

METROLOJİK KAPSAMDA OPTİK ÖLÇÜM VE KALİBRASYONLAR

Farhad Samedov, Murat Durak

TÜBİTAK, UME, PK.21, 41470 Gebze-Kocaeli, Türkiye
Tel: 262 646 63 55 E-Mail: farhad.samedov@ume.tubitak.gov.tr

ÖZET

Telekomünikasyondan savunma teknolojilerine, renk analizlerinden güneşle ilgili fiziksel çalışmalara değin çok geniş alanda optik ölçümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ölçümlerin doğruluğu ve uluslararası geçerliliği metrolojik olarak ulusal standartlara izlenebilirlikleri ile orantılıdır.

Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Optik laboratuvarında bu konularda hizmet verebilmek için birincil seviye ölçüm düzenekleri kurularak geliştirilmektedir. Yapılan ölçümlerin izlenebilirlik zincirinin temelini oluşturan Düşük Sıcaklık Radyometresi ile ışınım kaynakların optik gücü mutlak olarak belirlenmektedir. Kurulmuş olan bu sistemle optik uygulamalarda kullanılan dedektör ve filtre radyometreleri mutlak olarak karakterize edilmiş ve transfer standartları oluşturulmuştur. Bu transfer standartları ile dedektör tabanlı radyometrik ve fotometrik uygulamalar için duyarlılık ölçeği oluşturulmuştur. Oluşturulan dedektörlerle yedi temel SI biriminden biri olan fotometrik büyüklük kandela 1979 yılındaki tanımına uygun olarak gerçekleştirilmiş ve alt türev birimlerine geçiş sağlanmıştır.

Bu bildiride, optik ölçümlerin yüksek doğrulukla gerçekleştirilmesi amacıyla laboratuvar tarafından oluşturulan ölçüm sistemleri, birimler arasındaki fiziksel bağlantılar ve endüstriyel alanda verilen kalibrasyon hizmetleri aktarılmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Radyometri, Fotometri, İzlenebilirlik, Kalibrasyon.

1. GİRİŞ

UME Optik laboratuvarı, optik metrolojisi konusunda birincil seviye ölçüm düzeneklerinin kurularak ulusal standartların gerçekleştirilmesi ve ülke genelinde izlenebilirlik dağılımının sağlanmasını amaç edinmiştir. Ölçeklerin uluslararası uygunluğunu sağlanması amacıyla UME Optik Laboratuvarı diğer metroloji kuruluşlarla ikili ve genel uluslararası ölçüm karşılaştırmalarına girmekte, yurtiçi izlenebilirlik zincirinin oluşturulmasına yönelik Fotometri, Radyometri ve Fiberoptik alanlarında ülkemizin ihtiyaç duyduğu kalibrasyon, eğitim ve danışmanlık hizmetlerini verebilmek için çalışmalar yürütmektedir.

Genel olarak bakılırsa, optik konusunda yapılan her türlü ölçümde tayfsal duyarlılığa sahip dedektörler kullanılmaktadır. Systeme International d'Unites (SI) temel ölçüm birimlerinden fotometrik büyüklük olan kandela, silikon fotodiyot temelli fotopikli fotometreler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu tip fotometrelerde dikkat edilmesi gereken önemli husus ışınım verimi fonksiyonudur:

