

SINIRLI HACİM SICAKLIKLARI İÇİN KULLANILAN TERMİSTÖR KARAKTERİSTİĞİNİN DOĞRUSALLAŞTIRILMASI

Mustafa BURUNKAYA

Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü
06500 Teknikokullar, ANKARA

ÖZET

Bu çalışmada, inkübatör ortamı gibi sınırlı bir hacimde yüksek çözünürlük ve doğrulukla sıcaklığın ölçülmesi için kullanılabilir olan bir ntc termistörün karakteristiği doğrusallaştırılmıştır. Algılayıcı olarak boncuk tip bir termistör kullanılmıştır. Seçilen termistör hakkında herhangi bir teknik bilgi mevcut olmadığından, önce termistörün sıcaklığa karşı direnç değişim karakteristiği belirlenmiştir. Daha sonra bu karakteristiği doğrusallaştırmak için bir devre tasarlanmıştır. Termistörün doğrusallaştırılmış direnç-sıcaklık karakteristiği sinyal işleme devresi ile voltaja dönüştürülmüştür. Termistör boncuk tip olduğundan boyutları çok küçüktür ve bu sebeple gerçekleştirilen sistem kolaylıkla yüksek çözünürlük ve duyarlılıkla cilt sıcaklığı ölçümlerinde kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Termistör, sıcaklık ölçümü, yüksek çözünürlük ve duyarlılık, doğrusallaştırma.

LINEARIZATION OF A THERMISTOR CHARACTERISTIC FOR LIMITED VOLUME TEMPERATURE

ABSTRACT

In this study characteristic of a ntc type thermistor have been linearized for measuring temperature with high resolution and high accuracy in a limited volume of environment; such as incubator chamber. A bead type thermistor have been used as a sensor. Since there is no any information about the thermistor, resistance versus temperature characteristic of the thermistor was specified firstly. After that a circuit has been designed to linearize the characteristic of the thermistor. Linearized resistance-versus-temperature characteristic of the thermistor have been converted into voltage by the signal conditioning circuit. As the thermistor is a bead type, i.e., small in size, developed system can easily be used in neonatal skin surface temperature measurement instruments with high resolution and sensitivity.

Keywords: Thermistor, temperature measurement, high resolution and sensitivity, linearization.

1.GİRİŞ

Termistörler termal direnç özelliği gösteren seramik metaryaller kullanılan yarıiletken malzemelerdir (1). Kullanılan termistörlerin çoğunluğu negatif sıcaklık katsayıdır (NTC: Negative Temperature Coefficient) (2). Boncuk tip termistörlerin boyutları küçük duyarlılıkları yüksek ve cevap zamanları hızlı olduğundan özellikle biyomedikal cihazlarda, örneğin yeni doğan bebeklerin cilt sıcaklığı ölçümlerinde tercih edilen algılayıcılarıdır. Termistör termal karakteristiğini ve cevap zamanı önemli derecede etkilemeyen bir kılıfla kaplanarak, ortam şartlarındaki değişimlerden örneğin ışık şiddeti, nem vb. ve fototerapi tedavisinin etkilerinden korunmuş olur (1).

Biyomedikal amaçlarla kullanılabilir çeşitli tipte termistörler vardır. Bu tip termistörlerin öz direnci 0,1-100 Ωm arasında, boyutları küçük (çapları 0,5 mm'den az), sıcaklık değişimlerine karşı çok duyarlı (-3 to -5% / $^{\circ}C$) ve uzun dönem sıcaklık kararlılıkları yüksektir (yılda nominal direnç $\pm 0,2\%$) (1). Termistörlerin sıcaklığa bağlı direnç değişim ($R-T$) karakteristikleri doğrusal değildir ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$R_T = R_0 \cdot e^{[\beta(T_0 - T)/(T \cdot T_0)]} \quad (1.1)$$

Denklem 1.1'de ifade edilen sembollerin anlamları aşağıdaki gibidir:

β : Termistörün sıcaklık katsayısı ($^{\circ}K$),

T : Mutlak sıcaklık ($^{\circ}K$),

T_0 : Standart referans sıcaklık ($^{\circ}K$),

R_T : Termistörün direnci (Ω),

R_0 : Termistörün 0 $^{\circ}K$ sıcaklıktaki direnci (Ω)

β değeri sabit kalması gerekirken sıcaklık artışına bağlı olarak çok az artar. Bununla birlikte biyomedikal çalışmalarda 10 - 20 $^{\circ}C$ gibi sınırlı aralıktaki sıcaklık değişimlerinde bu değer değişimi çok önemli değildir. β değeri 2500 - 5000 $^{\circ}K$ sıcaklık aralığında yaklaşık olarak 4000' dür.

