

IŞINIM (RADYASYON) TERMOMETRİ

Sevilay Uğur, Seda Oğuz
TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME)

ÖZET

Yoğun durumdaki maddeler (katı veya sıvı) sıcaklıkları nedeniyle sürekli spektruma sahip termal radyasyon yayımlar. Yayınlanan spektrumun karakteristiği cismin yapıldığı maddeden hemen hemen bağımsız, fakat büyük oranda cismin sıcaklığına bağlıdır.

Evrensel karakterde bir cisim vardır ki üzerine düşen bütün radyasyonu soğurur. Termal denge durumunda bu cisimden yayılan termal radyasyon da evrensel karakterdedir. Bu cisimlere siyah cisim denir. Planck, siyah cisimden yayılan radyasyonun spektral dağılımını aşağıdaki eşitlikle tanımlanmıştır.

$$L_{\lambda} = c_{1L} / \lambda^5 [\exp(c_2 / \lambda \cdot T) - 1]$$

Spektral ışınım (L_{λ}), bir cisimden birim alanda, birim dalga boyunda, birim katı açıda yayınlanan enerji miktarının ölçüsüdür.

Planck kavramı ideal termal radyasyonu tanımlar. Bütün gerçek cisimler ise belli bir T sıcaklığında, siyah cismin yaydığı radyasyon yoğunluğunun sadece bir kısmını yayarlar. Yayınlanan bu radyasyon yoğunluğunun maksimum radyasyon yoğunluğuna oranı emissivite olarak tanımlanır. Planck kavramında siyah cisim kaynaklarının emissivite değeri 1 olarak kabul edilir. Gerçek yüzeylerin emissivite değerleri ise 0 ile 1 arasında değişir.

Bu şekilde gerçek sıcaklığı ve emissivitesi ne olursa olsun bir cisimden gelen termal radyasyona Planck kavramı uygulanarak bir sıcaklık tayini yapılabilir. Bu sıcaklık radyasyon (ışınım) sıcaklığı olarak bilinir.

1. GİRİŞ

Radyasyon termometri bir yüzeyden gelen ışınım enerjisi kullanılarak bir cismin sıcaklığının, uzaktan ölçülmesi tekniğidir. Hareketli cisimlerin, tehlikeli ortamların veya uzaktaki cisimlerin sıcaklıkları, hızla değişen veya çok yüksek sıcaklıklar fiziksel dokunma olmadığı için bu teknikle ölçülebilir.