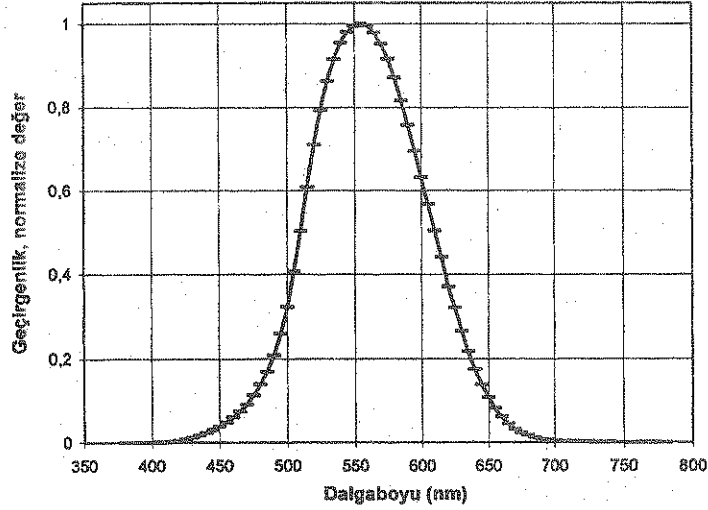
$$K(\lambda) = K_m V(\lambda) \quad (1)$$

$K(\lambda)$: İnsan gözüntün spektral ağırlık fonksiyonu; $V(\lambda)$: spektral verimlilik fonksiyonu; K_m : bu iki fonksiyonu bir birine bağlayan maksimum ışıksal verimlilik.

Görünür bölgeyi oluşturan $V(\lambda)$ fonksiyonu, 555 nm dalga boyunda maksimum geçirgenliğe sahiptir (Şekil 1). $V(\lambda)$ fonksiyonu Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) tarafından standartlaştırılmış ve Comite Consultatif de Photometrie et Radiometrie (CCPR) tarafından da fotometrik uygulamalarda kullanılmak üzere kabul edilmiştir.

1979 yılına kadar fotometrinin temel birimi olan kandela, platinyumun donma noktasında (1768°C) siyah cisme dayalı olarak tanımlanmış ve K_m değeri deneysel verilere göre 683 lm/W olarak hesaplanmıştır. Bu tanım yüksek belirsizlikle elde edildiğinden, ışık şiddeti temel birimi için SI günümüzde kullanılan tanımı kabul etmiştir. Bu tanım 1979 yılında Conference Generale des Poids et Mesures (CGPM) 16'cı konferansında kabul edilmiştir. Bu tanıma göre kandela, Belli bir yönde ışınım şiddeti 1/683 Watt/steradyan'a eşit olan bir kaynağın, 540×10^{12} Hz frekansında aynı yöndeki ışık şiddeti" olarak tanımlanmıştır [1].

Şekil 1. $V(\lambda)$ fonksiyonu



Aynı zamanda bu tanım fotometrik büyüklüklerle radyometrik büyüklükler arasındaki bağlantıyı oluşturmaktadır. Radyometri ve Fotometride yaygın olarak kullanılan önemli ölçüm büyüklükleri ve birimleri Tablo 1'de verilmektedir.

TABLO 1. Radyometri ve Fotometri birimleri arasındaki ilişki

Fotometrik		Radyometrik		Foton	
Büyüklik	Birim	Büyüklik	Birim	Büyüklik	Birim
Işık Enerjisi	Lm·s	Işınım Enerjisi	J	Foton Enerjisi	*
Işık Akısı	Lm	Işınım Akısı	W	Foton Akısı	s^{-1}
Işık Şiddeti	Cd	Işınım Şiddeti	$W sr^{-1}$	Foton Şiddeti	$s^{-1}sr^{-1}$
Aydınlık Düzeyi	$Cd \cdot m^{-2}$	Işınım Düzeyi	$W m^{-2}$	Foton Işınım Düzeyi	$s^{-1}m^{-2}$
Parıltı	$Cd \cdot m^{-2}$	Işıma	$W sr^{-1} m^{-2}$	Foton Işıması	$s^{-1}sr^{-1}m^{-2}$

*Foton Enerjisi birimi fotonların sayısını ifade eder.

Tablodan gözüktüğü gibi optik radyometri alanında ışınım akısı ölçümleri için temel ölçüm büyüklüğü watt, bu birime karşılık gelen fotometrik büyüklük ise ışık akısı birimi "lümen" 'dir. Radyometri 'deki diğer birimler radyometrenin temel birimi watt 'tan, fotometrik birimler ise ışık şiddeti birimi "kandela" 'dan türetilerek elde edilir.

