

RADYASYON TERMOMETRELERİNDE YANSIMA ÖLÇÜMÜ

Aynur DAVUT

ÖZET

Isı, kinetik enerji ile eş anlamlı olup birimi joule olarak ifade edilir. Isı transferi hareket halindeki enerji olarak düşünülebilir. Sıcaklık ise kinetik enerji, hareketin enerjisinin ölçüsüdür ve ısı iletim, hareket sonucu oluşan çarpışmalardan dolayı oluşur. Çarpışma mekanizmaları katı, sıvı ve gazlarda değişken olmasına rağmen iletim, daha enerjik atom veya moleküllerin daha düşük enerjili atom veya moleküllere enerji transferiyle olur ve cisim termal dengeye ulaşılana kadar devam eder. Isı transferi üç şekilde olur, iletim, taşınım ve ışımaya. Isıl radyasyon elektromanyetik dalga formundadır ve nesne yeterince sıcak ise radyo dalgaları, Infrared, UV, X-ray olarak tüm spektrumu kapsar.

Radyasyon termometreleri dar band ve geniş band termometreler olarak iki grupta toplanır. ITS 90 Sıcaklık skalasında yüksek sıcaklıklardaki izlenebilirlik radyasyon termometreleri ile sağlanır. Endüstriyel olarak kalibrasyonlarını yaptığımız düşük sıcaklık ölçümlerinde kullanılan radyasyon termometreleri genel olarak (-40 °C den 1000 °C ye kadar) Kızılötesi spektruma tepki veren termometrelerdir ve bu nedenle infrared termometre olarak da adlandırılır. 8 µm – 14 µm arasındaki dalga boyuna duyarlıdır.

Bu yazıda radyasyon termometreleri belirsizlik bütçesinde yer alan yansımaya etkisinin nasıl ölçülebileceği ve belirsizlik bütçesine dahil edileceği üzerinde duracağız.

Anahtar Kelimeler: Radyasyon, IR, Radyasyon Termometresi, Belirsizlik Bütçesi, Yansımaya etkisi, Yansımaya Belirsizliği

ABSTRACT

Heat is synonymous with kinetic energy, expressed in units of joules. Heat transfer can be considered as energy in motion or moving energy. Temperature is a measure of the energy in motion, and thermal conduction is caused by collisions caused by motion. Although the collision mechanisms are variable in solids, liquids and gases, conduction occurs by transferring energy from more energetic atoms or molecules to lower energetic atoms or molecules, and the body continues until thermal equilibrium is reached. Heat transfer occurs in three ways: conduction, convection and radiation. Thermal radiation is in the form of electromagnetic waves and covers the entire spectrum as radio waves, Infrared, UV, X-ray if the object is hot enough. Radiation thermometers are categorized in two groups as narrow band and wide band thermometers. Traceability at high temperatures on the ITS 90 temperature scale is ensured by radiation thermometers. Radiation used in industrial low calibrations thermometers are generally (from -40 °C to 1000 °C) thermometers that respond to the infrared spectrum and are therefore also referred to as infrared thermometers. 8 µm to 14 µm are sensitive to wavelength. In this text, we will focus on how to measure the reflection effect in the uncertainty budget of radiation thermometers and include them in the uncertainty budget.

Key Words: Radiation, IR, Radiation Thermometers, Uncertainty Budget, Reflection Effect, Reflection Uncertainty

1. GİRİŞ

Isı transferi üç yolla olmaktadır, taşınım, iletim ve radyasyon. En yaygın olarak bildiğimiz iletim şekli temas yoluyla ısı transferidir. Sıcaklık kalibrasyonunda en fazla yapılan kalibrasyon çalışmalarıdır ve kontak sıcaklık ölçümü olarak adlandırılır. Bununla birlikte taşınım, örneğin bir saç kurutma makinası ile sıcak havanın üflenmesi ya da sirkülasyonlu bir banyoda sıcaklığın homojen olarak dağıtılması gibi kontak sıcaklık ölçümü ile birlikte yürür. Radyasyon ya da ışıma, ısı transferi biçimidir ve en fazla hissettiğimiz şekli ise güneşten gelen radyasyonun bizi ısıtması olarak ifade edilebilir. Yani direkt temasın olmadığı ısı transferi. Bu tip temasın olmadığı sıcaklık kalibrasyon konuları da radyasyon sıcaklığı altında toplanır. Radyasyon sıcaklığını ölçen termometreler de radyasyon termometresi olarak adlandırılır. Isıl radyasyon elektromanyetik dalga formundadır. Elektromanyetik spektrumda bizim ilgilendiğimiz alan, görünür bölge ve kızılötesidir. -40 °C ile 1000 °C arasında ölçme yapan radyasyon termometreleri kızıl ötesi spektrumda yer alan ışınları ölçtüğü için IR (infrared- kızılötesi) termometre olarak adlandırılmakta olup 8 µm ile 14 µm aralığında spektral duyarlılığa sahiptirler.

