

Zorlanma Telleri, Yapıları ve Çalışma Prensipleri

A. Hikmet AKSEL*

ÖZET

Bu çalışmada diğer zorlanma ölçerleri içinde en çok kullanılan elektriksel dirençli foil ve tel tipi zorlanma telleri incelendi. Strain gaugelerin yapısı, duyarlılığı, çalışma prensipleri ve ölçüm devreleri gözden geçirildi.

SUMMARY

Strain Gauges: Structure and Principles of the Operating

In this study, the foil and wire type with electrical resistance of strain gauges that had been used as most in the other strain gauges were considered. The structure, sensitivity, the principles of the operating and the circuits of the measure of the strain gauge were examined.

Elektriksel Dirençli Zorlanma Telleri

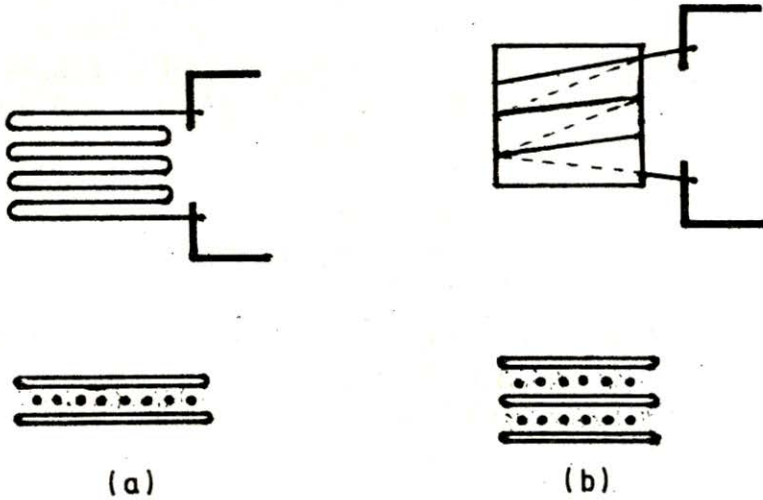
Zorlanma teli, zorlanma ölçeri, gerilme teli veya orjinal adıyla strain-gauge gibi isimler verilen bu ölçü aracı ilk defa Prof. William Thomson (Lord Kelvin) tarafından rapor edilmiştir. Lord Kelvin 1956'da bazı tellerin zorlanma sonucu dirençlerinin değiştiğini gözlemiştir. Bu olay 1923'te P.W. Bridgman tarafından da teyid edilmiştir. Cisimlerdeki zorlanma ölçümünde direnç tellerinin kullanımı ise 1930'lardan sonra küçük oranda başlamıştır.

* Doç. Dr.; U.Ü. Necatibey Eğitim Fakültesi Öğretim Üyesi.

İlk elektriksel dirençli zorlanma telleri Simmons ve Ruge tarafından yapılmıştır. Bu zorlanma telleri daha sonra daha da geliştirilmiş, rozet tipleri ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilen tipleri de yapılmıştır. Bugün bu zorlanma ölçerlerine ince film zorlanma telleri ve piezorezistif tipleri de eklenmiştir^{1.2.3.4.5.6.7.8}.

Elektriksel dirençli zorlanma telleri, zorlanma ölçerlerinde aranan özellikleri bünyesinde en fazla toplayan ölçü aracıdır. Bu nedenle fizikte, mühendislikte hatta biyomekanik ve dışçılıkta birçok kullanım alanı bulmuşlardır. Örneğin bu ölçü araçları Young modülü ve burulma modülünün tayininde, kuvvet, ivme ve basınç ölçümünde, bunun sonucunda çağdaş basküllerin yapımında kullanılmaktadır.

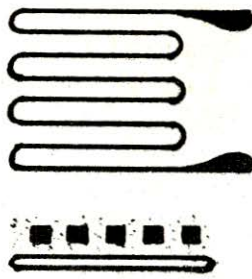
Zorlanma telleri başlıca tel tipi (Wire strain-gauge) ve yassı tip (Foil strain-gauge) olmak üzere iki çeşittir. Tel tipi zorlanma telleri, tellerin iki tabaka arasına sandviç şeklinde sıkıştırılmasıyla veya bir taşıyıcı üzerine sarılmış tellerin yine sandviç şeklinde iki tabaka arasına sıkıştırılmasıyla yapılırlar. Aradaki boşluklar dolgu maddeleriyle doldurulur.



