

FOTOMETRİDE ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

A.Kamuran TÜRKÖĞLU
Yusuf ÇALKIN

ÖZET

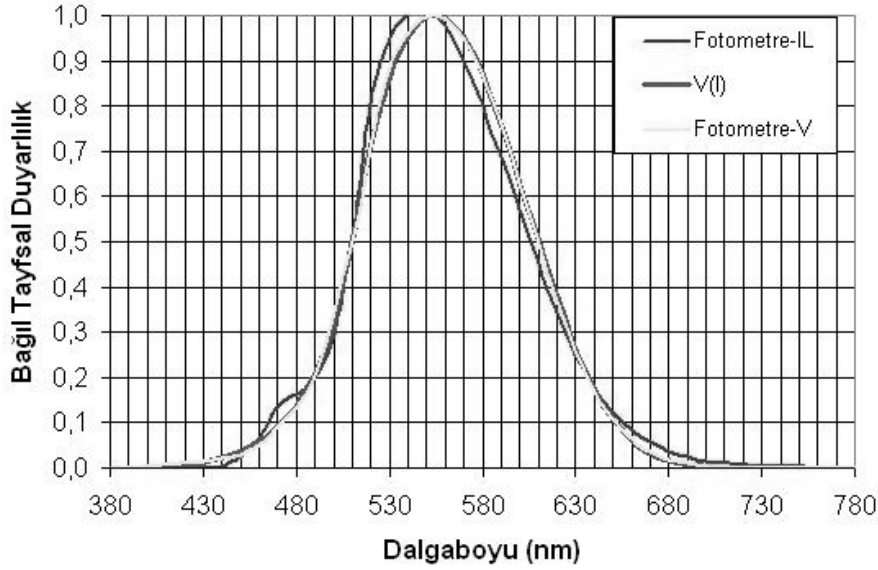
Fotometrik ölçümlere etki eden cihaz özellikleri, ortam şartları ve ölçüm alma sistematiği gibi pek çok konu vardır. Uluslararası standartlar ve çalışmalar bu konuları tanımlama ve sınıflandırmada yardımcı olmaktadır. Bu çalışmada aydınlatma alanı ve lüks ölçümleri örnek alınarak başlıca fotometrik ölçüm belirsizliği bileşenleri tanıtılmaktadır.

1. GİRİŞ

Elektromanyetik tayfın kızılötesi ve morötesi bölgeleri arasında kalan insan gözünün algılayabildiği 380 nm ile 780 nm dalga boyları arasındaki ışık ölçümleri 'fotometri' alanının konusudur. Bu alandaki temel nicelik yedi temel SI ölçüm biriminden biri olan ve "kandela" (cd) birimi cinsinden ifade edilen Işığın Şiddeti (I_v)'dir. Sıklıkla kullanılan diğer başlıca fotometrik nicelikler, lümen (lm) cinsinden ışık akısı, lüks (lx) cinsinden aydınlık düzeyi ve cd/m^2 cinsinden aydınlık şiddeti (parıltı)'dir [1, 2].

Günümüzde diyot dizin, CCD vb gibi alıcılı gelişmiş ışıkölçerler, fotometrik niceliklerin yanında ölçülen ışığın tayfsal büyüklükleri hakkında da bilgi verebilmektedirler. Ancak genel olarak günlük hayattaki fotometrik ölçümlerde, doğrudan insan gözü duyarlılığına benzer algılamaya sahip lüksmetre ya da Işığın Ölçer gibi fotometrik cihazlar kullanılmaktadır. Lüksmetreler, en dışta ışık toplayıcı beyaz difüzör, içerisinde insan gözü duyarlılığını yaratan yeşil renkli bir geçişgen optik filtre ve algılayıcı olarak göstergeli elektriksel yükselteç birimine bağlı bir silikon fotodedektör'den oluşmaktadır.

Kalite standartlarına uygun firma ve kurumlarda, kullanım yeri ve sıklığına bağlı olarak aydınlatma ölçümü yapılan bu tip fotometrik cihazların genelde yıllık kalibrasyonu sağlanılmaktadır [3]. Savunma ve Havacılık sektöründe kullanılmakta olan lüksmetrelerin genellikle % 5 ve daha iyi doğrulukla ölçüm alıyor olması istenebilmektedir. Ancak cihazın teknik altyapısı, ayar yapılabilme olanağı, ölçümü yapılan ışık kaynağı, ortamdaki kaçak ışık, mesafe ve pil şarj durumu gibi birçok etken nedeniyle bu ölçümlerin doğruluğu çok değişebilmektedir.



