

İÇ BASINÇ ETKİSİNDEKİ İNCE CİDARLI SİLİNDİRDE DENEYSEL GERİLME ANALİZİ DENEYİ

1. DENEYİN AMACI

Mukavemet derslerinde iç basınç etkisinde bulunan ince cidarlı silindirik basınç kaplarında oluşan gerilme ve şekil değişimleri ile ilgili olarak verilen çeşitli analitik bağıntıların ölçülen değerlerle doğrulanması amaçlanmaktadır.

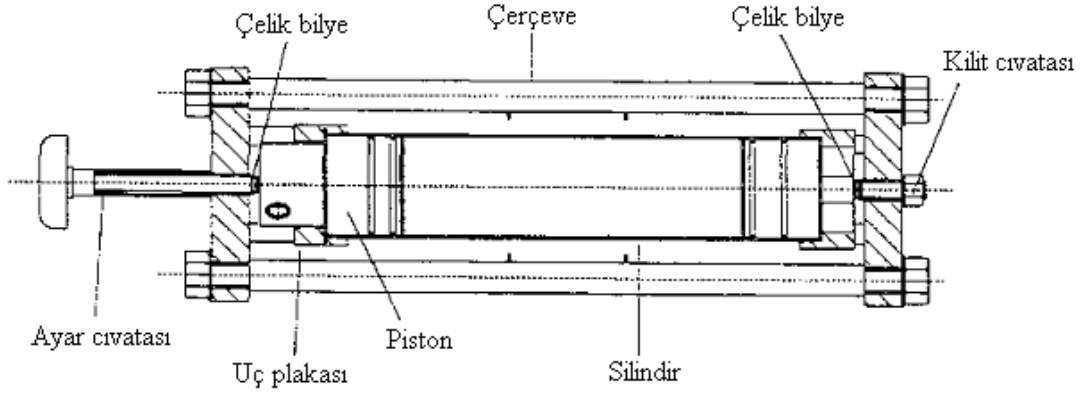
İç basınç etkisinde bulunan, uçları kapalı, ince cidarlı silindirin orta bölgesi üzerinde değişik noktalarda değişik doğrultularda yerleştirilen strain gauge'lerden (Birim şekil değişim ölçer) yapılan ölçümlerle öğrenciler iki eksenli gerilme hali için gerilme şekil değiştirme sistemlerini yorumlama olanağına sahip olurlar.

Deney düzeneği üzerinde yapılabilen değişikliklerle aksenal gerilmeler ortadan kaldırılarak gerilme hali tek eksenli duruma getirilebilmekte ve böylece silindir malzemesine ait Elastisite modülü ve Poisson oranı deneysel olarak belirlenebilmektedir.

2. DENEY DÜZENEĞİNİ TANITILMASI

Deney düzeneğinin kesiti Şekil 1'de görülmektedir. Alüminyumdan yapılmış olan ince cidarlı silindirin sol ucunda bulunan piston ayar civatası vasıtasıyla içeri-dışarı hareket ettirilerek uç koşulu değiştirilebilmektedir. Silindire 0-3.5 MPa aralığında çalışan bir basınç göstergesi monte edilmiştir.

Ayar civatası dışa doğru döndürüldüğünde silindir içinde bulunan basınçlı yağ pistonu uç plakasına doğru itmektedir. Ayar civatasının içe doğru döndürülmesi durumunda ise piston uç plakasından uzaklaşmakta ve tüm aksenal kuvvet etkisinden kurtarılmaktadır. Pistondan çerçeveye olan aksenal yük transferi ayar ve kilitleme civataları uçlarına yerleştirilmiş olan çelik bilyalar sağlamaktadır.

