

NORMAL TİPTEKİ ZORLANMA TELLERİ (STRAIN GAUGE) VE BİR ZORLANMA GÖSTERİCİSİNİN (STRAIN INDICATOR) ARDARDA SICAKLIK VE ZORLANMA ÖLÇÜMÜNDE KULLANIMI

Hikmet AKSEL*

ÖZET

Bu çalışmada genellikle zor-zorlanma (stress-strain) analizlerinde kullanılan zorlanma tellerinin ardarda sıcaklık ve zorlanma ölçümünde kullanımları araştırıldı. Bunun için 8 çeşit zorlanma teli 4 farklı genleşme katsayılı yüzeye yapıştırılarak, sıcaklığa bağlı açık zorlanma eğrileri tayin edildi ve buna etki eden bazı etkenler araştırıldı. Daha sonra bu yöntemin pratik olarak uygulanabilirliği kuramsal olarak tartışıldı.

Bunun sonunda iki ayrı zorlanma teli ve bir zorlanma göstercisi kullanılarak hem $0,1^{\circ}\text{C}/\mu\text{m}/\text{m}$ duyarlılıkla sıcaklığın, hem de zorlanmanın, ardarda tayin edilebileceği sonucuna varıldı.

SUMMARY

The use of the strain gauges at normal typ and a strain indicator for the measurement of temperature and the strain subsequently.

At this study it was investigated the use of strain gauges which are used for the analyse of the strees-strain for measurement of temperature and the strain. For this purpose 8 type of strain gauges were sticked to the 4 type of surface, then strain curves were determined according to temperatures. On the other hand, some factors affecting the experiments were investigated as well. Afterwards, practical applicability of this method was discussed theoretically.

As a result, by using two different strain gauges and a strain indicator, both temperatures with $0,1^{\circ}\text{C}/\mu\text{m}/\text{m}$ sensitivity and strain could be determined supsequently.

1. GİRİŞ

Günümüzde zorlanma telleri veya gerimin ölçerleri hem fizik, hem mühendislik ve hem de diğer bilim alanlarında geniş olarak kullanılmaktadır. Genellikle sıcaklık karşılanmalı olarak yapılan zorlanma telleri ile farklı sıcaklık ortamlarında ölçüm yapılırsa, duyarlı bir ölçüm için sıcaklıktan ileri gelen hataların giderilmesi gerekmektedir. Gerek bu nedenle, gerekse ısıyla ilgili diğer hesaplamalar için, ölçüm yerindeki sıcaklığın da bilinmesi gerekmektedir.

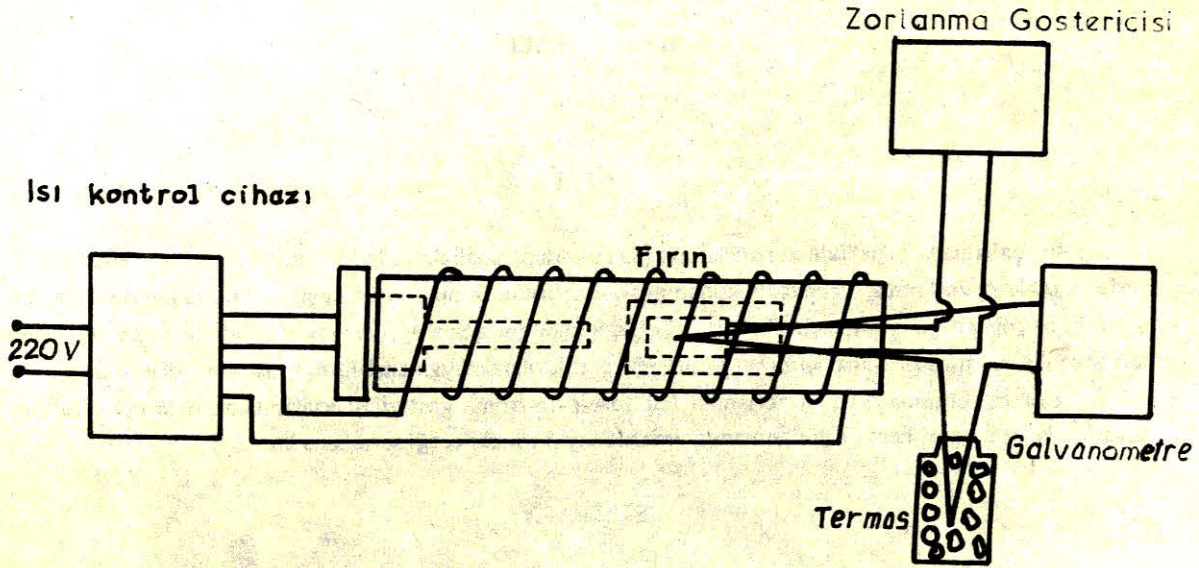
* Doç. Dr.; Uludağ Üniversitesi, Balıkesir Mühendislik Fakültesi Öğretim Üyesi - Balıkesir.