2. TEORİK ALTYAPI

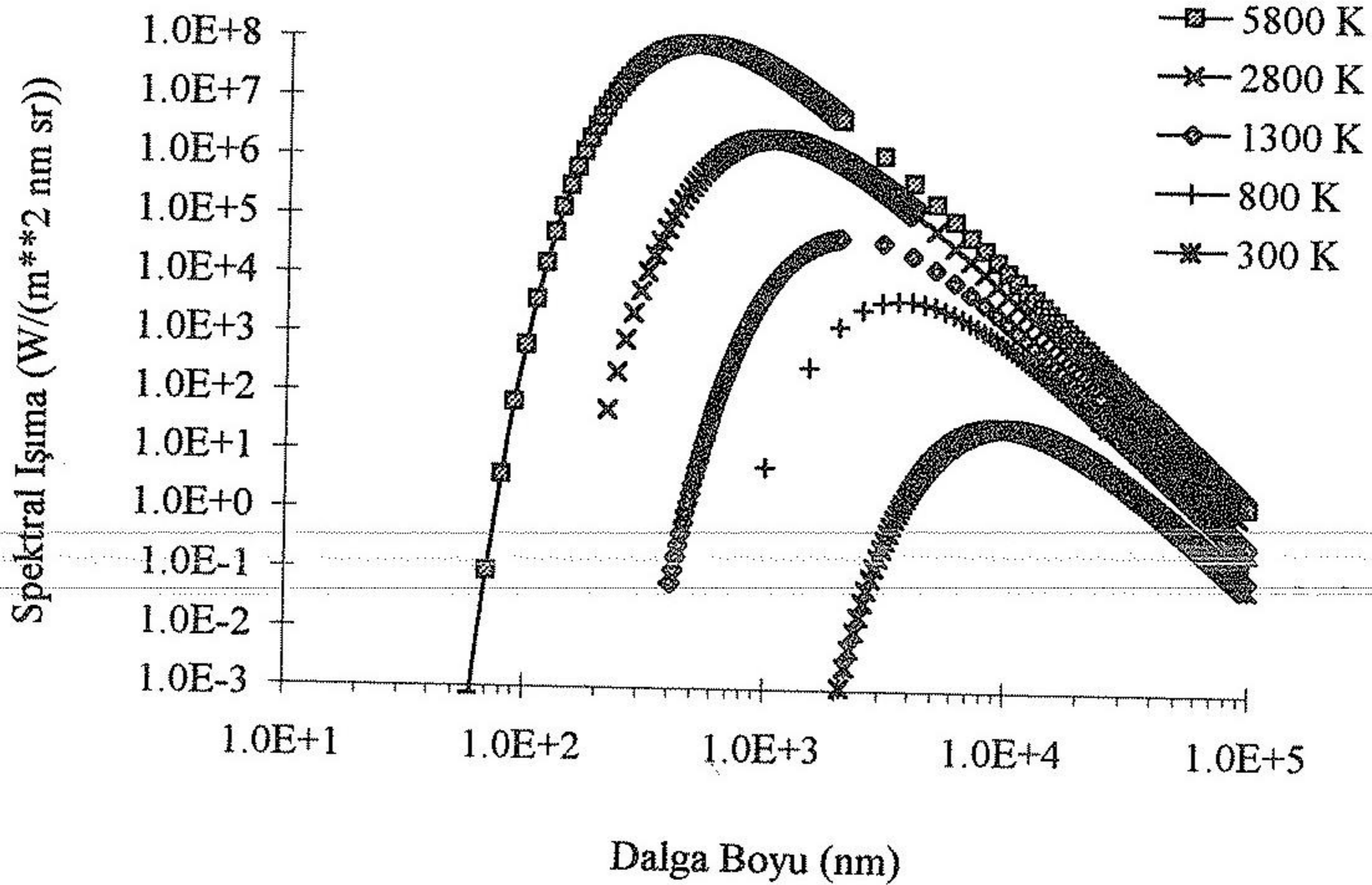
2.1 Isıl Işınım ve Planck Kanunu

Bütün cisimler atomlarının ısıl hareketleri nedeniyle enerji yayarlar. Cismin sıcaklığı nedeniyle yayılan bu enerji ısıl ışınım olarak adlandırılır. Bütün cisimler çevrelerine ısıl ışınım verirler ve çevrelerinden gelen ısıl ışınımı soğururlar. Yoğun haldeki maddelerin (katı veya sıvı) yaydıkları ışınım, spektrumunda süreklilik gösterir. Bu spektrumun ayrıntıları maddeden bağımsız ve tamamıyla cismin sıcaklığına bağlıdır.

Genelde ise sıcak bir cisim tarafından yayılan ısıl ışınım spektrumunun ayrıntıları cismin yapısına belli ölçüde bağlıdır. Fakat bir çeşit cisim vardır ki yaydığı ısıl ışınım evrensel karakterdedir. Bu cisimler siyah cisim olarak adlandırılır ve yapılarından bağımsız olarak aynı sıcaklıkta aynı spektruma sahip ısıl ışınım yayarlar. Siyah cisim tarafından yayılan spektrum aşağıdaki özelliklere sahiptir.

- Uzun dalga boylarında yayılan ışınım azdır.
- Kısa dalga boylarına doğru gidildikçe yayılan ışınım hızlı bir şekilde artar
- Her sıcaklıkta ışınımın en yüksek olduğu belli bir dalga boyu vardır.
- Bu en yüksek noktaya ulaşılan dalga boylarından daha kısa dalga boylarına gidildikçe ışınım çok hızlı bir şekilde azalır.
- En yüksek ışınımın olduğu dalga boyu sıcaklık arttıkça daha kısa dalga boylarına doğru kayar.
- Bütün dalga boylarında yayılan ışınım sıcaklık arttıkça artar.

Bu özellikler şekil 1. de görülmektedir.



Şekil 1. Farklı sıcaklıklarda siyah cisim spektrumu

Eğer bir oyuk varsayarsak ve bu oyuk dışarıya küçük bir delikle açılıyorsa delikten içeriye giren ışınım yansiyarak oyuğun duvarlarına çarpacak ve eninde sonunda soğurulacaktır. Eğer deliğin alanı oyuk iç alanına oranla çok küçük ise oyuğa gelen ışınımın ihmal edilebilir. Bir kısmı ise delikten yansımalar nedeniyle kaçacaktır. Fakat temel olarak oyuğa gelen bütün ışınım soğurulacaktır.

