

# LED'Lİ YOL ve SOKAK AYDINLATMALARINDA MEZOPIK (KARMA) GÖRME KOŞULLARININ ANALİZİ

Niyazi GÜNDÜZ

Sermin ONAYGİL

Emre ERKİN

## The Analysis of Mesopic Vision Conditions on LED Based Road and Street Lighting

*In this study, CIE recommended system for mesopic photometry based on visual performance is investigated especially for road and street lighting applications. As it is known that, luminance levels which are used on road and street surfaces are currently based on photopic photometry. However, since mesopic applications include road and street lighting, this approach takes no account of the fact that in the mesopic luminance region that is between the photopic and scotopic regions. Therefore, according to CIE recommended mesopic photometry system based on visual performance, conventional light sources, commonly used on road and street lighting, and LED light sources are compared with the possible contribution upon photopic luminance levels on the road surfaces.*

**Anahtar kelimeler:** LED, yol ve sokak aydınlatması, mezopik görme, görsel performans

### 1. GİRİŞ

Günümüzde aydınlatma tesisatlarında gerçekleştirilebilecek tasarruf önlemleri “enerji verimliliği” çalışmalarında üzerinde önemle durulan konulardan biridir. Bu kapsamda, az enerji harcayarak çok ışık üretebilen LED (ışık yayan diyot) teknolojisi, son yıllarda hızla aydınlatma tesisatlarına girmiştir. Uzun ömürleri ve etkinlik faktörlerinin (lm/W) yüksek olmasının yanı sıra, renksel geriverimlerinin iyileşmesi ve farklı renk seçenekleri gibi özellikleri ön plana çıkarılarak, LED ışık kaynakları iç ve dış tesisatlarda genel aydınlatma amaçlı kullanılmaya başlanmıştır. LED’lerin spektral güç dağılımının (özellikle beyaz LED’lerde) tayfin morötesi bölgesine (mavi bölgeye) yakın kısımlarında yoğun olması nedeniyle, daha önce de yol ve sokak aydınlatmalarında benzer tayfsal özelliklere sahip olan ışık kaynakları (metal halide lambalar gibi) için sorgulanan bir soruyu tekrar gündeme getirmiştir. Yol ve sokak aydınlatma uygulamalarında halen kullanılan fotometrik sistem “fotopik” yani gözün gündüz görmesine dayanan fotometri sistemidir ve etkinlik faktörü değerleri yüksek olan yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalar sıklıkla kullanılmaktadır. Bu lambaların spektral güç dağılımının spektral tayfta sarı bölgede (insan gözünün fotopik/gündüz görme koşullarında en duyarlı olduğu dalga boyu) baskın olması fotopik/gündüz fotometriye göre aydınlatma tesisatları için verimli çözümler sunarken, fotopik/gündüz ve skotopik/gece görmesinin arasında kalan mezopik/karma görme koşullarının hakim olduğu yol ve sokak uygulamalarında sonucun ne olacağının irdelenmesi gerektiği ifade edilmektedir.

Bu çalışmada özellikle yol ve sokak aydınlatmalarında geçerli olan gözün mezopik/karma görme koşulları için CIE’nin görsel performansla dayalı tavsiye niteliğinde önerdiği mezopik fotometri sistemi incelenmiş ve CIE tarafından önerilen bu mezopik fotometri sistemine göre, yol aydınlatmalarında sıklıkla kullanılan konvansiyonel ışık kaynakları ile son yıllarda kullanılmaya başlanan LED ışık kaynaklarının yol yüzeyindeki parlaltı seviyelerine olası katkıları açıklanmaya çalışılmıştır.

### 2. MEZOPIK/KARMA FOTOMETRİ

İnsan gözünün ağ tabakası (retina)’nda ışığa duyarlı koni ve çomak diye adlandırılan iki farklı tip algılayıcının olduğu bilinmektedir. Yüksek aydınlık düzeylerinde çalışan konilerle renkler algılanabilirken, düşük aydınlık düzeylerinde faaliyet gösteren çomaklar ile sadece

şekil ve hareketler seçilebilmektedir. Genelde  $10 \text{ cd/m}^2$  parlıtı değerlerinin üstünde gerçekleşen konilerin faaliyet gösterdiği görme olayına “fotopik/gündüz görme”,  $0.001 \text{ cd/m}^2$ 'nin altında çomaklarla gerçekleşen görme olayına ise “skotopik/gece görme” adı verilmektedir. Bu iki parlıtı düzeyinin arasında kalan, koni ve çomakların birlikte çalıştığının kabul edildiği koşullar ise “mezopik/karma görme” olarak adlandırılmaktadır.

