elongation. Different calculation methods are available depending on the use of the test data. The result can be changed according to the calculation method used. However, the method of measurement, the availability of the requirements and possible sources of error also affect the results. In this study, different calculation methods, requirements and possible sources of error of the most preferred tensile test method in determining the elastic modulus of materials were investigated. As a result, the reasons for the differences in the value of the elastic modulus through the tensile testing method and the necessary conditions for the accuracy of the value are given.

Keywords: Elastic modulus, Stress-strain curve, Tensile test, Elastic modulus measurement methods, Elastic modulus calculation methods.

1. GİRİŞ

Elastisite modülü, mühendislik tasarımları ve malzeme geliştirme çalışmaları için oldukça önemli bir parametre olup

malzemelerin rijitliğini ölçülendiren yapısal bir özelliktir. Diğer bir deyişle malzemenin şekil değiştirmeye karşı koyabilme kapasitesini gösterir. Elastisite modülünün matematiksel tanımı ise malzemeye uygulanan gerilme ile uygulanan

*Corresponding author
Email: bulent.aydemir@tubitak.gov.tr

gerilmeden dolayı meydana gelen birim uzama miktarının oranıdır. Elastisite modülü, Thomas Young isimli bilim insanının bu konudaki yapmış olduğu çalışmalara ithafen literatürde Young's Modülü olarak da geçmektedir. Ancak bu çalışmada bütünlüğün sağlanması için elastisite modülü olarak ifade edilmiştir.

Yük altındaki basit elemanların gerilmelerinin, karmaşık yapılarda momentlerin ve sehimler için elastisite modülüne ihtiyaç vardır. Tasarım çalışmaları, gerilme-birim uzama eğrisinden temel ve güvenilir denklemler elde edilmesi, sonlu elemanlar yöntemi ve modelleme hesaplamaları için elastisite modülünün anlamının doğru bilinmesi çok önemlidir. Ancak elastisite modülünün hesabı için kullanılan metotlar açık olarak ifade edilmemiştir. Bu sebeple elastisite modülü ölçümünde malzeme özelliklerine, modelleme verilerine ve kullanıcı talebine göre farklılıklar görülebilmektedir.

Metaller için mevcut olan ISO 6892-1 ve ASTM E8 gibi çekme standartları, gerilme-birim uzama eğrisinin elastik bölgesini genellikle şu şekilde tarif eder: Güvenilir gerilme değerlerinin hesaplanabilmesi için gerilme-birim uzama eğrisi ya da kuvvet-birim uzama eğrisi doğru incelenmelidir. Ancak yine de bu incelemelerde 2016 yılına kadar standartlarda elastisite modülü için geçerli bir tanıma yer verilmemiştir. ISO 6892-1 standardının 2016 yılında güncellenen son versiyonunun Ek-G kısmında ise elastisite modülü için ayrı bir bölüm oluşturulmuş ve gerekli tanımlamalar yapılmıştır. ASTM E111 standardında da elastisite modülü, tanjant modülü ve chord modülü ile ilgili tanımlamalar yapılmıştır [1-3].

Elastisite modülü, elastik yükleme sırasında gerilmenin birim uzamaya oranı olarak tanımlanabilir. Gerilme birim alan başına düşen kuvvettir. Birim uzama ise numunedeki uzunluk değişiminin numunenin ilk boyuna oranıdır. Gerek gerilme gerek birim uzama Uluslararası Birim Sistemi [SI (International System of Units)] temel büyüklüklerinden kütle (kilogram) ve uzunluk (metre) kullanılması ile izlenebilir durumdadır. Bu durum amaca uygun deney ekipmanlarının kullanımını ve bu ekipmanların uygun şekilde kalibre edilmesini önemli kılmıştır.

Basma veya çekme gerilmesi altındaki deney malzemesinin statik elastisite modülü, gerilme-birim uzama eğrisinin eğimi ile belirlenir. Ancak çoğu malzemenin gerilme-birim uzama eğrisinin doğrusal olmayan karakterinden dolayı elastisite modülünün bulunmasında zorluklar yaşanmaktadır. Bundan kaynaklı olarak elastisite modülünün hesabı için farklı tanımlar geliştirilmiştir.

Bu çalışmada, literatürdeki elastisite modülü ölçüm yöntemlerine değinilmiş ve bu yöntemlerden statik elastisite modülü ölçüm yöntemleri grubunda yer alan çekme deneyi metodu ele alınmıştır. Çekme deneyi metodunun uygulanması, metottan elde edilen verilerden elastisite modülü için hesap yöntemleri, metodun uygulanmasındaki gereklilikler ve muhtemel hata kaynakları incelenmiştir.

