

KATI CİSİMLERİN YÜZEY SICAKLIKLARININ BELİRLENMESİ

Aynur DAVUT

TSE Ankara Kalibrasyon Müdürlüğü Necatibey Cad.No:112 06100 Bakanlıklar/ANKARA
E-Mail: adavut@tse.org.tr

ÖZET

Bu çalışmada, katı cisimlerin yüzey sıcaklıklarının belirlenmesi için tasarlanan yüzey termometreleri genel olarak incelenmiştir. Endüstriyel uygulamalarda kullanım kolaylığı nedeniyle düşük sıcaklık bölgelerinde yapılan ölçümlerde de radyasyon termometreleri sıklıkla kullanılmaktadır. Temassız ölçümlerde kullanılan radyasyon termometresi ile yüzey proplu göstergeli sıcaklık ölçer kullanılarak, yüzey sıcaklığı kalibratörünün yüzey sıcaklıkları belirlenmiştir. Alınan veriler doğrultusunda ölçüm belirsizlikleri de hesaplanarak termometrelerin mukayesesi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yüzey probu, Radyasyon termometresi, temaslı ölçüm, Ölçüm belirsizliği.

ABSTRACT

In this study, thermometers designed for measuring surface temperature of solid bodies are generally investigated. In industrial application hand held radiation thermometers are frequently used for low temperature range in practice. Radiation thermometer, as non contact thermometer and hand held digital thermometer with K type surface probe are used to determine for surface temperature. Readings from measurement of surface temperature are evaluated for both thermometer and compared.

KeyWords: Surface probe; Radiation thermometer, Contact measurement, Measurement uncertainty, Energy saving, Solar heating.

1. GİRİŞ

Termal olarak denge halinde bulunan katı cisimlerin sıcaklığını ölçmek problemli bir konudur. Katı cismin sıcaklığı temaslı veya temassız olarak ölçülebilir. Bununla birlikte yarı temaslı metotlar da kullanılabilir. Yüzey sıcaklığının ölçümünde kullanılan yüzey proplu termometrelerin izlenebilirliğinin sağlanmasında yüzey sıcaklığı ölçümünden kaynaklanan sıkıntılar vardır. Bu nedenle referans standart olarak kullanılacak cihaz yapımı üzerinde metroloji enstitülerinin çalışmaları vardır. Bazı enstitülerde ise, halen izlenebilirlik direnç termometresi ile sıvı banyolarda yapılan kalibrasyonlarla sağlanmaktadır.[1] Buna rağmen endüstriyel uygulamalarda kullanım kolaylığı bakımından yüzey sıcaklıklarının ölçümünde radyasyon termometreleri de kullanılmaktadır. Bu tür termometreler yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilmiş olmasına rağmen düşük sıcaklık bölgelerinde de kullanım kolaylığı ve hijyen vb. şartlar nedeniyle kullanılmaktadır. Yüzey sıcaklığı ölçümünde kullanılan diğer termometrelerde yüzey proplu termometrelerdir. Burada yüzey sıcaklık ölçümünün ve yüzey proplarının teorisinden de bahsetmek gerekecektir.

2. TEMASLI ÖLÇÜM METODUNUN TEORİSİ

Katı bir cisim kendini çevreleyen gaz ortamıyla termal olarak kararlı durumdadır. Katı cisim yüzey sıcaklık kaynağıdır ve yüzeyin sıcaklığı θ_s , onu çevreleyen θ_a , gaz ortamının sıcaklığından büyüktür. Yüzey sıcaklığı yüzey ile temas halinde bulunan termokupl termometre ile ölçülür. Bu durumda denge halinde bulunan katı cisim sıcaklığı ile onu çevreleyen atmosferin sıcaklığı arasındaki kararlı durum bozulur. Sensör, yüzeyle temas halindeyken yoğun bir ısı akısına maruz kalır. Yüzey sıcaklığı θ_s den θ sıcaklığına düşer. Böylece sıcaklık farkı ;

$$\Delta\theta_1 = \theta' - \theta_s$$

ile ifade edilir. Ölçümün 1.kismi hatası olarak adlandırılan orijinal sıcaklık alanının deformasyonuna sebep olur.

Sensör ile araştırılan yüzey arasında daima ideal olmayan temas nedeniyle termal temas direnci w_c olur ve bu nedenle sıcaklık düşer.

$$\Delta\theta_2 = \theta'' - \theta'$$

ikinci kısmi hata olarak adlandırılır.

Bütün sensörlerde termometre okumasının hassas olduğu bir nokta vardır. Bu noktanın sıcaklığını θ_T ile gösterirsek sensörün yüzey ile temas ettiği nokta ile sıcaklığa duyarlı olduğu nokta arasında θ'' kadar farklıdır.

$$\Delta\theta_3 = \theta_T - \theta''$$

Sensörün tasarımına bağlı olan bu parametre de 3.kismi hata olarak adlandırılır.

Termal olarak kararlı durumda ki katı bir cismin yüzey sıcaklığının ölçümündeki sistematik hatalar belirtilen $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3$ farklarıdır.