Termistörler diğer sıcaklık sensörlerinden daha duyarlıdır (1). Çünkü sıcaklıktaki küçük değişimler diğer algılayıcılara göre daha büyük direnç değişimlerine neden olur (sıcaklık katsayısı $\%4/^{\circ}C$) (2). Termistörler aynı zamanda çok değişik boyut ve şekillere sahip olmak gibi bir avantaja sahiptir. Bu avantajlarının yanında sıcaklığa bağlı olarak doğrusal olmayan direnç değişimleri gibi

çok önemli bir dezavantajları vardır. Bu ise ölçümlerde hatalara sebep olur. Bu sebeple nispeten dar aralıktaki sıcaklık ölçümlerinde bile $R-T$ karakteristiği doğrusal hale getirilmelidir (3).

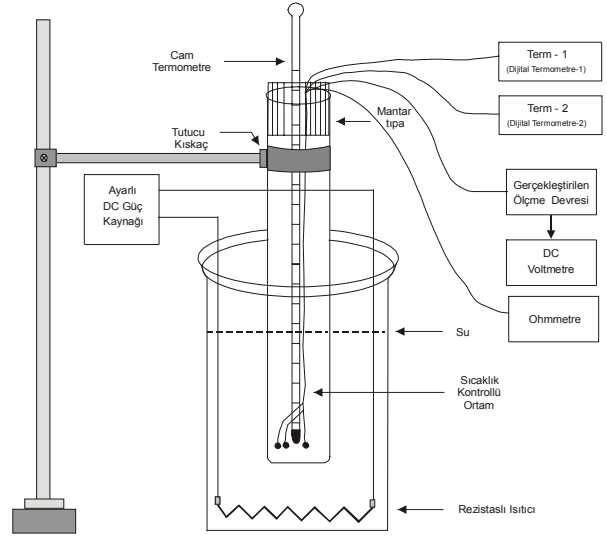
Termistörün $R-T$ karakteristiğinin doğrulaslaştırmak için çeşitli yöntemler vardır. Mikrodenetleyiciler, seri ve paralel dirençler, köprü devreleri vb. bu amaçla kullanılabilir. Köprü devrelerin doğruluğu daha yüksektir, duyarlılığı ise çok küçük sıcaklık farklılıklarını ölçebilecek kadar yüksektir. Örneğin biyolojik çalışmalarda iki organ arasındaki veya aynı organın iki farklı bölgesi arasındaki sıcaklık farkı bu yöntemle kolaylıkla belirlenebilir. Bir doğru akım (dc: direct current) köprüsü, karşı kollardaki dirençler $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki değerleri için $\pm 1\%$ toleransla eşlendiğinde tam skalada 1% ' den daha yüksek bir doğruluk sağlanabilir. Köprünün dc kararlılığı da bir problem oluşturmaz. Çünkü köprünün çıkış voltaj kayması (drift) $0,01\%$ sıcaklık farkında bile iyi bir entegre devreli işlemsel yükselteçten daha azdır (1, 4).

2. GELİŞTİRİLEN SİSTEM

Sıcaklık ölçümlerinde çok yüksek duyarlılık sıcaklığa karşı en duyarlı, boyutları en küçük ve hızlı bir algılayıcı olan termistör kullanılarak sağlanabilir. Bu avantajları sağlamak için ntc tipi boncuk kılıfa sahip bir termistör kullanılmıştır. Tasarımda karşılaşılan ilk problem termistörün $R-T$ karakteristiği hakkında herhangi bir bilgi olmamasıdır. Bu sebeple algılayıcının $R-T$ karakteristiği aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

2.1 Algılayıcının $R-T$ Karakteristiğinin Belirlenmesi

Algılayıcının $R-T$ karakteristiğinin belirlenebilmesi için bir sıcaklık kontrollü ortam düzeneği oluşturulmuştur. Sıcaklık kontrollü ortam Şekil 2.1'de görülen bir beher kabı, bir cam tüp, rezistanslı ısıtıcı, ayarlı dc güç kaynağı, iki adet dijital termometre, bir civalı termometre, bir ohmmetre, ntc termistör ve diğer bağlantı düzeninden oluşmaktadır.



Şekil 2.1. Termistörün $R-T$ karakteristiğini belirlemek için oluşturulan sıcaklık kontrollü ortam

Beher kabının içinde bir miktar su vardır. Rezistanslı ısıtıcı bu suyun içine yerleştirilmiştir. Algılayıcılar ve ntc termistör deney tüpünün içersine ve tüpün çeperlerine temas etmeyecek bir şekilde yerleştirilmiştir. Deney tüpü bu şekilde beher kabının içindeki suya daldırıldığında çok daha doğru ve kararlı bir sıcaklık kontrollü ortam sağlanabilir. Ayrıca deney tüpüne ısının su ile aktarılması, suyun ısıl ataletinden dolayı kontrollü ortamdaki kararlılığın artmasına neden olur.