2. ELASTİSİTE MODÜLÜ ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Elastisite modülünün belirlenmesinde literatürde farklı metotlar tanımlanmıştır [4].

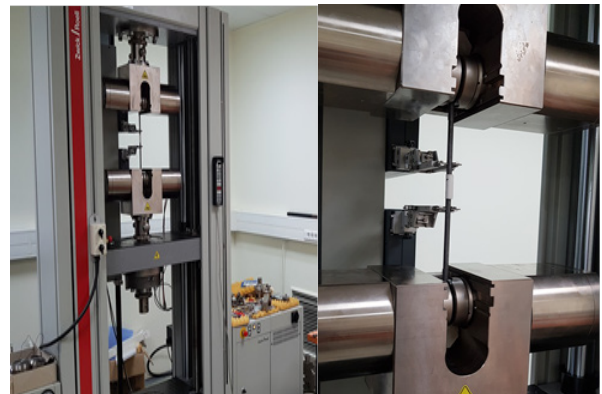
- a) statik elastisite modülü ölçüm yöntemleri
 - çekme (veya basma) deneyi metodu
 - eğme deneyi metodu
- b) dinamik elastisite modülü ölçüm yöntemleri
 - rezonans frekansı (darbeli uyarma) metodu
 - rezonans frekansı sönümlenme analizi metodu
 - ultrasonik (ultra ses) metodu

Bu çalışmada statik elastisite modülü ölçüm yöntemlerinden olan çekme deneyinden elde edilen gerilme-birim uzama eğrisine göre elastisite modülü hesap yöntemleri, elastisite modülünün doğru belirlenebilmesi için gereklilikler ve elastisite modülünün belirlenmesinde muhtemel hata kaynakları ele alınmıştır.

3. ÇEKME DENEYİ SONUÇLARINDAN ELASTİSİTE MODÜLÜ HESAP YÖNTEMLERİ

Çekme deneyi (test), çekme deneyi makinesi ve numunedan oluşan bir düzendir. Çekme deneyi numunesi, mekanik özellikleri kontrol edilecek malzemeden parça alınarak ilgili standarda uygun şekilde belirli bir geometride deneye hazır hale getirilen örnektir. Çekme deneyi makinesi, aşağı veya yukarı yönde hareket edebilen çenelerinin arasına bağlanan numuneyi kopana kadar sabit hız ile çekebilecek cihazdır. İlave olarak kullanılan yazılım, deney esnasında uygulanan kuvveti ve uzama miktarını aynı anda kaydeder. Şekil 1'de çekme deneyi makinesi ve deney sırasında çenelere bağlı halde bulunan bir numune gösterilmektedir.

Elastisite modülü ile birlikte akma, çekme, kopma mukavemeti ve akma, çekme, kopma uzama değerleri vb. birçok parametre çekme deneyi sonucunda elde edilir. Tüm bu sonuçlar ulusal ve uluslararası standartlarla tanımlanmış bir yapıdadır [5].

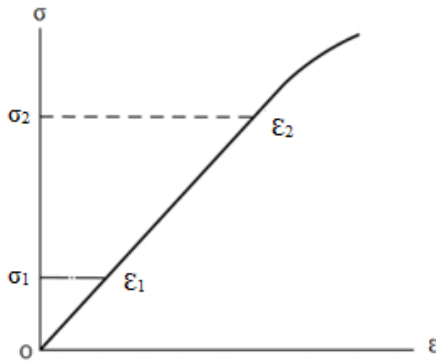


Şekil 1: TÜBİTAK UME Malzeme Test Makinesi; çekme deneyi sırasında çenelere bağlı numune

Elastisite modülü, çekme deneyinden elde edilen gerilme-birim uzama eğrisinin lineer elastik bölgesinden (1) numaralı bağıntı ile hesaplanır:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (1)$$

Burada, E elastisite modülü, $\Delta\sigma$ gerilmedeki değişim ve $\Delta\varepsilon$ uzamadaki değişimdir.



Şekil 2: Gerilme-birim uzama eğrisi

Elastisite modülünün ölçümü için grafik teknikleri halen kullanılmaktadır. Ancak günümüzde bilgisayar tabanlı sistemler de tercih edilmektedir. Literatürde ve ticari test makinelerinin yazılımlarında elastisite modülünün hesaplanması için birçok analiz yöntemi mevcuttur. Bunlardan bazıları şunlardır [4]:

- teğet (tanjant) modülü
- sekant modülü
- başlangıç teğeti modülü
- chord (kiriş) modülü
- regresyon

Bu çalışmada en yaygın olarak kullanılan bu beş yöntem ele alınmış olmakla birlikte literatürde farklı yöntemler de mevcuttur.