2.1.Bozulan Sıcaklık Alanları

Sensör olmaksızın cismin sahip olduğu bir sıcaklık alanı vardır, $\theta_b = f(x, r)$ ile tanımlanır. Bozulan sıcaklık alanı ise $\theta_d = f(x, r)$ ile tanımlanır. Bozulan sıcaklık alanı bozulan ısı akısı yoğunluğu nedeniyle dir. Sensör boyunca iletilen ısı akısının yoğunluğu q_T ile onu çevreleyen ortama transfer olan ısı akısı yoğunluğu q_b arasındaki fark neticesindedir.

Bozulan ısı akısı yoğunluğu,

$$q_d = q_T - q_b = f(x, r) \quad 1)$$

ile verilir.

Silindirik bir cismin bozulan (zorlanan) sıcaklık alanının ifadesi ısı iletiminin diferansiyel denklemi olarak verilir.

$$\frac{\partial^2 \theta_d}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_d}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta_d}{\partial x^2} = 0 \quad (2)$$

Yarı sonsuz bir cisim için sınır koşulları:

$$\left[\frac{\partial \theta_d}{\partial x} - \frac{\alpha_1}{\lambda} \theta_d \right]_{x=0} = \frac{-q_d}{\lambda_b} \Big|_{r=R_T}$$

$$\left[\frac{\partial \theta_d}{\partial x} - \frac{\alpha_2}{\lambda_b} \theta_d \right]_{x=l_b} = 0$$

$$\theta_d|_{x=0} < \infty; \theta_d|_{x=l_b} = 0$$

Sınır koşulları için, 2 numaralı denklemin çözümü;

$$\theta_d = -\frac{q_d R_T}{\lambda_b} H(k_X, k_Y, k_I, B_1, B_2) \quad (3)$$

Burada ;

$$k_X = \frac{h}{R_T}, \quad k_Y = \frac{r}{R_T}, \quad k_I = \frac{l_b}{R_T}, \quad B_1 = \frac{\alpha_1 R_T}{\lambda_b}, \quad B_2 = \frac{\alpha_2 R_T}{\lambda_b}$$

Bozunan sıcaklık değerleri düzlem kalınlığının artmasıyla azalır. Eğer düzlem yeteri kadar kalınsa yarısız cisim olarak dikkate alınabilir.

2.2. Sensöre Giren Isı Akısı

Eşitlik (1) i takip edersek , bozunan q_d , ısı akısı yoğunluğunun belirlenmesi sensöre giren q_T ısı akısı yoğunluğunun bilinmesini gerektir. Yüzey sıcaklık ölçümlerinde kullanılan muhtelif sensör tipleri için ısı akısının ne olduğunun bilinmesi gereklidir.

Isı transfer katsayısı sabit değerlere sahiptir ve bir çubuk veya düzlemin enine kesitindeki sıcaklık alanı tekdüzedir yani sensörün ön yüzündeki ısı akısı yoğunluğu tekdüzedir. Sensörler sonsuz uzun kabul edilmiştir. Her bir model için ısı akısı Φ_T , ısı akısı yoğunluğu olarak, sensör yüzeyinde A_T ile temas halindeyken

$$q_T = \frac{\Phi_T}{A_T} \quad (4)$$

İle verilir. Sensörün yüzeyle temas halindeyken termal direnci W_T de θ_T ile ilişkili olarak

$$W_T = \frac{\theta_T}{\Phi_T} \quad (5)$$

2.2.1. Disk Sensör

Disk şeklindeki bir sensör için sadece üst yüzeyinden çevreye ısı transferi yaptığı varsayılırsa ($l_p \ll 2R_p$) ve $\theta_{p1} = \theta_{p2} = \theta_T$. Bu durum termal iletkenliği λ_p büyük ince bir diske karşı gelir. Isı akısı

$$\Phi_T = \pi R_p^2 \alpha_p (\theta_T - \theta_a) = \pi R_p^2 \alpha_p \theta_T \quad (6)$$

Isı akısı yoğunluğu

$$q_T = \frac{\Phi_T}{\pi R_p^2} = \alpha_p \theta_T \quad (7)$$

Diskin termal direnci ise ,

$$W_T = \frac{1}{\pi R_p^2 \alpha_p} \quad (8)$$

2.2.2. Çubuk Sensör

Çubuk şeklinde tanımlanan sensör tipi boyunca sıcaklık dağılımını tanımlayan diferansiyel denklem aşağıda verilmiştir.

$$\frac{d^2\theta_c(x)}{dx^2} - \frac{2\alpha_c}{\lambda_c R_c} \theta_c(x) = 0 \quad (9)$$

Sınır koşulları,

$$\theta_c(x)|_{x=0} = \theta_T; \theta_c(x)|_{x=\infty} = 0 \quad (10)$$

(9) denkleminin (10) da verilen sınır koşulları için çözümünden aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\theta_c(x) = \theta_T \exp\left(-\sqrt{\frac{2\alpha_c}{\lambda_c R_c}} x\right) \quad (11)$$