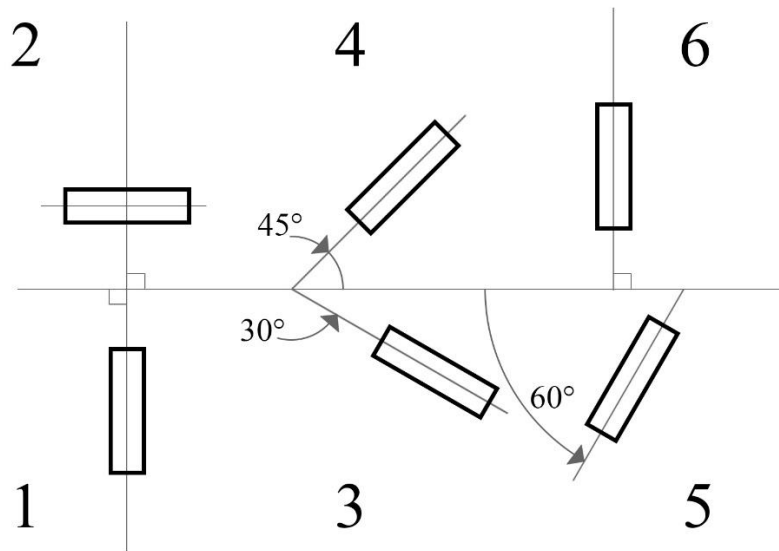


Şekil 1. İnce cidarlı silindirin kesiti

Silindir üzerinde altı adet strain gauge Şekil 2’de görüldüğü şekilde yerleştirilmiştir. Bu strain gauge’ler silindirin ısıl karakteristiklerine uygun olarak seçilmiş ve kendiliğinden ısıl kompanzasyonludurlar.

Her bir strain gauge Wheatstone köprüünün bir kolunu oluşturmakta köprüünün diğer üç kolu çok kanallı şekil değişimi ölçüm cihazı tarafından oluşturulmaktadır. Wheatstone köprüsü kollarını oluşturan strain gauge’ler ile şekil değişimi okumalarının yapıldığı cihaz arasındaki irtibat çok yollu bir soketle gerçekleştirilmektedir.

Ölçülen şekil değişimleri aşağıda verilen uygun dönüşüm bağıntıları ile gerilmelere dönüştürülmektedir.



Şekil 2. Silindir üzerinde Strain Gauge’lerin yerleştirilişi

Silindire basınç dönüş vanasını kapatarak el pompası ile tatbik edilir. Silindirdeki basınç dönüş vanasının açılması ile ortadan kaldırılır.

Deney düzeneği ile ilgili teknik bilgiler;