Sıcaklık ölçümü için birçok duyarlı yöntem geliştirilmiştir. Ancak bu yöntemlerde sıcaklık ölçümü için ayrı bir ölçme sistemi gerekmektedir. Biz ise burada sıcaklık ölçümü için ayrı bir ölçme devresi kullanmadan, yalnızca zorlanma ölçümü için elde bulunan zorlanma tellerini ve zorlanma göstergisini kullanarak duyarlı bir sıcaklık ölçümünün nasıl yapılabileceğini araştırdık.

Bunun için belli bir yüzey için sıcaklık karşılmalı olarak yapılan zorlanma tellerini farklı genişleme katsayılı yüzeylere yapıştırarak sıcaklığa bağlı açık zorlanma eğrilerini tayin ettik ve buna etki eden bazı etkenleri deneysel olarak araştırdık. Daha sonra bu yöntemin pratik olarak uygulanabilirliğini kuramsal olarak tartıştık.

2. DENEY DÜZENEGİ ve KULLANILAN MALZEME

Deneyde kullanılan deney düzeneği şekil 1 de görülmektedir.



Şekil 1 — Deneyde kullanılan devrenin blok gösterimi

Yine deneyde kullanılan zorlanma telleri ve bunların bazı özellikleri tablo 1 de verilmektedir. Bunlardan PL-3 dışındakilerin hepsi sıcaklık karşılmalıdır.

Bu zorlanma telleri, genişleme katsayıları sırasıyla $12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $17,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $23 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $16,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ olan yumuşak çelik; 304 çelik, alüminyum ve bakır yüzeylere yapıştırıldı.

Zorlanma göstergisi olarak Vishay Instruments firmasının P-350 A modeli portatif zorlanma göstergisi kullanıldı. Isı kontrol cihazı olarakta $0-400 \text{ } ^\circ\text{C}$ lık bir aralıkta $\pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ duyarlılıkta kontrol yapabilen

Tablo 1 — Kullanılan Zorlanma Telleri ve Bazı Özellikleri

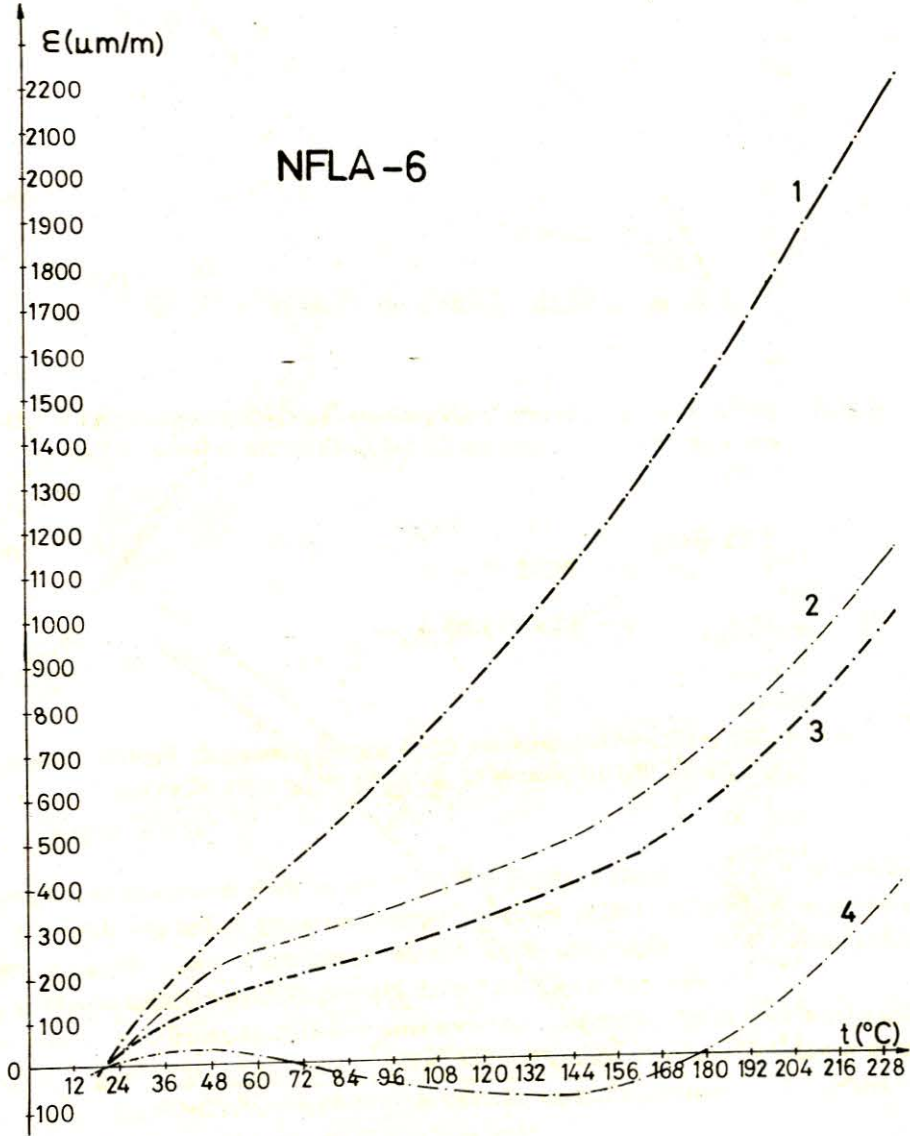
Adı	Tipi	Direnci (Ohm)	k Tel Etkeni	Uzunluğu (mm)	En Yüksek Kullanım Sıcaklığı
PL-3	Tel	120:0,3	1,94	3	80 $^\circ\text{C}$
PS-5-11	Tel	120:0,3	1,98	5	80 $^\circ\text{C}$
PC-5-11	Tel	120:0,3	2,05	5	80 $^\circ\text{C}$
FLA-30-11	Foil	120:0,3	2,17	30	80 $^\circ\text{C}$
CEA-06-120	Foil	120:0,3	2,125	1,57	205 $^\circ\text{C}$
WA-06-350	Foil	350:1,05	2,105	1,57	260 $^\circ\text{C}$
NFLA-6	Foil	120:0,3	2,09	6	230 $^\circ\text{C}$
NFCA-3	Foil	120:0,5	2,13	3	230 $^\circ\text{C}$