2. RADYASYON TERMOMETRESİ KALİBRASYONU

Radyasyon termometreleri yüzey sıcaklığı ölçer. Dolayısıyla her bir yüzey sensör gibi davranır. Her farklı yüzey sensör gibi davranırsa izlenebilirliğin nasıl sağlanacağı önemlidir. Bu amaçla kalibrasyon yapılırken; yüzey özellikleri bilinen transfer standardı olarak görev yapacak kaynak gerekir. Radyasyon dağılımının matematiksel tanımı için spektral radyans (ışıma) ve siyah cisim tanımı gerekir.

Spektral radyans, yüzeyin birim katı açı, birim dalga boyu, birim alanı tarafından yayılan enerji olarak ölçülen yüzeyin optik parlaklığını ifade eden teknik bir terimdir. Diğer optik büyüklüklere göre *radyans* (ışıma) kullanımının avantajı yüzeyin uzaklığından ve büyüklüğünden bağımsız olmasıdır.

Siyah cisim, basit olarak mükemmel siyah yüzeydir, ışımayı mükemmel olarak absorblar ve yayar. Nesnelere üç temel optik özelliğe sahiptir, yayma (emissivity), yansıtma (reflectivity) ve geçirgenlik (Transmissivity).

$$\text{Yansıtma} + \text{Yayma} + \text{geçirgenlik} = 1 \quad (1)$$

$$\rho + \epsilon + \tau = 1 \quad (2)$$

Radyasyon sıcaklık ölçümünde karşılaşılan pek çok nesne mat olduğu için geçirgenlik sıfırdır böylece yayma ve yansıtma birbirini tamamlayıcı özelliklerdir. Planck'ın siyah cisim ışımasının dağılımı için ifade ettiği formül;

$$L_b(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \left[e^{\left(\frac{c_2}{\lambda}\right)} - 1 \right]^{-1} \quad (3)$$

L: Radyans, b indisi siyah cismin radyansı olduğunu ifade eder, λ ışımının dalga boyu ve T'de kelvin olarak siyah cismin sıcaklığıdır.

c_1 ve c_2 sabit olup 1. ve 2. Işıma sabitleri olarak bilinir. Ölçülen en iyi değer;

$$c_1 = 1,191044 \times 10^{-16} \text{ Wm}^2$$

ve

$$c_2 = 0,01438769 \text{ mK}$$

Planck yasası, gümüş sabit noktasından yukarıdaki sıcaklıklarda ITS 90 sıcaklık ölçeğini tanımlamada kullanılır. Bunu yapabilmek için ikinci ışıma sabiti,

$$c_2 = 0,014388 \text{ mK}$$

Olarak atanmıştır. Pratikte gerçek nesnelere siyah cisim değildir ve Planck yasasıyla belirlenen ışımadan ε faktörü kadar daha az ışımaya yaparlar. Gerçek nesnelere spektral ışımaları,

$$L(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda)L_b(\lambda, T) \quad (4)$$

Burada $\varepsilon(\lambda)$ dalga boyu ile değişen yayma (emisiviteyi) gösterir. Planck yasasına göre sıcaklığın fonksiyonu olarak spektral dağılım incelendiğinde, sıcaklık artarken maksimumlar daha kısa dalga boylarında oluşur. Maksimumdaki dalga boyu,

$$\lambda_{maks} = \frac{2989}{T} \mu\text{m} \quad (5)$$

3. RADYASYON TERMOMETRELERİNİN KULLANIMI

Radyasyon termometreleri temaslı termometreler kadar doğru olmasa da hızlı ölçme ve temassız ölçüm yapabilme kabiliyetinden ötürü çeşitli uygulamalar da kullanılabilirler.