Tüm bu metotlar, çekme deneyi sonrasında elde edilen gerilme-birim uzama eğrisi kullanılarak akma gerilmesinin altında elastisite modülünün belirlenmesi için kullanılır. Bu metotlarda kullanıcı tarafından tanımlanabilen değerlerle elastisite modülü hesabı mümkündür. Malzeme deney makinesi üreticilerinin çoğu, yazılım programlarında elastisite modülü hesabı için yukarıda verilen yaklaşımları kullanır. Hesap yöntemlerinin detayları alt başlıklar halinde verilmiştir.

3.1 Teğet (Tanjant) Modülü

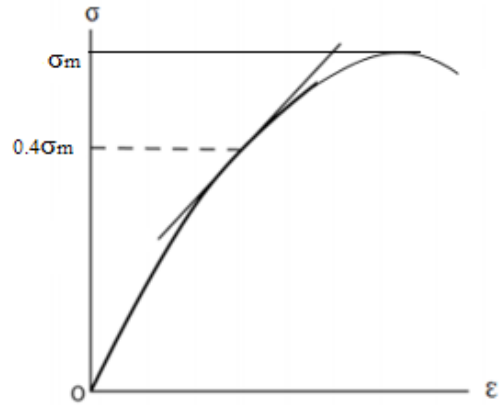
Teğet (tanjant) modülü, belirtilen herhangi bir gerilme ya da birim uzama değeri için gerilme-birim uzama eğrisinin eğimidir. Teğet modülü, gerilme-birim uzama eğrisinin elastik bölgesinde elastisite modülüne eş değerdir ($E = \tan\alpha$).

Elastisite modülü, bu yöntemle göre (2) numaralı bağıntı ile hesaplanır [6]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

Burada E elastisite modülü, σ gerilme değeri ve ε uzama değeridir.

Şekil 3'te görüldüğü gibi bazı malzemeler için bu teğet noktası, yaklaşık olarak eğrinin $0.4\sigma_m$ çekme gerilmesine karşılık gelen noktası esas alınarak çizilebilir [6].



Şekil 3: Gerilme-birim uzama eğrisinde tanjant modülü

Teğet modülü, elastik bölgenin ötesinde (plastik bölgede) malzemelerin davranışının açıklanmasında kullanışlıdır. Ancak bilindiği üzere bir malzemenin plastik deformasyonunda elastik deformasyonda olduğu gibi gerilme ve birim uzama arasında doğrusal bir ilişki yoktur [7].

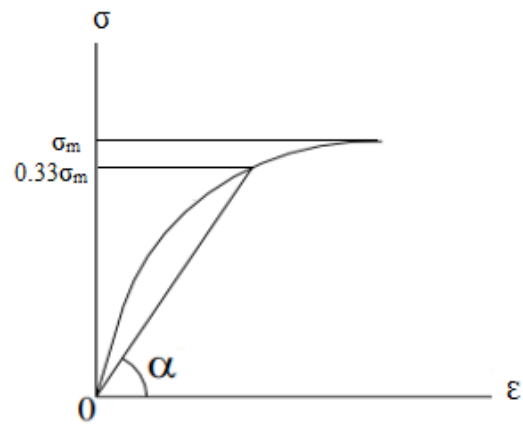
3.2 Sekant Modülü

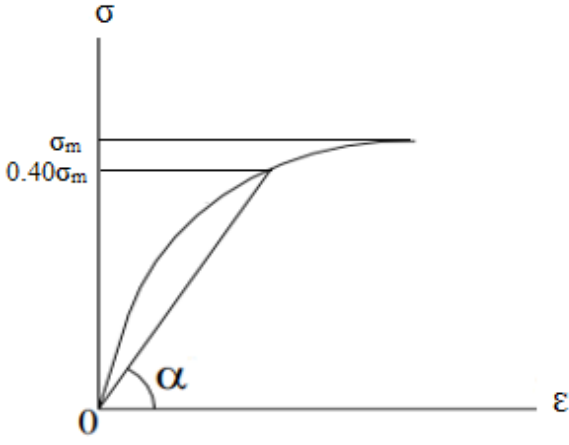
Sekant modülü, gerilme-uzama eğrisinin herhangi bir noktası ile koordinat merkezini birleştiren doğrunun eğimidir.