Yol aydınlatmalarında halen kullanılmakta olan fotometrik uygulamalar, temel olarak foveal (sarı leke) konilerinin spektral duyarlılığını fotopik aydınlatma koşullarında karakterize eden fotopik spektral duyarlık fonksiyonu  $V(\lambda)$ 'ya dayanır. Skotopik koşullar için geçerli olan  $V'(\lambda)$  spektral duyarlık fonksiyonu CIE tarafından tanımlanmış olmasına rağmen, pratikte hemen hemen tüm aydınlık düzeylerinde ve tüm fotometrik ölçümlerde,  $V(\lambda)$  spektral duyarlık fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, fotopik ve skotopik bölgeler arasındaki (yaklaşık  $0.001 \text{ cd/m}^2$  ve  $10 \text{ cd/m}^2$  arasındaki) hem çomakların hem de konilerin ağ tabakada aktif olabileceği aydınlatma seviyelerinde geçerli olabilecek mezopik/karma görme koşullarını ihmal etmektedir. Mezopik fotometrinin kullanımı ile, hem çomakların hem de konilerin görsel performansa katkıları dikkate alınarak ışığın daha verimli kullanılması sağlanabilir. Yol ve sokak aydınlatmalarında, denizcilik ve hava taşımacılığında, acil durum aydınlatmasında, güvenlik ve suç önleme aydınlatma uygulamalarında mezopik görme koşulları geçerlidir [1].

Mezopik fotometri, fotopik ve skotopik parlıtı bölgelerinin arasında kalan aydınlık seviyelerinde fotometrik ölçüm sistemindeki fonksiyonların kullanımına izin veren yöntemsel bir model ile tanımlanmış mezopik spektral duyarlılık fonksiyonlarının bir dizesidir. Bu yöntemde, hem çomakların hem de konilerin görmeye katkı sağladığı, skotopik aralığın üzerinde ve fotopik aralığın altındaki parlıtı seviyelerine göz adapte olduğunda, kontrast algılama, performansın hızı gibi çeşitli görsel performanslar mezopik görsel performansa dayalı olarak incelenmektedir [1].

### **3. MEZOPIK GÖRSEL PERFORMANS ve MEZOPIK KOŞULLAR**

Mezopik aydınlatma uygulamalarında, insan görme sisteminde görsel fonksiyonlara katkı yapan koni ve çomaklar birlikte çalışır. Ancak, belli bir uygulamadaki mezopik sistemin analizi kolay değildir. En önemli sorunlardan biri, görsel ortamda karşılaşılan aydınlatma seviyelerinin önemli ölçüde değişebilmesidir. Düşük mezopik parlıtı seviyelerinden yüksek fotopik parlıtı seviyelerine kadar olabilen bu değişim adaptasyon koşullarının değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır.

Gece sürüş koşullarındaki görsel çevre önemli ölçüde mezopik parlıtı bölgesinin içinde olduğundan, yol aydınlatmaları mezopik görmenin en belirgin ve önemli uygulamalarından biridir. Değişik yol aydınlatma sınıfları için yol aydınlatması standartlarında/önerilerinde verilen ortalama yol yüzeyi parlıtı düzeyleri  $0.3 \text{ cd/m}^2$  ila  $2 \text{ cd/m}^2$  arasındadır [2]. Ancak bu değerler sadece yol yüzeyi üzerinde sağlanması gereken parlıtı düzeyleridir. Oysa ki, sürücü görüş alanında yol yüzeyinin dışında diğer araçların farları, armatürlerin ışık yayan yüzeyleri gibi fotopik görme aralığındaki parlıtılar ile yol ve yakın çevresinin dışındaki karanlık alanlar, gökyüzü gibi skotopik bölgedeki parlıtılar da vardır. Bunların dışında trafik işaretleri, uyarıcı levhalar, binalar gibi objeler de görsel alan içerisindeki parlıtı dağılımını etkiler. Tüm bu katkılar dikkate alındığında, gece sürüş koşullarındaki gözün adaptasyon seviyesi tam anlamıyla mezopik bölgeye düşmese de, yol, sokak ve benzer dış aydınlatma uygulamalarındaki parlıtı seviyelerinin önemli ölçüde mezopik bölge sınırları içinde kaldığı düşünülmektedir.

