

Elektriksel Dirençli Strain Gaugelerde En Uygun Akım Değeri

A. Hikmet AKSEL*

ÖZET

Stress ve strain ölçümü için kullanılan elektriksel dirençli strain gaugelerle ölçüm yapılırken ölçümde hataya neden olan en önemli etken sıcaklıktır. Burada ısınmaya neden olan etkenler ve bunlardan biri olan strain gaugeden geçen elektrik akımının en uygun değeri ile ilgili bir tartışma sözkonusu edilmektedir. En uygun değişkenleri içeren bir örnek gözönüne alındığında P elektriksel gücünün değeri 10^{-2} W ile 1 W arasında seçilirse SGO² (sindal gürültü oranı) değerinin en uygun olduğu görülmektedir.

SUMMARY

The Optimum Value of The Current in Electrical Resistor Strain Gauge

When we measure with electrical resistor strain gauge that is used for measuring stress and strain, the most important factor that causes errors on the measuring is the temperature. In here, there is a discussion about the factors that causes warming and from this ones the most appropriate value of electrical power P that is chosen 10^{-2} W and 1 W, when an example that comprehends the most appropriate parameter is considered, it's seen that SNR² (signal noise rate) is most suitable one.

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

1. GİRİŞ

Bugün fizikte, mühendislikte ve diğer birçok alanda stress ve strain ölçümü için strain gaugeler kullanılmaktadır. Strain gaugelerle yapılan ölçümlerde çeşitli ölçüm hataları veya ölçüm belirsizlikleri olabilmektedir. Biz burada elektriksel dirençli strain gaugelerdeki ölçüm hatalarından akım nedeniyle oluşan sıcaklık etkisi üzerinde duracağız.

2. ELEKTRİKSEL DİRENÇLİ STRAIN GAUGELERDE ÖLÇÜM HATALARI

Elektriksel dirençli strain gaugelerde değişik oranda ölçüm hatalarına neden olan birçok etken bulunmaktadır. Bu hataların en büyüğü olarak sıcaklık etkisi kabul edilir^{1,2,3,5,6,7,8}. Sıcaklık etkisi başlıca iki şekilde ortaya çıkar;

- a) Gaugenin yapıştırıldığı cismin yüzeyi üzerindeki sıcaklık değişimlerinin neden olduğu etki
- b) Ölçüm sırasında gaugeden geçen elektrik akımının neden olduğu Joule ısısının etkisi.

Sıcaklık etkisini gidermek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Açıkta ki ölçüm güvenilirliği için akımın en uygun bir değeri kullanılmalıdır. Burada akımın bu en uygun değerini tartışacağız. Tartışma sırasında kullanılacak hesaplama strain gaugenin özelliklerine ve kullanılan ölçüm yöntemine bağlı olacaktır. Bu nedenle ölçüme bazı sınırlamalar getireceğiz.

Ölçüm durumu için ilk yapacağımız seçim biri istenen doğrultuda, diğeri ise buna dik doğrultuda olmak üzere yerleştirilmiş çapraz iki gauge kullanmaktır. Bu durumda köprü çevriminin özelliği nedeniyle her iki gaugedeki sıcaklık etkisi birbirini yok edecektir. Çapraz gaugeler birbirleriyle temasta olacağından, aralarındaki sıcaklık farkı da küçük olacaktır.

Çapraz gaugeler arasındaki sıcaklık farkının nedenini kavramak için gaugelerin yapıştırıldığı yüzey ve bu yüzey çevresindeki havayı içine alan iyi bir ısı transferi analizi yapılmalıdır. Isı transferindeki kusur ve düzensizliklerden ikisi şunlar olabilir;

- a) Çevre atmosferi ve test örneği arasındaki sıcaklık farkı: Atmosferdeki günlük sıcaklık değişimleri sonucu cisimde de sıcaklık değişimleri oluşur. Yalnız atmosferik sıcaklık değişimlerine cismin yanıtında bir gecikme olmaktadır.
- b) Çapraz strain gaugelerin üst gaugesi ile çevreleyen atmosfer arasındaki ısı transferi değişimleriyle oluşan sıcaklık farkları.