Şimdi oyuğun çeperlerinin her yerde aynı olacak şekilde, T sıcaklığına ısıtıldığını varsayalım. O zaman çeperler, bütün oyuğu dolduran bir ışınım yaymaya başlayacaktır. Bu ışınımın küçük bir parçası delikten dışarı çıkacak, böylece delik ısı ışınım kaynağı olarak davranacaktır. Delik, siyah cisim ışınımının özelliklerine sahip olduğu için delikten yayılan ışınım siyah cisim spektrumuna sahiptir.

Işınım sıcaklığı tanımlarında ve ölçümlerinde kullanılan nicelik *Spektral Işıma*'dır. Spektral ışıma mutlak T sıcaklığında, $d\lambda$ dalga boyu aralığında, birim zamanda, birim katı açıda kaynağın birim alanından yayılan enerjidir.

T sıcaklığındaki siyah cismin, λ dalga boyunda spektral ışınması $L_\lambda d\lambda$ *Planck eşitliği* ile verilir.

$$L_\lambda d\lambda = (c_1 / \pi) \lambda^{-5} [\exp(c_2/\lambda T) - 1]^{-1} d\lambda \quad (1.1)$$

$$c_1 = 2\pi^5 h c^2 = 3.7418 \cdot 10^{-16} \text{ W m}^2$$

$$c_2 = hc/k = 1.4388 \cdot 10^{-2} \text{ m K}$$

Böylece eğer eşitlik (1.1)'deki değişkenler biliniyorsa cismin termodinamik sıcaklığı, L_λ ölçülerek belirlenebilir.

k Boltzman sabiti, h Planck sabiti, c ışık hızıdır.

Şekil 1'de Planck eşitliği kullanılarak farklı sıcaklıklar için spektral ışınım çizilmiştir. Şekilde eğriler logaritmik ölçekte çizilmiştir. Düşey ölçek, belli bir dalga boyunda ışınlanan enerjiyi gösterir. Yatay ölçek ise dalga boyudur. En yüksek ışımanın olduğu dalga boyu

$$\lambda_{\max} = 2989/T \text{ } \mu\text{m}$$

olarak ifade edilir. $\lambda T \ll 1$ ise genellikle sıcaklık ve enerji arasındaki ilişki *Wien kanunu* (veya Planck kanununa Wien yaklaşımı) ile ifade edilir.

$$L_\lambda d\lambda = (c_1/\pi) \lambda^{-5} [\exp(c_2/\lambda T)]^{-1} d\lambda \quad (1.2)$$

Planck eşitliğiyle verilen spektral ışıma bütün dalga boylarında toplanarak (şekil 1'de eğrilerin kapsadığı alan) toplam enerji elde edilir. Toplam enerji *Stefan eşitliği* ile ifade edilir.

$$E = (\sigma/\pi) T^4 \quad (1.3)$$

Bu eşitliklerde L_λ spektral ışımaya (spectral radiance), E toplam ışıyan enerji, c_1 ve c_2 birinci ve ikinci ışımaya sabitleri olarak bilinir ve σ Stefan-Boltzman sabitidir.

$$\sigma = 2\pi^5 k^4 / 15c^2 h^3 = 5.67051 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

Bu eşitliklerde sıcaklık birimi Kelvin'dir. Celcius sıcaklığı ve Kelvin arasında

$$T/K = t/C + 273.15$$

bağıntısı vardır.

2.2. Uluslararası Sıcaklık Ölçeği ITS-90

Genelde sıcaklık termodinamik kanunları ile tanımlanır. Pratikte, termodinamiğin kanunlarına dayandırılan termometreler hem yeterince doğru hem de uygun değildir. Bunun yerine uluslararası ölçüm komitesi, endüstri ve bilimin ihtiyaçlarını karşılayabilmek için yeterince kendini tekrarlayabilen ampirik bir sıcaklık ölçeği tanımlamıştır. Bu ölçek, uygulanabilecek kadar geniş bir aralık içermesi ve termodinamik ölçeğe yakın olması açısından periyodik olarak tekrar gözden geçirilir. En yakın düzeltme, 1990 yılında yapılan ve 1990 Uluslararası Sıcaklık Ölçeği olarak bilinen ITS-90'dır.