UME, sahip olduğu altyapısıyla optik alanının çok farklı konularındaki ölçümlere yönelik ölçüm ve kalibrasyon hizmetleri vermektedir. Aydınlatma, Tekstil, Otomotiv, Boya, Denizcilik, Ambalaj, Cam, Havacılık ve Savunma Sanayi v.b. kuruluşlarca sıklıkla ihtiyaç duyulan optik ölçüm ve kalibrasyonlar çok çeşitli cihaz ve çalışma konularını kapsamaktadır. Otoyol aydınlatmalarından özel çok-modlu fiberoptik kabloların kızılötesi karakteristiklerine, güneşin morötesi bölgesinin ışınım etkilerinden hava kirliliği ölçüm cihazlarına değin, optik ışınım ve sensörlerinin kullanıldığı birçok konu, laboratuvar araştırma konularına dahil olmaktadır.

2. Optik İzlenebilirlik Ölçeği

UME 'de kandela, birincil seviye düşük sıcaklık radyometre (Radiox) ölçüm düzeneği kullanılarak oluşturulan ve karakterize edilen mutlak detektörler yardımı ile 1979 yılındaki son tanımına göre gerçekleştirilerek fotometrik ve radyometrik büyüklükler için izlenebilirlik zincirleri oluşturulmuştur [2].

Düşük sıcaklık radyometresi izlenebilirlik zincirinin temelini oluşturur [3]. Sıvı helyumla 4 K kadar soğutulan radyometre elektriksel yerine koyma prensibi ile çalışır. Lazerlerin optik gücü mutlak olarak bu radyometre ile ölçülür. Işınım kaynağı olarak ölçümlerde Ar+ (457nm, 488nm, 515nm), He-Ne (632.8 nm) ve Nd:YAG (532nm ve 1064 nm dalga boyları) gibi lazer kaynakları kullanılmıştır. Lazerlerin optik gücü kurulu olan birincil seviye düzenekle 10^{-4} mertebesinde bir belirsizlikle elde edilmiştir. Optik güç mutlak olarak ölçüldükten sonra, laboratuvar araştırmacıları tarafından dizayn edilen ve transfer standardı olarak kullanılan tuzak detektörlere aktarılmıştır [4, 5, 6]. Dedektörün çıkış akımının

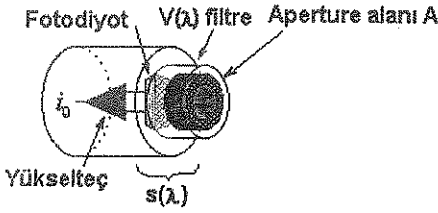
optik güce olan tepkisi aynı lazer dalga boylarında ölçülmüş ve geliştirilen interpolasyon ve ekstrapolasyon modelleri kullanılarak UME spektral duyarlılık ölçeği 350-1600 nm dalgaboyu aralığında oluşturulmuştur. Modellerde çift-monokromatör ölçüm sistemi kullanılarak dedektörlerin yansıtması ölçülerek [7] ve iç/dış kuvntum verimleri hesaplanmıştır.

3. Ölçüm Büyüklükleri

3.1. Kandela

UME 'de kandela, karakterize edilmiş standart fotometre başlıkları ve standart ışık şiddeti lambaları kullanılarak gerçekleştirilmektedir [8]. Standart fotometre silikon fotodiyot, spektral olarak $V(\lambda)$ fonksiyonuna eş olan filtre ve foto-aralıktan oluşur (Şekil 2).

Şekil 2. UME standart fotometre başlığı



Bu fotometrelerin ışıksal duyarlılıkları optik ölçüm teknikleri kullanılarak A/lüks cinsinden elde edilmiştir. Fotometre önünde kullanılan ve ölçümlerin görünür bölgeyi içermesini sağlayan $V(\lambda)$ -filtresinin spektral geçirgenliği monokromatör ölçüm sistemine göre 360-830 nm dalga boyu aralığı için %0.2 belirsizlikle ölçülerek çıkarılmıştır. Dedektör önüne konulan ve katı açıyı belirleyen foto-aralığın (aperture) alanı oluşturulan optik tarama yöntemine göre 2.4×10^{-4} belirsizlikle ölçülerek hesaplanmıştır.