HB-FER firmasının Best modeli ısı kontrol cihazı kullanıldı. Isıtma fırını içi boş bir kuarz borunun dış çevresine direnç teli sarılmak suretiyle yapıldı.

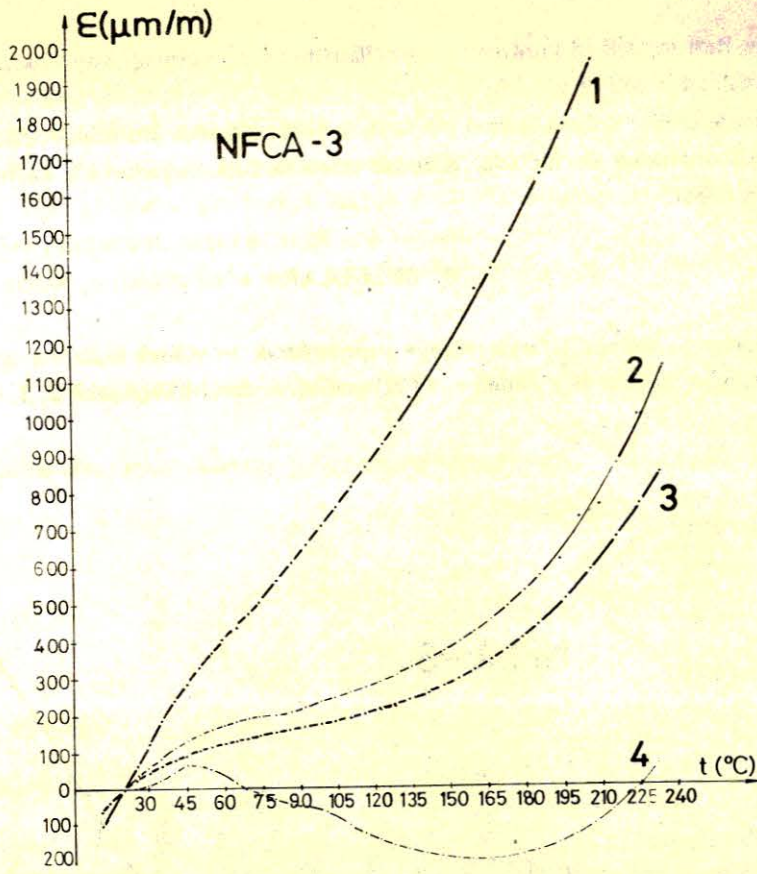
Sıcaklık ölçümü için kromel-alumel bir sıcaklık çifti kullanıldı. Bu sıcaklık çiftinin gerilimi Norma marka ışıklı bir galvanometre ile ölçüldü. Karşılık gelen sıcaklık değerleri bir kalibrasyon tablosundan yararlanılarak tayin edildi.