Şekil 1. Standart 2° V(λ) Göz Duyarlılığı ve Fotometrelerin Uyumluluğu

2. FOTOMETRİK CİHAZLARIN TAYFSAL ÖZELLİKLERİ

SI birimi 'Işık Şiddeti' ve bu ölçümden türetilen diğer fotometrik niceliklerinin ölçümü beraberinde birçok ölçüm belirsizliği faktörünün incelenmesini gerektirmektedir. Bir fotometrik ölçümün belirsizliğine etki eden başlıca unsurlar hiç şüphesiz kullanılan cihazın kalibrasyon belirsizliği ve yapılmakta olan ölçümün tekrarlanabilirliğidir. Ölçülen ışık sinyalinin kararlılığı ölçüm sonuçlarına doğrudan yansımaktadır. Ancak istatistiksel inceleme kaliteli cihazlarla daha düşük belirsizlikli ve tekrar edilebilir ölçümlerin alınabileceğini göstermektedir. Bu kapsamda sıralanabilecek ölçer kaynaklı başlıca belirsizlik etkenleri şunlardır;

2.1. f_1' ; V(λ) Uyumluluğu

Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (Commission Internationale l'Eclairage, CIE) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarla insan gözü 2° fotopik duyarlılık eğrisi, V(λ), 1931 yılında standartlaştırılmıştır [4, 5]. Görülür bölgede tanımlı, mavi ve kırmızı bölgelerde azalma gösteren bu tayfsal eğrinin maksimum duyarlılığı sarı-yeşil renkte 555 nm tepe dalga boyundadır (Şekil.1). Bir fotometrik cihazın toplam tayfsal duyarlılığının, standart V(λ) eğrisine yakınlığı, cihazın kalitesini belirler ve ölçüm doğruluğu hakkında bilgi verir. f_1' olarak gösterilen bu uyumsuzluk derecesi standarttan fark oranı eşitliği ile % olarak hesaplanır;

$$f_1' = \frac{\int |s^*(\lambda) - V(\lambda)| d\lambda}{\int V(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

Burada V(λ), standart eğrinin bilinen teorik tayfsal duyarlılık değerleri, $s^*(\lambda)$ ise fotometrik cihazın karakterize edilen normalize bağıl tayfsal duyarlılık değerleridir. Integral 380 ile 780 nm dalga boyları arasındaki aralıkta en fazla 10 nm'lik adımlarla alınır. Şekil.1'de gösterilen Fotometre-V cihazının bu eşitlikle hesaplanan f_1' değeri % 1,5, Fotometre-IL no'lu ticari cihazın değeri ise % 8,7'dir [6, 7]. Kaliteli

fotometrik cihazların dedektör ve filtre toplam duyarlılıkları özellikle standart eğriye mümkün olduğu kadar uyumlu olacak şekilde tasarlanmaktadır [8].

2.2. Tayfsal Uyumsuzluk Faktörü

Bir fotometrik cihaz, standart $V(\lambda)$ eğrisine benzer duyarlılığa sahip olduğu dereceye göre, özellikle farklı tayflardaki ışık kaynakları için, farklı doğruluklarda ölçümler yapabilir. Yukarıda belirtilen f_1' ifadesi bir sınıflandırma bilgisidir ve bu bağlamda tam olarak bir düzeltme faktörü olarak ölçümlerde uygulanamaz. Bunun yerine ölçülmekte olan ışığın tayfı da hesaba katılarak tayfsal veya renksel uyumsuzluk faktörü hesaplanır ($\phi_e(\lambda)$: Ölçülen ışığın tayfı) ;

$$f = \frac{\int V(\lambda) \phi_e(\lambda) d\lambda}{\int s(\lambda) \phi_e(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

Işığın tayfına ve cihazın algılama hassasiyetine bağlı olarak belirlenen bu tayfsal ya da renksel uyumsuzluk indisi bir düzeltme faktörü olarak sonuca yansıtılmalıdır. Örneğin lüksmetrelerin genelde tungsten A-tipi standart aydınlatıcılara göre kalibrasyonları yapıldığından, farklı tayflardaki ışık kaynakları ölçümlerindeki duyarlılıkları aynı olmayabilir. Bazı lüksmetrelerin flüoresan, akkor veya günışığı gibi ayrıca ölçülen ışık seçimli tasarlanmış olmasının nedeni budur. Tayfsal uyumsuzluk belirsizliğinin dikdörtgenel bir dağılımı vardır.