Sensöre giren ısı akısı Φ_T ,

$$\Phi_T = \int_0^{\infty} 2\pi R_c \alpha_c \theta_c(x) dx \quad (12)$$

ye göre çubuğun yan yüzeylerinden çevreye transfer edilen toplam ısı akısına eşittir. Eşitlik (11) i denklem (12) de yerine koyarsak

$$\Phi_T = \pi R_c \sqrt{\alpha_c \lambda_c R_c} \theta_T \quad (13)$$

Elde ederiz. O zaman ısı akısı yoğunluğu,

$$q_T = \frac{\Phi_T}{\pi R_c^2} \quad (14.a)$$

Son olarak ,

$$q_T = \sqrt{\frac{2\alpha_c \lambda_c}{R_c}} \theta_T \quad (14.b)$$

Çubuğun (iletkenin) termal direnci, W_T ,

$$W_T = \frac{1}{\pi R_c \sqrt{2\alpha_c \lambda_c R_c}} \quad (15)$$

2.2.3. Çift iletkenli termokupulsensör

iki bağımsız çubuk olarak alınabilir. Pek çok durumda $R_{c1} = R_{c2} = R_c$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_c$, $\theta_{T1} = \theta_{T2} = \theta_T$ olarak varsayılır. O zaman sensöre giren toplam ısı akısı,

$$\Phi_T = \pi R_c \sqrt{2\alpha_c R_c} (\sqrt{\lambda_{c1}} + \sqrt{\lambda_{c2}}) \theta_T \quad (16)$$

Sensörün termal direnci;

$$W_T = \frac{1}{\pi R_c \sqrt{2\alpha_c R_c} (\sqrt{\lambda_{c1}} + \sqrt{\lambda_{c2}})} \quad (17)$$

Her bir iletkenin ısı akısı yoğunluğu (14) eşitliği ile verilmiştir.

2.2.4. Disk termokupulsensör

2.2.1 ve 2.2.2 deki basitleştirmeler $R_c \ll R_p$ varsayımı ile aynıdır.

Sensöre giren toplam ısı akısı Φ_T , her iki iletken ve diskin akıları toplamına eşittir.

$$\Phi_T = [\pi R_p^2 \alpha_p + \pi R_c \sqrt{2\alpha_c R_c} (\sqrt{\lambda_{c1}} + \sqrt{\lambda_{c2}})] \theta_T \quad (18)$$

Isı akısı yoğunluğu;

$$q_T = \frac{\Phi_T}{\pi R_p^2} = \left[\alpha_p + \frac{R_c}{R_p} \sqrt{2\alpha_c R_c} (\sqrt{\lambda_{c1}} + \sqrt{\lambda_{c2}}) \right] \theta_T \quad (19)$$

ve termal direnç;

$$W_T = \frac{1}{\pi [\alpha_p + \frac{R_c}{R_p} \sqrt{2\alpha_c R_c} (\sqrt{\lambda_{c1}} + \sqrt{\lambda_{c2}})]} \quad (20)$$

2.3. Metot Hataları ve Azaltılması

1.kısmi hata $\Delta\theta_1$, en başta verilen tanıma uygun olarak,

$$\Delta\theta_1 = \theta' - \theta_c \quad (21)$$

Verilmiştir. Bu hata sensör ve cisim arasındaki temas yüzeyinde; bozulan sıcaklığın $\theta_{d,m}$, orta değerine eşittir. Yarı sonsuz bir cisim için

$$\theta_d = \frac{-q_d R_b}{\lambda_b} F(k_x, k_y, B) \quad (22)$$

Burada λ_b cismin ısı iletkenliği, α_b ise cismin yüzeyindeki ısı transfer katsayısıdır.

Yarı sonsuz cisim için (22) denkleminde, hata $\Delta\theta_1$

$$\Delta\theta_1 = \theta_{d,m} \Big|_{x=0, 0 \leq y \leq R_T} = \frac{-q_d R_b}{\lambda_b} F_m \Big|_{x=0, 0 \leq y \leq R_T} \quad (23)$$

Olarak tanımlanır. Formüldeki ısı akısı yoğunluğu q_d ,

$$q_d = q_T - q_b \quad (24)$$

Olarak hesaplanır. Bir önceki bölümde dört sensör modeli için q_T 'nin belirlenmesi tanımlanmıştır. Problemi basitleştirmek için $\theta_T = \theta' (W_c = 0)$ olarak farz edilmiştir. q_b 'nin değeri $q_b = \alpha_b \theta_T$ den hesaplanır. F_m 'nin değeri grafiksel olarak bulunurken hatanın hesabı $\Delta\theta_1$, iterasyonla veya grafik olarak yapılır bunun yanı sıra hazır formülde kullanılabilir. Yarı sonsuz cisim için Mackiewics (1976a) tarafından termal temas direnci dikkate alınarak türetilmiştir.

$$\Delta\theta_1 = \frac{(W_T + W_c) / (W_c - 1)}{1 + (\pi R_T \lambda_b / F_m) (W_T + W_c)} \theta_c \quad (25)$$

Burada; λ_b araştırılan cismin termal iletkenliği, W_T her bir sensör için termal direnç, W_c sensör ve cisim arasındaki termal temas direnci ve W_c cismin yüzeyinden çevreye yayılan ısı transfer direncidir. Sensöre uyarılmadan önce aşağıdaki bağıntıyla verilmiştir.