Fotometre içerisinde kullanılan fotodiyotun spektral duyarlılığı $s(\lambda)$ "A·W⁻¹" cinsinden ölçüldükten sonra fotometrenin fotometrik duyarlılığı ($R_{v,f}$) aşağıdaki eşitliğe göre bulunmuştur:

$$R_{v,f} = \frac{\int P(\lambda)s(\lambda)d\lambda}{K_m \int P(\lambda)V(\lambda)d\lambda} \quad (2)$$

$P(\lambda)$: kullanılan ışık kaynağının spektral güç dağılımı; K_m : maksimum ışıksal verimliliğidir (683 lm/W).

Işık kaynağı olarak 2856 K (CIE-A aydınlatma seviyesi) renk sıcaklığında çalışabilen tungsten filamanlı ışık şiddeti lambaları kullanılır [9, 10]. Eğer $R_{v,f}$ tüm foto-aralık yüzeyinde homojenliğe sahipse ve foto-aralık alanı (A) biliniyorsa, fotometrenin aydınlık düzeyi duyarlılığı $R_{v,i}$ [A/lüks] aşağıdaki denklem yardımıyla bulunabilir:

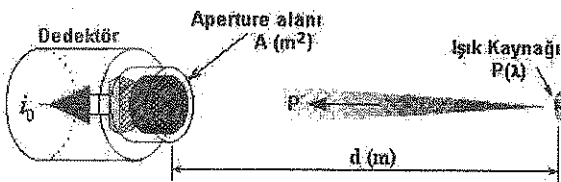
$$R_{v,i} = A \cdot R_{v,f} \quad (3)$$

2856 K renk sıcaklığına sahip ışık kaynağı kullanıldığında ve bu kaynak noktasal kaynak şartlarını sağladığında ışık şiddeti birimi kandela I_v [cd] aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$I_v = d^2 i_0 / R_{v,i} \quad (4)$$

d: ışık kaynağı ile foto-aralık yüzeyi arasındaki mesafe; i_0 : fotometrenin çıkış akımıdır (Şekil 3).

Şekil 3. Işık şiddeti biriminin oluşturulması



3.1.1. Işık Şiddeti kalibrasyonu

UME 'de ışık şiddeti lambaları iki yöntemle kalibre edilmektedir.

İlk yöntem kalibreli standart lambalar kullanılarak gerçekleştirilen yöntemdir. Bu yöntemde 2856 K renk sıcaklığında çalışan ve ışık şiddeti $I_v(T_R)$ bilinen lamba kullanılarak test lambasının $I_v(T_X)$ ışık şiddeti değeri "yerine koyma" yöntemine göre aşağıdaki gibi bulunur:

$$I_v(T_X) = I_v(T_R) \frac{y_X}{y_R} \left(\frac{T_X}{T_R} \right)^m, \quad (5)$$

y: fotometre ile ölçülen fotoakım; T: lambanın renk sıcaklığı değeri; m: renk sıcaklığı için düzeltme faktörüdür. Alt indisler olan R ve X ise referans ve test lambaları kullanıldığı zaman elde edilen verileri belirtmektedir.

Uygulanan ikinci yöntem ise, test ışık şiddeti lambasının dedektör-temelli kalibrasyonudur. Bu yöntemde test lambası standart fotometre kullanarak kalibre edilir.

$$I_v(T) = \frac{d^2}{\Omega_0 s_v} y \left(\frac{T}{2856K} \right)^m, \quad (6)$$

Ω_0 : katı açı; s_v : fotometrenin fotometrik duyarlılığı; m: renk sıcaklığı değerleri arasındaki düzeltme faktörüdür.