### 3.1. Kritik Görsel İşler

Daha önce de bahsedildiği gibi, parlıltı düzeyi mezopik görme sınırları içinde kalan bir çok aydınlatma uygulamaları vardır. Bu uygulamalardan herbiri arka fona göre hedef cismin ayrımını yapmak veya potansiyel bir tehlikeyi önlemek gibi belirli görsel işleri içerir. Gece koşullarındaki sürüş, görsel algılamanın çok önemli olduğu karmaşık ve dinamik işlerden biridir. Görme fonksiyonu bir çok görsel işlemler tarafından desteklenir. Bir sürücü görüş fonksiyonunda, statik ve dinamik görsel keskinlik (duyarlık), kontrast hassasiyeti, stroboskopik görüntü, renksel görme, hareketi algılama ve görsel alanın boyutu gibi birçok faktör görsel performansı etkilemektedir [3, 4, 5, 6, 7, 8]. Bu görsel işler;

- Yoldaki diğer sürücülerin vermiş oldukları sinyalleri ve hareketlerini fark etme,
- Yol üzerindeki çukurları, tümsekleri ve engelleri fark etme,
- Yol kıvrımlarını ve yol çizgilerini görme,
- Güvenli bir sürüş için var olan uyarıları, çıkış işaretlerini okuyabilme,
- Yol kenarlarındaki hayvanları veya yakındaki yayaları fark etme gibi durumlarda kullanılır.

Gece sürüş veya gündüz sürüş koşullarında temel görsel iş, efektif bir şekilde fonksiyonları yerine getirebilmek için görsel alandan yeterli bilgiyi elde etmek olarak tanımlanmaktadır.

MOVE (Mesopic Optimisation of Visual Efficiency) konsorsiyumu, tüm bu görsel olayları ve performansı karakterize etmek için geliştirilmiş bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımda gece sürüş işleri görsel bilgiyi elde edebilmek amacıyla üç soru ile üç görsel işe ayrılmıştır. Bunlar, görsel hedefin algılanması için “cisim görülebildi mi?”, algılamanın hızı için “ne kadar çabuk?”, hedefin detaylarının tanımlanması için “Cisim nedir?” sorularının cevabıdır. Gece sürüşte görsel performansın tanımlanabilmesi için bu üç görsel işin kullanımı basit bir yaklaşımdır ve hiçbir şekilde insan görsel sisteminin detaylı performansını tanımlayamaz. Ancak, mezopik fotometri için pratik bir görsel performans sistemini tanımlayabilir [1].

Görsel hedefin algılanması, görme alanının belirli bir bölgesinde herhangi bir şeyin değişmesinin gözlemlenmesi ile alakalıdır. Görsel algılamayı tetiklemek ve hedefin algılanmasını sağlamak için hedef ve arka fon arasında belirli bir parlıltı ve/veya renksel farklılıklar gereklidir. Bu görsel iş “cisim görülebildi mi?” sorusu ile karakterize edilebilir ve renksiz algılama eşik değeri veya görsel bir uyarıyı algılamayı basitleştirme yeteneği (renkleri veya detayları algılama yeteneği gerekli değildir) ile ilgilidir [9]. Sürüş esnasında en temel ve önemli görsel işlerden biridir. Günümüzde kullanılan yol aydınlatma tasarım uygulamaları genel olarak eşik değer kontrastı ile tanımlanmış görülebilme konseptine dayanmaktadır [2, 10]. Buradaki eşik değer kontrastı, sürücünün hedefi algılayabilmesi için gerekli hedef ve arka fon arasındaki minimum göreceli parlıltı değeridir [11].

