

## Işınım Düzeyi Ölçümlerinde Kullanılan Radyometrelerin Kalibrasyonu

*Murat Durak, Rahmi Dilli, Ferhat Sametoğlu*

TÜBİTAK-Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME),  
P.K.54, 41470, Kocaeli - TURKEY  
Tel: 262 679 5000 E-mail : [murat.durak@ume.tubitak.gov.tr](mailto:murat.durak@ume.tubitak.gov.tr)

### Özet

Işınım düzeyi ölçümlerinde kullanılan radyometrelerin ölçüm sonuçları, kalibrasyonda kullanılan kaynak ve metotlara bağlı olarak değişim gösterir. Herhangi bir kaynak ve metot kullanılarak kalibre edilen bir radyometrenin değişik bir kaynakla ve yöntemle kalibre edilmesi durumunda özellikle morötesi bölgede % 30' a varan farklar meydana gelebilmektedir. Bundan dolayı, kalibrasyonda kullanılan ölçüm metodu ve kullanılan ışınım kaynakları sertifikada belirtilmelidir. Her laboratuvar tüm yöntemleri ve kaynakları kullanma yeterliliğine sahip değildir. Bu nedenden dolayı da Uluslararası Aydınlatma Komitesi (CIE), kalibrasyon metotlarını ve radyometrelerin endüstriyel uygulamalarını standart yöntemlere göre gerçekleştirmek amacıyla çalışmalar yapmaktadır. Bu bildiride, ışınım düzeyi ölçümlerinde kullanılan radyometrelerin kalibrasyonunda kullanılan üç farklı yöntem detaylı olarak incelenmektedir.

Anahtar Sözcükler: Radyometre, Işınım Kaynağı, Kalibrasyon, Fotodedektör

### 1. GİRİŞ

Radyometreler endüstrinin birçok alanında kullanılmaktadır [1-3]. Bununla birlikte, özellikle morötesi bölgede bu cihazların doğruluğu % 90' dan iyi değildir ve kullanıcılar bu cihazların kolay ve ucuz kalibrasyonunu talep etmektedir [4]. Ölçümlerin doğruluğu, çalıştırma koşulları, çevre şartları kullanılan ekipman ve yöntemler başta olmak üzere bir çok parametreden etkilenmektedir. Bunlara ek olarak radyometrenin duyarlılık yapısı ve ölçümü istenen bölgenin teorik yapısı arasındaki farkta bilinmelidir [5].

Farklı üreticilerin ticari radyometreleri karşılaştırıldığında özellikle morötesi bölgede % 30' a varan farklar tespit edilmiştir [4]. Bu farklılığın temel nedeni ışınım düzeyi radyometrelerinin kalibrasyonunun kaynak tabanlı olmasıdır. Dolayısıyla kullanıcılar, bu tip radyometrelerin kalibrasyonun da karşılaşılan problemleri çözmek için Uluslararası standartlaştırılmış metotlara ihtiyaç duyarlar. Son zamanlarda, CIE ve diğer organizasyonlar bu konu üzerine çeşitli çalışmalar gerçekleştirmişlerdir [6,7].

Bir radyometre genel olarak bir foto detektör, bir filtre, bir foto-aralık ve bir dağıtıcıdan oluşmaktadır. Radyometrenin tayfsal duyarlılık yapısı, etkin ölçüm tayfındaki yapıya filtre kullanılarak ayarlanır. Tayfsal duyarlılık fonksiyonları uygulama alanlarına bağlı olarak değişim göstermektedir. Örneğin; fotometri için bu yapı 380 nm ile 780 nm arasında olan  $V(\lambda)$  fonksiyona, UVA bölgede ise 315 nm ile 400 nm aralığında kare fonksiyona sahiptir. Radyometre duyarlılığını fiziksel olayın meydana geldiği tayf bölgesine eşitlemek oldukça karmaşık bir problemdir. Doğru duyarlılık yapısı genel anlamıyla, teorik olarak istenilen uygulama bölgesinden oldukça uzak olabilmektedir.