En iyi duyarlık hesabı için Nyquist denklemiyle verilen strain gürültüsü kavramı üzerinde durmak gerekir. Ayrıca sürünme etkisi (creep effect) denilen etkiyi de hesaplamalarda gözönüne almak gerekir.

3. DIŞ ETKENLERİN NEDEN OLDUĞU VOLTAJ BELİRSİZLİKLERİ

Varsayalım ki karşılaştırma sırasında gaugeden geçen I akımı sabit olsun. Gaugenin çıkış sinyalinin V_s büyüklüğü için;

$$V_s = I \frac{dR}{dL} L \quad \varepsilon = I R K \varepsilon \quad (1)$$

yazılabilir. Burada R gaugenin direnci, L uzunluğu, K tel etkeni ve ε de cisimdeki zorlanmadır.

3.1. Nyquist Gürültüsü: Nyquist gürültüsünün neden olduğu belirsizliğin KKD (kare kök değeri) ΔV_n için;

$$\Delta V_n = \sqrt{4R' K_b T \Delta f} \quad (2)$$

denklemini kullanıyoruz². Burada Δf kullanılan yükseltecin band genişliği, K_b Boltzman değışmezi, R' eşdeğer gürültü direnci ve T Kelvin cinsinden sıcaklıktır.

3.2. Oda sıcaklığından ileri gelen dalgalanmalar: Gaugenin sıcaklığındaki ΔT sıcaklık dalgalanmalarının neden olduğu ΔV_t belirsizliği için de;

$$\Delta V_t = I R \beta \Delta T \quad (3)$$

denklemini kullanıyoruz. Burada β direncin sıcaklık katsayısıdır. Strain gaugele-
rin çapraz kullanımı bu etkiyi büyük oranda giderecektir. Kalan küçük etkiyi
tayin etmek için iki gauge, bunlar arasındaki ve alt ve üstündeki tabakalarla be-
raber sistemi 5 tabakalı olarak düşünebiliriz. Hesaplamaları havanın T_{hk} en
küçük değeri ve T_{hb} en büyük değeri ile yapıştirıldığı cismin T_{ck} en küçük ve T_{cb}
en büyük değeri ile sınırlayacağız. Varsayalım ki ısı akışı yüzeyin her iki tarafın-
dan düzgün bir şekilde olsun. Bu durumda cismin günlük ısınma peryodu sıra-
sında gaugeden geçen ısı miktarı;

$$Q = 0,5 (T_{cb} - T_{ck}) A d_c \rho_c C_c \quad (4)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada A gaugenin yüzey alanı, d_c , ρ_c ve C_c ise sırasıyla
cismin kalınlığı, özkütlesi ve özısıdır.

Çapraz iki gauge arasındaki 12 saatlik ısınma peryodu için sıcaklık farkı;

$$\Delta T = d_3 Q / (43200 A \lambda_3) \quad (5)$$

şeklinde yazılabilir. Burada λ_3 ve d_3 sırasıyla gaugeler arasındaki ayırıcı tabakanın ısı iletim katsayısı ve kalınlığıdır.

Böylece (3), (4) ve (5) denklemlerinden oda sıcaklığı değişiminin neden olduğu ΔV_t belirsizliği için;

$$\Delta V_t = I R \beta d_c \rho_c C_c (T_{cb} - T_{ck}) / (8,64 \cdot 10^4 \lambda_3) \quad (6)$$

yazılabilir.