Şekil: 1

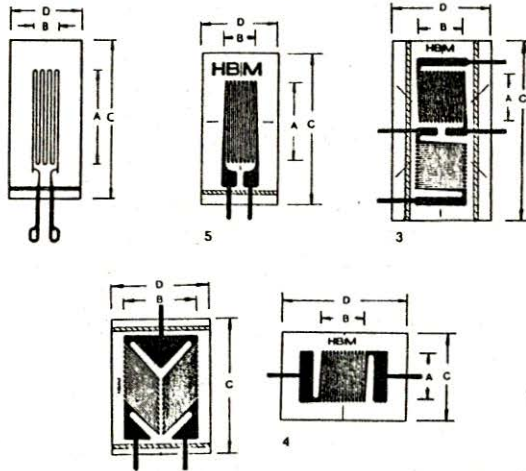
Tel tipi zorlanma tellerinin yapısı. a) Normal tel tipi, b) Bobin tipi

Yassılaştırılmış zorlanma tellerinde telin kesiti dikdörtgen şeklindedir, genişliği kalınlığından daha fazladır. Bu tip zorlanma telleri de dolgu maddeleri kullanılarak, bir taşıyıcı tabaka üzerine monte edilmişlerdir. Yassı tip zorlanma telleri daha geniş bağlanma etki kesiti, ısı dağıtma etkisi ve daha yüksek gerilimlerde çalışabilmeleri nedeniyle tercih edilirler (Şekil: 2).



Şekil: 2
Yassı tip zorlanma tellerinin yapısı

Zorlanma tellerinin kalınlıkları genellikle 5μ - 25μ arasında, dirençleri de 60Ω - 1000Ω arasındadır. Bunlar ölçüm yapılacak düzeye uygun bir yapıştırıcı ile yapıştırılırlar ve kullanılırlar. Bu ölçü araçlarının yüzeye kaynak yapılabilen tipleri ve rozet tipleri de bulunmaktadır. Şekil: 3'te normal ve rozet tipi bazı zorlanma tellerinin görünümü verilmektedir.



Şekil: 3
Değişik zorlanma tellerinin görünümü

Zorlanma Tellerinin Çalışma Prensibi

Metalik bir tel bir kuvvet etkisiyle zorlandığı zaman, telin cinsine ve zorlanmanın büyüklüğüne bağlı olarak telin direnci değişir. Uygun bir tel cismin yüzeyine yapıştırıldığı zaman; yüzeydeki zorlanma ile orantılı olarak telde de bir zorlanma oluşur. Zorlanma sonucu telde oluşan direnç değişimini ölçerek, yüzey üzerindeki zorlanma hakkında bilgi edinmek mümkündür. Bu prensip, zorlanma tellerinin çalışma prensibidir.

Uzunluğu L, yarıçapı r ve öz direnci ρ olan dairesel bir telin direnci;

$$R = \rho \frac{L}{A} = \rho \cdot \frac{L}{\pi \cdot r^2} \quad (1)$$

şeklinde hesaplanabilir. Böyle bir telin uzunluğu çok küçük bir dL miktarı kadar artarsa, telin direnci de çok küçük bir dR miktarı kadar artar. dR direnç değişimini (1) denkleminin diferansiyelini alarak bulabiliriz;

$$dR = \frac{L}{\pi r^2} \partial \rho + \frac{\rho}{\pi r^2} \partial L + \frac{\rho L}{\pi} \frac{-2r \partial r}{r^4}$$

veya;

$$dR = \rho \frac{L}{\pi r^2} \left(\frac{\partial \rho}{\rho} + \frac{\partial L}{L} - 2 \frac{\partial r}{r} \right)$$

yazılabilir. Buradan bağıl direnç değişimi;

$$\frac{\partial R}{R} = \frac{\partial \rho}{\rho} + \frac{\partial L}{L} - 2 \cdot \frac{\partial r}{r} \quad (2)$$