Işık şiddeti ölçümleri oluşturulan 6 m uzunluğundaki optik masa üzerinde $10^{-1} - 10^3$ cd aralığında %1.2 belirsizlikle gerçekleştirilmektedir.

3.2. Aydınlık Düzeyi ölçer (lüksmetre) kalibrasyonu

Aydınlık Düzeyi ölçümlerinde lüksmetre ve fotometreler kullanılmaktadır. Bu tür cihazların kalibrasyonu standart ışık şiddeti lambaları (kaynak-temelli yöntem) veya referans fotometreler (dedektör-temelli yöntem) kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Yapılan ölçümler ters kare kanununu sağlayacak şartlarda gerçekleştirilir. Test lüksmetre cihazı veya fotometresinin kalibrasyonu UME standart fotometresi ile "yerine koyma" yöntemine göre karşılaştırıldığından aşağıda gösterilen belirsizlik faktörleri ölçümleri etkilememektedir [10]:

- mesafe ölçümlerindeki hassasiyet,
- lambanın diklik ayarı

Aydınlık Düzeyi ölçüm/kalibrasyon işlemleri ışık şiddeti ölçüm düzeneğinde mesafeye bağlı olarak aşağıdaki eşitlik kullanılarak $10^{-2} - 10^5$ lüks aralığında %1.34 belirsizlikle gerçekleştirilmektedir.

$$E(T) = \frac{I(T)\Omega}{d^2} = \frac{y}{s_v} \left(\frac{T}{2856K} \right)^m \quad (7)$$

3.3. Işık Akısı kalibrasyonu

Işık kaynaklarının lümen cinsinden Işık Akısı değeri, 2 m çaplı özel tasarlanmış toplama küresi kullanılarak elde edilir. Küre ile gerçekleştirilen kalibrasyonlarda "yerine koyma" yöntemi uygulanır ve test lambası için ölçülen değerler UME çalışma standardı değeri ile karşılaştırılarak kalibrasyon yapılır. Küre iç yüzeyi, görünür bölgede yansıtması %96 olan BaSO4 boya ile kaplanmıştır. Küre içerisinde kullanılan tüm yabancı cisimlerin ölçüm üzerindeki etkisini ortadan kaldırmak için küre içerisinde ayrıca yardımcı lamba da kullanılır. Bu lamba yardımı ile düzeltme faktörü bulunarak ölçüm sonucuna eklenir ve ışık akısı kalibrasyonu aşağıdaki eşitlikle hesaplanarak elde edilir:

$$\Phi_X = \Phi_R \frac{\Delta U_X}{\Delta U_R} \frac{R_R}{R_X} \left(\frac{T_R}{T_X} \right)^{m_r} \frac{\Delta U_{HR}}{\Delta U_{HX}} \left(\frac{J_{0X}}{J_X} \right)^{m_j} \left(\frac{J_R}{J_{OR}} \right)^{m_j} \left(\frac{T_{OX}}{T_{OR}} \right)^{m_p + m_k} \quad (8)$$

Φ_R : kullanılan referans lambanın ışık akısı değeri; U: fotometre başlığı ile ölçülen toplam foto-akım; R: lamba akım kontrolü için kullanılan direnç; T: lambanın renk sıcaklığı; U_H : yardımcı lamba için ölçülen foto-akım; J: lamba akımı; J_0 : ölçüm süresince akımdaki kararlılık; T_0 : küre içi ortam sıcaklığı; m_j : lamba akımı için düzeltme faktörü; m_p ve m_k

ise kullanılan fotometrenin ve kürenin uyumluluk faktörleridir.

Lambalar için ışık akısı ölçümleri 5-510³ lm aralığında %1.5 belirsizlikle gerçekleştirilmektedir.