3.3. Hava akımının neden olduğu sıcaklık dalgalanmaları: Hava akımı da cismin sıcaklığında dalgalanmalara neden olur. Çapraz iki gaugenin ısı dengesinde yüzey sıcaklığı T_u olan gaugenin dış yüzeyinden olan P_u ısı akışı için;

$$P_u = A \alpha_u (T_u - T_a) \quad (7)$$

yazılabilir. Buradaki;

$$\alpha_u = \alpha_s + \alpha_i + \alpha_d \quad (8)$$

şeklinde ifade edilir. Burada T_a çevre havasının sıcaklığını, α_u , α_s , α_i ve α_d ise sırasıyla toplam, ışıma, iletim ve dolaşımla olan ısı transferi katsayılarını göstermektedir.

Bu denklemdaki ışımayla olan α_s katsayısı yaklaşık olarak;

$$\alpha_s = 5 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9)$$

alınabilir. α_i için ise kenarları L uzunluğunda olan yüzey ve ısı iletim katsayısı $\lambda = 26 \cdot 10^{-3} \text{ W/m K}$ olan hava gözönüne alınarak Wong bağıntısından^{2,4};

$$\alpha_i = 0,06 L^{-1} \quad (10)$$

alınabilir.

Aynı şekilde ısı transferine hava dolaşımının katkısı için laminer akışta Prandtl sayısı için $P_i = 0,71$ ve kinematik viskozite için aynı çizelgeden $n = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ değerlerini kullanarak Nusselt denkleminde;

$$\alpha_d = 125 \lambda u^{1/2} L_1^{-1/6} L^{-1/3} \quad (11)$$

yazabiliriz. Burada u hava akımının hızı, L_1 üst akış uzunluğudur.

Böylece $L_1 = 1 \text{ m}$ değeri için toplam ısı transferi katsayısı;

$$\alpha_u = 5 + 0,06 L^{-1} + 3,25 u^{1/2} L^{-1/3} \quad (12)$$

şeklinde yazılabilir. Çok küçük olan u hava akış hızı ve hızdaki Δu belirsizliği yaklaşık olarak tayin edilebileceğinden, toplam ışıma katsayısındaki belirsizlik te;

$$\Delta\alpha_u = 3,25 u^{1/2} L^{-1/3} \quad (13)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Çapraz strain gaugelerin 5 tabakalı modelinde alt, orta ve üst tabakaların α_i ($i = 1,3,5$) iletimle ısı transferi katsayısı için;

$$\alpha_i = \lambda_i/d_i \quad (i = 1,2,3,4,5) \quad (14)$$

denklemini kullanıyoruz. 2. ve 4. tabakadaki gaugenin homojen olan ısı transfer katsayılarını hesaba katmaz, bunların oluşturduğu P Joule ısılarını eşit kabul eder ve cismin her tarafının T_a oda sıcaklığında olduğunu varsayarsak, bu koşullardaki ısı dengesi denklemleri;

$$P/A = (T_4 - T_a)/(\alpha_u^{-1} + \alpha_5^{-1}) + (T_4 - T_2) \alpha_3 \quad (15)$$

ve

$$P/A = (T_2 - T_a) \alpha_1 + (T_2 - T_4) \alpha_3 \quad (16)$$

şeklinde yazılabilir. (15) ve (16) denklemlerinden T_2 ve T_4 çözümlerse;

$$T_2 = (\alpha_1 + 2 \alpha_3) P / (\alpha_s (\alpha_1 + \alpha_3) \alpha_1 \alpha_3) A + T_a \quad (17)$$

ve

$$T_4 = (\alpha_1 + 2 \alpha_3) P / (\alpha_s (\alpha_1 + \alpha_3) + \alpha_1 \alpha_3) A + T_a \quad (18)$$

yazılabilir. Bu denklemlerdeki α_s ;

$$\alpha_s = 1/(\alpha_u^{-1} + \alpha_5^{-1}) \quad (19)$$

şeklinde dir. $\Delta\alpha_s$ belirsizliğini de içeren $\Delta\alpha_s$ belirsizliği de;

$$\Delta\alpha_s = (\alpha_s/\alpha_u)^2 \Delta\alpha_u \quad (20)$$

şeklinde ifade edilebilir. (17) ve (18) denklemlerinden ΔT_2 ve ΔT_4 belirsizlikleri için de;