şeklinde yazılabilir. (2) denklemindeki terimlerden sağdan ikisini;

$$\frac{\partial L}{L} = \epsilon \quad (3)$$

ve

$$- \frac{\partial r/r}{\epsilon} = \nu \quad (4)$$

şeklinde yazar ve (2) denkleminin her terimini ϵ 'a bölersek;

$$\frac{dR/R}{\epsilon} = \frac{\partial \rho/\rho}{\epsilon} + 1 + 2\nu \quad (5)$$

bağıntısı elde edilir. (3) denkleminle verilen ϵ 'a teldeki bağıl uzama veya zorlanma miktarı, (4) denkleminle verilen ν 'ye ise Poisson oranı denir. Metal ve metal alaşımlarının birçoğu için Poisson oranının değeri 0,25-0,35 arasında değişir. Böylece (5) denkleminin son iki teriminin değeri 1,5-1,7 arasındadır. Kalan $(\partial \rho/\rho)/\epsilon$ terimi, bağıl uzama başına bağıl öz direnç değişimidir. Bunun değeri de birçok metal ve alaşım için pozitif, bazan da nikelde olduğu gibi negatiftir.

Sonuç olarak belirli bir malzeme için (5) denkleminin sağ tarafı değişmezdir (sabit). Genellikle k ile gösterilen bu değişmeze telin zorlanma duyarlılığı denir. Böylece (5) denklemi daha da basitleşerek;

$$\frac{dR}{R} = k \cdot \epsilon \quad (6)$$

şeklini alır. k değişmezinin büyük olması, telin zorlanma duyarlılığının büyük olması demektir. k'nın değeri çeşitli metal ve alaşımlar için - 12 ile + 4 arasında değişir.

Zorlanma Teli Duyarlılıkları ve Tel Etkeni

Tek bir iletkenin belirli bir uzunluğunun zorlanma duyarlılığı için;

$$k_A = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad (7)$$

yazılabilir. (7) bağıntısındaki ϵ büyüklüğü iletken boyunca ve iletken doğrultusundaki özdeş zorlanmadır. k_A tel duyarlığı telin yapıldığı alaşımın cinsine bağlıdır. Izgaranın doğrultusuna dik olan doğrultudaki sarımlarda da zorlanma olabilir. Yani zorlanma teli çift eksenli bir zorlanma alanındaysa, sarımlar çapraz zorlanmayla orantılı bir direnç değişmesi de göstereceklerdir. Bu etkiler aşağıdaki şekilde tanımlanır;

a) Eksenel zorlanma duyarlığı;

Bu zorlanma teli duyarlığı $\epsilon_{yy} = 0$ için;

$$k_x = \frac{\Delta R/R}{\epsilon_{xx}} \quad (8)$$

şeklinde tanımlanır. Bu halde zorlanma teli x eksenli doğrultusundadır ve aynı zamanda dikey zorlanma yoktur.

b) Dikey zorlanma duyarlığı;

Bu cins zorlanma da $\epsilon_{xx} = 0$ için;

$$k_y = \frac{\Delta R/R}{\epsilon_{yy}} \quad (9)$$

şeklinde tanımlanır. Burada zorlanma teli yine x eksenli doğrultusundadır ve zorlanma tek eksenli olarak zorlanma teli eksenine dik doğrultuda etkimektedir.

c) Tel etkeni (Gauge factor);

Genel olarak zorlanma teli duyarlığını gösteren k tel etkeni ise $\epsilon_{yy} = -0,285 \cdot \epsilon_{xx}$ için;

$$k = \frac{\Delta R/R}{\epsilon_{xx}} \quad (10)$$

şeklinde tanımlanır. Bu değer, zorlanma teli yapımcıları tarafından zorlanma teli paketi üzerinde verilir ve kalibrasyon işlemini gösterir. Tel etkeni (gauge factor) adı da verilen bu büyüklük, direnç değişmesini zorlanmaya çevirmeyi sağlamaktadır.

d) Çapraz duyarlık etkeni;

k tel etkeninin ölçüm koşullarından değişik bir zorlanma alanında direnç-zorlanma çevrimi yapılırsa, bu durum ölçüm hatalarına neden olacaktır. Bu hata birçok durumda önemsizdir, ancak hatanın büyük olduğu durumlarda düzeltme yapmak mümkündür. Bunun içinse k_a çapraz duyarlık etkeninin bilinmesi gerekmektedir.