$L_\lambda d\lambda$ değerinin mutlak ölçümü çok detaylı ve genellikle yeterince kesin değildir. Bu sorunun üstesinden gelmek için L_λ bir standardın spektral ışımaya karşı ölçülüp, radyasyon (ışımaya) sıcaklık ölçeği birisi standart olarak seçilmiş iki kaynağın spektral ışımalarının oranına bağlı olarak tanımlanabilir.

ITS-90 Uluslararası Sıcaklık Ölçeği tarafından uygulanması gereken işlem budur. ITS-90 gümüşün donma noktası 1234.93 K (961.78 °C) üstündeki sıcaklıkları aşağıdaki eşitlikle tanımlar.

$$\frac{L_\lambda(T_{90})}{L_\lambda(T_x)} = \frac{e^{c_2/\lambda \cdot T_{90}} - 1}{e^{c_2/\lambda \cdot T_x} - 1} \quad (1.4)$$

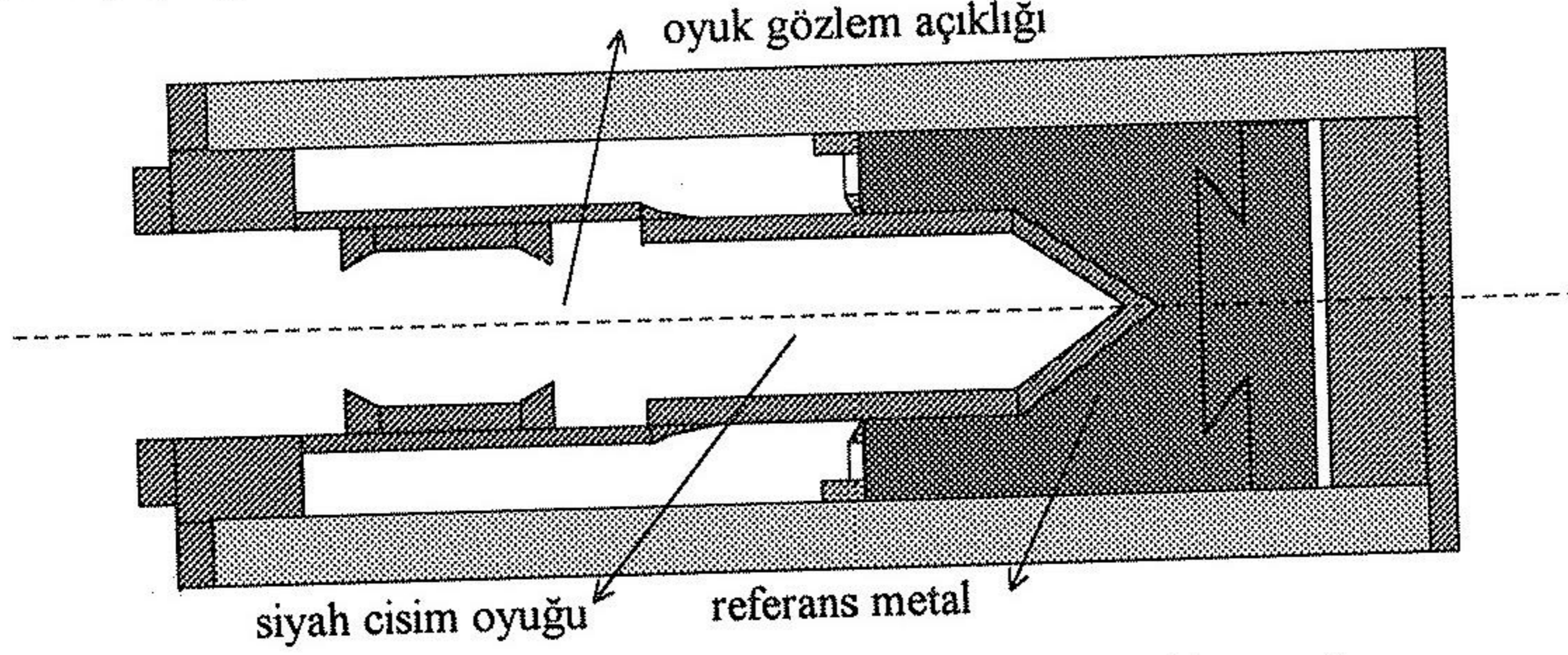
T_x gümüş, altın veya bakırdan herhangi birinin donma noktası, $L_\lambda(T_{90})$ ve $L_\lambda(T_x)$, λ dalga boyunda, T_{90} ve T_x sıcaklıklarında siyah cismin boşluktaki spektral ışımaya ve