$$\Delta T_2 = -\alpha_3 (\alpha_1 + 2 \alpha_3) P \Delta\alpha_s / (\alpha_s (\alpha_1 + \alpha_2) + \alpha_1 \alpha_3)^2 A \quad (21)$$

$$\Delta T_4 = -(\alpha_1 + \alpha_3 (\alpha_1 + 2 \alpha_3) P \Delta\alpha_s / (\alpha_s (\alpha_1 + \alpha_2) + \alpha_1 \alpha_3)^2 A \quad (22)$$

yazılabilir. $\alpha_1 = \alpha_3 = \alpha_5 = \alpha$ olmak koşuluyla (13), (18), (19), (20), (21) ve (22) denklemlerinden $\Delta T = \Delta T_2 - \Delta T_4$ sıcaklık belirsizliği;

$$\Delta T = 9,75 P u^{1/2} L^{-1/3} / (\alpha + \alpha_u) A \quad (23)$$

şeklinde yazılabilir. Bu şekilde (3) denkleminde de yararlanarak hava akımından ileri gelen ΔV_d belirsizliği için;

$$\Delta V_d = 9,75 I^3 R^2 \beta u^{1/2} L^{-1/3} / (\alpha + 3\alpha_u)^2 A \quad (24)$$

denklemini elde edilir.

3.4. Sürünme etkileri (creep effect): Strain gauge ile zorlanma ölçümü yapılırken gauge direncini çevreleyen maddelerin sürünme etkileri adı verilen etkilerinin de hesaba katılması gerekir. Bu etkileri hesaplamak için Rohrbach arkadaşlarınca³ verilen bağıntı kullanılır. Bu bağıntıda tek tabaka gözönüne alınır ve esneklik sabitleri a ve b olan iki yay ters esneklik etkilerini ifade etmekte kullanılır.

Biz bu modeli i alt simgesi ile ifade edilen ve n_i tabakadan oluşan bir sisteme uygulayacağız. Bu sistemde iki tabaka için ϵ_{i-1} zorlanmasının $t_0 = 0$ da 0 basamağından başlayıp ϵ_0 çıkan bir basamaklı fonksiyon olduğunu varsayıyoruz. Buna göre i inci levhanın $\epsilon_i(t)$ zorlanması için;

$$\epsilon_i(0) = \epsilon_0 \quad (25)$$

ve

$$\epsilon_i(\infty) = \epsilon_0 b / (a + b) \quad (26)$$

yazılabilir. Ayrıca $0 < a/b < 1$ olduğunu varsayarak;

$$\epsilon_i(0) - \epsilon_i(\infty) = \epsilon_0 a/b \quad (27)$$

elde edilir. Buradan gerçek zorlanma ile ölçülen zorlanma arasındaki f_e azalma etkenini de gözönüne alarak $\Delta \epsilon_i$ belirsizliği için;

$$\Delta \epsilon_i = f_e \epsilon_0 a/b \quad (28)$$

yazılabilir.

Şimdi n_i tabakanın yapılandırıldığı sistemimize dönelim. $t_0 = 0$ anında 0 dan ϵ_0 basamağına kadar zorlanma etkisinde kalan sistemin (28) denklemini kullanarak t anındaki belirsizlik için;

$$\Delta \epsilon = f_e i (2n_i + 1 - i) a \epsilon_0 / 2b \quad (29)$$

elde edilir. Burada $i = 1, 2, \dots, n_i$ dir.