Si (Silicon), Termo-pil, InGaAs (Indium-Gallium Arsenide) ve Ge (Germanium) tipteki detektörler morötesi, görünür ve kızılötesi uygulamalarda oldukça tercih edilmektedir. Ayrıca, kalibrasyonlarda kullanılan ışınım kaynaklarının tayfı, radyometrenin önemli duyarlılığa sahip olduğu tayfsal bölge içerisinde değişebilmektedir.

Bu bildiride, ışınım düzeyi ölçümlerinde kullanılan radyometrelerin kalibrasyon metotları ve deney sistemleri incelenmektedir. Olası belirsizlik kaynakları ve kullanılan yöntemin uygulama alanına bağlı avantajları bu çalışma içerisinde detaylı olarak tartışılmaktadır.

## 2. Kalibrasyon Metotları

Işınım düzeyi ölçümlerinde kullanılan radyometrelerin kalibrasyonunda üç ana metot vardır:

1. Etkin ışınım düzeyi duyarlılık ölçümü
2. Referans radyometre ve bir çizgisel kaynak kullanılarak kalibrasyon
3. Spektrometrik kalibrasyon

### 2.1. Etkin ışınım düzeyi duyarlılık ölçümü

Bir ışınım kaynağının ölçümünde, ideal bir ışınım düzeyi ölçer radyometrenin çıkışında elde edilen sinyal;

$$R = \int_0^{\infty} S_{act}(\lambda)E(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

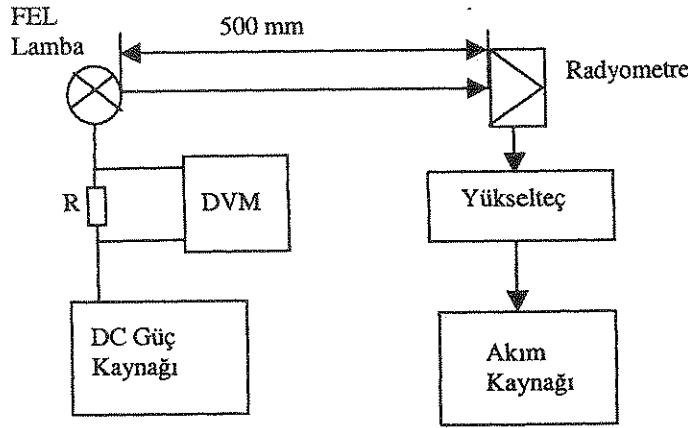
Burada,  $E(\lambda)$  ölçülen ışınım kaynağının tayfsal ışınım düzeyi,  $S_{act}(\lambda)$  uygulama alanının duyarlılık fonksiyonu,  $R$  çıkış sinyali ve  $\lambda$  dalga boyudur.

Radyometrenin çıkış sinyali ve kalibrasyon kaynağının radyometre başlığı üzerinde meydana getirdiği etkin ışınım düzeyinin gerçek değerinin oranı eşitlik 2.'de verilmektedir.

$$R_c = \frac{i}{E_c} = \frac{A s_0 \int_0^{\infty} S_{\lambda,c} s(\lambda)_{rel} d\lambda}{\int_0^{\infty} S_{\lambda,c} s(\lambda)_{act} d\lambda} \quad (2)$$

Burada  $i$  radyometre çıkışında okunan akım değeri,  $A$  radyometrenin algılayıcı alanı,  $s(\lambda)_{rel}$   $s_0$  tepe değerine normalize edilen göreceli tayfsal duyarlılık ve  $S_{\lambda,c}$  kaynağın tayfsal ışınım gücüdür.