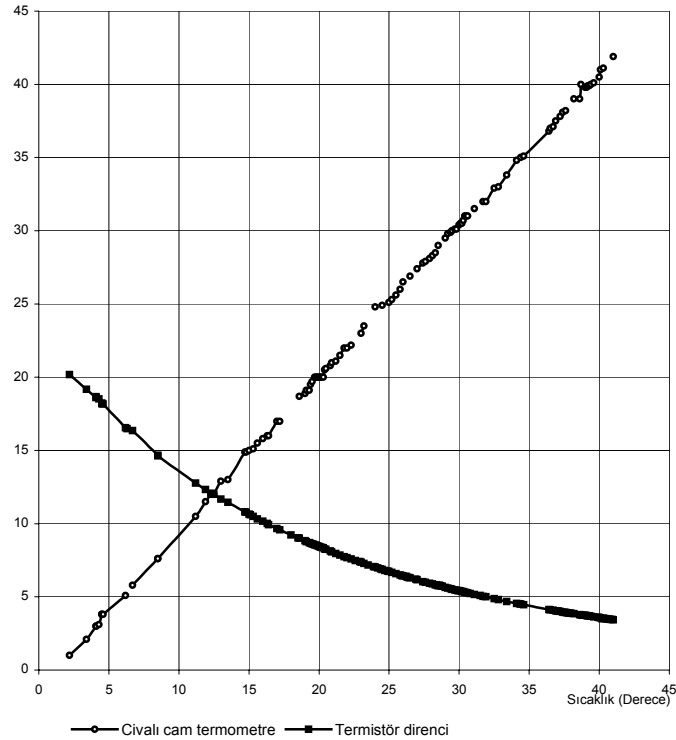
Termistörün $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki direncini belirlemek üzere, yaklaşık 100 gram kadar iyice ufalanmış buz parçacıkları beher kabına eklenerek bir süre beklenir. Cam termometre $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ gösterdiğinde ohmmetre ile ölçülen direnç, algılayıcının $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki direnci olarak Tablo 2.1'e kaydedilir. Ayarlı dc güç kaynağı ile ısıtıcıya 1-2 dakika güç uygulanarak kontrollü ortamın ısısı artırılır ve 1-2 dakika kadar beklenerek kontrollü ortamın sıcaklığının kararlı hale gelmesi beklenir. Aynı zamanda bu süre algılayıcının cevap zamanı nedeni ile yanlış direnç göstermesini de engeller. Bundan sonra algılayıcının artan sıcaklığa karşılık değişen direnci Tablo 2.1'e kaydedilir. Benzer işlemler algılayıcının $R-T$ karakteristiğini belirlemek üzere $0-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığı için küçük ısı değişimi adımları ile tekrarlanır. Bundan sonra Tablo 2.1'e göre ntc termistörün $R-T$ grafiği Şekil 2.2'de görüldüğü gibi çizilmiştir.

Tablo 2.1. Ortam ve cilt sıcaklığını ölçebilen termistörün sıcaklık kontrollü ortamda tespit edilen sıcaklık-direnç karakteristik verileri

Term1 (sıcaklık) (°C)	Term2 (sıcaklık) (°C)	Cam (sıcaklık) (°C)	Termis. (direnç) (kΩ)
2,5	2,2	1	20,1803
3,9	3,4	2,1	19,18
4,7	4,1	3	18,604
5	4,6	3,8	18,16
6,7	6,7	5,8	16,345
8,9	8,5	7,6	14,67
9	8,5	7,6	14,631
11,6	11,2	10,5	12,78
12,4	11,9	11,5	12,334
12,7	12,3	12	12,077
13,9	13,5	13	11,455
15,2	14,7	14,9	10,795
15,5	15	15	10,645
16,1	16	15,8	10,16
16,8	16,3	16	10,01
17,6	17	17	9,67
19,3	18,6	18,7	9
19,8	19,1	19,1	8,76
20,1	19,7	20	8,56
21,5	20,9	21	8,075
22,7	22	22	7,67

Term1 (sıcaklık) (°C)	Term2 (sıcaklık) (°C)	Cam (sıcaklık) (°C)	Termis. (direnç) (kΩ)
23,6	23	23	7,36
	24	24,8	7,035
25,7	25	25,1	6,73
26,4	25,8	26	6,5
27,6	27	27,4	6,158
28,5	27,9	28,1	5,92
29,2	28,5	29	5,753
30,2	29,5	30	5,52
30,9	30,4	31	5,317
32,3	31,7	32	5,03
33,4	32,8	33	4,804
34,6	34,1	34,8	4,55
35	34,4	35	4,494
36,8	36,4	36,8	4,137
37	36,5	37	4,114
38	37,4	38,1	3,957
38,8	38,2	39	3,855
39,3	38,7	40	3,757
40	39,4	40	3,668
40,6	40,1	41	3,565
41,5	41	41,9	3,442