Bu sonucu $n = 5$ olan ve 2. ve 4. tabakalarda çapraz strain gaugeler bulunan sisteme uygulayalım. Çapraz dirençler doğrultusundaki etkinin son $\Delta\varepsilon$ sürünme etkisinden bağımsız olduğunu varsayarak;

$$\Delta\varepsilon = ((\Delta\varepsilon_2)^2 + (\Delta\varepsilon_4)^2)^{1/2} = 16,6 f_e a \varepsilon_0 / b \quad (30)$$

yazabiliriz. Böylece sürünme etkisi nedeniyle çıkış sinyalinde oluşan ΔV_c hatası;

$$\Delta V_c = I L \Delta\varepsilon \partial R / \partial L = 16,6 I R K f_e \varepsilon_0 a / b \quad (31)$$

şeklinde hesaplanabilir. Buradaki K ;

$$K = \frac{L}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial L} \quad (32)$$

şeklinde tanımlanan gauge etkenidir.

4. ÖLÇÜLEN SİNYALİN GÜVENİLİRLİĞİ

Yapılan ölçümlerde ölçüm hatalarının mümkün olduğunca küçük, ölçüm duyarlılığının da mümkün olduğunca büyük olması istenir. Ölçüm duyarlılığı veya ölçüm güvenilirliğinin bir ölçüsü olarak ta ölçülen büyüklüğün, ölçüm belirsizliklerine oranı olarak tanımlanabilen bir terim kullanılabilir. Aşağıda strain gaugelerde ölçüm güvenilirliğini belirleyen sinyal gürültü oranı üzerinde durulacaktır.

4.1. Strain gaugelerde sinyal gürültü oranı: Strain gauge için sinyal gürültü oranının karesi (SGO)²;

$$(SGO)^2 = V_s^2 / \Delta V^2 \quad (33)$$

şeklinde tanımlanır. Bu bağıntıda paydadaki ΔV terimi;

$$\Delta V^2 = \Delta V_n^2 + \Delta V_t^2 + \Delta V_d^2 + \Delta V_c^2 \quad (34)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. (1), (2), (6), (24) ve (31) denklemlerindeki değerler (34) denkleminde yazılır, denklemin pay ve paydası $I^2 R^2$ ye bölünerek $P = I^2 R$ nin strain direncinde harcanan elektriksel güç olduğu hatırlanırsa bu denklem daha kısa olarak;

$$(SGO)^2 = E / (B/P + C_1 + C_2 + DP^2) \quad (35)$$

şeklinde yazılabilir. (35) denkleminde ayrıca;

$$E = K^2 \varepsilon^2 \quad (36)$$

$$B = 4K_b T \Delta f R'/R \quad (37)$$

$$C_1 = \beta^2 d_c^2 \rho_c^2 C_c^2 (T_{cb} - T_{ck})^2 / (7,4 \cdot 10^9 \lambda_3^2) \quad (38)$$

$$C_2 = 277K^2 f_e^2 \varepsilon_0^2 a^2/b^2 \quad (39)$$

$$D = 95 \beta^2 u / ((\alpha + 3\alpha_u)^4 A^2 L^{2/3}) \quad (40)$$

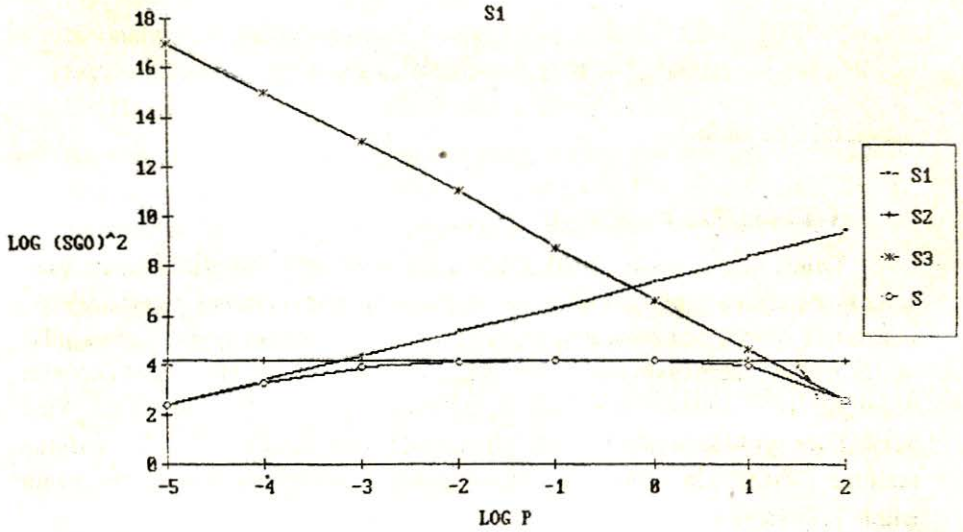
kısaltmaları kullanılmıştır.