$$c_2 = 0.014388 \text{ m.K dir.}$$

Eşitlik (1.4) gümüşün donma noktasının üstündeki sıcaklıklarda ITS-90 Uluslararası Sıcaklık Ölçeğini tanımlar. Bu tanım sadece ikinci ışımaya sabiti c_2 'nin değerinin bilinmesiyle yapılmıştır ve $c_2 = 1.4388 \cdot 10^{-2} \text{ m.K}$ alınarak ITS-90 sıcaklık ölçeği sabitlenmiştir. Araştırmalar sonucunda c_2 sabiti daha doğru ölçülse bile ITS-90 c_2 değeri kolaylıkla değiştirilemez.

2.3. Pratik Siyah Cisimler

Eşitlik (1.4) ile spektral ışınması belirlenen fiziksel sistem, metal donma noktasıdır. Bu sistemde sensör, yüksek safılıktaki grafitten oluşturulmuş oyuktur (Şekil 2). Tipik oyuk boyu 50 - 80 mm, oyuk (aperture) açıklığı ise 1 - 6 mm arasındadır.



Şekil 2. Işınım standardı için uygun bir siyah cisim oyuğu

Metal ile grafit arasında çok iyi bir ısı iletim olması gerekir. Oyuk yüzeyi, ısı enerjisi Planck kanununa göre ışınım enerjisine dönüştürür. Oyuk ve oyuk açıklığı, oyuktan ışınlanan enerjinin mümkün olduğunca Planck kanunuyla ifade edilebilmesine olanak verecek şekilde tasarlanmıştır.

Siyah cisim ışınmasını, seçilen dalga boyunda yüksek kesinlikle ölçebilmek için bir radyometreye gereksinim vardır. Ölçek, eşitlik (1.4) ile tek bir dalga boyunda tanımlanmasına rağmen pratik radyometreler sonlu bir band genişliğine sahiptir. Radyometrenin bütün dalga boylarındaki tepkisi belirlenerek, radyometrenin ölçtüğü toplam ışınımın bir Planck eğrisi uydurularak etkin dalga boyu belirlenir. Işınım termometreleri (pyrometreler) radyometreden okunan fiziksel değerleri (akım, voltaj), bir düzeltme faktörü de içererek, sıcaklık bilgisine dönüştüren cihazlardır.

2.4. Emissivite (ışınılama)

Pratikte yüzeyden yayılan ışınım yukarıdaki eşitliklerden hesapladığımız ışınımından farklıdır. Emissivite (ışınılama) olarak bilinen bir etkeni bu eşitliklere katmak gerekir. Bu Planck ve Wien eşitliklerinde spektral emissivite ϵ_λ , Stefan eşitliğinde toplam emissivite ϵ 'dir.

$$L_\lambda d\lambda = \epsilon_\lambda (c_1/\pi) \lambda^{-5} [\exp(c_2/\lambda T) - 1]^{-1} d\lambda$$
$$\approx (c_1/\pi) \lambda^{-5} \exp(-c_2/\lambda T) d\lambda \quad (1.5)$$

ve

$$E = \epsilon (\sigma/\pi) T^4$$

Emissivite belli bir sıcaklıkta bir cisim tarafından ışınlanan ışınımın, aynı sıcaklıktaki siyah cisim veya bütün ışınlayıcı (full radiator) tarafından ışınlanan ışınımına oranıdır. Bu nedenle emissivite değerleri 0 (mükemmel yansıtıcı) ile 1 (siyah cisim) arasında olmalıdır. Bir yüzey için emissivite

dalga boyuna ve sıcaklığa bağlıdır. Ayrıca yüzeyin nasıl olduğuna ve nasıl hazırlandığına da bağlıdır ve bu nedenle zamanla da değişebilir.