3. BULGULAR

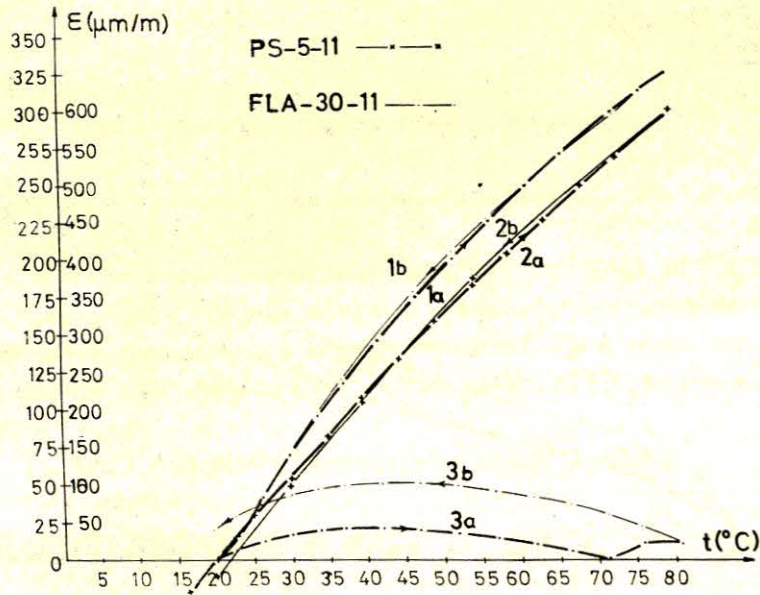
8 çeşit zorlanma telinin 4 farklı yüzeye yapıştırılarak en yüksek kullanım sıcaklığına kadar 2,5-5°C aralıklarla ısıtılması sonucu elde edilen $\epsilon = f(t)$ grafiklerinden birkaçı şekil 2, 3, 4 ve 5'te görülmektedir.



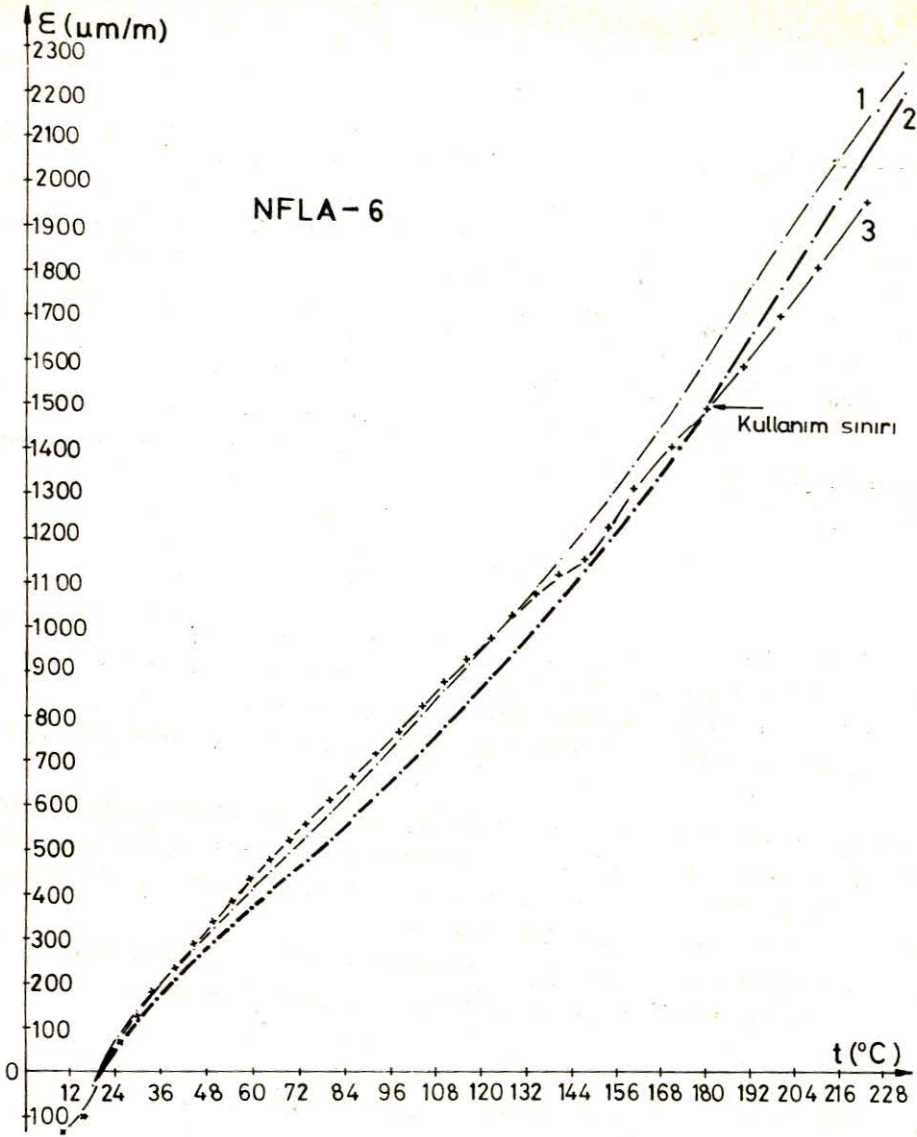
Şekil 2 – NFLA-6 Zorlanma telinin farklı genişleme katsayılı yüzeyler için $\epsilon = f(t)$ grafikleri 1) Ticari Alüminyum 2) 304 Çelik 3) Ticari Bakır 4) Yumuşak Çelik.