Silindir İç Çapı: 76.14 mm

Silindir Cidar Kalınlığı: 3.18 mm

Silindir Boyu: 360 mm

Silindir Malzemesi: Al Alaşımı

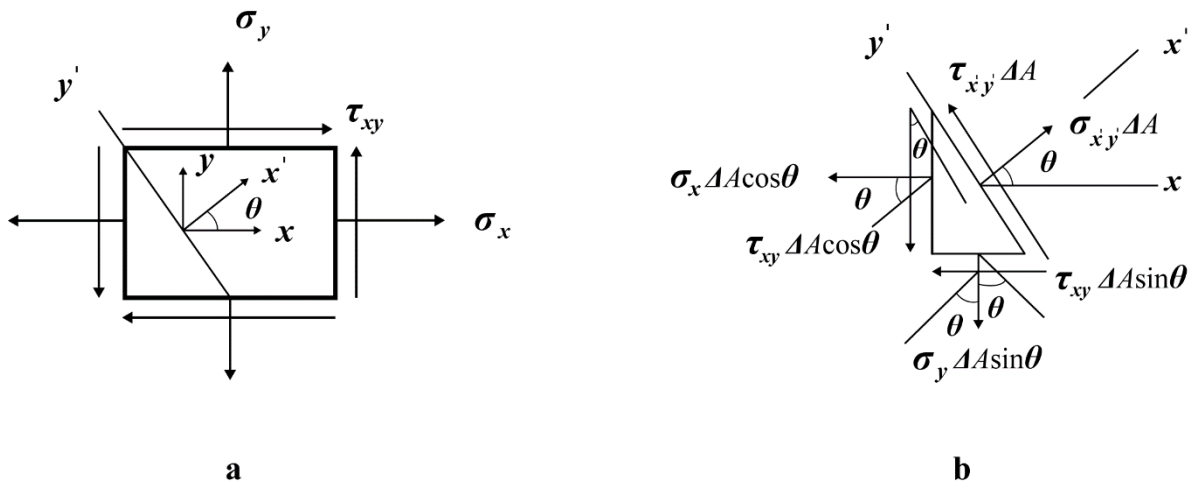
Elastisite Modülü: 69 GPa

Poisson Oranı: 0.33

Basınç Ölçme Aralığı: 0-3.5 MPa

3. DÜZLEM GERİLME HALİ İLE İLGİLİ TEORİK BAĞINTILAR

Aşağıda düzlem gerilme etkisindeki dikdörtgen elemana etkiyen gerilmeler Şekil 3a'da ve bu elemandan çıkarılan kama şeklindeki bir elemana etkiyen kuvvetler Şekil 3b'de görülmektedir.



Şekil 3. Düzlem gerilme hali

3.1. Eğik Düzleme Etkiyen Gerilmeler

Şekil 3b'deki elemanın x' ve y' doğrultularındaki kuvvet denge denklemleri yazılırsa x eksenini ile θ açısı yapan dış normal x' olan yüzeye etkiyen normal ve kayma gerilmeleri;

$$\sigma_{x'} = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + \tau_{xy} (2 \sin \theta \cos \theta) \quad (1)$$

$$\tau_{x'y'} = (\sigma_x - \sigma_y) \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (2)$$

şeklinde elde edilir.

(1a) ve (1b) bağıntıları cinsinden yazılırsa;

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (3)$$

$$\tau_{x'y'} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (4)$$

elde edilir.

3.2. Eğik Düzleme Etkiyen Birim Şekil Değişimleri

$$\varepsilon_{x'} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta \quad (5)$$

$$\frac{\gamma_{x'y'}}{2} = -\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \sin 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} \cos 2\theta \quad (6)$$

3.3. Asal Gerilmeler Cinsinden Hooke Kanunları

Asal gerilme doğrultusunda meydana gelen şekil değişimleri çevresel yönde;

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu\sigma_2) \quad (7)$$

ve aksenal yönde;

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E}(\sigma_2 - \nu\sigma_1) \quad (8)$$

şeklindedir. Bu denklemlerden σ_1 ve σ_2 asal gerilmeleri;

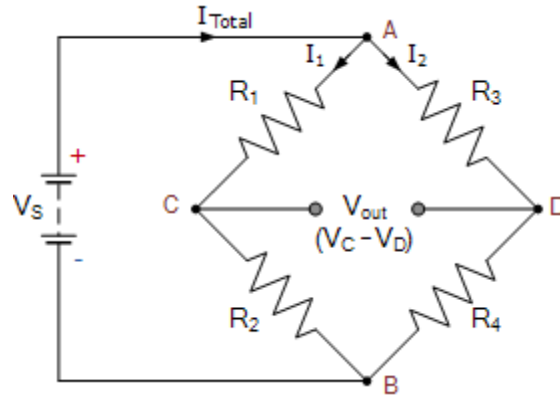
$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \nu^2}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2) \quad (9)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1 - \nu^2}(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1) \quad (10)$$

şeklinde elde edilir.

4. WHEATSTONE KÖPRÜSÜ

Wheatstone köprüsü şekil 4 'de görüldüğü gibi dört dirençten oluşmaktadır. Dirençlerin değerleri $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ şeklinde dengede ise V_{out} voltajı 0 değerini almaktadır. Bu yöntem kullanılarak devredeki direnç değişiklikleri hassas bir şekilde okunabilmektedir.