3.4. Aydınlik Şiddeti (Parıltı) kalibrasyonu

Aydınlik şiddeti birimi genel olarak ışık şiddeti lambası ile aydınlatılan beyaz yansıtma standardı veya opal cam gibi geçirgen dağıtıcı kullanılarak elde edilir. UME 'de aydınlık düzeyi birimi detektör-temelli ölçüm yöntemi ve ışık şiddeti kaynağı (toplama küresi) kullanılarak gerçekleştirilmiştir [11]. Ölçümlerde küre duvarına monte edilmiş ve V(λ)-monitör detektöre sahip 25 mm çaplı toplama küresi kullanılmaktadır. Küre içerisinde kullanılan halojen lamba kararlı güç kaynağı kullanılarak 2856 K renk sıcaklığında çalıştırılır. 20 mm ve 30 mm çaplı kalibreli iki adet foto-aralık alternatif olarak küre çıkışında kullanılır. Küre kaynağı ve fotometre başlığı optik masa üzerinde aynı optik eksene yerleştirilir. Küre yüzeyindeki aydınlanma UME Aydınlik Düzeyi standart fotometresi kullanılarak ölçülür. Aydınlik düzeyi E [lüks], mesafe d [m] ve alanı bilinen foto-aralık A [m²] kullanılarak ortalama Aydınlik şiddeti değeri L [cd/m²] aşağıdaki eşitliğe göre elde edilmiştir:

$$L = \frac{y(T) \left(\frac{T}{T_A} \right)^m d^2}{s_v \pi \left(\frac{d_a}{2} \right)^2} \quad (9)$$

y(T): fotometre ile ölçülen sinyal; s_v: fotometrenin ışıksal duyarlılığı; T: küre içerisindeki kaynağın renk sıcaklığı; T_A: CIE-A tipi aydınlatma seviyesi (2856 K); m: renk sıcaklığı için uyumluluk faktörü; d: küre foto-aralığı ile fotometre arasındaki uzaklık, d_a ise küre önündeki foto-aralığın iç çapıdır.

Kalibre edilen toplama küresi ile test aydınlık şiddeti kaynağı veya aydınlık şiddeti ölçer cihazı, 10⁻¹ - 1.210³ cd/m² aralığında %1.47 ve 10⁻⁴ - 2107 cd/m² aralığında ise %1.65 belirsizlikle kalibre edilebilmektedir.

4. Ölçüm ve kalibrasyon olanakları

Genel olarak bakılırsa, UME Optik Laboratuvarı, sürekli geliştirilmekte olan olanaklarıyla, optik ve aydınlatma ile ilgili her türlü endüstriyel kalibrasyon ve ölçüm isteklerine cevap vermeye çalışmaktadır. Gerçekleştirilen tüm kalibrasyonlar ulusal birincil standartlara göre izlenebilir ve başta EUROMET' e üye Avrupa ülkeleri olmak üzere toplam 58 ülkede kabul görmektedir.

Laboratuarda çeşitli fotodetektörlerin fiziksel özellikleri: lazer hatlarında mutlak tayfsal duyarlılıkları, fotodiyotların yüzey haritaları, sıcaklık, doğrusalılık ve açısal duyarlılık gibi teknik karakteristikleri belirlenmektedir. Radyometrik ve Spektrometrik ölçümler konusunda: ışığın katı, sıvı yada gaz gibi her türlü maddedeki yansıma, geçirme, kırılma, soğurma ve saçılma gibi özellikleri incelenmekte, optik güç, optik ışın enerjisi, ışınım düzeyi, kaynakların ışınım şiddeti, renk sıcaklığı, renk parametreleri [12], gün-ışığı ölçümleri ve cihazlara yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Metal endüstrisinde yüzey kalitesini belirlemek için kullanılan UV-ölçerler, askeri teknolojide sıklıkla kullanılan kızılötesi sistemler, kurutma ve temizlemede kullanılan morötesi cihazlar bu gruba dahildir.