Şekil 3 – NFCA-3 Zorlanma telinin farklı genleşme katsayılı yüzeyler için $\epsilon = f(t)$ grafikleri 1) Ticari Alüminyum 2) 304 Çelik 3) Ticari Bakır 4) Yumuşak Çelik.



Şekil 4 – PS-5-11 ve FLA-30-11 zorlanma tellerinin histerisiz eğrileri. 304 Çelik üzerindeki PS-5-11 zorlanma telinin 1 a) Isınma 1 b) soğuma eğrileri. Ticari bakır üzerindeki FLA-30-11 zorlanma telinin 2 a) ısınma, 2 b) soğuma eğrileri. Yumuşak çelik üzerindeki FLA-30-11 zorlanma telinin 3 a) ısınma, 3b) soğuma eğrileri. (Not: dikey eksenin sol tarafı FLA-30-11, sağ tarafı PS-5-11 zorlanma tellerine aittir).



Şekil 5 – Ticari alüminyum üzerine farklı yapıştırıcılarla yapılmış NFLA-6 zorlanma telinin $\epsilon = f(t)$ grafikleri. 1) M-Bond 610, 2) NP-50, 3) P-2.

Bu grafiklerin incelenmesinden de açıkça görüldüğü gibi yumuşak çeliğe göre sıcaklık karşılanmalı olarak yapılan bu zorlanma telleri, genişleme katsayısı yumuşak çelikten daha büyük olan bakır, 304 çelik ve alüminyum yüzeylerde genişleme katsayısıyla orantılı olarak daha büyük bir açık zorlanma eğrisi vermektedir. Ayrıca, genişleme katsayısı büyüdükçe grafik daha düzgün bir hale gelmektedir.

Yine ısınma ve soğuma eğrilerinin incelenmesinden, zorlanma tellerinin yumuşak çelikte epeyce büyük bir histerisiz gösterdiği, bu histerisizin bakır, 304 çelik ve alüminyum yüzeylerde önemsenmeyecek mertebede olduğu görülmektedir. Ayrıca, farklı yapıştırıcıların, aynı bir zorlanma teli için verdiği açık zorlanma eğrilerinin bir miktar farklılık gösterdiği görülmektedir.

4. TARTIŞMA ve SONUÇ

Grafiklerden ve aşağıdaki¹ eşitliğinden de açıkça görüldüğü gibi, zorlanma tellerinin sıcaklıktan ileri gelen açık zorlanma yanıtına etki eden en büyük etken, yapıştırma düzeyinin α genişleme katsayısı ile,

zorlanma telinin β genleşme katsayısı arasındaki farktır⁸.

$$(\Delta R/R)_t = (\alpha - \beta) \cdot k \cdot \Delta t + \gamma \cdot \Delta t \quad (1)$$

Buradaki β zorlanma teli maddesinin, α deney yüzeyinin genleşme katsayısı, γ zorlanma telinin direncinin sıcaklık katsayısı ve k tel etkendir. $(\alpha - \beta)$ farkı ne kadar büyükse zorlanma telinin verdiği açık zorlanma da o kadar fazla olmaktadır. Ayrıca bu fark arttıkça, açık zorlanma eğrisinde daha düzgün bir duruma gelmektedir. Bu şekilde örneğin alüminyumun üzerine yapıştırılmış NFCA-3 zorlanma telinde 1°C sıcaklığa karşılık ortalama $10,53 \mu\text{m}/\text{m}$ lik bir açık zorlanma ölçülebilmektedir. Bu yaklaşık $0,1^\circ\text{C}$ lik sıcaklık artışına karşılık $1 \mu\text{m}/\text{m}$ lik zorlanma artışı demektir. Yani bu şekilde zorlanma telleriyle yaklaşık $0,1^\circ\text{C}/\mu\text{m}/\text{m}$ lik duyarlıkla sıcaklık ölçümünün mümkün olduğu görülmektedir.

Aynı şekilde sıcaklık ölçümünde belirli bir yapıştırma yüzeyi, belirli bir yapıştırıcı ve belirli bir zorlanma teli için sıcaklığa bağlı olarak ölçülen zorlanma, örneğin dördüncü derece bir polinom olarak düşünülebilir. Böyle genel bir polinol;

$$\epsilon = a + b \cdot t + c \cdot t^2 + d \cdot t^3 + e \cdot t^4 \quad (2)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu denklemdaki a, b, c, d, e , katsayıları basit bir bilgisayar programıyla tayin edilebilir. Yine böyle bir bilgisayar programıyla her t ye karşılık gelen ϵ lar hesaplanarak birer tablo yapılabilir ve ölçülen herhangi bir ϵ değerine karşılık gelen sıcaklık bu tablodan okunabilir.

Bizim kullandığımız zorlanma telleri için hesaplanan a, b, c, d ve e katsayıları aşağıda tablo 2 de verilmektedir.