Şekil 4. Wheatstone Köprüsü

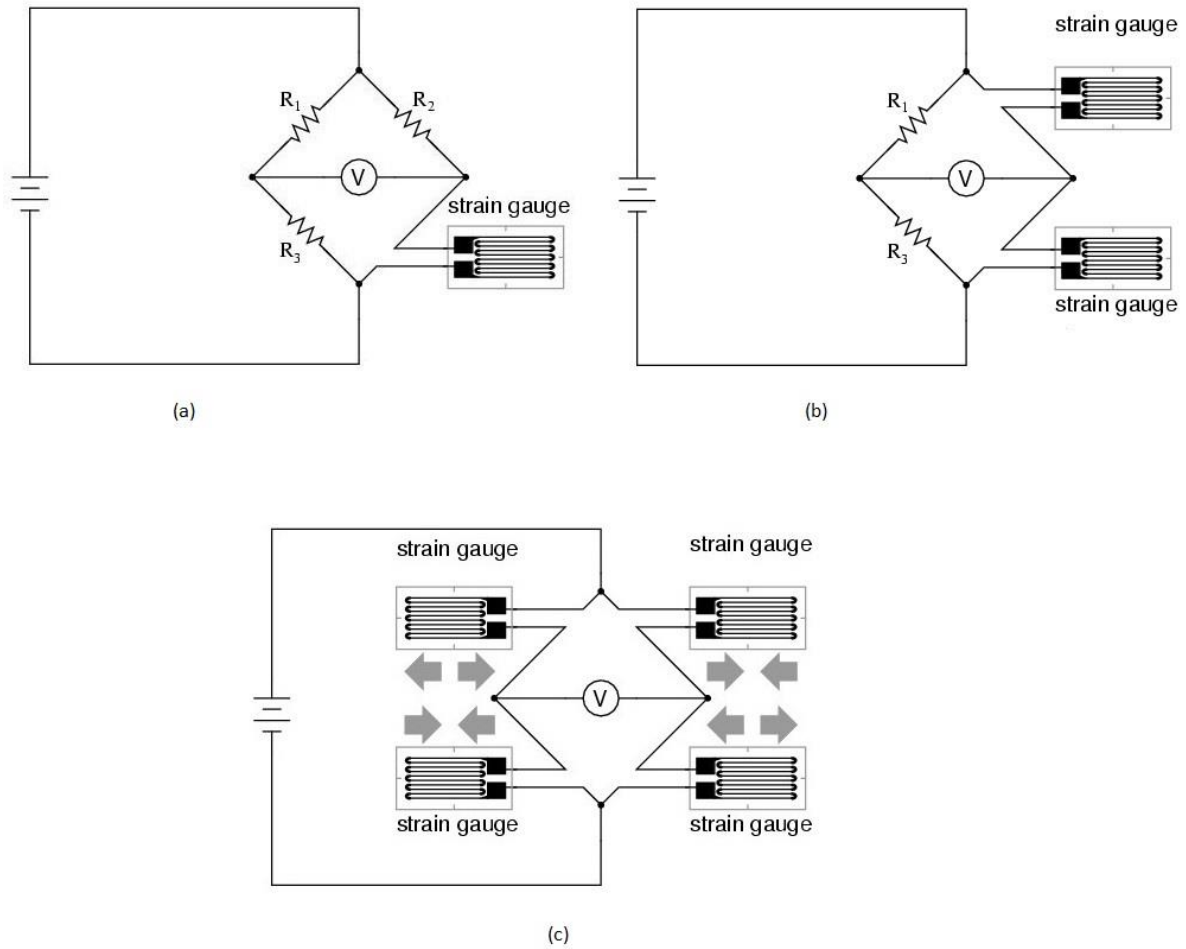
Wheatstone köprüsünde dirençleri strain gauge ile değiştirmemiz durumunda, dirençlerin arasındaki bir dengesizlik sonucunda meydana gelecek olan çıkış voltajındaki değişim, birim şekil değişiminin bir fonksiyonu olacaktır.