$$W_c = \frac{1}{\alpha \pi R_c^2} \quad (26)$$

Benzer şekilde sonsuz geniş bir plaka için bozulan ısı akısının teorisine dayanan hata $\Delta\theta_1$, denklem (3)'e dayanan hesaplama ile bulunabilir. *Bu metodun uygulama bölgesi plaka yüzeylerinin her iki tarafındaki ısı transfer katsayısı ($\alpha_1 = \alpha_2$) aynı olduğu zaman ve plakanın kendisi sadece 1 tabakadan oluştuğundadır.*

$\Delta\theta_1$ 'in 1.kismi hatasını azaltmak için çeşitli yollar vardır.[2]

- 1) Sensör ve araştırılan cisim arasındaki temas yüzeyinin artırılmasıyla azaltılabilir. Bu yolla ısı akısı yoğunluğu temas yüzeyinde azalır ve böylece orijinal sıcaklık alanının deformasyonu da azalır. Buna ulaşmak için yapılması gereken i yüksek termal iletkenliğe sahip ilave metal disk uygulamasıdır.
- 2) $\Delta\theta_1$ 'in değerinin azalması sensör boyunca ölçüm noktasından iletilen ısı akısının azalmasıyla elde edilebilir. Bu amaçla termokupul iletkenler mümkün olduğu kadar ince ve kısa mesafeli, araştırılan yüzeye izotermeler boyunca paralel olmalıdır. Sensöre giren ısı akısı üzerinde iletken yarıçapının R_f etkisi (13) eşitliğinden görülebilir.
- 3) $\Delta\theta_1$ hatanın toplam eliminasyonu (toptan bertaraf edilmesi), araştırılan yüzeye aynı emisiviteye sahip ve daimi (uzun süreli bağlantılı) yüksek iletkenliğe sahip materyalden yapılmış ince disk sensör uygulamasıyla elde edilebilir. Böyle bir çözümde ısı akısı yoğunlukları q_s ve q_T eşit termal direnç $W_s = W_T$, ($\alpha_s = \alpha_T$) eşittir. Yüzeye daimi olarak bağlı bir disk için, sensörle yüzey arasındaki temas direnci yaklaşık olarak ($W_c \approx 0$) sıfırdır. (23) ve (25) eşitliklerinden $\Delta\theta_1 = 0$ olur, yukarıda tanımlanan durumda.

İkinci kısmi hata; $\Delta\theta_2$

$$\Delta\theta_2 = \theta'' - \theta' \quad (27)$$

olarak tanımlanır. Bu hata sensör ve cisim arasındaki ara yüzde W_c termal temas direncinin olması sonucudur. Sensöre giren ısı akısının etkisi altında W_c direnci geçerek oluşan sıcaklık düşmesi olarak alınabilir. Böylece $\Delta\theta_2$,

$$\Delta\theta_2 = -\Phi_T W_c \quad (28)$$

Olarak verilmiştir. Yarı sonsuz bir cisim olması halinde ;

$$\Delta\theta_2 = \frac{(W_c/W_s) + (\pi R_T \lambda_s / F_{in}) W_c}{1 + (\pi R_T \lambda_s / F_{in}) (W_T + W_c)} \theta_T \quad (29)$$

Olarak verilmiştir.

Burada; λ_s araştırılan cismin termal iletkenliği, W_T her bir sensör için termal direnç, W_c sensör ve cisim arasındaki termal temas direnci ve W_s cismin yüzeyinden çevreye yayılan ısı transfer direncidir.

Termal temas direnci W_c yi hesaplamak, düzgünlük (pürüzlülük ve yüzeyin temizliği), sensöre uygulanan kuvvet, sensörün elastisitesi, yüzey materyalleri vb., bir çok faktöre bağlı olduğundan oldukça güçtür. Deneysel sonuçlara dayanarak 8 mm çapındaki bakır plaka sensör için 30 N civarında bir kuvvetin uygulanması tavsiye edilebilir.. Termal temas direncinin azaltılması kontak yüzeylerin temizlenmesi, oksitlerin, yağların ve diğer safsızlıkların yüksek termal iletkenliğe sahip macun uygulamasıyla mümkündür.

3.kismi hata $\Delta\theta_3$,

$$\Delta\theta_3 = \theta_T - \theta' \quad (30)$$

Olarak tanımlanır. Sensör boyunca hesaplanacak sıcaklık dağılımı bilinmelidir. Sensörün duyarlı noktası ile ön yüzeyi arasındaki mesafe gerçekten küçük olsa da, sensörün l' uzunluğu boyunca yan yüzeylerden ısı akışı ihmal edilebilir. Böylece 3.kısımla hata,

$$\Delta\theta_3 = -q_T \frac{l'}{\lambda_T} \quad (31)$$

ile verilir. Burada λ_T sensör materyalinin termal iletkenliğidir.

3.kısımla hatayı azaltmak için, $\Delta\theta_3$, ölçülen yüzeye sensörün duyarlı olduğu noktanın l' mesafesi mümkün olduğunca küçük olmalıdır. Bu sadece metalik yüzeylerde kullanılabilen ince düz bandtermokupul, ince plaka, iyi iletken materyalden veya birleştirilmemiş termokupullar, işaretlememiş veya nokta kondüktörler gibi; elde edilebilir.