2.3. Kızılötesi Duyarlılık

780 nm dalga boyunun yukarısında yaralan kızılötesi bölgeyi insan gözü algılayamadığından, bağlı $V(\lambda)$ duyarlılığı 1×10^{-5} 'in altındadır. Ancak çoğu silikon fotodiyot 1100 nm dalgaboyuna kadar giderek artan bir hassasiyetle duyarlı olduğundan, iyi ayarlanmamış dedektör+filtre çiftine sahip ticari fotometrik cihazlarda kızılötesi bölgede de istenmeyen algılama olabilir. Özellikle günışığı ile ısı olarak çevreden gelen bu kızılötesi ışınım ek olarak ölçüme yansiyabilir. Bunun için tungsten lamba önüne 780 nm dalgaboyunun ötesini geçiren filtre konulur ve fotometrik cihazın filtre yokken ölçtüğü fotometrik sinyalle karşılaştırılır.

2.4. Morötesi Duyarlılık

İdeal fotometre morötesi ışığı algılamamalıdır. Standartlar bu seviyenin maksimum binde bir seviyelerinde olmasını belirtmektedir. Fotometrik cihazların 380 nm dalgaboyu altındaki morötesi banttaki kaçak geçirgenlik seviyeleri ölçülebilir. Veriler etkin morötesi ışınım içeren günışığına uzun süre maruz kalan fotometrik cihazların duyarlılığında değişim ve kalıcı etki olma olasılığının fazla olduğunu göstermektedir.

2.5. Doğrusallık

Fotometrik cihazın hem düşük hem de yüksek şiddeti aydınlatmalarda aynı doğrulukta ölçüm yapabilme özelliğine sahip olması, yani doğrusal olması beklenir. Geniş aralıkta doğrusal duyarlılık, daha çok dedektör ve fotoakım ölçüm sistemine bağlı özelliklerdir.

Fotometrik cihazlarda ölçülen sinyalin gerçek değeri ile cihaz ölçüm sonucunun doğrusal orantılı çıkmadığı görülebilmektedir. Ayar yapılabilen cihazlarda bile ancak ayarın yapıldığı aralıkta arzu edilen doğruluğun sağlandığı, bu bölgenin dışarısında ise farkın giderilemediği durumlar olmaktadır. Bu nedenle kalibrasyonların kullanım aralığında yaptırılması, ayar seviyesi dışında sertifikada belirtilen düzeltme katsayıları uygulanarak ölçümlerin alınması önerilmektedir.

2.6. Kosinüs Duyarlılığı

Özellikle lüksmetrelerde cihaz ölçümlerinin yatay yer değişimlerden en az etkilenmesi ve dağınık (doğrudan olmayan) aydınlık düzeyi ölçümleri için kosinüs düzeltmeli sensör başlıkları kullanılmaktadır. Bunlar, cihazın en dış yüzeyinde yarımküresel ya da düz beyaz dağıtıcı (difüzör) formunda kosinüs düzeltilmesi sağlayan ışık toplayıcı birimlerdir. Mesafe ölçümlerinde difüzörün dış yüzeyi referans olarak alınır. Cihaz sensörüne dik gelen ışığın yanı sıra açılı aydınlatmanın da hesaba katılabilmesi için sensör algılaması ışığın geliş açısına göre karakterize edilmelidir. Difüzöre sahip cihazların uygunca korunamaması durumunda difüzör üzerinde sonradan oluşabilecek çizik, kirlenme veya bozukluklar ölçümleri etkileyecektir.