$$k_a = \frac{k_y}{k_x} = \frac{(\Delta R/R)/\epsilon_{yy}}{(\Delta R/R)/\epsilon_{xx}} = \frac{\pi r/2}{L + \pi r/2} \quad (11)$$

şeklinde tanımlanır. (11) denkleminde ızgaranın doğru kısmının uzunluğu olan L ve ilmeğin yarıçapı r bilinirse k_a hesaplanabilir. k_a çapraz duyarlık etkeni ızgaranın geometrik yapısına bağlıdır ve zorlanma alanının çift eksenliliğinden bağımsızdır.

Zorlanma Ölçümü Devreleri, Wheatstone Köprüsü

Önceki bölümde anlatıldığı şekilde zorlanma telinin direnci (10) denklemine göre

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \epsilon_{xx}$$

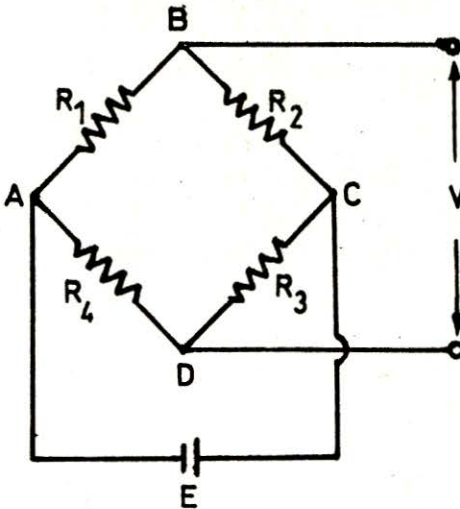
şeklinde değişiyordu. Denklemdaki $\Delta R/R$ bağıl direnç değişimi ölçülürse, bu takdirde ϵ_{xx} zorlanması hesaplanabilir. Bunun sonucunda gerekirse Hooke Yasasına göre

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (12)$$

denklemden σ zorlanması hesaplanabilir.

Elektriksel zorlanma ölçümü devreleri, direnç değişimini elektriksel sinyallere çevirecek yapıdadırlar. Bu amaçla potansiyometre devreleri veya köprü devreleri kullanılır. Biz burada durağan (static) zorlanma ölçümünde daha çok tercih edilen Wheatstone köprü devresi üzerinde duracağız.

Wheatstone köprü devresinin basit yapısı Şekil: 4'te görülmektedir. Bu köprü devresiyle hem değişken (dinamic) hem de durağan (static) zorlanma ölçümünde kullanılabilir.



Şekil: 4
Wheatstone köprü devresi

Şekil 4'te R_1 direnci üzerindeki gerilim düşmesi V_{AB}

$$V_{AB} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot E \quad (13)$$

şeklinde hesaplanabilir. Benzer olarak R_4 direnci uçlarındaki potansiyel düşmesi de;

$$V_{AD} = \frac{R_4}{R_1 + R_2} \cdot E$$

şeklinde hesaplanabilir. Köprünün çıkış gerilimi ise;

$$V = V_{BD} = V_{AB} - V_{AD} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot E$$

$$V = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \cdot E \quad (14)$$

denkleminde eşittir. (14) denkleminin payı sıfır olursa yani;

$$R_1 R_3 - R_2 R_4 = 0 \quad (15)$$

olduğu zaman, köprünün çıkış gerilimi de sıfır olacaktır. Wheatstone köprüsünün statik zorlanma ölçümünde kullanılmasını sağlayan bu özelliğidir. Köprü, zorlanma teline yük uygulanmadan önce içten dengelenir. Böylece zorlanmadan ileri gelen ΔV gerilimi doğrudan ölçülebilir.