Yine tel tipi ve foil tipi zorlanma tellerinin verdiği açık zorlanma sonuçları da bir miktar farklı olmakta ve foil tipi zorlanma tellerinin bu iş için daha uygun olduğu görülmektedir. Bunun nedeni foil tipi zorlanma tellerinin temas yüzeyinin daha fazla olmasıdır^{8,13}. Bundan dolayı foil tipi zorlanma telleri zorlanmadan daha iyi etkilenmekte ve daha duyarlı olmaktadır.

Yine aynı nedenle foil tipi zorlanma telleri daha az bir histerisiz etkisi göstermekte, bu histerisizin bilhassa 304 çelik ve alüminyum da önemsiz bir mertebede olduğu görülmektedir.

Tablo 2 – 2 Deneyde Kullanılan Zorlanma Telleri İçin Hesaplanan Katsayı Değerleri (E exponansiyeldir)

Z.Teli	Taşıyıcı	a	b	c	d	e
NFCA-3	Al	-351,453	21,4078	-0,217516	1,33864 E-03	-2,53932 E-06
	304 çe.	-196,552	12,4482	-0,144783	7,05544 E-04	-8,88668 E-07
	Cu	-115,87	7,02923	-0,673829	2,83816 E-04	-2,01379 E-07
	Yum.çe.	-181,32	12,8053	-0,207244	1,04593 E-04	-1,59981 E-06
NFLA-6	Al	-279,311	16,3032	-0,132343	8,01751 E-04	-1,43702 E-06
	304 çe.	-289,965	18,4424	-0,220265	1,19938 E-03	-2,02664 E-06
	Cu	-166,269	10,1914	-0,103923	5,15330 E-04	-7,02289 E-07
	Yum.çe.	-129,212	9,43141	-0,166756	9,41573 E-04	-1,54174 E-06
WA-350	Cu	-195,732	11,298	-0,0815138	3,03024 E-04	-2,99464 E-07
CEA-120	Yum.çe.	-57,0387	3,58668	-0,0377863	4,42502 E-05	4,09756 E-07
FLA-30	Cu	278,612	-41,1097	1,90025	-3,03390 E-02	1,63711 E-04
	Yum.çe.	-60,6314	3,24552	0,0197546	-1,82607 E-03	1,51735 E-05
PG-5	Al	-432,053	31,9471	-0,66784	8,30453 E-03	-3,86831 E-05
	304 çe.	-106,666	6,4479	-0,07323	9,78114 E-04	-5,15842 E-06
	Cu	-173,549	10,4781	-0,0947222	2,09876 E-04	1,23457 E-06
	Yum.çe.	-152,63	15,6906	-0,531143	7,13074 E-03	-3,60654 E-05
PS-5	Al	-354,6	19,7475	-0,115114	5,09722 E-04	-1,38889 E-06
	304 çe.	-1068,25	97,52	-2,9669	4,23515 E-02	-2,13737 E-04
	Cu	-91,0571	-22,6398	1,2965	-2,20663 E-02	1,22937 E-06
	Yum.çe.	-176,0	13,545	-0,307917	3,95 E-03	-2,08333 E-05
PL-3	Al	-617,468	56,4462	-1,67425	2,18328 E-02	-1,0261 E-04
	304 çe.	73,3807	-9,17088	0,362747	-4,88477 E-03	2,51029 E-05
	Cu	100,634	-10,5675	0,346914	-3,83539 E-03	1,64609 E-05
	Yum.çe.	-360,667	35,9116	-1,23053	1,8672 E-02	-9,20635 E-05

Yine küçük boyutlu NFCA-3 zorlanma teli aynı firmaca aynı alaşımdan yapılan NFLA-6 zorlanma telinden daha iyi sonuç vermektedir. Bunun nedeni de küçük boyutlu zorlanma tellerindeki ölçüm hatalarının daha küçük olması tahmin edilmektedir.

Ayrıca kullanılan yapıştırıcı da sonuca epeyce etkili olmaktadır. Şekil 5'in incelenmesi, en iyi sonucu M-Bond 610 yapıştırıcısının verdiğini göstermektedir.

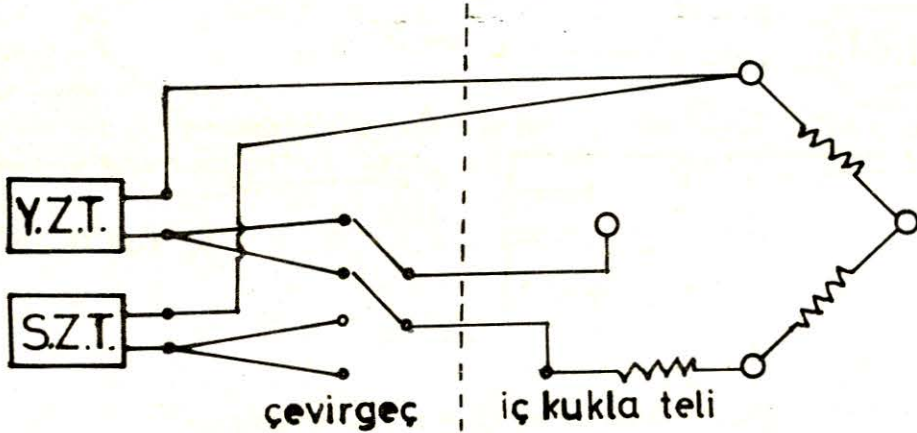
5. NORMAL ZORLANMA TELLERİYLE ARDARDA ZORLANMA VE SICAKLIK ÖLÇÜMÜNÜN PRATİK OLARAK UYGULANABİLİRLİĞİNİN TARTIŞILMASI