2.7. Uzun Süreli Kararlılık

Günümüzde üretilen çoğu fotometrik cihazın duyarlılığı kısa zaman dilimi içinde değişmezdir. Ancak sensör duyarlılıklarının kullanımla ve zamanla değişebileceği dikkate alınmalıdır. Özellikle $V(\lambda)$ düzeltme filtresi zaman içerisinde değişebilme özelliğine sahip olduğundan, sensörün duyarlılığının uzun zaman içerisinde değişmesi sözkonusudur. Cihazın çalıştırıldığı ölçüm aralığının üzerindeki aydınlatma seviyelerine sürekli maruz bırakılması da offset değerini değiştirerek cihazın kararlılığına etki edebilir. Fotometrik cihazların uzun süre içerisindeki sürekliliği yıllık olarak diğer standart fotometrelere veya başka bir standarda dayalı olarak kalibre edilip kayıt altında tutulmalıdır.

3. ORTAM ŞARTLARI

3.1. Sıcaklık

Birçok cihaz gibi fotometrelerin duyarlılıkları da sıcaklıkla değişim gösterdiğinden, farklı ölçümler alınabilir. Bunun başlıca nedeni içerideki yeşil filtrenin geçirgenliğinin ve dedektörün ayrı ayrı sıcaklıktan etkilenerek değişen duyarlılıkla ölçmeye başlamasıdır. Sıcaklık değişimi ise ortam sıcaklığının değişmesiyle olabileceği gibi, algılayıcı üzerine gelen ölçülen ışınımın zamanla yaratabileceği sıcaklık farkından da kaynaklanabilir. Filtrenin sıcaklık bağımlılığı, dedektörünküne oranla çok daha fazla olup, yaklaşık doğrusal ve $-0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ katsayıları civarındadır [9]. Bu nedenle laboratuvar tipi ölçerlerin hazneleri aktif sıcaklık kontrollü olarak yapılmaktadır. Cihaz sıcaklık kontrollü olsun ya da olmasın, özel ölçüm veya kalibrasyonlarda ortam sıcaklığı gözlenmeli ve nem değerleriyle birlikte kaydedilmelidir. Sıcaklık kontrolü olmayan cihazlarda, mevsim farklılıkları nedeniyle oluşabilecek ölçüm farklılıkları göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, çoğu kalibrasyon işlemi 25°C civarındaki oda sıcaklığında yapıldığından, güneş altında veya yüksek güçlü metal halit kaynakları ölçümleri gibi ölçerlerin ısınabileceği durumlarda ölçüm farklılıklarına dikkat edilmelidir. Ayrıca floresan lambaların ışık çıktılarının 35°C sıcaklık değeri üstünde veya 10°C altında % 10–15 seviyelerinde düştüğü dikkate alınmalıdır.

3.2. Kaçak Işık

Işık ölçümlerinde fotometrik sensöre çevreden ulaşan kaçak gürültü ışıkları minimize edilmeli, bu kaçak ışık değeri ölçülmeli ve sonuçta kaçak ışıktan kaynaklanan düzeltme yapılmalıdır. Kaçak ışık belirsizliği dikdörtgensel bir dağılım ile sonuç belirsizliğine yansıtılır. Ortam gürültüsünün % 1 oranı seviyesinin mutlaka altında olması beklenmektedir. Bu bağlamda, ölçümlerde eğer mümkünse ölçülen ışığın diyaframlardan geçerek alıcıya ulaşması sağlanabilir. Işığın çeşitli renk ve yüzeyli malzemelerden yansiyarak kaçak ışık olarak sensöre ulaşması sözkonusu olabildiğinden, fotometrik laboratuvarlarda kapalı ve mat siyah boya ile boyalı özel oda ortamı sağlanmaktadır.

4. ÖLÇME TEKNİĞİ ÖNERİLERİ

İdeal nokta tipi ışık kaynaklarının aydınlatması teknik olarak '1/r² kuralı' uyarınca, kaynaktan uzaklaştıkça mesafenin tersi ile orantılı olarak azalacaktır. Bu nedenle lüks ölçümlerinde ışık kaynağından ne kadar uzaklıkta ölçümlerin alındığı önemlidir. Ortam aydınlatması ölçümlerinde yerden h=70-85 cm gibi belli bir yükseklikte ölçümlerin alınması gereklidir. Yine ortam aydınlatması konum ile değişebildiğinden, tercihen ölçüm yerleri bir kroki üzerinde belirtilmelidir.