Teldeki direnç değişimine ile şekil değişim arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir;

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon K \quad (11)$$

Buradaki K değeri strain gage faktörüdür ve iki etkiye bağlıdır. Eşitliğin ilk terimi poisson etkisini temsil ederken ikinci terim uygulanan şekil değişimine malzemenin direncini temsil eder. Eğer malzeme direnci ihmal edilirse gage faktörü $1 \leq K \leq 2$ değerleri arasında değişir. Bu değerler $0 \leq \nu \leq 0.5$ içindedir.

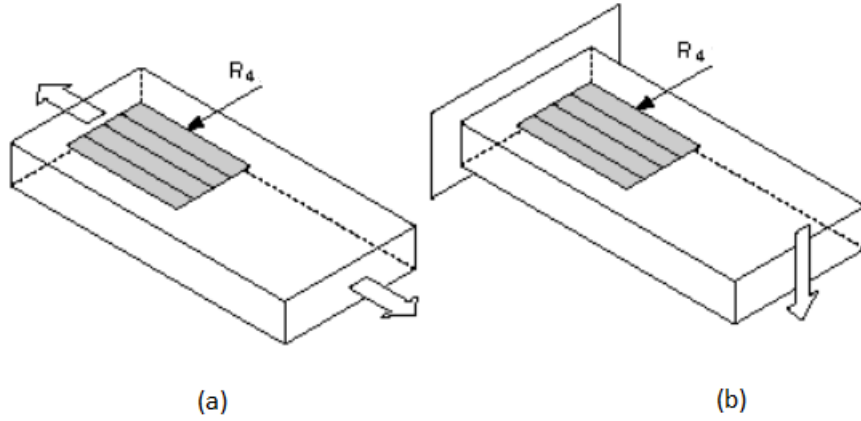
$$\frac{de}{E} = \frac{K}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (12)$$



Şekil 5. Çeyrek (a), yarım (b) ve tam (c) Wheatstone köprüleri

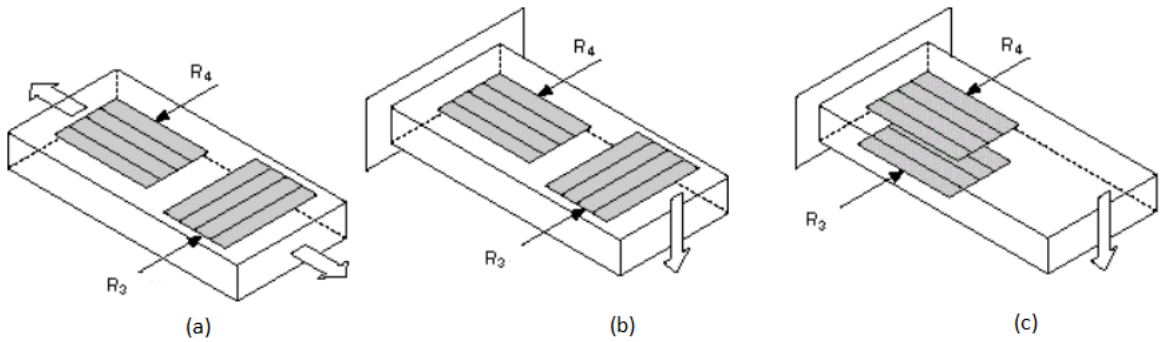
Wheatstone köprüleri, strain gaugelerin devredeki dizilimlerine göre, tek strain gauge kullanımında çeyrek köprü (şekil 5a), iki strain gauge kullanımında yarım köprü (şekil 5b) ve dört strain gauge kullanımında tam köprü (şekil 5c) olarak adlandırılır.

Çeyrek köprü kullanılması durumunda malzemede oluşan aksenal veya eğilme birim şekil değişimleri ölçülebilir.