Termistör Direnci (Kohm)



Şekil 2.2. Termistörün sıcaklık kontrollü ortamda saptanan $R-T$ karakteristiği

Ölçümlerin doğruluğunu göstermek üzere çalışılan sıcaklık aralığı boyunca seçilen belirli sıcaklıklardaki direnç değerleri ($0^{\circ}C - R_0$, $20^{\circ}C - R_{20}$, $40^{\circ}C - R_{40}$) hesaplanabilir. Denklem 1.1

kullanılarak ve Tablo 2.1'e göre termistörün β değeri 4040,96, R_{20} 8,579 kΩ ve R_{40} 3554,2 kΩ olarak hesaplanmıştır. Tablo 2.1 ve bu hesaplanan direnç değerleri arasında küçük farklılıklar vardır.

Bunun sebebi sıcaklığın artışına bağlı olarak β değerinin küçük değerdeki artışıdır. Fakat sıcaklık ölçme aralığı nispeten çok dar olduğundan ve son ölçme devresinde aralığın başlangıcı ve sonu için doğrudan fiziksel ve fizyolojik büyüklüğün kendisine (sıcaklık) göre yapılabilecek olan çıkış gerilimi ayarı ile bu hata yok edilebilir.

2.2. Termistör Karakteristiğinin Doğrusallaştırılması

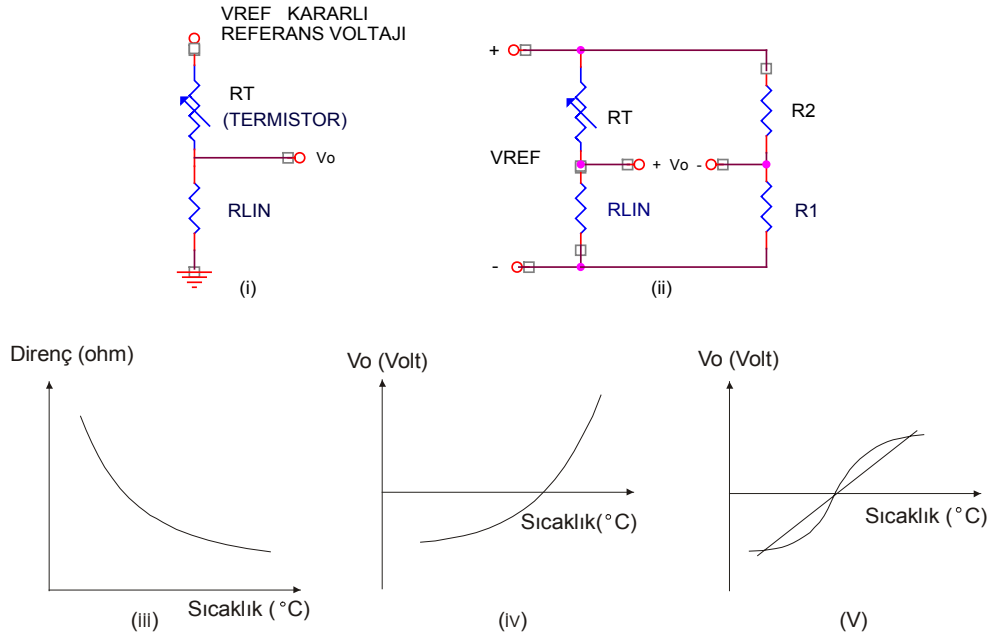
Şekil 2.2’de termistörün $R-T$ karakteristiğinin doğrusal olmadığı görülmektedir. Termistörün doğrusal olmayan karakteristiği, uygun değerdeki bir köprü devresi tarafından sağlanan bir doğrusal olmayan karakteristik ile kompanse edilebilir (2). Bu doğrusallaştırma işlemi Şekil 2.3’te görüldüğü gibi termistöre seri bir direnç ve voltaj kaynağı bağlanarak sağlanabilir (3, 5).

$$V_o = V_{REF} \cdot \left[\frac{R_{LIN}}{(R_{LIN} + R_T)} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right] \quad (2.1)$$