Radyasyon termometreleri ölçümü başlatmak ve durdurmak için tetikle donatılmıştır.

Nesneler sıcaklık değiştikçe yaydıkları termal radyasyon da değişir. Termal radyasyon miktarı, nesnenin sıcaklığı, yayması (emisivite) ve yansıyan sıcaklığına dayanarak tahmin edilebilir.

El tipi radyasyon termometreleri verilen spektral aralığında termal radyasyonu ölçer ve sıcaklık ile termal radyasyon arasındaki ilişkiyi belirler. Bu cihazlarda esas olarak kullanılan algılayıcı ısı pildir.

3.1 Temel IR Ölçümü

Ölçüme başlamadan önce IR termometrenin emisivitesini, cihazın spektral aralığına göre ölçülecek nesnenin etkin emisivitesine ayarlanır. Bazı IR termometreler bunun ayarlanmasına imkan vermez çünkü emisivite sabitlenmiştir. Bu durumda matematiksel düzeltme yapılır.

Ölçmek için IR termometre lensi ölçülecek nesneye doğrultulur ve ölçme başlar. Eğer tetik varsa tetiğe basılır ve en az IR termometrenin tepki süresi kadar basılı tutulur. Tetik bırakıldığında göstergedeki değer sabit kalır, bu ölçülen sıcaklıktır.

IR termometrenin D:S oranına göre ölçme yüzeyi tayin edilir. Burada D: mesafe-uzaklık, S: ölçülen büyüklük-çap ifade eder. İyi bir ölçme yapabilmek için hedef yüzey, termometrenin görüş alanından büyük veya eşit olmalıdır.

3.2 Doğruluk

Doğru ölçüme etki eden pek çok faktör dikkate alınmalıdır. En önce ise izlenebilirlik zincirine bağlı olarak IR termometre kalibre edilmelidir. Kalibrasyon sonuçları, sonraki ölçümlerde kullanılmak üzere iki şekilde ele alınabilir. Eğer termometrenin kalibrasyon ayarı varsa, kullanıcı sonuçları cihaza girerek doğrudan okur. Bazı IR termometre kalibrasyonlarında elde edilen offsetler tablo halindedir. Bu durumda kullanıcı doğru sıcaklığı belirlemek için elle hesaplama yapmalıdır.

3.3 Geniş bantlı cihazlar

Düşük sıcaklık IR termometrelerin pek çoğu geniş bantlıdır. Sonuç olarak emisivite spektral aralık üzerinden değişirse ölçümlerde değişir. Genel olarak IR termometre spektral aralıkları 8 – 14 µm arasındadır. Bazı cihazlar 5 – 20 µm spektral aralığa sahiptir. Her durumda, IR termometrenin spesifik bir spektral aralığı olmalıdır.

3.4 Spektral Emisivite

IR termometre bir nesneden gelen termal radyasyonu ölçer. Eğer nesne geçirgen değilse gelen enerji yayılan ve yansıyan enerjinin bileşimidir. Yayılan enerji emisivite olarak bilinir ve ideal bir cisim için $\epsilon = 1$. Bütün gerçek yüzeyler $\epsilon E(T)$, ideal siyah cisimden $E(T)$, daha az enerji yayar. Gerçekte ideal siyah cisim elde edilemez, ideal siyah cisme yaklaşım vardır bunu sağlayan cisimler "cavity radiator" olarak adlandırılır.

Yüksek yayıma sahip nesnelere daha iyi termal ışımaya yaptıklarından sıcaklıkları daha iyi belirlenebilir. Metal olmayan nesnelere metallere göre daha yüksek yayma özelliğine sahip olma eğilimindedir. Okside olmayan metallerde, okside olanlara göre daha düşük yayma özelliğine sahiptir. Kaba –pürüzlü yüzeylerde parlak cilalı yüzeylerden daha yüksek yayma özelliğine sahiptir.

Geniş bant termometreler, yüksek yayma gücüne sahip malzemelerin yüzey sıcaklıklarını belirlemek için geliştirilmiş araçlardır.