Dinamik Hatalar: Temaslı yüzey sıcaklık ölçümlerinde özellikle, elde taşınan portatif sensörler kullanıldığında dinamik hatalar görülür. Dinamik hata teorisi, temas sıcaklığı ölçümlerinde Markiewicz 1976 b'ye kadar uygun şekilde geliştirilmedi. Bu tip hatalar, temas sensörü araştırılan yüzeye temas ettikten sonra ısıl olarak kararlı duruma erişmeden önce yapılan ölçümlerden dolayı oluşur. Bu hata okuma yapmadan önce yeteri kadar uzun süre temas ettirilirse bertaraf edilir. *Pratikte bu süre 1 dakikanın altında olmalıdır.* Yüzey üzerinde doğru pozisyonun sağlanması da bu süreyi azaltır. Pik toplayıcı sistemler dinamik hataların azaltılmasına imkan verir.

2.4. Cisimlerin Termal Özelliklerinin Hatalar Üzerine Etkisi

Sıcaklığı ölçülecek bir cisimi karakterize eden esas fiziksel özellik ona özel termal iletkenliği λ_c dir. Bozulan sıcaklık $\Delta\theta_2$, artan λ_c ile denklem (22) uyarınca, birinci kısmı hata $\Delta\theta_1$, (23) eşitliğindeki gibi azalır.

Bunu takiben temas yüzeyinin yarı çapından 5 kat daha fazla x ve r boyutlarına sahip herhangi bir cisim yarı sonsuz cisim olarak dikkate alınabilir. ($x > 5R_T$; $r > 5R_C$) Bu boyutların altında karakteristik boyutlara sahip herhangi bir cisim de orijinal sıcaklık alanının deformasyonu ve hatalar, $\Delta\theta_1$, daha büyük olacaktır.

Araştırılan cismin yüzeyin durumu sensör ve cisim arasındaki temas direncini W_T' 'yi ve okumaların doğruluğunu etkiler. Termal temas direncinin varlığından doğan hatalar diğer bütün kısmi hatalardan fazladır.

2.5. Yüzey Sıcaklığı Ölçen Sensörler

Muhtelif tipte üretilen sensörler farklı yüzey sıcaklıklarının ölçümünde kullanılabilir. Hata kaynakları Metot hataları yanı sıra çoğunlukla yüzeye göre sensör ucunun doğru konumlanmaması nedeniyledir. Sensör tepki süreleri de hata kaynaklarından biridir. Bunları azaltmak için düşük ısıl ataletli sensörleri kullanmak veya ölçümleri birkaç defa tekrar etmektir. Belirgin gelişme pik toplayıcı cihaz uygulaması ile elde edilir. Pik toplayıcı olmayan dijital cihazlarla yapılan okuma yanlış ve hatalı değerler serisidir. Çoğunlukla yüzey sensörleri termokupullardır. Düzgün pürüzsüz yüzeylerin sıcaklık ölçümü için çoğunlukla disk tipi termokupul kullanılır. Termokupul iletkenler 400 °C'ye kadar bakır veya >400 °C üzeri gümüş üzerine lehimlenir. Yapısal parametrelere göre örnekler kıyaslandığında Örnek olarak $d_p = 10 \text{ mm}$ çapında gümüş diskli K tipi termokupul, kalınlığı $l_p = 0.8 \text{ mm}$, $d_f = 1 \text{ mm}$ iletkenlere sahip metal yüzeyler için 10 ila 20 °C civarında düşük okumalar verir. %98 tepki süresi $t_{0.98} \approx 10 \text{ s}$ ' dir.

Bu tipler, metal olmayan cisimler için kullanılmaz. Isı ileten pasta (macun) uygulaması $\Delta\theta_2$ 'nin küçülmesi sebebiyle daha doğru değerlere götürür.

Ferromagnetik yüzeylerin sıcaklık ölçümü için mıknatıslı sensörler yüzeye baskı yaparak kullanılırlar. Silindirik yüzeyler için bow-band termokupullar elastik boyunduruklarla uzatılmış olanlar kullanılır. Bu yolla silindirik yüzeylere tam temas sağlanır. Bandın tanjant pozisyonundan dolayı orijinal sıcaklık alanının deformasyonu olmaz böylece $\Delta\theta_2 \approx 0$ olur. Bu termokupul metalik ve metalik olmayan

yüzeylerin sıcaklıklarının ölçümünde kullanılabilirler, örneğin 30 mm çapında bir bakır tüpün sıcaklığını ölçmede, 100 °C' de tüm hata 2 °C civarındadır ve tepki süresi de 3 s' dir.

Düz metalik olmayan yüzeyler için flatbandtermokupullar kullanılır. Bowband ile benzer yapıdadır. Ölçüm eklemi ile yay sarmallı metalik olmayan çubuk ile bant yüzeye bastırılır. Ölçüm hatası negatif veya pozitif olabilir. Bant emisivitesi yüzey emisivitesinden daha küçük olması halinde hata pozitifdir.