Sıcaklık ölçme aralığının başlangıç, orta ve son değerleri için R_T direnci ve uygun direnç değerleri seçilerek çıkış gerilimi aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

$$V_o = 0 \text{ V } (20 \text{ } ^\circ\text{C}); \quad V_o = 2 \text{ V } (30 \text{ } ^\circ\text{C}); \\ V_o = 4 \text{ V } (40 \text{ } ^\circ\text{C})$$

Buna göre R_1 , R_2 ve R_{LIN} değerlerini tespit edebilmek mümkündür. Bu durumda Şekil 2.3 (v) ile ifade edilen daha doğrusal çıkışlar elde edilebilir (2). Termistörün bu şekilde seri bir dirençle (ve voltaj kaynağı ile) veya paralel bir

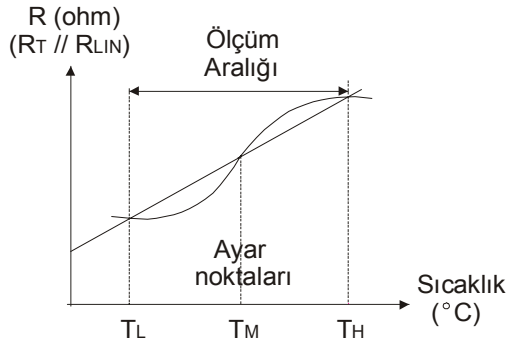


Şekil 2.3. (i) Sıcaklığa göre çıkış voltajı değişen devre; (ii) En büyük doğrusallığı sağlayan köprü devresi; (iii) Termistörün $R-T$ karakteristiği; (iv) Termistörün doğrusal olmayan karakteristiğini kompanse eden karakteristik; (v) Doğrusallaştırılmış çıkış

En uygun doğrusallık sıcaklık aralığı ve köprünün çıkış voltajının orta değerleri seçildiğinde elde edilebilir. Şekil 2.3 (i) ve (ii)’de bu devre bağlantıları görülmektedir. Köprü devresi için çıkış gerilimi (V_o) aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

dirençle (ve akım kaynağı ile) sürülmesi özellikle nispeten küçük sıcaklık aralıklarının ($\pm 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında doğrusallığın bozulması $0,03 \text{ } ^\circ\text{C}$) ölçülmesinde etkili bir yöntemdir (3). Örneğin bir inkübatörde sıcaklık ölçüm aralığı $20-40 \text{ } ^\circ\text{C}$ olduğundan, bahsedilen esasa göre kurulan bir köprü devresi kullanılabilir.

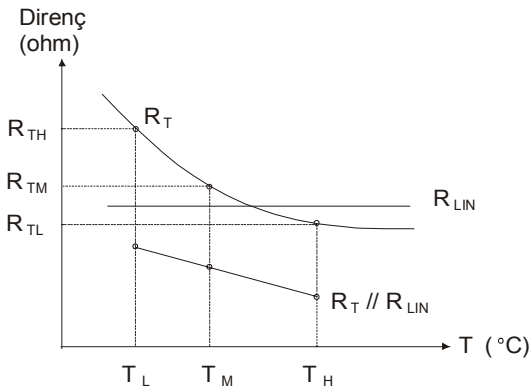
En uygun doğrusallaştırma, Şekil 2.4 ve Şekil 2.5’ de görüldüğü gibi $R_T // R_{LIN}$ değerinin büküm noktası, ölçülecek sıcaklık aralığının orta noktası olan T_M değerinde olduğunda gerçekleşir. R_T artarken, doğrusallaştırma direnci, eşdeğer direncin daha az artmasına neden olur ve karakteristik eğim denklemindeki kuadratik terimleri büyük ölçüde kompanse eder (3, 6). Çok yüksek doğruluk gerektiğinde sıcaklık aralığı tipik olarak ölçülecek sıcaklık aralığının orta noktası ± 25 °C olarak alınmalıdır (1, 6, 7).



Şekil 2.4. Sıcaklık aralığında seçilen üç nokta ile en düşük hata kompanzasyonu

Doğrusallaştırma işleminin başarısı öncelikle seçilen sıcaklık aralık değeri için doğrusallaştırma direncinin en uygun değerinin seçilmesine bağlıdır. Doğrusallaştırma direnci üç sıcaklık değeri (T_L , T_M , T_H) için hatanın sifıra kadar azaltılmasını temin eder. Şekil 2.4’ de R_{LIN} direncinin uygun değeri seçildiğinde, hatanın aralığın her iki tarafında da aynı genlikte olduğu görülmektedir.