(35) denklemi yukarıdaki değişkenlere ve gauge direnci üzerindeki P elektriksel gücüne bağlı olarak sinyal gürültü oranı ilişkisini göstermektedir. Bu bağıntının anlamını daha iyi kavrayabilmek için aşağıda sayısal bir örnek üzerinde durulacaktır.

4.2. Sinyal gürültü oranı için sayısal bir örnek: Sinyal gürültü ilişkisini ifade eden (35) denkleminin anlamını daha iyi göstermek için normal laboratuvar koşullarına göre seçilen ve değerleri Çizelge-1'de verilen büyüklükleri kullanarak bir örnek hesap üzerinde duracağız.

Çizelge: 1
Laboratuvar Koşullarına Uygun Olarak Seçilen Bazı
Büyüklüklerin Sayısal Değerleri

$K = 2$	$f_e = 0,05$
$\varepsilon_0 = \varepsilon = 10^{-4}$	$a/b = 10^{-2}$
$K_b = 1,4 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$	$u = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m s}^{-1}$
$T = 300 \text{ K}$	$\alpha = \lambda_3/d_3 = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
$\Delta f = 100 \text{ s}^{-1}$	$\alpha_u = 13 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
$R'/R = 1000$	$A = 10^{-4} \text{ m}^2$
$\beta = 10^{-5} \text{ K}^{-1}$	$L = 0,01 \text{ m}$
$(T_{cb} - T_{ck}) = 5 \text{ K}$	$d_c = 0,1 \text{ m}$
$\rho = 2000 \text{ kg m}^{-3}$	$C_c = 1000 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
$d_3 = 10^{-4} \text{ m}$	$\lambda_3 = 0,25 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$



Şekil: 1

Çapraz strain gaugeler üzerinde harcanan p elektriksel gücünün logaritmasının fonksiyonu olarak sinyalin gürültüye oranı karesinin $(SGO)^2$ logaritması

Çizelge: 1'deki değerleri kullanarak (36), (37), (38), (39) ve (40) denklemlerinden E , B , C_1 , C_2 ve D büyüklükleri hesaplanıp (35) denkleminde yerine yazılırsa bu denklem;

$$(SGO)^2 = 1/(7.10^{-5} + 4,3.10^{-8} P^{-1} + 2,5.10^{-7} P^2) \quad (41)$$

şeklini alır.

Şekil: 1 de ise strain direncinde harcanan P elektriksel gücüne göre $(SGO)^2$ değişimini içeren bir çizge 10 tabanına göre logaritmik ölçekli olarak verilmektedir. Bu çizge aşağıda verilen (42), (43) ve (44) denklemleriyle S kısaltması kullanılarak (41) denkleminde yararlanılarak çizilmiştir. Şekil: 1 de gösterilen üç doğru şu fonksiyonları ifade etmektedir;

$$S_1 = E P/B \quad (42)$$

$$S_2 = E/(C_1 + C_2) \quad (43)$$

$$S_3 = E/(D P^2) \quad (44)$$

Bu üç denklem özel olarak seçilen sayısal değerlerin (35) denkleminde yerine konmasıyla elde edilmişlerdir. Şekil: 1'den de görüldüğü gibi eğrinin maksimumu $P_m = (B/2D)^{1/3}$ değeri için elde edilir ve bunun sayısal değeri de $P_m = 0,44$ W olarak hesaplanabilir. Elde edilen bu değer (35) denkleminde yazılmasıyla da $(SGO)^2$ nin en büyük değerini veren;