Fotometrik ölçümler konusunda: ışık kaynaklarının ışık şiddeti, ışık akısı, aydınlık düzeyi, aydınlık şiddeti (parıltı) ölçümleri, fotometrelerin duyarlılık oranlarının belirlenmesi, lambaların eş-ışık dağılım haritalarının çıkarılması, armatürlerin karakteristik ölçümleri, geri yansıtma ölçümleri ve kedi-gözü karakteristiklerin belirlenmesi, Işık Yayan Diyotların fotometrik ve spektra-radyometrik özelliklerinin belirlenmesi [13], flaş yapan cihazların çalışma karakteristiklerinin çıkarılması üzerine çalışmalar sürdürülmektedir. Fiber optik teknolojinin hızlı, net ve yüksek kapasiteli haberleşmeye olanak sağlaması nedeniyle günümüzde kullanım alanı oldukça genişlemiştir. Özellikle telekomünikasyonda kullanılan tek modlu fiber kabloların 1300 ve 1550 nm, çok modlu fiber kabloların ise 850 ve 1300 nm dalga boylarındaki çalışma karakteristikleri ölçülerek çıkarılmaktadır [14]. Fiber optik güç, kayıp ve uzunluk ölçümleri geliştirilen düzenekler yardımı ile ölçülmektedir.

Kalibrasyon alanları sürekli artırılmakta olup, halen verilmekte olan kalibrasyon hizmetleri Tablo 2'deki gibidir.

Tablo 2. UME Optik ölçüm/kalibrasyon imkanları

Ölçümler	Ölçüm Aralığı	Ölçümler	Ölçüm Aralığı
Işık Akısı <i>Tüm Çeşit Lambalar</i>	$5 \cdot 10^3$ lm	Tayfsal yansıtma /geçirgenlik <i>Seramik, filtre</i>	200 - 380 nm 380 - 780 nm 780 - 2500 nm
Işık Şiddeti <i>Tüm Çeşit Lambalar</i>	$10^{-1} - 10^3$ cd	Parlaklık <i>Parlaklık plakası</i>	20-45-60-85°
Renk Sıcaklığı <i>Akkor lambalar</i>	2300 - 2856 K	Dalga boyu <i>Spektra fotometre</i>	200 - 2500 nm
Renk <i>Spektra fotometre etalonları</i>	CIE (x,y, XYZ, LAB, LUV), (0/45°, D/8)	Optik Güç <i>Lazer, LED</i>	350 - 780 nm 780 - 1600 nm
Aydınlık Şiddeti <i>Lambalar, Parıltı ölçerler</i>	$10^{-1} - 1.2 \cdot 10^3$ cd/m ² $10^{-4} - 2 \cdot 10^7$ cd/m ²	Fotodiyot Yüzey Haritası	Lazer hatlarında
Aydınlık Düzeyi <i>Lüksmetre, fotometre</i>	$10^{-2} - 10^5$ lux	Tayfsal Duyarlılık <i>Si, Ge ve InGaAs fotodiyotlar</i>	250 - 1100 nm 850 - 1600 nm
Işınım Düzeyi <i>UV metre, lamba</i>	365 nm	Dağınık Yansıtma, Pusluluk	200 - 380 nm 380 - 780 nm 780 - 2500 nm
Fiberoptik Güç <i>Opt. Multimetre</i>	Tek modlu 1310 nm ve 1550 nm	Fiberoptik Uzunluk <i>OTDR</i>	Tek modlu 1310 nm ve 1550 nm

5. Sonuçlar

UME optik laboratuvarında yedi SI temel ölçüm büyüklüklerinden fotometrik büyüklük olan ışık şiddeti birimi kandela, karakterize edilen kalibreli detektörler kullanılarak oluşturulmuştur. Başta ışık akısı birimi lümen olmak üzere tüm diğer fotometrik büyüklükler kandelaya dayalı olarak birincil seviye düzenekler kullanılarak oluşturulmuştur.