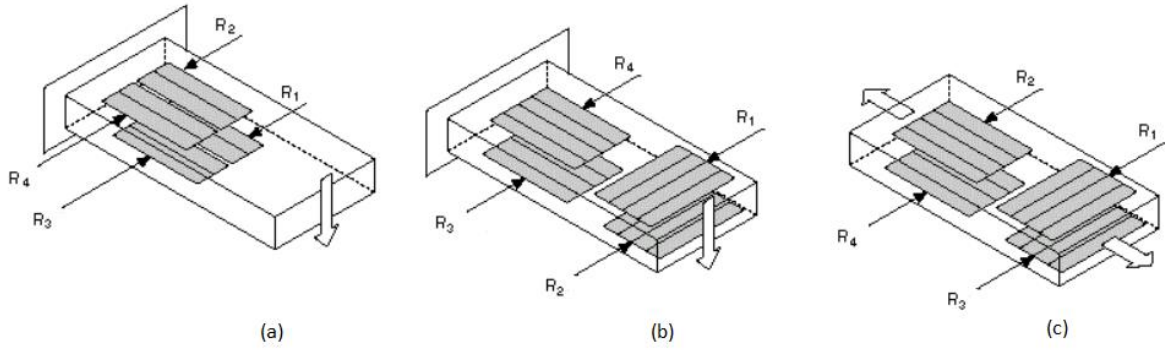
Şekil 6. Çeyrek köprü ile aksenal (a) ve eğilme (b) şekil değişimi ölçümü

Yarım köprüde okunacak voltaj farkı iki katına çıkacağından, çeyrek köprüden iki kat daha hassas olmaktadır. Bu köprüde de aksenal veya eğilme birim uzamaları ölçülebilmektedir.



Şekil 7. Yarım köprü ile aksenal (a), eğilme (b) ve hassas eğilme (c) şekil değişimi ölçümü

Tam köprüde ise aşırı hassas olarak eğilme birim uzamaları, sadece aksenal veya sadece eğilme birim şekil değişimleri ölçülebilir.



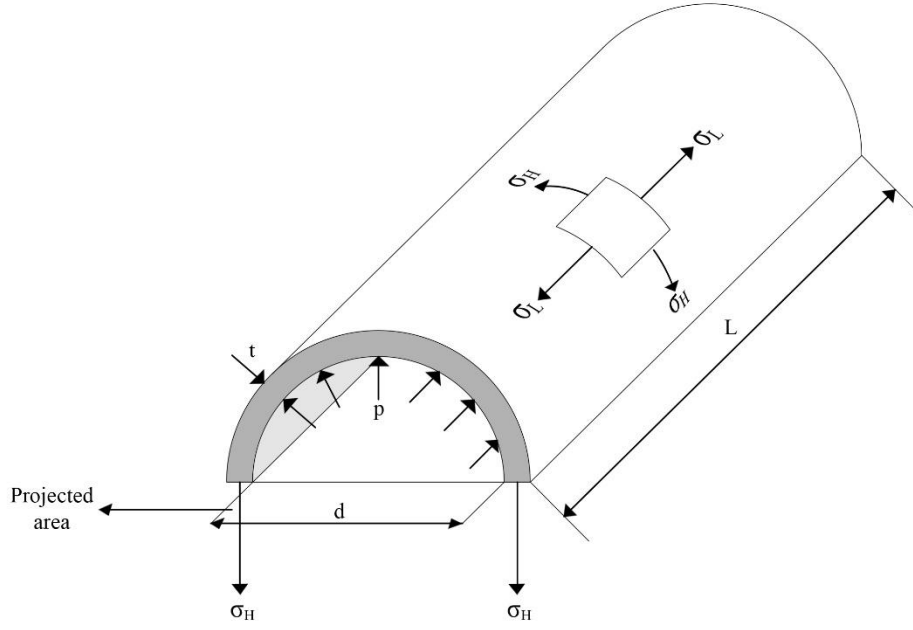
Şekil 8. Tam köprü ile aşırı hassas eğilme (a), hassas eğilme (b) ve eksenel (c) birim şekil değiştirmelerinin ölçümü