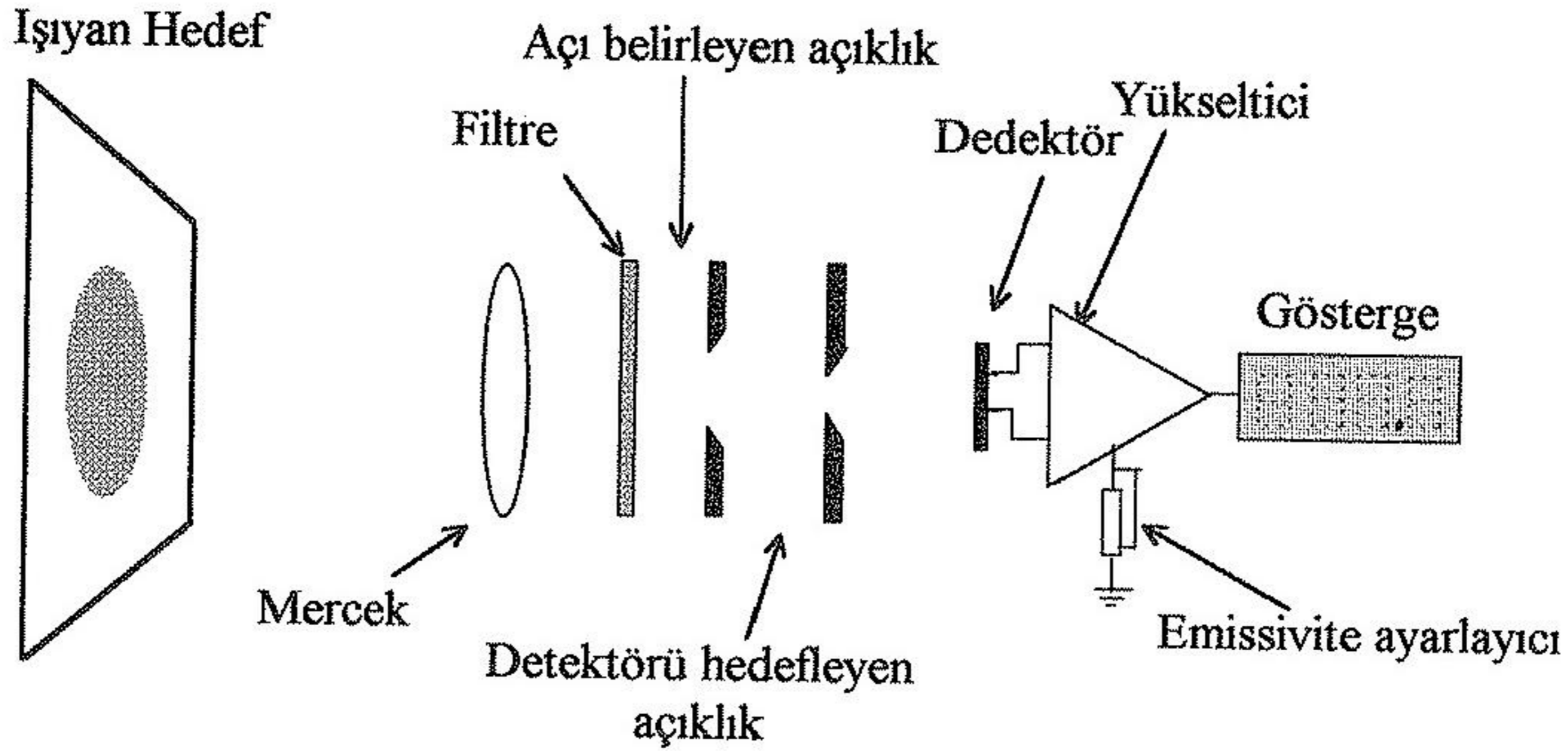
Görüldüğü gibi siyah cisim olmayan yüzeylerin sıcaklıklarının kestirilebilmesinde yüzeyin emissivitesinin bilinmesi, en azından yaklaşık olarak bilinebilmesi ve bu düzeltmenin yapılan ölçümlere yansıtılması şarttır.

3. IŞINIM TERMOMETRELERİ

Şekil 4, bir ışıma termometresinin basitleştirilmiş şemasını göstermektedir. Işıma termometrelerinin ana çalışma prensibi yüzeyden ışıma toplamak, filtreleyerek istenen dalga boylarını seçmek, dedektör ve sinyal toplama sistemiyle ölçmektir.