$$(SGO)_m^2 = E/(1,89 (B^2D)^{1/3} + C_1 + C_2) \quad (45)$$

denklemini elde edilir.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Örnek olarak verilen Şekil: 1'deki çizge incelendiğinde çapraz strain gaugelerde harcanan P elektriksel gücü ile sinyal gürültü oranının karesi $(SGO)^2$ arasındaki eğrinin maksimumunun çok geniş olduğu görülmektedir. Bunun anlamı $(SGO)^2$ nin değerinde önemli bir değişiklik olmaksızın P elektriksel gücünün değerinin 1000 kattan daha fazla değişebilmesinin mümkün olmasıdır. Yine Şekil: 1'den görüldüğü gibi P elektriksel gücünün değeri 0,01 W ile 1 W arasında seçilirse $(SGO)^2$ nin maksimum değeri pratik standartlarla çok iyi bir uyum içinde kalmaktadır.

Örnek hesap için kullanılan büyüklükler bizim kullandıklarımızdan farklı olarak seçilirse E, B, C_1 , C_2 ve D büyüklükleri de değişeceğinden (42) ve (44) denklemlerine karşılık gelen iki doğru hemen hemen aynı eğime sahip olmalarına karşın bir miktar değişeceklerdir. Bundan başka Şekil: 1'deki yatay çizgi ve $(SGO)_m^2$ şeklindeki sinyal gürültü oranının karesinin maksimum değeri (39) denklemindeki C_2 değerinin azalması sonucu yukarı doğru değişecektir. Bu durum ilgilenilmesi gereken önemli bir sorundur. Bu sorunu gidermek için uzun zaman periyodları içerisinde istenmeyen zorlanmalardan korunmak için gereken tedbirleri almak, ayrıca mekanik sürünme etkilerini karşılama yöntemlerini uygulamak yararlı olacaktır.

Diğer taraftan $B^2D < (C_1 + C_2)^3$ olduğu zaman Şekil: 1'deki yatay çizgi $(SGO)^2$ nin en büyük değerini tayin etmek yönünden bir ilgi alanı sağlamaktadır. Bunun dışındaki durumlarda düşey durumdaki diğer iki eğrinin kesim noktası $(SGO)^2$ nin en büyük değerini tayin etmekte tercih edilebilecek bir önem kazanır.

KAYNAKLAR

1. Noise limitations in weighing with strain dependent resistors. Th. Kwaaitaal and J.A. Pouils. App. Sci. Res. p. 33 p. 157-207 (1977).
2. Weighing with strain gauges. J.A. Pouils and Th. Kwaaitaal. Thermo Chim. Ac. V: 24, p: 215-223 (1978).
3. About creep effects of strain gauges under static strain. Chr. Rohrbach and N. Czaika. A.T.M. v: 287 p. 135-16 (1955).
4. Heat transfer for engineers. H.Y. Wang. p. 10-86 Langmar London (1977).

5. Normal tipteki zorlanma telleri (strain gauge) ve bir zorlanma göstericisinin (strain indicator) ardarda sıcaklık ve zorlanma ölçümünde kullanımı. Doç. Dr. H. Aksel. U.Ü. Mühendislik Fakültesi Dergisi, C. 1, s. 1, s. 125-133.
6. Results of an investigation into the temperature characteristics of combined resistance wire strain gauges on metal base. V. Ya. Agaronik, Yu. I. Linhacheu, D.T. Shakmatov. Translated from Problemy prochnosti. No. 4 p. 118 (1973).
7. Correcting for the effects of temperature on strain gauges use of couyouter-logger ou milford Bridge project. Strain. p. 89-103 (1975).
8. The measurement of thermally induced strains, E. procter and D.H. Mitchell Bercecy Castle Glas. p. 225-43 (1969).