Elektromanyetik spektrumun geniş bölgesinde yer alan radyometrik ölçümler ise optik gücün mutlak olarak birincil seviye düşük sıcaklık radyometresi (krajojenik radyometre) ile ölçülmesine dayanarak gerçekleştirilmiştir. Bu konuda morötesi, görünür ve kızılötesi bölgelerde tayfsal geçirgenlik/yansıtma/soğurma, görsel renk, parlaklık ve dalga boyu ölçüm/kalibrasyonlar hizmetleri kurulan birincil seviye optik düzenekler aracılığıyla verilmektedir.

Optik ölçümlerin yeni konusu olan Fiber optik ölçümler, özellikle telekomünikasyonda kullanılan tek modlu fiber kabloların güç, kayıp ve uzunluk ölçümleri gerçekleştirilebilmekte ve OTDR gibi önemli fiber optik cihazların kalibrasyonları yapılabilmektedir.

6. Referanslar

- [1] CGPM, "Comptes Rendus des Seances de la 16e Conference Generale des Poids et Mesures", Paris-BIPM, 1979
- [2] M.Durak, F.Samedov, A.K.Türkoğlu "Ulusal Fotometri Ölçeğinin oluşturulması ve İzlenebilirlik Zinciri" 4.Ulusal Aydınlatma Kongresi Bildiri Kitapçığı İstanbul 2002 s.78
- [3] A.Kamuran Türkoğlu, Farhad Samadov, Murat Durak, Uğur Küçük "Cryogenic Radiometer Based Spectral Responsivity Measurements at UME" NEWRAD 2002 NIST Gaithersburg USA
- [4] M.Durak, F.Samadov, A.K.Turkoglu "Spectral Characterization of Silicon Photodiodes" CIE International Lighting Congress Istanbul 2001 p.388
- [5] M.Durak, F.Samadov, A.K.Türkoğlu "Silikon Fotodiyotların Optik Karakterizasyonu" 3.Ulusal Elektro-Optik Çalışma Toplantısı Ankara 2001
- [6] M.Durak, F.Samadov, A.K.Turkoglu "Spatial Non-uniformity Measurements of Large Area Silicon Photodiodes" Turkish Journal of Physics v.26, No:5 2002 p.375
- [7] U.Kçük, A.K.Türkoğlu, F.Samedov "Yüzey yansıtma bilgileri kullanılarak cisimlerin renginin belirlenmesi"

III.Ulusal Ölçümbilim Kongresi Eskişehir 1999 s.341

[8] A.K.Turkoglu, F.Samadov, M.Durak, U.Küçük "Construction of a Reference Photometer Head for the Realization of Candela" CIE International Lighting Congress Istanbul 2001 p.379

[9] F.Samadov, M.Durak, A.K.Turkoglu "Standard Color Measurements" 3th International Lighting Congress İstanbul 2000 p.144

[10] F.Samadov, M.Durak, A.K.Turoglu "Measurement of 0/45 Diffuse Reflectance of Reflection Standards by Using a Spectophotometer" CIE International Lighting Congress Istanbul 2001 p.433

[11] F.Samedov, M.Durak, A.K.Türkoğlu "Aydınlık düzeyi ve parıltı" III.Ulusal Ölçümbilim Kongresi Eskişehir 1999 s.21

[12] F.Samadov, M.Durak, A.K.Turkoglu "Standard Spectrophotometric Color Measurements" IV. International Paint, Varnish, Ink & Auxilary products Industry Conference & Exhibition Istanbul 2001 p.137

[13] F.Samedov, M.Durak, A.K.Turkoglu "Photometric characterizations of light emitting photodiodes" Proc. of the 2nd Balkan Conference on lighting, Istanbul, Turkey 2002 p.150

[14] M.Bilsel, F.Samadov, A.K.Türkoğlu. "Fiberoptik İletişim hatlarında uzunluk ve güç zayıflaması ölçümleri" 1.Ulusal İletişim Teknolojileri Sempozyumu ve Fuarı Ankara 2001 s.184