SI birimlerine izlenilebilir cihazların kullanıldığı kontrollü ortamlarda tekrarlı olarak alınacak ölçümler, belirsizliğin azaltılması ve hesaplanmasını kolaylaştıracaktır. Kalibrasyon laboratuvarlarının tekrarlı ölçümleri 20 ardışık ölçüm için almaları tavsiye edilmektedir. Tekrarlanabilir ve doğru ölçüm işlemleri için başlıca şu bilgilerin belirlenmiş ve kaydedilmiş olması gereklidir [10];

1. Ölçüm Yerinin Ayrıntılı Tanımı (varsa Yerleşim Krokisi)
2. Mevcut Yapay Aydınlatma Ekipmanı (Model, Lamba Tipi, Elektriksel değerleri vb)
3. Ölçüm Cihazı
4. Ortam Şartları (Sıcaklık, Nem)
5. Diğer Faktörler (Günlüğü, Yansımalar vb)
6. Ölçüm Başlangıç ve Bitiş Zamanları
7. Ölçüm Yapan (lar)
8. Tüm Ölçüm Değerleri

Yapay ışık kaynağı ölçümlerinde, sodyum buharlı veya flüoresan lamba ölçümleri alınıyorsa kaynakların kararlılığa ulaşması için zaman gerekeceğinden, ölçümler öncesinde yarım saat gibi bir ısınma süresi verilmeli, bu süre kaydedilmelidir. Eğer lambalar ilk defa çalıştırılıyor ise deşarj ve floresan lambalar için en az 100 saat, tungsten ve halojen lambalar için 10 saat yaşlandırma süresi uygulanmalıdır.

Pille çalışan cihazlarda pilin gücünü yitirmesi cihazın performansını etkilenebileceğinden, gerilim değeri kontrol edilmelidir. Fotometrik cihazların sensörleri kullanılmadığında ışık, ısı, nem ve tozdan korunmak üzere mutlaka üzeri kapalı olmalı, mümkünse cihaz özel kapalı kutusunda saklanmalıdır.

5. SINIFLANDIRMA

Gelişen optoelektronik teknolojisinde cihazların sınıflandırması zor olabilmektedir. Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE) teknik komitelerinin fotometrik ölçümlerde referans alınan öneri nitelikli rapor ve yayınları mevcuttur [11, 12]. Örneğin, lüks cinsinden ölçüm yapan fotometrik cihazlardan beklenen performansa göre yapılan bir sınıflandırma Tablo.1'de verilmektedir [13];

Tablo 1. Lüksmetrelerin Sınıflandırması

Karakteristik	Lüksmetre Sınıfına göre istenilen en fazla % değer			
	L	A	B	C
Kalibrasyon Belirsizliği	1,0	1,5	3,0	5,0
$V(\lambda)$ Uyumluluğu, f_1'	1,5	3,0	6,0	9,0
Kızılötesi Duyarlılığı	0,2	1,0	2,0	4,0
Morötesi Duyarlılığı	0,2	1,0	2,0	4,0
Sıcaklık Bağımlılığı	0,2	2,0	10,0	20,0
Doğrusallık	0,2	1,0	2,0	5,0
Kosinüs Duyarlılığı, f_2	-	1,5	3,0	6,0
Cihaz Kararlılığı	0,2	0,5	1,0	2,0
Gösterge Birimi Hatası	0,2	3,0	4,5	7,5
TOPLAM PERFORMANS	3,0	5,0	10,0	20,0

Tabloda belirtildiği gibi cihaz performansına etki eden başlıca faktör, tayfsal duyarlılığın $V(\lambda)$ standart eğrisi ile uyumluluğudur. Bu nedenle akredite bir fotometri laboratuvarında $V(\lambda)$ uyumluluğu, $f_1' \leq \% 1,5$ 'a sahip L sınıfı laboratuvar tipi ölçerin olması istenmektedir. Bunun dışında A-sınıfı yüksek kaliteli bir fotometre maksimum % 3, B sınıfı ortalama kalite fotometre % 6 ve C sınıfı düşük kaliteli bir sensör en fazla % 9 oranında $V(\lambda)$ uyumluluğuna sahip olmalıdır. Piyasada mevcut çoğu ticari lüksmetre, tasarım itibarıyla % 4-6 civarında bir $V(\lambda)$ uyumluluğuna sahiptir. Ölçüm aralığı, gösterge hassasiyeti ve kararlılık gibi faktörler de eklenince bu tip ölçerlerin genel performansı % 7-10 seviyelerinde kalmaktadır.