Algılamanın hızı, “ne kadar çabuk?” sorusu ile karakterize edilir. Reaksiyon zamanı bu görsel işi tanımlamak için kullanılır. Reaksiyon zamanı görsel uyarının başlangıcı ile o uyarının algılanma cevabı arasındaki süredir. Gözlemcinin yol üzerindeki bir cismi görür görmez bir butona basma yöntemi örnek olarak verilebilir. McGowan ve Rea mezopik koşullardaki spektral duyarlılığı karakterize etmek için reaksiyon zamanının kullanılmasını önermişlerdir [12]. Gece sürüş koşullarında reaksiyon zamanı güvenli bir sürüş için önemli bir faktördür [5] ve sürücünün tehlikeyi algılamasının sorgulanması için iyi bir performans ölçümüdür [13]. Reaksiyon zamanı ve sürüş performansı arasındaki bağlantı, yol kaza oranları açısından “görülebilirliğin azaldığı ve reaksiyon zamanının arttığı düşük aydınlatma seviyelerinde yol

kazaları artar” şeklinde rapor edilmektedir [14]. Reaksiyon zamanı, USP (Unified System of Photometry) [15] ve MOVE sisteminde [16] performans kriteri olarak kullanılmaktadır.

Hedef detaylarının tanımlanması, “cisim nedir?” sorusu ile karakterize edilir. Bu kriter, görsel hedefin detaylarının daha bilinçli ve net bir şekilde tanımlanmasını içerir. Bu görsel tanımlama, hedefin ya da cismin nerede olduğundan çok, cismin ne olduğu gibi detayları içermektedir. Örnek olarak trafik işaretlerinin, pano aydınlatmalarının ve yol üzerindeki işaretlemelerin okunabilirliği gibi görsel işler verilebilir.

### **3.2. Görsel Performansı Belirlemek için Parametreler**

Mezopik görmede koni ve çomak fotoreseptörleri aktiftir. Burada konilerin ve çomakların görsel işler için göreceli katkısı adaptasyon seviyesine bağlıdır. Mezopik bölgenin üst sınır limitinde koniler baskın iken, alt sınır limitinde çomakların baskınlığı söz konusudur. İkisinin arasında, koni-çomak etkileşimi ile karakterize edilen mezopik görme, aydınlık seviyesi ve ışın retinal lokasyonu tarafından belirlenir. Bu nedenle, mezopik bölgede görsel sistemin performansını belirlemek için birden fazla parametre gerekmektedir. Bunlar arka fon parıltısı, kontrast, görme alanı içerisinde hedefin yeri ve boyutu, hedef ve arka fonun spektral karakteristikleridir. Görme koşulları aynı zamanda görüş süresi, hedefin hızı ve şekli, görmenin tek gözlü veya çift gözlü (monocular veya binocular) olup olmamasına göre de tanımlanabilmektedir. Mezopik bölgede görsel sistemin performansını belirlemek için gerekli olan parametreler parıltı düzeyi, kontrast ve ışık kaynağının spektral karakteristiği olarak sıralanabilmektedir.

Tipik gece sürüş koşullarında sürücülerin adaptasyon seviyeleri, mezopik bölgenin orta ve üst sınır değerlerine yakın olma eğilimindedir [17]. Mezopik görmenin üst sınır değeri renksellik, görme alanı içerisindeki cismin boyutu ve konumu gibi birkaç faktöre bağlı olarak değiştiğinden kesin olarak tanımlanamamaktadır. LeGrand tarafından mezopik görmenin üst sınır değeri 3°'lik görme alanında 5 cd/m<sup>2</sup>, 25°'lik görme alanında ise 15 cd/m<sup>2</sup> olarak açıklanmaktadır [18]. Kokoschka'ya göre mezopik bölgenin üst sınır değeri 10 cd/m<sup>2</sup>'ye kadar uzamaktadır [19]. Mezopik ve fotopik parıltı bölgeleri arasındaki sınır değer için CIE'nin tanımı “en azından bir kaç cd/m<sup>2</sup>'dir” şeklinde yapılmaktadır [20]. IESNA (2000) mezopik parıltı bölgesinin üst limitini 3 cd/m<sup>2</sup>, alt limitini ise CIE'nin (1978) tanımının 10 katı fazlası olan 0.01 cd/m<sup>2</sup> olarak belirlemiştir [21]. CIE TC 1-58, yaklaşık 10 cd/m<sup>2</sup>'nin altındaki parıltı düzeylerinde performansa dayalı araştırmalarını sürdürmekte ve deneylerde adaptasyon parıltısı olarak USP ve MOVE gibi görsel performansa dayalı sistemleri de kapsayan 0.003 cd/m<sup>2</sup> ile 10 cd/m<sup>2</sup> arasındaki seviyeleri incelemektedir [1].