3.5 Emisivite kompanzasyonu

Tercih edilen yöntem IR termometrenin emisivite ayarını kullanmaktır. Eğer IR termometre ayarlanabilir emisivite ayarına sahip değilse matematiksel dengeleme yöntemini kullanmaktır ve bu da belirsizliğe sahiptir.

3.6 Yansıyan Radyasyon

IR termometre ile tespit edilen ısı radyasyonu, nesne tarafından yayılan radyasyon ile birlikte yine nesneden ve çevreden yansıyan radyasyondur. IR termometreler bazı durumlarda yansıyan radyasyonu dengeler, bu yansıyan radyasyon veya yansıyan sıcaklık ayarıdır. Bazı durumlarda IR termometre içinde dengeleme yapılır. Yansıyan ışımaya eğer ölçülen nesne sıcaklığından düşük eşit veya daha yüksekse yansıyan radyasyon çok yüksek olabilir. Yansıyan radyasyon metal yüzeyler ölçülecekse çok yüksek olabilir. Bu tür durumlarda yansıyan sıcaklık bilinmeli ve kontrol edilmelidir. Dış ortamda ölçme yapılacaksa ölçülecek nesne atmosferik ışınlamından korunmalıdır.

4. SİYAH CİSİM KAYNAKLAR

IR termometre kalibrasyonu yapabilmek için emisivitesi bilinen siyah cisim kaynaklara ihtiyaç vardır. Uygulama, bir kızılötesi termometrenin okuma sıcaklığını bir radyasyon kaynağının ışımaya sıcaklığıyla karşılaştırmaktan oluşur. Işıma sıcaklığı, test edilen kızıl ötesi termometrenin spektral aralığına karşılık gelecektir.

Radyasyon kaynakları iki tiptir. İdeal olarak emisiviteyi (1.00)' e yakın olan kovuk şeklindeki (kavite) kaynaklar. Bazı termometrelerin görüş açılarından dolayı daha büyük ağız açıklığı olan kovuklar veya geniş alanlı düzlemsel kaynaklara ihtiyaç duyulur. Her iki durumda da kaynağın ışımaya sıcaklığı izlenebilir ölçümlerle bilinmeli, belirsizlik hesaplamasında dikkate alınmalıdır.

Bazı kaynaklar her iki kategoride de ele alınabilir. Kovuk şeklindeki kaynakların emisivitesi daha doğru belirlenebilir. Düzlemsel kaynaklar daha ucuzdur D:S oranı düşük IR termometrelerin kalibrasyonu için yeterlidir.

İdeal olarak termal radyasyon kaynağının boyutu IR termometre üreticisi tarafından belirlenir. Bu bilginin bulunmadığı durumlarda görüş alanı testi (field of view test) yapılmalıdır. Kızılötesi termometreye kaynaktan gelmeyen sinyal oranı, belirsizlik bütçesinde hesaba katılmalıdır.

Düzlemsel kaynaklar daire veya dikdörtgen düzlem şeklindedir ve kovuk biçimindeki kaynaklara göre emisivite değeri daha düşüktür.

IR termometre kalibrasyonları için kovuk biçimli kaynaklar tercih edilir. Kovuk biçimli kaynakların iki ana üstünlüğü vardır: Birincisi, geometriden dolayı daha iyi emisiviteye sahiptir. İkinci olarak yansıyan sıcaklık daha azdır. Düzlemsel yüzeylerde sıcaklık dağılımının homojenliğine daha fazla dikkat edilmelidir. Kovuk biçimli kaynaklara göre üstünlüğü geniş açıklığı nedeniyle daha küçük D:S oranına (daha geniş görüş alanı) sahip cihazların kalibrasyonuna imkan vermesidir[2].

5. BELİRSİZLİK KAYNAKLARI

Radyasyon termometresi kalibrasyonunda genel olarak ele alınan parametreler aşağıda verilmiştir[2].

- (1) kalibrasyon kaynağının emisivite tahmini,
- (2) Infrared termometrenin kaynak boyutu,
- (3) Işınım kaynağının sıcaklık gradyanı,
- (4) IR termometrenin ışınım kaynağına göre hizalanmaması,
- (5) ışınım kaynağının kalibrasyon sıcaklığı,
- (6) Çevre sıcaklığı,
- (7) yansıyan sıcaklık.