Işınım düzeyi ölçümlerinde kullanılan radyometrelerin kalibrasyonu için laboratuarda kurulan deney düzeneği Şekil 1'de görülmektedir. Bu ölçümde, ışınım akısı detektör alanını kaplamalı ve hem radyometrenin tayfsal duyarlılığı hem de radyometre algılayıcı alanı içerisindeki ışınım düzeyi homojen olmalıdır [8].



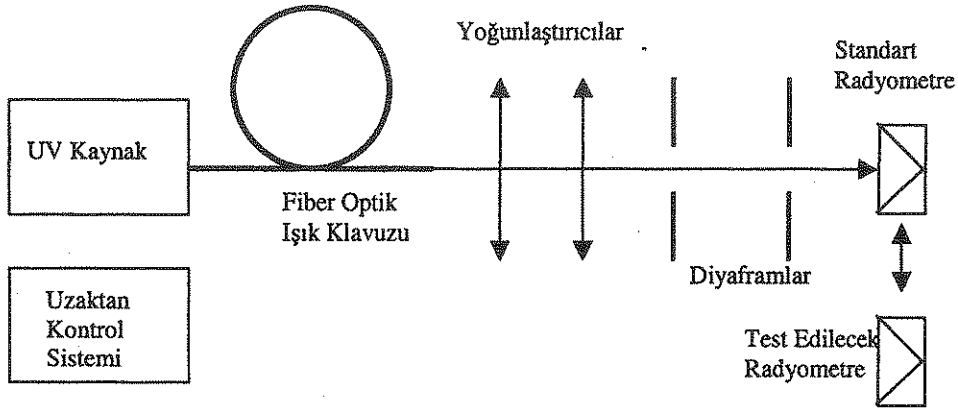
Şekil 1. Işınım Kaynağı Standardı Kullanarak Radyometre Kalibrasyonu

Standart kaynak olarak bir adet 1000 W FEL tip tungsten filamanlı lamba kullanılmıştır. Lamba sabit polaritede ve kararlı akımda, DC güç uygulanarak çalıştırılmıştır [9]. Akım kararlılığında yüksek doğruluk elde etmek amacıyla ana güç kaynağına bir adet programlanabilir akım kaynağı bağlanmıştır. Böylece, uzun ve kısa dönem akımı  $10^{-5}$  seviyesinde kararlı tutulabilmektedir.

Kalibrasyon işlemi kalibrasyon standardına bağlı olarak belirlenir. Eğer standart olarak kalibreli bir ışınım kaynağı kullanılırsa, kaynağın tayfsal ışınım düzeyi bilinmek zorundadır. Bazı laboratuvarlar standart olarak FEL tipi tungsten

lamba kullanılmaktadır. Bu tip lambalar birkaç dalga boyunda ölçüm gerçekleştirildikten sonra teorik olarak öngörülebilir devamlı tayfa sahiptirler. Bundan dolayı, bu tip lambalar kullanılarak etkin ışınım düzeyi hesabının gerçekleştirilmesi kompleks değildir. Fakat, tayfsal güç dağılımı FEL tip lambalardan oldukça farklı olan cıva temelli lambalar birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Dolayısıyla, eğer FEL tip lamba kullanılarak kalibre edilen bir radyometre, cıva temelli lambaların ölçüm işlemlerinde kullanılmak istenirse mutlaka doğrulama yapılmalıdır.

Eğer ölçüm bir detektör standardı kullanılarak gerçekleştirilirse, eşitlik etkin ışınım düzeyi duyarlılığını hesaplamak için kullanılır. Bu tip ölçümlerde, radyometrenin alanı ve kaynağın tayfsal dağılımı bilinmek zorundadır. Yukarıda belirtildiği üzere, eğer radyometre homojen duyarlılığa sahipse eşitlik 2 geçerlidir. Aksi takdirde bu yöntem uygun değildir. Şekil 2.' de ölçüm sisteminin şematik gösterimi yer almaktadır. Bu tip radyometrelerin kalibrasyonu sadece, bir çalışma standardı ile karşılaştırılarak sağlanır. Bu radyometre kullanılmadan önce tam olarak karakterize edilmelidir [6]. Kalibrasyonda kullanılan ışınım kaynağı aynı tipte olmalıdır. Aksi takdirde, kalibreli ve karakterize edilmiş bir üst seviye radyometre kullanmak gerekmektedir.