Kontrast, arka fon ve hedef arasındaki göreceli parıltı farklılığı ile tanımlanmaktadır. Hem laboratuvar hem de alan ölçümleri hedef kontrastının mezopik bölgede görsel performansı etkilediğini göstermektedir [8].

Gece sürüş koşullarında görsel hedefin kontrastı hedefin yansıtma özelliklerine, aydınlatma armatürlerinin geometrilerine, hedefin konumuna göre değişmektedir. USP sistemi yüksek kontrast ve renksiz işler üzerine (C=2.3) dayalı iken, MOVE sisteminde hem renkli hem de renksiz eşik kontrast değerleri esas alınmaktadır.

Mezopik spektral duyarlılık üzerine etki eden bir diğer parametre de ışık kaynağının spektral karakteristik özelliğidir. Bu değer, metrik olarak “S/P-oranı” ile ifade edilmektedir [15]. Bu oran, bir ışık kaynağının CIE skotopik spektral duyarlık fonksiyonu V'(λ)'ya göre

değerlendirilmiş ışık çıktısının, CIE fotopik spektral duyarlık fonksiyonu  $V(\lambda)$ 'ya göre değerlendirilmiş ışık çıktısına oranıdır ve (1) no'lu denklem ile ifade edilmektedir [1].

$$S/P - oranı = \frac{K'_m \int_0^{\infty} S_{\lambda}(\lambda) V'(\lambda) d\lambda}{K_m \int_0^{\infty} S_{\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

Burada;

$K'_m = 1699 \text{ lm/W}$  (skotopik görme için enerji akısının ışıksal eşdeğeri,  $K'(\lambda)$ )

$K_m = 683 \text{ lm/W}$  (fotopik görme için enerji akısının ışıksal eşdeğeri,  $K(\lambda)$ )

$S_{\lambda}(\lambda)$  ; ışık kaynağının spektral dağılımı,

$\lambda$  ; dalga boyudur.

Kullanımda olan ışık kaynaklarının S/P-oranları birbirinden farklıdır. Örneğin alçak basınçlı sodyum buharlı lambalar için yaklaşık 0.23, sıcak beyaz ışık renkli metal halojen lambalar için 1.2, soğuk beyaz ışık renkli metal halojen lambalar için ise 2.40'dır. Yol aydınlatmalarında sıklıkla kullanılan yüksek basınçlı sodyum buharlı lambaların S/P-oranı düşük olup yaklaşık 0.60'dır. Bu düşük değer, yüksek basınçlı sodyum buharlı lambaların mezopik fotometriye göre yol ve sokak aydınlatmalarında karşılaşılan düşük seviyeli parıltı değerlerinde optimum sonuçlar veremeyeceği düşüncesini doğurmaktadır. Buna karşılık metal halojen lambalar, LED'ler gibi spektrumları mavi dalga boyu bölgesinde yoğun olan beyaz ışık kaynaklarının, yol aydınlatması uygulamalarında geçerli olabilen mezopik görme koşullarında daha iyi görsel performans sağlayabileceği ifade edilmektedir [1].