Konkav veya konveks yüzeyler, küçük metalik veya düzlemsel metal olmayan cisimlerin sıcaklık ölçümleri için konveks bandtermokupullar kullanılır. Elastik E tipi veya K tipi konveks bandtermokupullar araştırılan yüzeye dokundurulduklarında düzleşerek iyi temas sağlarlar. Bu düzleşme bantta hasar oluşmasını önlemek amacıyla bir buffer ile sınırlandırılmıştır. Bant kalınlığı ölçüm hataları üzerine karar verici bir etkiye sahiptir. Üretilen konveks bant termokupulların farklı ölçümleri için çeşitli alanlarda yaklaşık 500 °C'ye kadar uygulama alanı vardır. Küçüksensörler elektronik bileşenlerin sıcaklık ölçümünde kullanılırlar. Metalik yüzeylerde böyle bir tepki süresi 0,2 s-0,5 s ve metal olmayan yüzeylerde 3 s -10 s arasındadır.

Termistörler de yüzeye temaslı ölçümlerde kullanılırlar. Isı transferini artırmak için termistör küçük gümüş bir plakaya monte edilir. Metalik yüzeylerde 250 °C'ye kadar olan ölçümlerde tepki süresinin kısalığı nedeniyle kullanılırlar. Daha az doğru olan yüzey sıcaklık ölçümü için özel termometrik cep veya boşluklara sahip bakır veya pirinç ayaklarla monte edilerek kullanılırlar. Termometrik boşluğa yerleştirilen bir termometre yüzeyden farklı okumalar verebilir.

2.5.1. Sabit Kontak Sensörler

Durağan sürekli yüzey sıcaklığı ölçümlerinde sıcaklık sensörleri bir boşluğa preslenmiş, yapıştırılmış veya lehimlenmiştir. Doğrulukları ve gösterdikleri değerler taşınabilir tiplere göre, termal temas direnci olmadığından daha doğrudur.

2.6. Quasi-Kontak Metot

Yarım küre şeklindeki gibi kap sensörün ana bölümüdür. Kabın iç yüzeyi altın ayna şeklinde cilalanmıştır. Araştırılan yüzeyden 1 mm'den daha kısa mesafede yer alır. Yüzeyden yayılan termal radyasyon, fluorite pencereden termopil radyasyon dedektörüne doğru ışın yapar. Okside metal yüzeyler 1 in altında iyi bir emisiviteye sahiptir. Yarı küresel altın bir yüzeyin olması tüm sistemi siyah cisim şartlarına yaklaştırır. Bu durumda okumalar emisiviteden bağımsızdır, koruyucu yarı kürenin olmasından dolayı da radyasyondan etkilenmez.

Yarı temaslı metodun çekincelerinden biri ayna uygulamasından dolayı tahmin edilen yüzeyden çevreye ısı transfer şartlarının değişmesidir. Bu etkiyi bertaraf etmek için aynanın yansımaları biraz daha düşük yapılır veya küre uygulamasından çok kısa bir sürede okumalar alınır. Küre çapı 50 mm ve tepki süresi 5 ila 6 s civarındadır. Okside metaller ve metal olmayanlar için tüm hata ± 5 °C'dir. Bu cihaz aynı zamanda 50 mm eğri yarı çapına sahip konkav yüzeylere de uygulanabilir. Aynı cihaz yüzey emisivitesini de ölçmede kullanılabilir. Bu amaçla ayna geçici olarak siyah insert ile kaplanır. İnsertli ve insertsüz okumalardan oluşan diagram yüzey emisivitesinin bulunmasını sağlar. Bu fikrin daha gelişmiş fotoelektrik pirometrelerde kullanmak için tanımlanmış "emisiviteenhancer" dir.

Konvektif metotlar yarı temaslı metotlara aittir. Zorlanan konveksiyona sensör ve yüzey arasındaki ısı transferini şiddetlendirir. Konvektivkompanzasyon metotları daha doğru okumalara yardımcı olmasına rağmen sensörün ilaveten ısıtılmasına ihtiyaç duyar. Bu metotların ikisinde de sensörün kendisi yüzeye temas etmez. Bu tür metotlar daha çok hareketli cisimlerin sıcaklıklarının ölçümünde kullanılır.

2.7. Ekstrapolasyon Metodu

Katı cisimlerin yüzey sıcaklığını belirlemede kullanılan metotlardan biridir. Şekil 16.30 da gösterilen prensibe dayanır. Genellikle ince çıplak veya mineral izoleli termokupullar katı cisim içerisindeki izoterm boyunca yerleştirilir. MI termokupullar ölçüm eklemeleri izoleli yarı iletkenler ve metallerde kullanılırlar. Termokupul göstergeleri vasıtasıyla yüzey sıcaklığı T_s , orijinal yüzey sıcaklığında bozunma olmaksızın belirlenebilir. Ancak n termokupulun tanımlanması ve onları yerleştirecek kovuk gerekliliği nedeniyle bu durum özel ölçüm cihazlarında veya termal temas direncinin ölçülmesinde tasarlanan cihazlarda kullanılabilir.