Başlangıçta dengelenen ve çıkış gerilimi $V = 0$ olan bir köprüde, dirençlerin herbirinde küçük bir artma olduğunu düşünelim. Bu durumda köprünün ΔV çıkış gerilimi (13) denkleminde hesaplanabilir;

$$\Delta V = \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} \cdot E \quad (16)$$

Gerekli düzenlemeleri yaparsak;

$$\Delta V = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \cdot E \quad (17)$$

(17) denkleminde $r = R_2/R_1$ çevrimiyle denklemin yeniden yazarsak;

$$\Delta V = \frac{r}{(1+r)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \cdot E \quad (18)$$

elde edilir. (17) ve (18) denklemlerinde $(1 - \eta)$ çarpanını önemsemedik. Buradaki η ;

$$\eta = \frac{1}{1 + (1+r)/((\Delta R_1/R_1) + (\Delta R_4/R_4) + r(\Delta R_2/R_2) + (\Delta R_3/R_3))}$$

büyükliğindedir. $(1 - \eta)$ doğrusal olmayan çarpanının önemsenmemesiyle yapılan hata % 5 ten daha küçüktür.

(18) denklemi, zorlanma ölçümünde Wheatstone köprüsünün davranışına egemen olan temel eşitliktir.

Wheatstone köprüsünün duyarlığı, birim zorlanma başına çıkış gerilimindeki değişim olarak tanımlanır. Buna göre;

$$S_c = \frac{\Delta V}{\epsilon} = \frac{r}{(1+r)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \cdot E \quad (19)$$

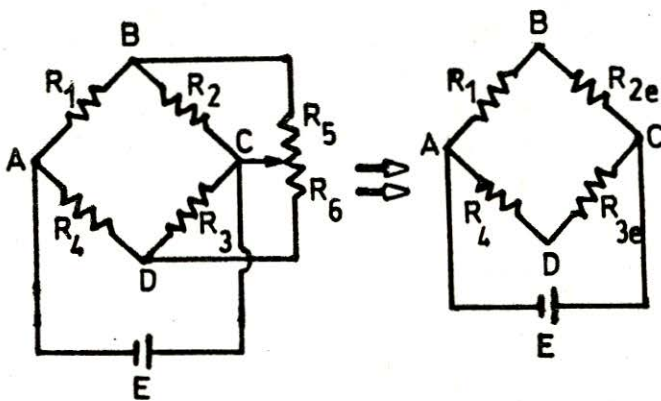
yazılabilir. n zorlanma teline sahip bir köprünün çıkışını gözönüne alırsak;

$$S_c = \frac{r}{(1+r)^2} n \cdot k \cdot E \quad (20)$$

yazılabilir. (20) denkleminden görüldüğü gibi köprü duyarlığı, $r/(1+r)^2$ şeklindeki verim etkenine, n zorlanma teli sayısına, k tel etkenine ve E uygulanan gerilime bağlıdır. Belli bir zorlanma teli için k ve E sınırlı olduğundan, duyarlık daha çok n zorlanma teli sayısı ve zorlanma tellerinin köprüdeki uygun düzenlenişi ile artırılabilir.

Sıfır Denge Köprüleri (Null-balance bridges)

Önceki bölümde anlatılan Wheatstone köprü devresi, V gerilim değişiminin ölçülmesi yoluyla daha çok dinamik zorlanma ölçümünde kullanılır. Durağan zorlanma ölçümünde ise sıfır denge köprüleri kullanılır. Sıfır denge köprüsünde helis sarımlı bir potansiyometre Şekil: 5'te görüldüğü gibi, köprünün B ve D noktalarına bağlanır. Potansiyometrenin orta ucu da C noktasına bağlıdır.



Şekil: 5

a) Paralel dengeli köprü devresi, b) Bu köprünün eşdeğeri sıfır dengeli Wheatstone köprüsü

R_1 , R_2 , R_3 ve R_4 dirençlerinden birkaçı veya hepsi aktif zorlanma teli olabilir. Köprünün B ve D noktaları arasına da yüksek duyarlıklı bir galvanometre bağlanır.