Tablo: Köprülerin kullanım yerleri

Ölçüm	Çeyrek Köprü		Yarım Köprü		Tam Köprü		
	Şekil	Şekil	Şekil	Şekil	Şekil	Şekil	Şekil
	6a	6b	7a, 7b	7c	8a	8b	8c
Eksenel Birim Uzama	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓
Eğilme Birim Uzama	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Poisson etkilerine hassaslık	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✓
Sıcaklığa hassaslık	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1000 $\mu\epsilon$ 'daki hassaslık	~0.5 mV/V	~0.5 mV/V	~0.65 mV/V	~1 mV/V	~2 mV/V	~1.3 mV/V	~1.3 mV/V

5. İNCE CİDARLI SİLİNDİRDE GERİLMELER

Deney düzeneğinde kullanılan silindirde kalınlığın iç çapa oranı $1/20$ 'den daha küçük olduğundan, diğer bir söylemle silindir ince cidarlı olduğundan, σ_H çevresel ve σ_L eksenel gerilmelerinin kalınlık boyunca, radyal yönde, değişmedikleri kabul edilebilir. İlave olarak diğer bileşenleri yanında küçük kaldığından radyal gerilme de sıfır olarak alınabilir.



Şekil 9. İç basınç etkisinde bulunan ince cidarlı silindirde gerilmeler

Simetri nedeniyle iki asal gerilme silindire etkiyen çevresel ve eksenel gerilmeler olup;

$$\sigma_H = \frac{pd}{2t} \quad (13)$$

$$\sigma_L = \frac{pd}{4t} \quad (14)$$

şeklindedir.

Başlangıç bölümlerinde belirtildiği üzere, deney düzeneği ile açık uç ve kapalı uç koşulu olarak adlandıracağımız, iki ayrı uç koşuluna ait gerilme durumunu oluşturmak mümkündür.

5.1. Açık Uçlu Silindir

Bu durumda silindirin uç kısmında herhangi bir sınırlama yoktur ve silindirde yalnızca çevresel gerilme meydana gelir. Eksenel gerilme sıfırdır. Ancak Poisson etkisi sebebiyle

silindirde çevresel gerilmelerden oluşan hem çevresel hem de aksenal ve radyal şekil değişimleri meydana gelir. Bu şekil değişimleri aynı zamanda asal şekil değişimleridir.

$$\varepsilon_H^1 = \frac{\sigma_H}{E} \quad (15)$$

$$\varepsilon_L^1 = -\frac{\nu\sigma_H}{E} \quad (16)$$

bağıntılarında görüldüğü üzere bu durumda silindir çevresel olarak büyürken aksenal olarak kısalmaktadır.

5.2. Kapalı Uçlu Silindir

Bu durumda silindir, her iki ucundan da sınırlandırıldığı için, uçları kapalı hem çevresel gerilme hem de aksenal gerilme etkisindedir. Silindirde oluşan şekil değişimleri ise;

Çevresel yönde;

$$\varepsilon_H = \frac{1}{E} (\sigma_H - \nu\sigma_L) \quad (17)$$

Eksenel yönde;

$$\varepsilon_L = \frac{1}{E} (\sigma_L - \nu\sigma_H) \quad (18)$$

şeklindedir.

5.3. Poisson Oranının Belirlenmesi

Uçları açık silindir durumunda (tek aksenal gerilme hali) silindirden yapılan şekil değişimi ölçümlerinden yararlanarak Poisson oranı aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\frac{\varepsilon_L^1}{\varepsilon_H^1} = -\nu \quad (19)$$

6. DENEYİN YAPILIŞI

Deney düzeneğinden yararlanarak silindirde iki farklı gerilme durumu elde edilir. Bunlar; açık uçlu durumundaki silindirde oluşan tek eksenli, çevresel gerilme hali ile kapalı uç durumunda oluşan eksenel ve çevresel gerilmelerin oluşturduğu düzlem gerilme halidir.