Bir yüksek sıcaklıkta yapılan statik zorlanma ölçümü sırasında, hem yükten hem de sıcaklıktan ileri gelen toplam zorlanma ölçülecektir. Üst üste binmiş durumdaki bu iki zorlanmayı birbirinden ayırmak imkânsızdır⁷⁻⁸⁻¹³. Bu nedenle sıcaklık ölçümü için ayrı bir zorlanma teli kullanmak gerekmektedir. Dinamik zorlanma ölçümlerinde, sıcaklıktan ileri gelen statik zorlanmanın dinamik zorlanmadan kolayca ayrılacağı bilinmektedir⁹. Yine 4 elemanlı özel bir tam köprü devresindeki zorlanma tellerinin bir elemanı ile sıcaklığın da ölçülebileceğinden bahsedilmektedir¹⁸. Ancak bunun nasıl başarıldığı konusunda bu makalede fazla bir açıklama yoktur.

Bize göre iki zorlanma teli kullanılarak aşağıdaki 2 farklı yöntemle, ardarda sıcaklık ve zorlanma ölçümü yapmak mümkündür.

I. Yöntem

Şekil 6'da görüldüğü gibi, yükten ileri gelen zorlanmayı ölçecek zorlanma teli, zorlanma ölçümü yapılacak yüzeye yapıştırılır. Sıcaklık zorlanmasını ölçecek olan zorlanma teli ise, genleşme katsayısı ölçülecek yüzeyden epeyce farklı, örneğin yumuşak çelik halinde aliminyumdan yapılmış küçük bir yüzeye yapıştırılır. Sıcaklık zorlanma teli uygun bir destekle sıcaklığı ölçülecek yüzeye yumuşak bir şekilde temas ettirilir.



Şekil 6 — Birinci yöntem için devre bağlantısı gösterimi

Yük ve sıcaklık zorlanma telleri, şeklindeki gibi 2x2 lik bir çevirgeç (Komütatör) yardımıyla zorlanma göstericisine bağlanırsa, çevirgeçin bir konumunda yük zorlanması, diğer konumunda sıcaklık zorlanması ölçülecektir. Ölçülecek sıcaklık zorlanması, daha sonra ilgili e-t tablosundan yararlanarak sıcaklığa çevrilebilir.

II. Yöntem

Genleşme katsayısı, zorlanması ölçülecek yüzeye uygun bir zorlanma teli ile, genleşme katsayısı bundan epeyce farklı ikinci bir zorlanma telinin test yüzeyine yapıştırıldığını ve bu iki zorlama telinin bir yarım köprünün birer koluna bağlandığını varsayalım. Bu durumda çıkış sinyali:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{r}{(1+r)^2} \cdot k \cdot (\epsilon_1 + \epsilon_{1t}) - (\epsilon_2 + \epsilon_{2t}) \quad (3)$$

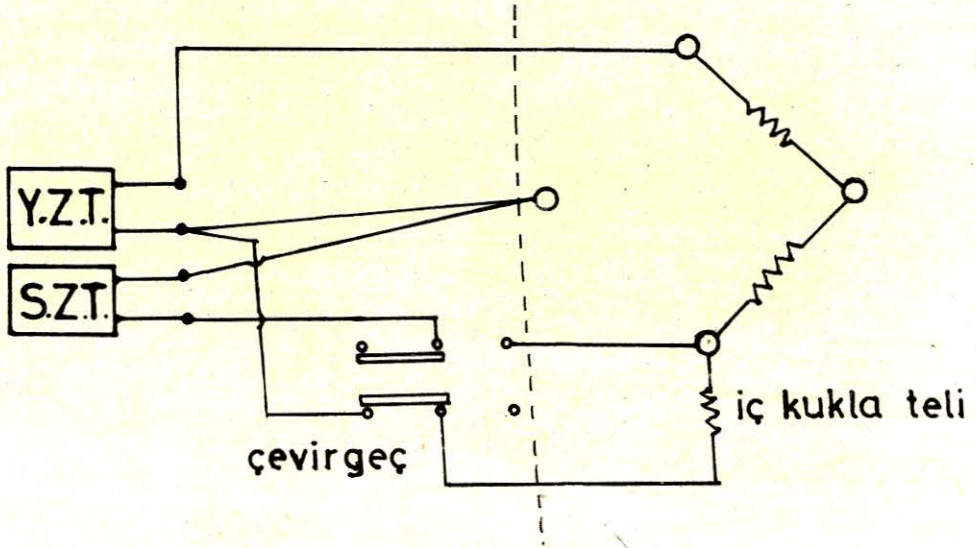
şeklinde olacaktır^{8,13,15}.