Şekil 2. Çalışma Standardı Kullanılarak Radyometrelerin Kalibrasyonu

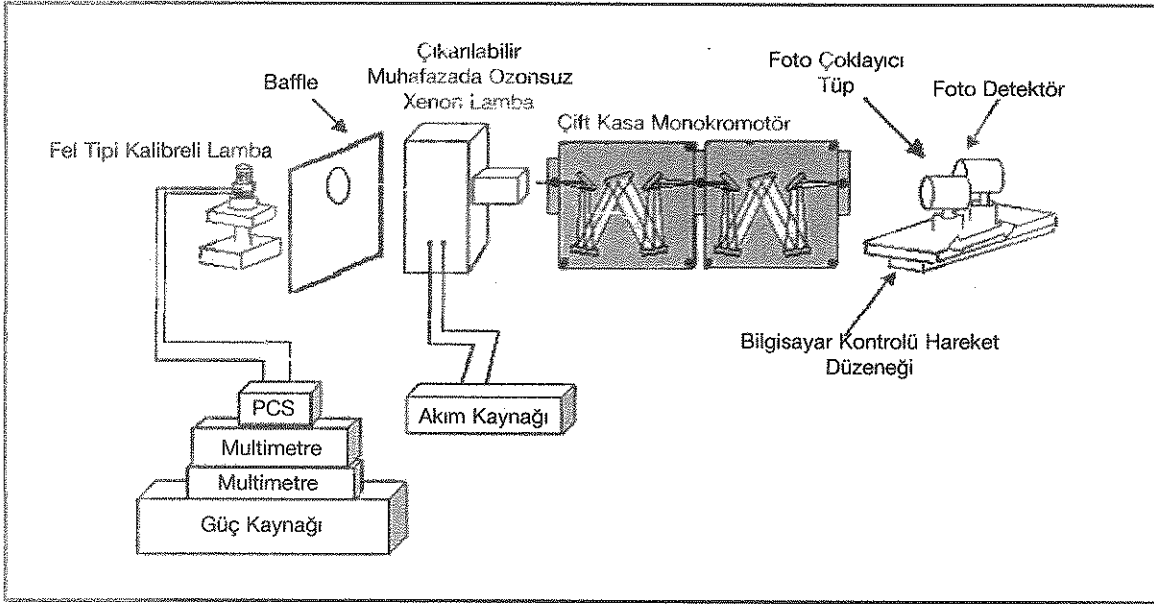
## 2.2. Bir Çizgisel Kaynağın Referans Radyometre Kullanılarak Kalibrasyonu

Birçok laboratuarda ışınım düzeyi ölçümlerinde kullanılan radyometrelerin kalibrasyonu için çizgisel kaynak metodu kullanılmaktadır. Uygulamaya bağlı olarak, bir cıva lambasının özellikle 254 nm, 313 nm ve 365 nm dalga boylarında filtrelenmiş çizgileri kullanılır. Bu yöntemde, kalibrasyon yerine koyma tekniği uygulanarak gerçekleştirilir. Bundan dolayı, bu yöntemi uygulamak oldukça basittir ve kalibrasyon tekrarlanabilirliği çok iyidir. Bir radyometrenin kalibrasyonu cıvadan farklı bir çizgisel kaynak kullanılarak yapıldığında, kaynağın farklı çizgisel yapısından dolayı hatalı okuma problemleri meydana gelebilir. Bazı durumlarda diğer ışınım kaynakları yeterli ışımaya sahip olamadıklarından dolayı, çizgisel kaynak kullanılarak radyometrelerin kalibrasyonu tek seçenek olmaktadır.