Elastisite modülü, bu yöntemle göre (3) numaralı bağıntı ile hesaplanır:

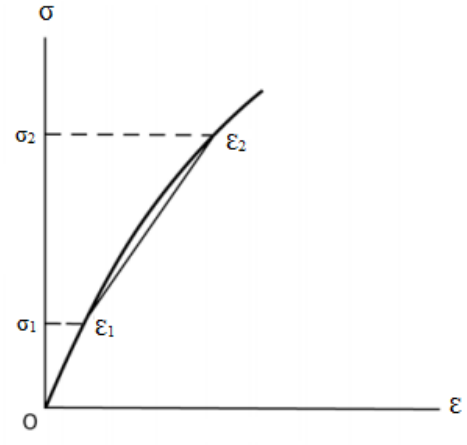
$$E = \frac{1}{\sec\alpha} \quad (3)$$

Gerilme değerine bağlı olarak kesişme yeri değişeceği için E farklı değerler alabilir. Bu nedenle sekant modülünün hesaplandığı gerilme değeri belirtilmelidir. Gerilme değeri, çekme gerilmesinin (σ_m) belirli bir oranı olarak seçilir. Bu oran bazı malzemeler için İngiliz standardında çekme gerilmesinin 0.33 katı, Amerikan standardında ise çekme gerilmesinin 0.40 katı olarak öngörülmüştür [6].





Şekil 4: Gerilme-birim uzama eğrisinde sekant modülü



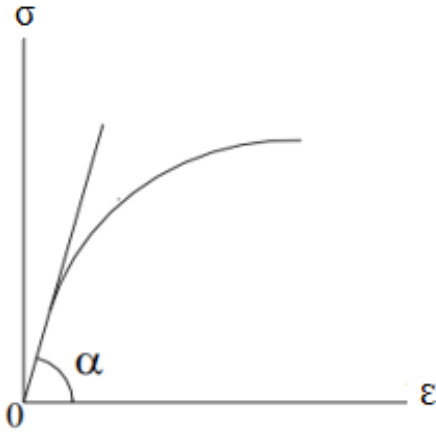
Şekil 6: Gerilme-birim uzama eğrisinde Chord modülü

3.3 Başlangıç Teğeti Modülü

Başlangıç teğeti modülü, çekme deneyi sonrasında elde edilen gerilme-birim uzama eğrisine koordinat sisteminin başlangıç noktasından atılan teğetin eğimidir [7].

Elastisite modülü, bu yöntemle göre (4) numaralı bağıntı ile hesaplanır:

$$E = \tan \alpha \quad (4)$$



Şekil 5: Gerilme-birim uzama eğrisinde başlangıç teğeti modülü

3.4 Chord (Kiriş) Modülü

Chord modülü, malzemenin akma gerilmesi altındaki gerilme-birim uzama eğrisinde belirtilen herhangi iki nokta arasında çizilen kirişin eğimidir. Bazen deney sırasında, gerilme-birim uzama eğrisinin başlangıcı içbükey olarak gözlenir. Böyle durumlarda gerilme-birim uzama eğrisi üzerindeki iki nokta arasında çizilmiş doğrunun eğimi chord modülünü verir [3].

Elastisite modülü, bu yöntemle göre (5) numaralı bağıntı ile hesaplanır:

$$E = \tan \alpha = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (5)$$

Burada E elastisite modülü, $\Delta \sigma$ gerilme değişimi ve $\Delta \epsilon$ uzamadaki değişimdir.

3.5 Regresyon

Regresyon yönteminde elastik bölgede belirlenen bir eğri ve en küçük kareler yöntemi ile elastisite modülü hesabı yapılır. Bu yöntemin kullanımı uygun bilgisayar yazılımının mevcut olup olmamasına bağlıdır. Uzama üzerinde gerilmenin doğrusal regresyonu alt gerilme değeri R_1 ve üst gerilme değeri R_2 arasında yapılmalıdır (alternatif olarak, uzama değerleri e_1 ve e_2 kullanılabilir).

Elastisite modülü, bu yöntemle göre ISO 6892-1 standardında (6) numaralı bağıntı ile ifade edilmiştir:

$$R = \frac{E \cdot e}{100 \%} + b \quad (6)$$

Burada R megapascal cinsinden gerilme, E elastisite modülü, e yüzde cinsinden uzama ve b megapascal cinsinden gerilme uzamasıdır.