#### 4. GÖRSEL PERFORMANSA DAYALI MEZOPIK FOTOMETRİ İÇİN CIE TARAFINDAN ÖNERİLEN SİSTEM

CIE 191:2010 tavsiye niteliğindeki raporda, mezopik bölgedeki  $V_{mes}(\lambda)$  spektral duyarlık fonksiyonunu,  $V(\lambda)$  fotopik spektral duyarlık fonksiyonu ve  $V'(\lambda)$  skotopik spektral duyarlık fonksiyonunun lineer bir kombinasyonu olarak tanımlayan görsel performansa dayalı bir sistem önerilmektedir. Spektral duyarlık değerlerinin görsel adaptasyon koşullarına göre değiştiği mezopik bölgede skotopik ve fotopik fonksiyonlar arasında kademeli bir geçiş olduğu varsayılmaktadır.  $0.005 \text{ cd/m}^2$  ve  $5.0 \text{ cd/m}^2$  parıltı düzeyleri arasında tanımlanan mezopik bölge algoritması aşağıdaki eşitliklerle verilmektedir.

$$0 \leq m \leq 1 \text{ için,} \quad M(m) V_{mes}(\lambda) = m V(\lambda) + (1-m) V'(\lambda) \quad (2)$$

$$L_{mes} = \frac{683}{V_{mes}(\lambda_0)} \int V_{mes}(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

Burada;

$m$  : Görsel adaptasyon koşullarına bağlı olarak değişen değer için bir katsayı,

$M(m)$  :  $V_{mes}(\lambda)$ 'yı maksimum değeri olan 1'e ulaştıran normalizasyon fonksiyonu,

$V_{mes}(\lambda_0)$  :  $555\text{nm}$ 'de mezopik spektral duyarlık,  $V_{mes}(\lambda)$  değeri,

$L_{mes}$  : Mezopik parıltı,

$L_e(\lambda)$  : Birim uzay açındaki spektral enerji akısı yoğunluğu ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ )

Eğer  $L_{mes} \geq 5.0 \text{ cd/m}^2$  ise  $m=1$ ,  $L_{mes} \leq 0.005 \text{ cd/m}^2$  ise  $m=0$ 'dır. Mezopik parıltı ( $L_{mes}$ ),  $m$  katsayısı 0 ila 1 arasında belli değerlerde kabul edilip, iterasyon yapılarak aşağıdaki formülle de hesaplanabilmektedir.

$$L_{mes,n} = \frac{m_{(n-1)}L_p + (1 - m_{(n-1)})L_s V'(\lambda_0)}{m_{(n-1)} + (1 - m_{(n-1)})V'(\lambda_0)} \quad (4)$$

$$0 \leq m_n \leq 1 \text{ için } m_n = a + b \log_{10}(L_{mes,n}) \quad (5)$$

Burada,

$$a = 0.767$$

$$b = 0.3334$$

$n$  : İterasyon adımı,

$L_p$  : Görsel adaptasyon alanının fotopik parıltısı,

$L_s$  : Görsel adaptasyon alanının skotopik parıltısı,

$L_{mes}$  : Görsel adaptasyon alanının mezopik parıltısı,

$V'(\lambda_0)$  :  $683/1699$ ,  $\lambda_0=555.5\text{nm}$ 'deki skotopik spektral duyarlık değeridir.

CIE 191:2010'nun önerdiği görsel performansa dayalı mezopik fotometri sistemi ile hesaplanan "m" ve  $L_{mes}$  değerleri, fotopik parıltının ve ışık kaynağının S/P oranının bir fonksiyonu olarak sırasıyla Tablo 1 ve 2'de verilmektedir. Tablo 3'de ise, alçak basınçlı sodyum buharlı (LPS), yüksek basınçlı sodyum buharlı (HPS), metal halojen (MH) lambalar ve LED ışık kaynakları için mezopik fotometriye göre hesaplanan yol yüzeyi parıltı değerleri ile fotopik fotometriye göre önerilen parıltılar arasındaki farklar yüzdesel olarak gösterilmektedir. Tablo 3'de verilen S/P-oranları yaygın olarak kullanılan lambaların tipik S/P-oranlarıdır. S/P-oranı aynı lamba cinsinde, lambanın tipi ve gücüne göre de değişeceğinden, her bir lamba için bu değer bilinmesi gerekmektedir.

**Tablo 1.** Fotopik parıltının ve ışık kaynağının S/P-oranının fonksiyonu olarak, CIE 191:2010'nun önerdiği görsel performansa dayalı mezopik fotometri sistemi ile hesaplanan “m” katsayısı değerleri.