R_{LIN} direncinin en uygun değeri, ölçülecek sıcaklık aralığının başlangıcına ve sonuna T_L ve T_H , ortasına ise T_M değeri yerleştirilerek bulunur (Şekil 2.5). R_{TL} , R_{TM} ve R_{TH}



Şekil 2.5. Doğrusallaştırma direncinin hesabı

sırası ile algılayıcının T_L düşük, T_M orta ve T_H yüksek sıcaklık değerlerindeki direncidir. Bu durumda seçilen sıcaklık aralığının orta değerinde doğrusallaştırma direnci algılayıcının direncine eşit olmalıdır. Bu sebeple eşdeğer devrenin direnç değişimleri ölçüm aralığının alt ve üst yarısında aynı değerde olacaktır (6).

2.3. Doğrusallaştırma Direncinin Hesaplanması

Termistörün $R-T$ karakteristiği daha önce aşağıdaki gibi ifade edilmişti:

$$R_T = R_0 \cdot e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

Paralel bağlı iki direncin eşdeğeri aşağıdaki gibi bulunur:

$$R = R_p \parallel R_T = R_p \cdot R_T / R_p + R_T$$

$$\frac{dR}{dT} = \frac{R_p^2 \cdot (dR_T / dT)}{(R_p + R_T)^2} \quad (2.2)$$

Denklem (2.2) direnç çiftinin sıcaklığa karşı tepkisini ifade etmektedir. Bu eğri üzerinde, ölçülecek sıcaklık aralığının başlangıcında ve sonunda termistörün direnci sırası ile R_{T1} ve R_{T2} olarak seçilir. Bunların her ikisi de aynı eğime sahiptir.

$$\frac{R_p^2 \cdot (dR_{T1} / dT)}{(R_p + R_{T1})^2} = \frac{R_p^2 \cdot (dR_{T2} / dT)}{(R_p + R_{T2})^2} \quad (2.3)$$

Denklem (2.3) kullanılarak en uygun doğrusallaştırma direnci tespit edilir.

$$R_p = \frac{R_{T1} \cdot (-dR_{T2} / dT)^{1/2} - R_{T2} \cdot (-dR_{T1} / dT)^{1/2}}{(-dR_{T1} / dT)^{1/2} - (-dR_{T2} / dT)^{1/2}} \quad (2.4)$$

Direnç çifti paralel devrede akım kaynağı ile, seri devrede ise bir gerilim kaynağı ile sürülerek sıcaklığa göre oluşan direnç değişimleri elektriki büyüklüklere çevrilebilir. Doğrusallaştırma direncinin değeri her iki durumda da aynıdır (8).

$$R_p = R_{SER} = R_{LIN} = \frac{R_{T1} \cdot T_1 \cdot (R_{T2})^{1/2} - R_{T2} \cdot T_2 \cdot (R_{T1})^{1/2}}{T_2 \cdot (R_{T1})^{1/2} - T_1 \cdot (R_{T2})^{1/2}} \quad (2.5)$$

Doğrusallaştırma direncinin değeri denklem (2.5) ve Tablo 2.1 veya Şekil 2.2’deki değerler kullanılarak hesaplanabilir. Doğrusallaştırma direncinin değeri 20 °C -40 °C’lik sıcaklık

aralığının ölçülebilmesi için aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

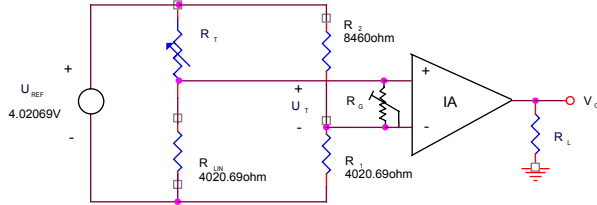
$$R_{LIN} = \frac{8460(273+20)(3590)^{\frac{1}{2}} - 3590(273+40)(8460)^{\frac{1}{2}}}{(273+40)(8460)^{\frac{1}{2}} - (273+20)(3590)^{\frac{1}{2}}} = 4020,69 \Omega$$

Algılayıcının kendi kendini ısıtma etkisinin (self heating error) çok küçük olabilmesi için, sürücü akım 1 mA olarak seçilmiştir. Düşük ateşleme akımları termistörün kendi kendine ısıtma bölgesine girmesine sebep olmaz. Doğrusallaştırma direnci ve termistör seri olarak bağlandığından, termistörü ateşlemek için kullanılan referans voltaj kaynağının (U_{REF}) voltaj değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$U_{REF} = I_{REF} \cdot R_{LIN} = 1 \text{ mA} \cdot 4020,69 \Omega = 4,02069 \text{ V}$$

2.4. Ölçme Devresi

Şekil 2.6' da ölçme devresinin son hali görülmektedir. Termistör voltaj kaynağı ve standart bir dirençle (% 1, metal film) seri olarak bağlanmıştır. Çıkış voltajı U_T (veya V_o) sıcaklığın doğrusal bir fonksiyonudur. Çıkış voltajının yüklenmemesi için, enstrümantasyon yükselticinin (IA: Instrumentation Amplifier) evirmeyen girişi kullanılmıştır. R_1 , R_2 , R_T , R_{LIN} ve R_G kazanç ve sıfır ayarı için kullanılmaktadır.