Bu belirsizliklerin yaygınlık sırası, uygun prosedürün kullanımına ve kullanılan termal radyasyon kaynağının türüne bağlı olarak değişebilir. Radyasyon kaynağının sıcaklığına, radyasyon kaynağının kalibrasyon yöntemine, kızıl ötesi termometrenin optik karakteristiğine ve kızılötesi termometre detektörü ve filtre özelliklerine bağlı olarak, bu belirsizliklerin katkısı genel belirsizlik bütçesinde önemli ölçüde değişebilir.

5.1 Yansıma Ölçümü

Bu çalışmada genel bütçe parametreleri içinde verilen yansıma belirsizliği üzerinde durulacaktır. Kalibrasyon için gelen IR termometrelerinde yansıma ile ilgili herhangi bir parametre cihaz üzerinde ve menüsünde görülmemektedir. Ancak emisiviteden kaynaklanan hata ve belirsizlik yanında yansımadan kaynaklı hata ve belirsizlik parametresinin ölçülmesi hesaplanması ve bütçeye konması gereklidir. Bütün nesnelere enerji absorblama, aynı zamanda yayma özelliğine sahiptir. Bu nedenle IR termometre kalibrasyonu çalışması yapılırken ortam sıcaklığının etkisini tek başına almak yetersiz kalabilir. Çünkü aynı laboratuvar içerisinde kalibrasyon personeli, aydınlatma, aynı anda yapılan başka kalibrasyonlar vb. nedeniyle çevre sıcaklığının ölçümü önem kazanır.

Bütün laboratuvarlar akreditasyon gereği ve kalibrasyonun gereği olarak çevre şartlarını izler ve kayıt altına alır. Bunu yaparken hepimizin bildiği sıcaklık ve nem kaydedici cihazları kullanır. Ancak bu cihazların radyasyon kaynaklı sıcaklığı doğru tespit edip etmediği belli değildir. Bu nedenle sıcaklığı tüm yönlerden alacak şekilde ölçme düzeneği oluşturulmuş ve iki sıcaklık değerinde ortam sıcaklığından ne kadar fark ettiği ölçülmüştür.

5.1.1 Ölçüm

İlk çalışma; siyah cisim kaynağı 100 °C'ye ayarlanmış ve stabil hale gelmesi için beklenmiş ve radyasyon termometresi ile sıcaklık ölçülmüştür.

İkinci olarak; Pt100 termometre siyah bir kürenin merkezine yerleştirilmiş ve radyasyon termometresi kullanılarak küre yüzeyinden radyasyon termometresi ile ve pt100 den göstergeye bağlanarak sıcaklık ölçülmüş ve sıcaklık nem kaydedici cihazın ölçtüğü sıcaklık değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Üçüncü olarak ta Al folyo kullanılarak siyah cismin açıklığından ortama taşınan sıcaklık ölçülmüştür.

Buna göre alınan ölçüm değerleri Tablo 1. de verilmiştir.

Tablo 1. Ölçüm sonuçları

Set sıcaklığı	N tipi ölçülen	Fluke 574 ölçülen	Pt100 Küre	Al folyo sıcaklığı	Fluke 574 küre sic.	Ortam sıcaklığı	Ölçüm mesafesi	Hesaplanan yansımaya hatası-küre	Yansımaya hatası Al folyo
°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	cm	°C	
100	98,4	96,7	23,92	29,4	23,5	21,2	30	0,01	0,12
200	196,000	195,3	23,67	33,8	24,8	21,8	30	0,01	0,14

Yapılan hesaplama sonucu radyasyon termometresi ışınım kaynağı kovuk şeklinde olduğundan yansımaya etkisi küçük bulunmuştur. Hesaplama kullanılan formüller aşağıda verilmiştir. Hesaplamaların ana formülü Plank denkleminde türetilmiş ve radyasyon termometresi kalibrasyonlarında iyi sonuç veren Sakuma Hattori denklemini kullanılmıştır[2;3].