Basit grafiksel ekstrapolasyon nadir ölçümlerde, mikrokomputerler de sürekli ölçümlerde kullanılır. Pek çok teknik problemde termokupul uygulaması yeterlidir. Oldukça kalın cisimlerin sıcaklığının belirlenmesinde ki yarı sonsuz cisim olarak alınabilir, Yarishov ve Minin (1969) in iki sensör metodu yeteri kadar doğrudur. Bu metotta araştırılan yüzeyde birbirlerine göre x_1 ve x_2 mesafesinde ve sıcaklıkları θ_1 ve θ_2 olan iki sensöre dayanarak yüzey sıcaklığı aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır.

$$\theta_2(t) = \theta_1(t) \left[\frac{x_2}{x_2 - x_1} - \frac{x_2}{x_2 - x_1} \sqrt{\frac{\theta_2(t)}{\theta_1(t)}} \right]^2 \quad (32)$$

Katı cismin içindeki küçük sıcaklık farkları ve küçük bir bölgedeki sıcaklık değişimleri sonlu kalınlığa sahip plakalarda ki gibi, termal iletkenlik λ_s sabit kabul edilebilir. Bunun neticesinde cisimdeki sıcaklık düşüşü yaklaşık olarak lineerdir. Bu durumda en basit mümkün olan lineer ekstrapolasyon iki ölçüm değerine dayanır.

$$\theta_2(t) = \frac{\theta_1(t)x_2 - \theta_2(t)x_1}{x_2 - x_1} \quad (33)$$

Ekstrapolasyon metotları kararlı yüzey sıcaklıklarının belirlenmesi prensibinde kullanılır, nadiren geçiş veya dalgalı değişken durumlar içinde kullanılabilir.

Thomas (1975) ekstrapolasyon metodunun ana hata kaynağı olarak katı cisim materyalinin anisotropisi, termal homojensizliği ve katı cisim içerisine sensör konulduğunda mevcut sıcaklık alanının deformasyonu olduğunu işaret etti. Bu son hata kaynaklarından sakınmak için izoterm boyunca mümkün olduğu kadar ince termokupulların kullanılmasını tavsiye etmiştir.

Buna göre ölçüm sistemlerinde kullanılacak yüzey sıcaklığı kaynakları bu kriterler dikkate alınarak tasarlanmalıdır.

2.8. Radyasyon Termometreleri

Radyasyon termometreleri, pyrometre veya infrared termometre olarak da adlandırılan temassız ölçüm yapan termometrelerdir. Ölçümde sıcaklık alanını bozucu bir etki mevcut değildir. Cismin sıcaklığı nedeniyle cisimden yayılan termal radyasyonu ölçerler. Siyah cisim özelliğine sahip kaynaklarda ölçüm sonuçları iyidir ancak kaynak siyah cisim değilse termometre okumaları çok düşük olur. Verilen dalga boyunda hedefin radyasyon sıcaklığı, aynı spektral radyansı gösteren siyah cisim sıcaklığıdır. Siyah cisim olmayan hedefin spektral emisivitesi ϵ_{λ_s} , T_s sıcaklığında ve λ_s dalga boyunda spektral radyansı

$$L_{\lambda_s} = C \epsilon_{\lambda_s} c_1 \lambda_s^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda_s T_s}} \quad (34)$$

ile verilir. Radyasyon termometresi okumalarına T_i dersek siyah cisim ışıma sıcaklığı

$$L_{\lambda_s} = C c_1 \lambda_s^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda_s T_i}} \quad (35)$$

Her iki eşitlikten

$$\frac{1}{T_i} = \frac{1}{T_s} + \frac{\lambda_s}{c_2} \ln \epsilon_{\lambda_s} \quad (36)$$

Elde edilir. Siyah cisim olmayan cisim için gerçek sıcaklık;

$$T_s = \frac{1}{(1/T_i) + (\lambda_s \epsilon_{\lambda_s} / c_2)} \quad (37)$$

den bulunur. Burada $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ mK}$ ve $\lambda_s = 0.65 \mu\text{m}$ alınmıştır. Pratik olarak yüzey sıcaklığını radyasyon termometresi ile ölçmek istiyorsak yüzeyin emisivitesini bilmemiz gerekir ki bu takdirde doğru ölçüm yapmış olalım. Sıcaklık ölçümünde yüzeyin emisivitesinin bilinmesi gereklidir.

3.1. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi

3.1.1. Deneylerde Kullanılan Cihazlar

Sıcaklık kaynağı;50 °C ile 500 °C aralığında yüzey problarının kalibrasyonu için, yüzey sıcaklık dağılımı:0,1 °C

Kalibratör Kontrol Ünitesi;PID kontrollü, Pt100 Ω Class A

El tipi Dijital sıcaklık göstergesi K tipi termokupulproplu; 50°C ile 500 °C aralığında ölçüm yeteneğine sahip, 0,1 °C çözünürlüğe sahip.

Radyasyon termometresi; ayarlanabilir emisivite değerlerine sahip, ölçüm aralığı:-30 °C ile 900 °C aralığında; 0,1 °C çözünürlüklü

3.2. Yüzey sıcaklık ölçümleri

Yüzey sıcaklık kaynağı 50 C'den başlayarak 400 C'ye kadar kalibrasyon için ayarlandı. Set sıcaklığına ulaştığında sıcaklığın kararlı hale gelmesi için en az yarım saat beklendi..Sıcaklıklar kararlı hale ulaştığında yüzey termometresinden ve radyasyon termometresinden ölçümler alındı. Kalibrasyon ünitesindeki yüzey parlak Nikel alaşımına ulaştığında yüzey termometresi emisivitesi 0,35'e ayarlandı. İlk emisivite değeri 0,95 ti ve bu emisivite ile ölçüm yapıldığında 50 °C'de 3 °C civarında eksik okuma gözlemlendi. Emisivite değeri ve yüzeyden olan uzaklık sabit tutulduğunda gösterge ve el tipi dijital termometre ile uyumlu sonuçlar verdi.