Bu şekilde belirlenen düz doğru gerilme-birim uzama grafiğinin üzerine çizilmelidir ve grafiğin ilk bölümü bu amaçla büyütülmelidir. Düz doğru ve eğri arasındaki eşleşme görsel olarak değerlendirilmelidir. 1'e (>0,999 5) yakın olması gereken R^2 korelasyon katsayısının dikkate alınması faydalı olabilir. Ayrıca dikkate alınan veri noktalarının sayısı 50'den az olmalıdır. Bir diğer yardımcı araç bağıl standart sapmanın hesaplanmasıdır. Bağıl standart sapma, diğer istatistiksel veriler ile birlikte R^2 korelasyon katsayısını ve dikkate alınan veri noktalarının sayısını göz önünde bulundurur. %1'den az olması tavsiye edilir. Alt ve üst değerlerin yerini değiştirerek ve buna göre formülü tekrar hesaplayarak en iyi uyumu gösteren hat (elastisite modülü) eğriye uyarlanabilir. Regresyon hesaplamasında başlangıç noktası olarak ISO 6892-1 standardında alt gerilme değeri (R_1), R_{eH} veya $R_{p0.2}$ 'nin ≈ 10 'u; üst gerilme değeri (R_2), R_{eH} veya $R_{p0.2}$ 'nin ≈ 40 'i olarak tavsiye edilir [1].

4. ELASTİSİTE MODÜLÜNÜN DOĞRU BELİRLENEBİLMESİ İÇİN GEREKLİLİKLER

Uluslararası alanda elastisite modülünün doğru belirlenebilmesi için çeşitli tanımlamalar yapılmıştır. 2016 yılında yayınlanan metalik malzemeler çekme deney standardı ISO 6892-1'e de EK-G elastisite modülü kısmı eklenmiştir. 2017

yılında yayınlanan ASTM E111 standardı da elastisite modülü belirlenmesinde dikkate alınacak parametreleri tanımlamıştır. Bu standartlara göre elastisite modülünün doğru olarak belirlenebilmesi için şartlar şöyledir:

Cihazla ilgili parametreler:

1. Deney cihazının doğruluğu:

Deney cihazının kuvvet ölçme sistemi elastik modül ölçümü için gerekli aralıkta ISO 7500-1 standardına göre Sınıf 1'e uygun olmalıdır. Yine deney cihazının ekstansometre sistemi ilgili aralıkta ISO 9513 standardına göre yapılan kalibrasyonunda Sınıf 0,5'e uygun olmalıdır [9,10].

2. Deney cihazının çözünürlüğü:

Deney sisteminin çözünürlüğü, değerlendirme aralığında en az 50 farklı ayrı ölçülen değeri elde etmek için yeterli olmalıdır.

3. İlgili deney parçası boyutlarının belirlenmesi için kullanılan ölçme cihazları:

İlk kesit alanının tayini için kullanılan tüm ölçme cihazları, Ulusal Ölçme Sistemine göre izlenebilirliğe sahip uygun standartlara göre kalibre edilmelidir.

4. Deney cihazının numuneyi kavrama ve eksenel hizalama durumu:

Kavrama ve hizalama yöntemi elastisite modülünün belirlenmesi için önemlidir [1].

Deney parçaları ile ilgili parametreler:

1. Deney parçası:

Deney parçası düz olmalıdır. Deney parçasının yüzeyi, deney sonucunu etkilemeyecek durumda olmalıdır.

2. İlk kesit alanının tayini:

İlk kesit alanının belirlenirken her bir boyut için en az üç ölçüm yapılmalıdır. İlk kesit alanı S_0 , ortalama kesit alanıdır ve uygun boyutlardan alınan ölçümlerle hesaplanmalıdır. İlk kesit alanı % $\pm 0,5$ veya daha iyi bir doğruluk ile belirlenmelidir [1].

Deney şartları ile ilgili parametreler:

1. Kuvvet:

Sıfır kuvvet noktasının ayarlanması yapılmalıdır.

2. Deney hızı:

Çekme deneyinde belirlenen diğer özellikler ile kıyaslandığında elastisite modülü deney hızına karşı daha az duyarlıdır. Deney hızı, analiz için gerekli sayıda veri noktasının elde edilmesi için düşük olabilir.

3. Veri alma sıklığı:

Veri alma frekansı, ilgili aralıkta (R_1 , R_2) en az 50 ölçülen değer elde edilecek şekilde seçilmelidir. Bunun parametreye yardımcı olması için elastisite modülü belirlenirken data sıklığı frekansının (f) belirlenmesinde (7) numaralı bağıntı önerilmiştir:

$$f = \frac{N \cdot E \cdot \dot{\epsilon}}{R_2 - R_1} \quad (7)$$

Burada, N ölçülen değer sayısı, E elastisite modülü, $\dot{\epsilon}$ deney hızı, R_1 ve R_2 ise elastisite modülünün belirlendiği gerilme değerleridir. Örneğin, çelik için $R_1 = 10$ MPa, $R_2 = 50$ MPa ve deney hızı $0,00007 \text{ s}^{-1}$ ise data sıklığı frekansı 18 veya daha büyük olmalıdır.