$$S(T_{meas}) = S(T_s) + \frac{(1-\epsilon_{instr})}{\epsilon_{instr}} [S(W) - S(T_d)] + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{instr})}{\epsilon_{instr}} [S(T_s) - S(T_w)] \quad (6)$$

Burada:

$S(T_{meas})$	= Sakuma-Hattori denkleminin uygulaması
ϵ_s	= Ölçülen yüzeyin emisivitesi
ϵ_{instr}	= Cihaz emisivite ayarı
T_{meas}	= IR termometreden okunan sıcaklık
T_s	= Termal ışımaya kaynağının beklenen ışımaya sıcaklığı
T_w	= Yansıyan radyasyon (duvarlar)
T_d	= Dedektör sıcaklığı

Yansımaya sıcaklığı belirsizliğini değerlendirmek için Denklem 6' nın differansiyeli alınarak denklem 7 elde edilir. Bu değer denklem 8' te yerine koyularak yansımaya sıcaklığından dolayı sıcaklık ölçme belirsizliği elde edilir.

$$\frac{\partial S(T_{meas})}{\partial S(T_w)} = \frac{(1-\epsilon_s)}{\epsilon_{instr}} \quad (7)$$

$$U_{REFL}(T_{meas}) = \frac{\partial T_{meas}}{\partial T}(T_w) = \frac{\partial S(T_{meas})}{\partial S(T_w)} \frac{\frac{\partial S(T_w)}{\partial T}}{\frac{\partial S(T_{meas})}{\partial T}} U(T_w) \quad (8)$$

SONUÇ

Yapılan bu çalışma; esasen emisivitesi 0,95 olan bir küre kullanılarak yapılacak ölçüm, yansıma hatası ve belirsizliğini hesaplamada etkin olur mu? Sorusuna yönelik yapıldı. Bu çalışma yapılırken kürenin emisivitesinin 0,95 olduğu tahmini bir çalışma yapılmıştır. Hesaplama sonuçları, düzeltme olarak kullanılacak hataların küçük olduğunu göstermektedir. Kullanılan ışımaya kaynağı kovuk şeklinde tasarlanmış olduğundan yansıma etkisi küçüktür. Yöntem en azından ortam sıcaklığını ölçmede özellikle ışımadan kaynaklı sıcaklığı ölçmede kullanılabilir gözükmektedir. Düzlem ışımaya kaynakları açısından yararlı olabilir.

KAYNAKLAR

- [1] J. V. Nicholas; D. R. White. "Traceable Temperatures", John Wiley & Sons, Ltd. Second edition 2005.
- [2] ASTM E2847-14 "Standard Test Method for Calibration and Accuracy Verification of Wideband Infrared Thermometers"
- [3] ASTM 2758 - 15a "Selection and Use of Wideband, Low Temperature Infrared Thermometers"
- [4] Reflection Errors in Radiation Thermometry <http://www.measurement.govt.nz>

ÖZGEÇMİŞ

Aynur DAVUT

1961 yılı Kütahya Emet doğumludur. 1985 yılında Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliğini bitirmiştir. 1986 yılında EİEİ Gen. Müd. Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Daire Başkanlığı'nda güneş pilleri üzerine çalışmıştır. 1993 yılında TSE Kalibrasyon Daire Başkanlığı bünyesinde sıcaklık kalibrasyon laboratuvarında göreve başlamış ve çalışmasını TSE Kalite Kampusü Gebze'de sıcaklık kalibrasyon Laboratuvarında sürdürmüştür. Bu süre zarfında Kalibrasyon, Laboratuvarlar arası Karşılaştırma ve Yönetim Sistemleri alanında yurt içi ve yurtdışı eğitimler almış, görevine yönetim temsilcisi ve kalibrasyon müdürü olarak devam etmiştir. 2017 yılı Ağustos ayında Baş Araştırmacı olarak TSE'den emekli olmuştur. 2005 yılından bu yana TÜRKAK' ta Denetçi ve Baş Denetçi olarak akreditasyon çalışmalarında yer almıştır ve halen sürdürmektedir.

TSE'den emekli olduktan sonra "DACKA Kalibrasyon Danışmanlık Eğitim- GEBZE" firmasında Yönetim temsilcisidir ve Sıcaklık-Nem-Elektrik kalibrasyonu alanında çalışmalarını sürdürmektedir.