Şekil 2.6. NTC termistör için kazanç, sıfır ayarı ve doğrusallaştırmayı sağlayan devre

Kullanılan devre elemanlarının seçimi ve hesaplanması gerçekleştirilen sisteme göre anlatılacaktır. Ölçme devresi 20°C - 40°C aralığındaki sıcaklık değerlerini ölçmekte ve 0 ile 4 V arasında çıkış vermektedir. Referans voltajı 4,02069 V ve algılayıcı silisyum ntc tip bir termistördür. Doğrusallaştırma direncinin değeri (R_{LIN}) belirtilen sıcaklık aralığı için daha önce açıklandığı gibi $4020,69 \Omega$ olarak hesaplanmıştır. Köprü devresinin dengede olabilmesi için $R_1 = R_{LIN} = 4020,69 \Omega$, $R_T = R_2 = 8460 \Omega$ olarak alınır. R_G direnci

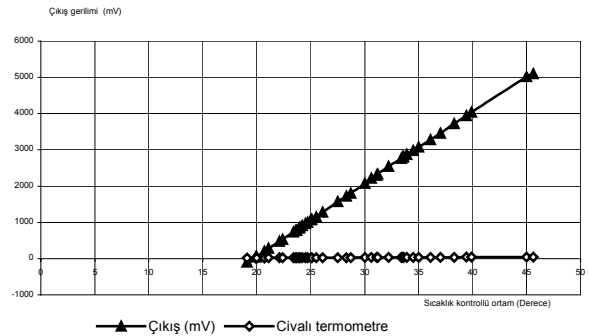
kazanç ayarı için kullanılmakta ve son skala değerini belirlemektedir. Köprünün dengesi gerektiğinde R_1 direnci ayarlanarak sağlanabilir. Toleransı düşük ve sıcaklık kayması düşük olan referans voltaj kaynağı (U_{REF}) (REF 02, Burr-Brown) algılayıcının sürülmesi (ateşleme) için kullanılmaktadır. Bu şekilde algılayıcının direnç değişimleri oransal voltaj değişimlerine dönüştürülmektedir. Denge şartlarında 0V çıkış elde edebilmek için IA' nın çıkışı $1 k\Omega$ ' luk ilave bir dirençle yüklenmelidir. Devrenin çıkış voltajı (U_T , V_o) Tablo 2.2 veya Şekil 2.7' de görüldüğü gibi sıcaklık değişimlerinin doğrusal bir fonksiyonudur.

2.5. Geliştirilen Ölçme Devresinin Performans Analizi

Geliştirilen ölçme devresinin performans analizi Şekil 2.1' de görülen ve daha önce algılayıcının $R-T$ karakteristiğini tespit etmekte de kullanılmış olan sıcaklık kontrollü ortamda yapılmıştır. Doğrusallık hataları ile birlikte sıcaklığa göre direnç ($R-T$) ve çıkış gerilimi karakteristiği Tablo 2.2 ve Şekil 2.7' de görülmektedir.

Tablo 2.2. Ölçme devresinin doğrusallık hataları ile birlikte sıcaklığa karşı direnç ve çıkış voltajı karakteristiği

$T (^{\circ}\text{C})$	$R_T (k\Omega)$	$U_T (V)$	$(V_o) (V)$
T_L	20	R_{TL} 8,46	U_{TL} 0
T_M	30	R_{TM} 5,29	U_{TM} 0,418
T_H	40	R_{TH} 3,59	U_{TH} 0,831



Şekil 2.7. Sıcaklık ölçme devresinin doğrusal çıkış voltajı

Tablo 2.2 ve Şekil 2.7' ye göre ölçme devresinin doğrusallık hatası hesaplanabilir. Önce hesaplanan direnç değerleri ve referans voltajına göre köprü devresinin çıkış voltajını (U_T) hesaplayalım.