4. Deney prosedürü:

Deney parçası modülün belirlenmesi için birden fazla kez kullanılacaksa uygulanan kuvvet, beklenen R_{eH} veya $R_{p0,2}$ 'nin %50'sine karşılık gelen değerden daha fazla olmamalıdır [7].

Değerlendirme ile ilgili parametreler:

1. Ekstansometre sinyallerinin ortalamasının alınması:

Deney parçasının her bir tarafına (yüzeyine) ait uzama verisi ölçülebilir ve iki eğrinin eğiminde farklılıklar gözlemlenebilir. Bu uzamaların ortalaması alınarak elastisite modülü hesaplanır. Bu farklılıklar, deney cihazının eksenelliğinin iyileştirilmesi ile azaltılabilir (eğilimin azaltılması).

2. Elastisite modülünün hesaplanması:

Kayıtlı verilerin değerlendirilmesi için yöntem, ISO 6892-1 standardına göre şu şekilde tavsiye edilir. Yöntem, uygun olan durumlarda değiştirilmiş parametrelerin yeniden hesaplanması ile birlikte en iyi uyumu gösteren hat ve gerçek ölçüm okumalarına ait eğri arasındaki eşleşmenin görsel olarak değerlendirilmesi dâhil elastik aralık (en küçük kareler yöntemi) için en iyi uyumu gösteren hattın sayısal olarak belirlenmesine dayalıdır. Bu sebeple, asıl olarak X-Y grafiğinin manüel analizine karşılık gelir. Bu yöntemin kullanımı uygun bilgisayar yazılımının mevcut olup olmamasına bağlıdır [7].

Ayrıca ASTM E111 standardında da elastisite modülünün hesabı için 2 metot tanımlanmıştır. Bunlar:

1. Grafik Veri Yöntemi:

Grafik olarak gerilme-birim uzama grafiği elde edilirse elastisite modülü, akma gerilmesinin altındaki kuvvetler için çizginin eğiminin belirlenmesiyle elde edilir.

2. Sayısal Veri Yöntemi:

Eğer gerilmeye karşı uzama verileri sayısal biçimde elde edilirse elastisite modülü, en küçük kareler yöntemiyle hesaplanır. Tercih edilen yöntem, çekme eğrisinin ilk kısmını (akma gerilmesinin altında) incelemek ve en küçük kareler regresyonu kullanılarak,

operatör müdahalesi olmaksızın elastisite modülü hattı verilerinin otomatik olarak optimize edilmesidir [2].

Her iki yöntem için ASTM E111 standardında hesaplamalar detaylı olarak tanımlanmıştır.

5. ELASTİSİTE MODÜLÜNÜN BELİRLENMESİNDE MUHTEMEL HATA KAYNAKLARI

Elastisite modülü, elastik bölgedeki gerilme ve uzama değerlerinden belirlenmektedir. Bunların belirlenmesinde oluşabilecek hatalar, doğrudan elastisite modülü hesaplamalarında hataya neden olabilmektedir. Bu parametreler alt başlıklarda detaylandırılmıştır.

5.1 Kuvvet Ölçme Cihazları Sorunları

Gerilme değerinin belirlenmesinde kuvvet ölçme cihazının verilerinden yararlanır. Kuvvet ölçme cihazı ISO 7500-1 standardına göre kalibre edilmiş olmalıdır. Bu standarda göre cihazlar; hata, tekrarlanabilirlik ve çözünürlük değerleri doğrultusunda 0,5 - 1 - 2 ve 3 şeklinde sınıflandırılır.

Elastisite modülü ölçümü için ISO 6892-1 standardı, 1 veya daha iyi sınıfa sahip bir cihazın kullanılabilmesini belirtmiştir. Daha kötü sınıfa sahip bir kuvvet ölçme cihazı ile elastisite modülünün belirlenmesi düşük kuvvet veya gerilme değerlerinde önemli hatalara neden olabilir [1].

5.2 Kuvvet Aralığı Sorunları

Uygulanan kuvvetin etkisi ile numunede oluşacak gerilme değerleri, gerilme-birim uzama eğrisini ve bu eğriden elde edilecek elastisite modülünü doğrudan etkilemektedir. Bu durum uygulanan kuvvetin doğru ve hassas olarak ölçülmesini gerekli kılmaktadır. Kuvvet aralığının hassas olarak ölçülmesiyle birlikte kuvvet aralığının uygun olması ve çok sayıda veri alınması elastisite modülü değerinin daha doğru ve güvenilir olmasını sağlayacaktır.