Herhangi bir deneye başlamadan önce, sıfır basınçta, tüm strain gauge kanal okumaları ya sıfırlanmalı veya başlangıç değerleri doğru olarak kaydedilmelidir.

a. Tek Eksenli Gerilme Halinin Oluşturulması

- El pompasının dönüş vanası açılarak yağın depoya dönmesi sağlanır.
- Ayar civatası desteğe erişinceye kadar çevrilir. Bu pistonu sol taraftaki uç plakasından uzaklaştırarak eksenel kuvvetin çerçeveye aktarılmasını sağlar.
- El pompasının dönüş vanası kapatılarak el pompası ile silindire basınç uygulanır.
- Silindirdeki iç basın. Sıfırdan en fazla 3.5 MPa değerine kadar 0.5 MPa'lık artımlarla arttırılırken ϵ_H çevresel şekil değişimi 1 ve 6 strain gauge'lerden okunur (Tablo 1).
- Bu durumda Tablo 1 de verilen çeşitli basınç değerlerinde oluşan çevresel gerilmeler (13) bağıntısından; silindir malzemesinin Poisson oranı (19) bağıntısından ve Elastisite modülü 1 ve 6 strain gauge'lerinden yapılan ölçümlerin ortalama değerleri kullanılarak çizilen gerilme-şekil değiştirme diyagramının eğimi olarak (15) bağıntısından belirlenebilir.

Tablo 1

Silindir basıncı (MPa)	Çevresel gerilme (MPa)	Ölçülen çevresel şekil değişimi	
		Gauge 1	Gauge 6
0	0		
0.5	6		
1	12		
1.5	18		
2	24		
2.5	30		
3	36		

b. İki Eksenli Gerilme Durumunun Oluşturulması (Şekil 1)

- El pompası dönüş vanası tam olarak açılır.
- Ayar civatası terse döndürülerek silindir içinde bulunan pistonun silindir iç basınca tabi tutulduğunda silindirin ucunda bulunan uç plakasına dayanması sağlanır.
- Dönüş vanası kapatılarak silindire el pompası vasıtası ile p iç basıncı uygulanır (Maksimum 3.5 Mpa).
- 1, 2 ve 6 strain gauge'lerinden yapılan okumalarla asal şekil değişimleri belirlenir. Hook bağıntılarından asal gerilmeler belirlenir.
- Alternatif olarak 3, 4 ve 5 strain gauge'lerinden yapılan ölçümlerden yararlanarak şekil değişiminin dönüşüm bağıntılarından veya Mohr şekil değiştirme dairesinden yararlanılarak asal şekil değişimleri belirlendikten sonra gerilme – şekil değiştirme bağıntıları kullanılarak asal gerilmeler elde edilir.

Tablo 2

Gauge No	Ölçülen Şekil Değişimi	Teorik Şekil Değişimi	Hata
1			
2			
3			
4			
5			
6			

7. DENEY RAPORUNDA İSTENENLER

1. Silindir malzemesinin Poisson oranı ve Elastisite modülünün belirlenmesi.
2. Tablo 1 ve Tablo 2'nin açık ve kapalı uç durumları için tanımlanması.
3. $p \dots$ MPa iç basınç için çevresel etki ve eksenel şekil değişimleri ve gerilmelerin 1, 2 ve 6 strain gauge'lerinden yapılan ölçümlerle belirlenmesi. *(Bu işlemler sırasında yukarıda verilen analitik bağıntılar veya Mohr gerilme ve şekil değiştirme daireleri kullanılabilir.)*
4. $p \dots$ MPa iç basınç için çevresel ve eksenel şekil değişimleri ve gerilmelerin 3, 4 ve 5 strain gauge'lerinden yapılan ölçümlerle belirlenmesi. *(Bu işlemler sırasında yukarıda verilen analitik bağıntılar veya Mohr gerilme ve şekil değiştirme daireleri kullanılabilir.)*
5. Sonuçların yorumlanması.

8. FAYDALI LİNKLER

1. Strain gauge'lerin yapıştırılması: <https://www.youtube.com/watch?v=uQWfNc24Ehc>
2. Strain gauge köprüleri: <https://www.youtube.com/watch?v=vzwbT0nvjM>