$\frac{U_{TL}}{\text{-----}}$	$\frac{U_{TM}}{\text{-----}}$	$\frac{U_{TH}}{\text{-----}}$
$T_L=20\text{ }^\circ\text{C}, R_{TL}=8450\ \Omega$	$30\text{ }^\circ\text{C}, 5290\ \Omega$	$40\text{ }^\circ\text{C}, 3590\ \Omega$
$U_{TL}=U_2-U_1$	$U_2=\frac{4,02}{5290+4020}\cdot 4020=$	$U_2=\frac{4,02}{3590+4020}\cdot 4020$
$U_2=\frac{4,02}{8450+4020}\cdot 4020$	$U_2=1,73\ \text{V}$	$U_2=2,123\ \text{V}$
$U_2=1,295\ \text{V}$		
$U_{TL}=1,295\ \text{V}-1,295\ \text{V}$	$U_{TM}=1,73-1,295$	$U_{TH}=2,123-1,295$
$U_{TL}=0\ \text{V}$	$U_{TM}=0,43\ \text{V}$	$U_{TH}=0,828\ \text{V}$

Son skala değerine göre köprünün hesaplanan (gerçek değer) çıkış voltajı 0,831 V ve ölçülen çıkış voltajı (ölçülen değer) ise 0,828 V' tur. Buna göre doğrusallık hatası:

$$\% \text{ hata} = \frac{\text{ölçülen deger} - \text{gerçek deger}}{\text{tam skala degeri}} =$$

$$\frac{0,828 - 0,831}{0,831} \cdot 100 = \% -0,361$$

bulunur. Köprü devresinin son skala değerine göre en büyük hatası sadece $\% -0,361\text{V}$ ' tur. Daha yüksek doğruluk için köprü devresinde R_1 direnci ile $20\text{ }^\circ\text{C}$ için 0 ayarı ve R_G ile $40\text{ }^\circ\text{C}$ için kazanç ayarı yapılarak çıkış gerilimi tam 4 V olarak elde edilmiştir.

Duyarlılık $R_T \parallel R_{LIN}$ ile sıcaklığa göre direnç değişimlerinin fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$tg\alpha = \frac{R_{T20^\circ\text{C}} // R_{LIN}}{R_{T40^\circ\text{C}} // R_{LIN}} \quad tg\alpha = 1.437$$

Duyarlılık sıcaklığın foksiyonu olarak değişen çıkış voltajı ile de hesaplanabilir.

$$\text{Duyarlılık} = \frac{4\text{V} - 0\text{V}}{40^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}} = 0,2\ \text{V}/^\circ\text{C}$$

($20 \leq T \leq 40\text{ }^\circ\text{C}$)

3. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada tıbbi çalışmalarda kullanılan bir ntc tip termistörün karakteristiği belirlenmiş ve

doğrusal hale getirilmiştir. Daha sonra gerekli olan sinyal işleme devresi eklenerek sıcaklık ölçme devresi gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları seri direnç-termistör çiftinin sıcaklık değişimlerinin fonksiyonu olarak, doğrusal direnç değişimleri gösterdiğini ortaya koymuştur. $20-40\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında doğrusallık hatası $\% -0,361$ ' dir. Bu değer son skalaya göre yapılan ayar ile ölçü aletinin mümkün kıldığı $\% 0$ değerine kadar düşürülmüştür.

Doğrusallaştırma işlemi sonunda termistörün duyarlılığı önemli derecede azalmış olsa da, hala fiziksel büyüklüklerin ve tıp elektronisinde cilt ve ortam sıcaklıklarının duyarlı olarak ölçülebilmesi için yeterince yüksektir. Ölçme devresinin duyarlılığı $0,2\ \text{V}/^\circ\text{C}$ olarak ölçülmüştür. Geliştirilen ölçme devresi kullanılarak, başka bir çalışmada inkübatör ortamında $0,02\text{ }^\circ\text{C}$ çözünürlükte sıcaklık ölçümü ve kontrolü kolaylıkla başarılabilmektedir. Ulaşılan duyarlılık ile uygun çözünürlüğe sahip bir dijital gösterge ile bundan çok daha yüksek çözünürlüklü ölçümlerin yapılabilmesi mümkündür.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Fonu tarafından desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

1. Webster, J.G., Medical Instrumentation, John Wiley & Sons, New York, 1995.
2. Denton, T., Automobile Electrical & Electronic Systems, Arnold, London, 1998.
3. Norman, R.A., Principles of Bioinstrumentation, John Wiley & Sons, New York, 1988.
4. Van Boak, D.A., An Improved Way to Use Thermistor in Temperature Servomechanisms, Meas. Sci. Tech., U.K., 5, 864-865, 1994.
5. Kaliyugovaradan, S., Sankarant, P., Vurti, V.G.K., Hardware Linearization of Thermistor Response Using Series-Parallel Resistors for Temperature to Time Conversion, Meas. Sci. Tech., U.K., 5, 786-788, 1994.
6. Sheingold, D.H., Transducer Interfacing Handbook, Analog Devices, Inc., Massachusetts, 1980.
7. Microchip Technology Inc., AN 685 Reference Manual, USA, 1999.
8. Welkowitz, W., Deutsch, S., Akay, M., Biomedical Instruments Theory and Design, Academic Press, Inc., California, 1992.