Varsayalım ki başlangıçta $R_1R_3 = R_2R_4$ ve $R_5 = R_6$ denge koşullarıyla köprü dengededir. Bu durumda G galvanometresi sıfır değerini göstermektedir. Şimdi R_1 kolundaki dirençte bir direnç değişimi olduğunu varsayalım. Köprü dengeye gelene kadar kayma teli veya potansiyometre ayarlanır. Potansiyometre aktif direnç telindeki zorlanmayla orantılı olacak şekilde kalibre edildiğinden, yapılan zorlanma potansiyometreye bağlı göstergeden doğrudan okunabilir. Bu durum Şekil: 5b'deki eşdeğer devrenin çözümünden de bulunabilir. Bu devredeki eşdeğer dirençler;

$$R_{2e} = \frac{R_2 R_5}{R_2 + R_5} \quad (21)$$

ve

$$R_{3e} = \frac{R_3 R_6}{R_3 + R_6} \quad (22)$$

şeklinde hesaplanır. Potansiyometrenin ayarlanmasıyla R_5 direncinde ΔR_5 , R_6 direncinde ΔR_6 kadar bir değişim olacaktır. Açıkta $\Delta R_5 = -\Delta R_6$ dır.

$\Delta R_{2e}/R_{2e}$ bağıl direnç değişimi hesaplanırsa;

$$\frac{\Delta R_{2e}}{R_{2e}} = \frac{R_2 (R_5 + \Delta R_5) / (R_2 + R_5 + \Delta R_5) - R_2 R_5 / (R_2 + R_5)}{R_2 R_5 / (R_2 + R_5)} \quad (23)$$

Denklem sadeleştirilirse;

$$\frac{\Delta R_{2e}}{R_{2e}} = \frac{\Delta R_5}{R_5} \cdot \frac{1}{1 + (R_5/R_2) (1 + \Delta R_5/R_5)} \quad (24)$$

yazılabilir. Benzer yoldan;

$$\frac{\Delta R_{3e}}{R_{3e}} = \frac{\Delta R_6}{R_6} \cdot \frac{1}{1 + (R_6/R_3) (1 + \Delta R_6/R_6)} \quad (25)$$

yazılabilir. Bu iki değeri (18) denklemine yerine yazarak ve R_2 ile R_4 dirençlerinin değişmediğini gözönünde tutarak;

$$\Delta V = \frac{R_1 R_{2e}}{(R_1 + R_{2e})^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_{2e}}{R_{2e}} + \frac{\Delta R_3}{R_{3e}} \right) \cdot E = 0 \quad (26)$$

(25) denklemine $\Delta R_{2e}/R_{2e}$ ve $\Delta R_{3e}/R_{3e}$ dirençleri $\Delta V = 0$ olacak şekilde ayarlandıklarından;

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = k \cdot \epsilon = \frac{\Delta R_{2e}}{R_{2e}} - \frac{\Delta R_{3e}}{R_{3e}} \quad (27)$$

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_5}{R_5} \cdot \frac{1}{1 + (R_5/R_2)(1 + \Delta R_5/R_5)} - \frac{\Delta R_5}{R_6} \cdot \frac{1}{1 + (R_6/R_3)(1 + \Delta R_6/R_6)} \quad (28)$$

yazılabilir. İlk köprüde $R_5 = R_6$ ve $R_2 = R_3$ olduğundan ve $\Delta R_5 = \Delta R_6$ yazılabileceğinden;

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = 2 \cdot \frac{\Delta R_5}{R_5} \cdot \frac{1 + R_5/R_2}{1 + 2(R_5/R_2) + (R_5/R_2)^2 (1 - (\Delta R_5/R_2)^2)} \quad (29)$$

(29) denkleminin incelenmesi göstermektedir ki, okunan ϵ zorlanması $(\Delta R_5/R_5)^2$ teriminden dolayı doğrusal değildir. Doğrusallıktan sapmayı en aza indirmek için bu oranı sınırlamak, dolayısıyla zorlanma alanını sınırlamak gerekir. Bu oran;