El tipi yüzey probunun diğer bir özelliği ise kendinden destekli olması nedeniyle ölçülen yüzey ile termometre probu arasında termal temas direncinden kaynaklanan hata 0 bolarak alınmıştır.Kalibratör olarak kullanılan yüzey yarı sonsuz cisim modeline uymaktadır.Termometrenin tepki süresi oldukça kısadır ve kendinden desteklidir. Bu da probun uygulanan kuvvete göre hatasını bertaraf etmektedir. Ölçüm sonuçları Tablo 1.'de verilmiştir. Yüzey termometrelerinin kalibrasyonu için örnek belirsizlik bütçesi de Tablo 2.'de verilmiştir.

3.2.1. Ölçüm Sonuçları

Tablo 1. Yüzey probu ve Radyasyon termometresi ile alınan ölçümler

Set sıcaklığı/°C	Gösterge/°C	Yüzey probundan okunan sıcaklık/°C	Radyasyon termometresinden okunan/°C
50	52,12	51,87	51,67
99	98,98	98,35	98,77
200	199,93	198,88	197,98
300	300,78	297,88	298,44
400	399,80	395,61	395,33

Tablo 2. Yüze termometresi örnek belirsizlik bütçesi

Örnek Belirsizlik Bütçesi							
Sembol	Belirsizlik Kaynağı	Tipi	Tahmini Belirsizlik Değeri	Dağılım	Bölen	Hassasiyet katsayısı (Duyarlık) c_i	Belirsizlik katkısı $u_i(y)$
δt_{yp}	Referans yüze termometresi probu sertifika belirsizliği	B	2,5	Normal	2	1	1,25
δt_{yg}	Referans yüze termometresi göstergesi sertifika belirsizliği	B	0,4	Normal	2	1	0,2
δt_{ypd}	Referans yüze termometresi sertifikasından kayma değeri (drift)	B	0,1	Dikdörtgen	3,46410162	1	0,028867513
δt_{ysk}	Yüze Sıcaklık Kalibratörü sertifika belirsizliği	B	2	Normal	2	1	1
δt_{yskd}	Yüze Sıcaklık Kalibratörü yıllık kayması (drift)	B	0,1	Dikdörtgen	1,73205081	1	0,057735027
δt_{yskst}	Yüze Sıcaklık Kalibratörü set değerinde kararlılığı (stabilite)	A	0,1	Normal	2,23606798	1	0,04472136
δt_{yskh}	Yüze Sıcaklık Kalibratörü yüzeyde sıcaklık dağılımı (homojenite)	B	0,1	Dikdörtgen	3,46410162	1	0,028867513
δt_{testcz}	Test cihazı çözünürlüğü	B	0,1	Dikdörtgen	3,46410162	1	0,028867513
δt_{testst}	Test cihazı kararlılığı	A	0,1	Normal	2,23606798	1	0,04472136
δt_{testtk}	Test cihazı tekrarlanabilirliği	A	0,1	Normal	1,73205081	1	0,057735027
$U_{toplaml}$	$U_{toplaml} = [\sum [u_i(y)]^2]^{1/2}$						1,617
Kullanılan kapsama faktörü: k=2				Genişletilmiş belirsizlik			3,23

SONUÇ

Yüzey proplarının kalibrasyonunda önemli olan katı cisimlerin sıcaklıklarının ölçümüne dair teori ve termometre tipleri incelenmiş ve hata kaynaklarının nasıl elimine edilebileceğine ilişkin teorik sonuçlar verilmiştir. Teori ile uygun olarak iyi tasarlanmış kalibrasyon sistemi kullanılırsa ve radyasyon termometrelerinin emisiviteyi yüzeyin emisivitesine ayarlanarak ölçme yapılırsa, el tipi dijital yüzey sıcaklık ölçerler ile alınan ölçüm sonuçlarının birbirleri ile uyumlu sonuçlar verebileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] V.C. FERNICOLA, A.FRATTOLILLO, L. ROSSO, P. VIGO, "New Results In Modelling Of A Surface Temperature Calibration System", XVIII IMEKO World Congress Metrology for a Sustainable Development September, 17-22, 2006
- [2] L. MICHALSKI, K. ECKERSDORF, J. KUCHARSKI, J. MCGHEE, "Temperature Measurement", Wiley, Second edition.

ÖZGEÇMİŞ

Aynur DAVUT

1961 yılı Emet /Kütahya doğumludur. 1985 yılında HÜ. Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliğini bitirmiştir. Aynı Üniversiteden 1986 yılında Eğitim Fakültesi pedagojik formasyonu almıştır. 1986-1989 yılları arasında EİEİ Genel Müdürlüğü Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Bölümünde güneş pilleri uygulamaları üzerine çalışmıştır. 1993 yılından itibaren Türk Standartları Enstitüsü Ankara, İstanbul ve Gebze Sıcaklık ve Nem Kalibrasyon Laboratuvarlarında Mühendis olarak ve yönetici olarak görev yapmıştır. Halen Gebze Elektroteknik ve Makine Grup Başkanlığında Baş Araştırmacı olarak görev yapmaktadır.