5.3 Ekstansometre Cihazları Sorunları

Çekme deneyinde uzamayı ölçmek için çok çeşitli yöntemler mevcuttur. Ancak standartların çoğu sadece ekstansometrelerin kullanımını ele alır. Uzama ölçerler de kullanılmaktadır. Fakat elastisite modülü belirlenmesinde ekstansometreler daha iyi bir çözüm sunar.

Ekstansometreler çeşitli tasarımlara ve farklı ölçme kapasitelerine sahiptir [11]. Tek taraflı veya ortalama (çift taraflı) modelleri bulunmaktadır. Ekstansometre cihazlarının kalibrasyonları EN ISO 9513 standardına göre yapılır. Bu standarda göre cihazların hata ve çözünürlük değerlerine göre 0,2 – 0,5 – 1 ve 2 şeklinde sınıflandırılması mümkündür.

Yüksek hassasiyetli ekstansometrenin kalibre edilmesi ve kurulması ile ilgili zorluklardan dolayı deney sırasında uzamayı ölçmek için deney parçasının her bir tarafına dirençli uzama ölçerler (strain gage) bağlanması da bir alternatiftir. Bununla birlikte doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmek için birtakım bilgiler göz önünde bulundurulmalıdır:

- Ekstansometre, hassas bir alettir ve kurulumu sadece uygun niteliklere sahip personeller tarafından yapılmalıdır.
- Çekme deneyinde yüksek uzama çözünürlüğünde ve tanımlı uzama aralığında doğruluğu yüksek bir uzama ölçer seçilmelidir.
- Doğru bir gösterge sistemi kullanılmalıdır.
- Ekstansometre cihazlarının kalibrasyonu, deneyde kullanılan uzama aralığında yaptırılmalıdır.

Elastisite modülü ölçümü için ISO 6892-1 standardı, 0,5 veya daha iyi sınıfa sahip bir cihazın kullanılabilmesini belirtmiştir. Daha kötü sınıfa sahip bir ekstansometre kullanılarak veya ekstansometre kullanılmadan elastisite modülünün belirlenmesi, düşük uzamalarda önemli hatalara neden olabilir. Bu 25 mm'lik bir ölçü boyu uzunluğu, sınıf 1 ekstansometre ve % 0,1 uzama için elastisite modülündeki mutlak hatanın \pm %12'ye kadar yüksek bir hataya sebep olabileceği anlamına gelir [4].

5.4 Uzama Aralığı Sorunları

Çekme deneyinde birim uzamayı ölçmek için kullanılan yöntem ve cihazlara ek olarak seçilen birim uzama aralığı da oluşturulacak gerilme-birim uzama eğrisini etkilemektedir. Uzama aralığının hassas olarak ölçülmesiyle birlikte uzama aralığının uygun olması ve çok sayıda veri alınması elastisite modülü değerinin doğru, güvenilir ve hatasının az olmasını sağlayacaktır.

5.5 Eksenel Hizalama ve Numune Tutma Sorunları

Deney parçasının çekme makinesi tarafından uygun eksenel tutulmaması veya makinenin eksenel hizalamasında sorunların olması elastisite modülü için saçılmalara ve doğruluğunda değişikliklere neden olur. Deney makinesi ve ekipmanların iyi hizalanması sağlanarak etkiyi en aza indirmek için önlemler alınmalıdır. Deney makinesi hizalaması için TS EN ISO 6892-1 ve ASTM E8 standartlarında genel kurallar verilmiştir. ASTM E 111 standardı deney parçasının karşılıklı taraflarındaki gerilmelerin %3'ten daha büyük olmaması gerektiğini belirtir ki bu da oldukça zordur.

Birçok durumda deney parçasının çenelere yerleştirilmesiyle ilgili olarak gerilme-birim uzama eğrisinin ilk kısmında doğrusal oluşmayabilir. Bunu önlemek için deneyden önce numuneye küçük bir ön yüklemeye uygulanabilir veya mevcut standartlarda izin verilen bir dizi tekrarlı yüklemeye-boşaltma testi yapılarak sorun çözülebilir.

Eksenel bozukluk, özel hizalama ekipmanlarının kullanımı ve doğru imal edilmiş numunelerin kullanımı ile azaltılabilir ancak tamamen ortadan kaldırmak zordur. Deney makinesi kurulumu sonrasında ASTM E1012 standardında tarif edilen belgeli bir 'referans' numune kullanılarak doğrulanabilir ve sınıflandırılabilir. Sistemde farklı bağlantıların kullanılması durumunda kavramada veya deney parçasının tasarımında değişiklikler varsa bu işlem tekrarlanmalıdır [12].