Burada ϵ_1 ve ϵ_2 yük zorlanmaları ϵ_{1t} ve ϵ_{2t} sıcaklık zorlanmaları ve $r = R_2/R_1$ iki koldaki direnç oranlarıdır. Her ikisi de aynı yükü ölçtüğünden $\epsilon_1 = \epsilon_2$ olacak ve çıkış;

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{r}{(1+r)^2} \cdot k \cdot (\epsilon_{1t} - \epsilon_{2t}) \quad (4)$$

şeklinde, sıcaklıktan ileri gelen zorlanmaların farkı kadar olacaktır.

Yine iki zorlanma telinin sıcaklıktan ileri gelen zorlanmaları farkı ile sıcaklık arasında bir grafik çizilebilir veya bir ϵ - t tablosu hazırlanabilir. Böylece şekildeki gibi yine 2x2 lik bir çevirgeç yardımıyla, çevirgecin bir konumunda çeyrek köprüdeki Y.Z.T. nin verdiği yük zorlanması, diğer konumunda Y.Z.T. ve S.Z.T. nin yarım köprüsü durumunda verdiği sıcaklık zorlanmaları farkı ölçülecektir. Daha sonra yine, ilgili grafikten veya ϵ - t tablosundan yararlanarak, bu sinyal sıcaklığa çevrilebilecektir.



Şekil 7 – İkinci yöntem için devre bağlantısı gösterimi

Bu şekilde 2 tane normal tipteki zorlanma teli ve bir zorlanma göstergisi kullanılarak ayrı iki yöntemle $0,1^\circ\text{C}/\mu\text{m}/\text{m}$ duyarlıkla, sıcaklık ve zorlanmanın ardarda ölçülmesinin mümkün olduğu görülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Agaronik, V., Ya, Linhachev, Yu. I and Shakmatov, D.T.; Results of an investigation into the temperature characteristics of combined resistance wire strain gauges on a metal base. Translated from Problemy Prochnosti No. 4 p. 118, April 1973.

2. Anderson, D.R.; High temperature strain gauge developments. Instrument Soc. of America ISA-Proc Preprint 48-2-63, p. 72-4, May 1964.
3. Bertodo, R.; Platinum metal alloys for the measurement of strains at high temperature. Engelhard Industries. Tech Bul. V. 9, p. 37-49, Sept. 1968.
4. 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. 1331-39, Feb. 1976.
5. Bower, D.I.; Temperature dependence of gauge factor and magnetoresistance of some platinum-tungsten strain gauges. Aparatus and technignes p. 848-48, April 1972.
6. Condon, E.U. and Odishaw, U.; Handbook of Physics. Mc Graw-Hill Book Comp. 1967.
7. Cullington D.W. and Hoar, C.P.; Correcting for the effects of temperature on strain gauges, use of computer-logger on Milford Haven Bridge project. Strain p. 99-103, July 1975.
8. Dally, I.W. and Riley, W.F.; Experimental stress Analysis, Mc Graw-Hill Comp. 1965.
9. Egorychev, L.P.; Contactless system for measuring deformations and temperature in mechanism with a double rotation. Meas. Tech. USA. Oct. 1966 No. 10, 1272-3.
10. Greenough, R.D. and Lee, E.W.; Behaviour of electrical resistance strain gauges at low temperatures. I Magnetoresistance. Cryogenics, p. 7-9, Feb. 1967.
11. Greenough, D. and Lee, E.W.; Behaviour of electrical resistance strain gauges at low temperatures. II. Gauge factor. Cryogenics, p. 10-12, Feb. 1967.
12. Lemon, T.E.H.; Measurement of static strain on titanium under rapid heating. Strain (GB) Vol. 7, No. 2, p. 66-73.
13. Micro-measurements. Catalog 1975.
14. Perry, C.C. and Lissner, M.R.; The Strain Gauge Primer, Second Edition Mc Graw - Hill Book Company.
15. Toprak, Tuncer; Uzama teli ile ölçme tekniğinin esasları, Wheatstone köprü devresinin uygulanması, I.T.Ü. Makina Fakültesi Mukavemet Kürsüsü, 1977.
16. Wilson, E.J., Egger, R.L.; Design and operation of a 1500°F thermal-null strain gauges. 25 th. annual ISA Conferance. Philadelphia, Pa. USA. 26-29, Oct. 1970, p. 631/1-6.
17. Window, A.L.; Strain gauges, basic principles, types and instrumentation. Engineering meterials and design, P. 45-50, Feb. 1977.
18. David, T.J.; The measurement of thermal strains in turbine casing, Berkeley castle, London, England: Butter worth, 1971, p. 185-201.