## 2.3. Spektrometrik Kalibrasyon

Bu yöntemde, radyometrelerin kalibrasyonu bir spektrometrik yöntemle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemi genelde Ulusal standartlar laboratuvarları kullanmaktadır [9]. Uygulamalarda kullanmadan önce spektrometrenin kalibrasyonu yapılmalıdır. İki adımda kalibrasyon işlemi gerçekleştirilebilir. İlk adımda tayfsal ışınım standardı kullanılarak spektrometrenin göreceli tayfsal duyarlılığı kalibre edilir. İkinci adımda, monokromatik ışınım altında bir standart detektör ile karşılaştırılarak mutlak kalibrasyon gerçekleştirilir.

Ölçüm sistemi şekil 3.' de görülmektedir. Radyometreleri, spektrometrik yöntemle kalibre etmek amacıyla LOT-Oriel firmasından satın alınmış olan oldukça kararlı ve 1000 W güce sahip bir zenon ark lamba monokromatörün ön kısmına yerleştirilerek çalıştırılmıştır. Akım oynama lamba ısısal dengeye geldikten sonra % 0.2' den daha azdır. Ölçümler ortam sıcaklığı  $23 \pm 1$  C° olan ve tüm yüzeyleri karartılmış karanlık oda içerisinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Spektrometrik ölçüm sistemi.

Farklı tipte ışınım kaynağı kullanılarak gerçekleştirilen ölçümlerin ardından, değişik tipte ışınım kaynaklarının ölçümleri için doğrulama faktörleri elde edilmiştir.

$$DF = \frac{\int_0^{\infty} S_{act}(\lambda)E(\lambda)d\lambda}{Okuma} \quad (3)$$

burada, okuma kalibrasyonu yapılan radyometrede okunan duyarlılık değeri,  $E(\lambda)$  tayfsal ışınım düzeyinin değeri ve  $S_{act}$  ölçümü istenilen uygulama alanının fonksiyonu.

Bu şekilde her tür uygulama alanı için kaynağın etkin ışınım düzeyi değeri kolayca hesaplanabilir [10]. Bununla birlikte, bu tip cihazların yüksek maliyetleri bu yöntemin uygulama alanını kısıtlamaktadır.

### 3. Metotların belirsizlik değerlendirmesi

Belirsizlik değeri kalibrasyon yöntemi, deney düzeneği ve standartlara bağlıdır. Bundan dolayı, Ölçümlerin belirsizlik kaynaklarını yöntemlere bağlı olarak üç bölüme ayırdık.

Etkin ışınım düzeyi duyarlılık ölçümleri için temel belirsizlik kaynakları aşağıdaki gibi verilmektedir:

- i. Standart lambaların tayfsal ışınım düzeyinin belirsizliği
- ii. Işınım kaynaklarının tayfsal dağılımının ölçüm belirsizliği
- iii. Ölçümlerin tekrarlanabilirliği
- iv. Geometrik faktörler; ışığın pozisyon ayarı ve iki cihazın foto-aralık alanlarının farklılığı
- v. Detektör duyarlılığının yönsel, uzaysal ve sıcaklık bağımlılığı
- vi. Test edilen radyometrenin çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik
- vii. Duyarlılık datasının çözünürlüğü ve bant genişliği

Kalibrasyon işleminde bu yöntem kullanıldığında kullanıcı radyometre hakkında bir çok bilgiye ulaşabilir. Fakat, pahalı servis ücreti ve monokromatör çıkışındaki çok küçük güç seviyesi, bu yöntemin endüstriyel uygulamalarda kullanımını kısıtlamaktadır.

Çizgisel kaynak ve referans radyometre kullanıldığı durumdaki temel belirsizlik bileşenleri:

- i. Test radyometresinin çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik
- ii. Ölçümün tekrarlanabilirliği
- iii. Referans dedektörün kalibrasyonu
- iv. Radyometrenin ve kaynağın kararlılığından meydana gelen A tipi belirsizlik

Bu kalibrasyonlarda belirsizlik seviyesi yaklaşık olarak % 3-6'dır.