6. SONUÇLAR

Çekme deneyinden doğru ve güvenilir elastisite modülü elde edilebilmesi için TS EN ISO 6892-1, ASTM E8 ve ASTM E111 standartlarına son güncellemeler ile yeni tanımlamalar ilave edilmiştir. Gerilme birim uzama eğrisinin ilk bölümü kullanılarak hesaplanan elastisite modülü değeri; verilerin kalitesinden, deney cihazlarının hatalarından ve belirlenen hesaplama yöntemlerinden doğrudan etkilenir.

Sonuç olarak çekme deneyi ile doğru elastisite modülü değeri belirlenebilmesi için dikkat edilmesi gereken hususlar şunlardır:

- ISO 6892-1 standardına göre elastisite modülü ölçümü için 0,5 veya daha iyi sınıfa sahip bir ekstansometre cihazı kullanılmalıdır.
- Analiz için yeterli miktarda veri ve örnekleme oranları (veri alma sıklığı) seçilmelidir. Gerilme-birim uzama verilerinin bilgisayar tabanlı bir toplama sistemi kullanılarak kaydedilmesi ve her % 0,1'lik uzama artışı için en az 100 veri noktasının örneklenmesi tavsiye edilir [1]. Ayrıca ISO 6892-1 standardında veri alma sıklığını belirleyebilmek için gerekli formül tanımlanmıştır.
- Deney sistemi ve ölçüm ekipmanı Uluslararası Birim Sistemi [SI (System of Units)] sistemine göre izlenebilir olmalıdır. Kuvvet ve uzama sensörleri kalibrasyonlu olmalıdır.
- İncelenen hata kaynaklarından uzama aralığı, deney hızı, eksenel hizalama bozukluğu, veri analiz prosedürleri, deney cihazları ve deney koşulları ile ilgili gereklilikler yerine getirilerek deney gerçekleştirilmelidir.
- Deney parçasının yerleştirilmesinde gerek eksenel bozukluğu gerek deney parçasında oluşabilecek sehim azaltmak için geliştirilmiş hizalama yöntemleri ve örnek geometriler kullanılabilir.
- Kullanılan veri analizi teknikleri dikkatlice yorumlanmalıdır. Veri analizi için uygun yazılımlar kullanılmalıdır. Minimum operatör müdahalesiyle verileri otomatik olarak yazabilen yazılımlar, bu analizler için ideal çözüm sunmaktadır.

Bu çalışmada çekme deneyi metodundan elde edilen gerilme-birim uzama eğrisinden bulunabilen farklı elastisite modülü değerlerinin sebebi; hesap yöntemi, gerekliliklerin sağlanma durumu ve hataya sebep olabilecek hususlar olarak açıkça ortaya koyulmuştur. Bu çalışma ile çekme deneyi metodundan elastisite modülü hesabı üzerine çalışma ve araştırma yapacak kişiler için rehber olabilecek bir doküman oluşturulması amaçlanmıştır.

7. TEŞEKKÜR

Destekleri için TÜBİTAK ailesine teşekkürlerimizi sunarız.

REFERANSLAR

- [1] TS EN ISO 6892-1, (2016), "Metalik malzemeler - Çekme deneyi - Bölüm 1: Oda sıcaklığında deney yöntemi"
- [2] ASTM E8, (2016), "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials"
- [3] ASTM E 111, (2017), "Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus and Chord Modulus"
- [4] Lord, J. D. ve Morrell, R. M., (2010), "Elastic modulus measurement; obtaining reliable data from the tensile test", *Metrologia*, (47), 41-49
- [5] Aydemir, B., (2013), "Metalik Malzemelerin Çekme Deney Standardı EN ISO 6892-1'in Getirdiği Değişiklikler", *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, (10), 61-70
- [6] Yiğiter, H., "Yapı Malzemesi II Ders Notları", Dokuz Eylül Üniversitesi
- [7] Türkel, E. B., (2002) "Betonla Basınç Dayanımı İle Elastisite Modülü Arasındaki İlişkiler", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [8] ASTM E9, (2018), "Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature"
- [9] ISO 7500-1, (2018), "Metallic Materials-Verification of Static Uniaxial Testing Machines Tension/Compression Testing Machines-Verification and Calibration of the Force-Measuring Systems"
- [10] ISO 9513, (2012), "Metallic materials – Calibration of extensometers used in uniaxial testing Machines"
- [11] Aydemir, B., (2017), "Ekstansometre Cihazlarının Seçimi ve Kullanımı Hakkında Önemli Hususlar" *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, (7), 73-82
- [12] ASTM E1012, (2014), "Standard Practice for Verification of Testing Frame and Specimen Alignment Under Tensile and Compressive Axial Force Application"