Sistemde bulunan iki açıklık (aperture), hedef alanını (target size) veya görüş alanını (field of view, f.o.v) ve termometrenin ışıma kabul açısını belirler. Mercek hedef alanının görüntüsünü, hedef alanı belirleyen açıklık üzerine odaklar. Mercek uygun bir şekilde odaklanmadan hedef alanın sınırlarının belirlenmesi mümkün değildir.

Dedektör çıkışındaki sinyal, açıklıkların geometrisinin, farklı optik parçaların optik geçirgenliğinin ve dedektörün duyarlılık fonksiyonunun karmaşık bir toplamıdır.



Şekil 4. Spektral band ışıma termometresinin yapım ve çalışmasındaki ana elemanlar

Termometre tarafından ölçülen spektral ışıma,

$$L_{\lambda,m} = \epsilon_{\lambda} L_{\lambda,b}(T_s) \quad (1.5)$$

ϵ_{λ} yüzeyin çalışılan dalga boyunda spektral emissivitesi ve T_s yüzeyin gerçek sıcaklığıdır. Sıcaklığı ölçebilmek için emissiviteyi belirlemek veya ölçmek gerekir. Pek çok ışıma termometresine emissivite ayarı konmuştur.

Dedektör bir ışınlı termometresinin önemli bir parçasıdır. Şekil 1'de görüldüğü gibi, sıcaklığa göre ışık şiddetinin değişme oranı kısa dalga boylarında daha büyüktür. Bu nedenle en kesin sıcaklık ölçümü için mümkün olduğunca kısa dalga boylarında çalışan monokromatik termometreler tercih edilmelidir. En uygun spektral çalışma aralığı, ölçülmek istenen sıcaklık aralığına uygun olmalı ve dedektör de buna göre seçilmelidir.

Spektral aralık belirlenirken dikkat edilecek diğer bir faktör ise, hedef ve cihaz arasında bulunan atmosfer tarafından bazı dalga boylarının soğurulmasıdır. Özellikle karbondioksit ve su buharının soğurduğu dalga boylarından kaçınılmalıdır. Aksi takdirde nem oranı ve ölçüm uzaklığı sonucu etkiler. Tipik olarak kullanılan dalga boyları 0.65µm - 1µm, 3µm - 5µm ve 8µm - 14µm'dir.

Göz önüne alınması gereken en önemli parametrelerden birisi hedef boyutudur (target size). Hedef boyutu gelen ışınının dedektörü tamamen doldurması için yeterli büyüklükte olmalıdır.

Eğer mutlak sıcaklık ölçümünden daha çok sıcaklıktaki dalgalanmalarla ilgileniyorsak veya tekrarlanabilirlik mutlak değerden daha önemli ise emissivite sorunu büyük ölçüde ortadan kalkabilir. Emissivitenin sabit olması veya sıcaklık ve dalga boyuyla fazla değişmemesi yeterli olabilir.

Eğer mutlak sıcaklığı bilmek istiyorsak hedefin emissivitesinin bir şekilde belirlenerek yapılan ölçümlere katılması gerekir.

6. SONUÇ

ışınlı termometrelerinin en büyük üstünlüğü cihaz ile sıcaklığı ölçülen ortam arasında fiziksel dokunmanın olmamasıdır. Bu nedenle cevap hızı cihazın dedektörü tarafından belirlenir ve mikro saniyeler düzeyinde bile olabilir. Böylece çok hızlı değişen sıcaklıklar veya hareketli cisimlerin sıcaklıklarını ölçmek olasıdır. Isılçiftlerin ve direnç termometrelerinin yüksek sıcaklıklarda uzun süre kalmalarının onların kalibrasyonlarında dolayısıyla ölçüm hatalarında büyük değişimlere neden olabildiği gözönüne alınırsa bu çok önemli bir noktadır.

Oysa ışınlı termometreleri sadece ortam sıcaklığının değişiminden ve elektronik parçalarının uzun dönemdeki kaymasından etkilenir. Eğer yüzey emissivitesi kararlı kalıyorsa böylece biliniyor veya ölçülebiliyorsa veya sıcaklık kaynağı bir şekilde siyah cisme benzetilebiliyorsa radyasyon termometreleri ile yüksek doğruluklara, 1500°C de $\pm 1^\circ\text{C}$ veya daha iyiye ulaşılabilir.