Spektroradyometre kalibrasyonlarının belirsizliği aşağıdaki unsurlardan meydana gelir,

- i. Ölçümün tekrarlanabilirliği
- ii. Geometrik faktörler, ışınının konumlandırması ve iki cihazın foto aralığındaki fark gibi
- iii. Spektroradyometrenin kalibrasyonu
- iv. Test radyometrenin çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik

Bu metot daha karmaşıktır ve kalibrasyonun belirsizliği diğer kullanılan metotlara göre daha büyüktür. Bu ölçüm yönteminin başka bir problemi de ölçüm maliyetidir.

Işınım düzeyi ölçümlerinde kullanılan radyometrelerin başarılı kalibrasyonu için birkaç nokta daha vardır.

- Kalibrasyonda kullanılan kaynağın tayfsal güç dağılımı bilinmelidir.
- Eğer mümkünse kalibrasyon laboratuvarları aynı kalibrasyon yöntemini kullanmalıdır.
- Radyometre kalibrasyonu için değişik ışınım kaynakları kullanılması durumunda doğrultma katsayıları kullanılmalıdır.

#### 4. Sonuçlar

Işınım düzeyi ölçümlerinde kullanılan radyometrelerin kalibrasyonu amacıyla üç farklı kalibrasyon yöntemi avantaj ve dezavantajları ile incelenmiştir. Bu tip radyometrelerin özellikle morötesi ve kızılötesi bölgelerde ölçüm doğrulukları ve kaliteleri yetersiz tayfsal çözünürlükten dolayı istenilen seviyede olamamaktadır. Radyometrenin duyarlılık yapısı ve kaynağın tayfsal güç dağılımı, istenilen uygulama alanından oldukça uzakta olabilmektedir. Bundan dolayı, uygun filtreler kullanılarak radyometre duyarlılığı ve kaynak tayfsal güç dağılımı istenilen uygulama alanına yaklaştırılabilir. Bu tip radyometrelerin kalibrasyonu kaynak bağımlıdır. Dolayısıyla, karşılaştırılabilir ölçüm sonuçları elde edebilmek için radyometrelerin kalibrasyonu belirli kılavuzlar dahilinde yapılmalıdır.

## 5. Referanslar

- [1] L. Huurto, E. Snellman, and L. Ylianttila, "Dosimetry in Phototherapy," UV News 7, (2002)
- [2] T. G. Helminger, W. Dahn, and S. Fenk, "Manufacturer's view on UV meters with different action spectra," UV News 7, 20(2002)
- [3] A. Ridyard, "Measuring the irradiance of high power UV lamps in radiation curing process industries using a calibrated photodiode array spectrograph", Proc. CORM Ann. Conf. And Business Meeting, May 2001, Gaithersburg, MD:NIST
- [4] P. Karha, "Calibration and intercomparison issues with broadband UV meters", UV News 7, (2002)
- [5] Xu G. and Huang X, " Characterization and calibration of broadband ultraviolet radiometers", Metrologia 37, 235-242
- [6] Xu G., "Methods of characterization and calibration of broadband ultraviolet radiometers" firs draft CIE Document TC2-47
- [7] T. G. Helminger et al, "Characterizing the performance of integral measuring UV-meters", Final Report of WG1, Thematic Network for UV Measurements
- [8] Xu G. and Huang X, "Area correction in the calibration of detectors for ultraviolet radiation measurement", Metrologia 37, 559-562
- [9] M. Durak, "Development of Filter Radiometer Based High Accurate Calibration Facility for Solar UV Measurements" OPTIK, 2004, 115(12), 533-537
- [10] T. Larason and C. Cromer, " Sources of Error in UV Radiation Measurements", J. Res. Nat. Inst. Stand. Technol. 7, 649-656 (2001)