SONUÇ

Fotometrik ölçümlerde belirsizliğe etki eden başlıca faktörler arasında, ölçerin insan gözü duyarlılığına benzerliği gelmektedir. Bu çalışmada fotometrik ölçümlerde dikkate alınması gereken pratik bilgiler aktarılmış, uluslararası standartlar ve teknik komite çalışmalarına göre fotometrik ölçüm belirsizliği bileşenleri kategorize edilmiştir. Belirlenen faktörler için fotometrelerin toplam performanslarına göre bir kalite sınıflandırması verilmiştir. Akredite fotometrik test ve kalibrasyon laboratuvarlarında olması gereken laboratuvar (L) sınıfı fotometrenin başlıca teknik özellikleri tanımlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Born&Wolf, "Principles of Optics", Pergamon Press
- [2] DeCusatis C., "Handbook of Applied Photometry", Springer Verlag, 1997
- [3] Türkoğlu A.K., "Kalibrasyon Periyodu Neye Göre Belirlenir?", VI. Ulusal Ölçümbilim Kongresi, 17-18 Kasım 2005.
- [4] Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), Kegelgasse 27, A-1030, Viyana / Avusturya
- [5] Aydınlatma Türk Milli Komitesi, www.atmk.org.tr, İTÜ Enerji Enstitüsü, Maslak-İstanbul
- [6] ISO/CIE 10527, "CIE Standart Colorimetric Observers", 1991
- [7] CIE S 005, "CIE Standart Illuminants for Colorimetry", 1998
- [8] PRC Krochmann GmbH, Am Sandwerder 47, 14109 Berlin / Almanya

- [9] Türkoğlu A.K. Samadov F. Durak M. Küçük U. "Construction of a Reference Photometer Head for the Realization of Candela", CIE Kongresi, İstanbul, 2001
- [10] Türkoğlu A.K. Çalkın Y. "Ofis ve İşYeri Aydınlatmasında Standartlar ve Standart Ölçümler", VI. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu, Taşkılla-İstanbul, 24.11.2006
- [11] CIE Yayın No.53, Methods of Characterizing the Performance of Radiometers and Photometers, 1982
- [12] CIE Yayın No.69, Methods of Characterizing Illuminance Meters and Luminance Meters, 1987
- [13] CIE TC 2-40,"CIE/ISO Standard of Characterizing the Performance of Illuminance Meters and Luminance Meters", 3rd Draft, June 1999

ÖZGEÇMİŞLER

A.Kamuran TÜRKOĞLU

1969 yılı Tavas/Denizli doğumludur. 1991 yılında Hacettepe Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden lisans, 1994 yılında Bilkent Üniversitesi Fizik bölümünden yüksek lisans derecesiyle mezun olmuştur. 1995'ten itibaren TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü Optik Grubu Laboratuvarlarında çalışmaktadır. Halen ilgili laboratuvarında başuzman araştırmacı ünvanıyla laboratuvar sorumlusu olarak görev yapmaktadır. EURAMET Fotometri-Radyometri Grubu ve CIPM Fotometri-Radyometri Danışmanlar Komitesi (CCPR) kurum temsilcisidir. CIE (Uluslararası Aydınlatma Komisyonu) II. Bölüm 'Işık ve Işınımın Fiziksel Ölçümü' grubu ülke temsilcisidir. Aydınlatma Türk Milli Komitesi (ATMK) Yönetim Kurulu üyesidir. Aydınlatma, Fotometri ve Radyometri alanlarında test, ölçüm yöntem ve sistemleri üzerine çalışmaktadır.

Yusuf ÇALKIN

1970 Bucak/Burdur doğumludur. 1996 yılında Orta Doğu Üniversitesi Fizik bölümünden lisans derecesiyle mezun olmuştur. İlk altı yılı Basınç ve Vakum Laboratuvarında ve halen Optik Grubu Laboratuvarlarında olmak üzere, 1997 yılından bu yana TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde Araştırmacı olarak çalışmaktadır. Fotometrik ölçümler ve metrolojik elektro-optik cihazlar üzerine çalışmaktadır.