$$0 < \left(\frac{\Delta R_5}{R_5}\right)^2 < 0,01 \quad (30)$$

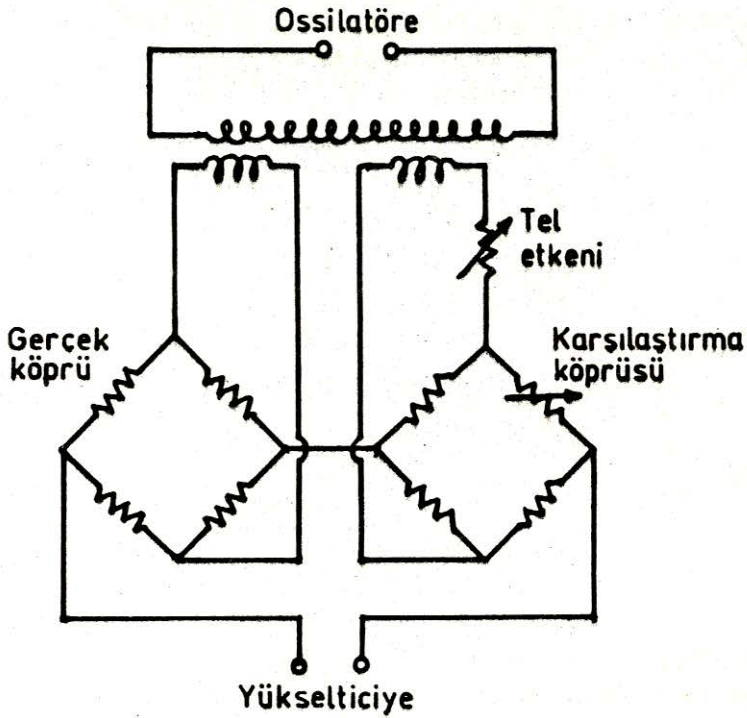
şeklinde seçilirse o takdirde doğrusal olmayan terim önemsenebilir. Bu durumda (29) denklemi daha da basitleşir,

$$\epsilon = \frac{2}{k} \cdot \frac{\Delta R_5}{R_5} \cdot \frac{1}{1 + R_5/R_2} \quad (31)$$

şekline girer. (31) denklemi, potansiyometrenin ayarlanmasıyla doğrudan zorlanmayı tayin etmekte kullanılır.

Ticari Zorlanma Göstercileri

Ticari zorlanma göstercilerinde en çok kullanılan köprü düzenlerinden biri referans köprüsüdür. Böyle bir köprü Şekil: 6'da görülmektedir. Bu sistemin sol tarafında aktif zorlanma tellerinin bulunduğu gerçek köprü, sağ tarafında ise değişmez veya değişken dirençlerin bulunduğu referans köprüsü bulunur. Köprüye akım verildiğinde referans köprüsündeki değişken direnç ayarlanarak başlangıç dengesi sağlanır. Gerçek köprüde zorlanma nedeniyle bir direnç değişimi olursa, iki köprü, dolayısı ile okuma sisteminde bir dengesizliğe neden olur. Referans sisteminin tekrar ayarlanması sonucu okuma sistemi sıfırlanır. Sıfırlama potansiyometresinin bağlı olduğu numarator'den de zorlanma miktarı okunur. Pratikte referans köprüsü, farklı dirençlerdeki zorlanma telleriyle de kullanılabilmesi için biraz daha karışıktır.



Şekil: 6

Referans köprü devresinin şematik gösterimi

KAYNAKLAR

1. BRANVERS, M. and BROUERS, F.: Temperature and Strain Effect on Electrical Resistivity of Transition Metal Alloys: Application to Strain Gauges. Metal Phys. Vol: 10 p. 131-35, Feb. 1976.
2. NEELSON, V.V.: Measurement Using the Wheatstone Bridge Pittsburgh, Pa. USA. Instrument Soc. 1970, p. 633/1-8.
3. DALLY, I.W. and RILEY, W.F.: Experimental Stress Analysis. Mc Graw-Hill Book Comp., 1965.
4. PERRY, C.C. and LUSNER, H.R.: The Strain Gauge Primer, Mc Graw-Hill Book Comp.
5. TOPRAK, T.: Uzama Teli ile Ölçme Tekniğinin Esasları, Wheatstone Köprü Devresinin Uygulaması. İ.T.Ü. Makina Fakültesi Mukavemet Kür. 1977.
6. WINDOW, A.L.: Strain Gauges, Basic Principles, Types and Instrumentation. Engineering Materials and Design. p. 45-50, Feb. 1977.

7. FRENCH, P.J. and EVANS, A.G.R.: Piezoresistance in Polysilicon and its Applications to strain gauges. *Solid-State Electronics* v: 32, p. 1-10, 1989.
8. CHITALE, S., HUANG, C. and STEIN, M.: High Gauge Factor Thick Film Resistors for Strain Gauges. *Hybrid Circuit Technology* v: 6, p. 45-47, 1989.