	S/P	Fotopik Parıltı [cd/m <sup>2</sup> ]						
		0.01	0.03	0.1	0.3	1	3	4.5
LPS ~	0.25		0.1542	0.383	0.5644	0.7538	0.9225	0.9841
	0.35		0.1804	0.392	0.5688	0.7558	0.923	0.9842
	0.45	0	0.1992	0.4	0.573	0.7576	0.9235	0.9843
	0.55	0.019	0.214	0.4073	0.577	0.7594	0.924	0.9844
	0.65	0.0459	0.2265	0.4139	0.5808	0.7612	0.9245	0.9845
HPS ~	0.75	0.0655	0.2373	0.4201	0.5844	0.7629	0.9249	0.9846
	0.85	0.0812	0.2468	0.4258	0.5878	0.7646	0.9254	0.9846
	0.95	0.0943	0.2553	0.4311	0.5911	0.7662	0.9258	0.9847
	1.05	0.1057	0.2631	0.4361	0.5942	0.7678	0.9263	0.9848
	1.15	0.1157	0.2702	0.4408	0.5972	0.7693	0.9267	0.9849
MH sıcak-beyaz ~	1.25	0.1247	0.2767	0.4452	0.6001	0.7708	0.9272	0.985
	1.35	0.1329	0.2828	0.4494	0.6029	0.7723	0.9276	0.9851
	1.45	0.1404	0.2885	0.4534	0.6056	0.7737	0.928	0.9852
	1.55	0.1473	0.2939	0.4573	0.6082	0.7751	0.9284	0.9853
	1.65	0.1538	0.299	0.4609	0.6107	0.7764	0.9289	0.9853
	1.75	0.1598	0.3038	0.4645	0.6131	0.7778	0.9293	0.9854
	1.85	0.1654	0.3083	0.4678	0.6155	0.7791	0.9297	0.9855
	1.95	0.1708	0.3126	0.4711	0.6178	0.7803	0.9301	0.9856
	2.05	0.1758	0.3168	0.4742	0.62	0.7816	0.9304	0.9857
	2.15	0.1806	0.3207	0.4772	0.6221	0.7828	0.9308	0.9857
MH gün ışığı~	2.25	0.1852	0.3245	0.4801	0.6242	0.784	0.9312	0.9858
	2.35	0.1895	0.3282	0.483	0.6263	0.7852	0.9316	0.9859
	2.45	0.1937	0.3317	0.4857	0.6283	0.7863	0.9319	0.986
	2.55	0.1977	0.3351	0.4883	0.6302	0.7875	0.9323	0.986
	2.65	0.2015	0.3383	0.4909	0.6321	0.7886	0.9327	0.9861
	2.75	0.2052	0.3415	0.4934	0.6339	0.7896	0.933	0.9862

**Tablo 2.** Fotopik parıltının ve ışık kaynağının S/P-oranının bir fonksiyonu olarak, CIE 191:2010'nun önerdiği görsel performansa dayalı mezopik fotometri sistemi ile hesaplanan “L<sub>mes</sub>” değerleri.

	S/P	Fotopik Parıltı [cd/m <sup>2</sup> ]						
		0.01	0.03	0.1	0.3	1	3	4.5
LPS ~	0.25	0.0025	0.0145	0.0705	0.2467	0.913	2.9265	4.4782
	0.35	0.0035	0.0174	0.075	0.2545	0.9253	2.9367	4.4812
	0.45	0.0045	0.0198	0.0793	0.262	0.9373	2.9468	4.4842
	0.55	0.0057	0.022	0.0834	0.2693	0.9492	2.9568	4.4872
	0.65	0.0069	0.0239	0.0873	0.2764	0.9608	2.9666	4.4901
HPS ~	0.75	0.0079	0.0258	0.0911	0.2833	0.9722	2.9763	4.4929
	0.85	0.0088	0.0275	0.0947	0.2901	0.9835	2.9859	4.4958
	0.95	0.0096	0.0292	0.0983	0.2967	0.9945	2.9953	4.4986
	1.05	0.0104	0.0308	0.1017	0.3032	1.0054	3.0046	4.5014
	1.15	0.0111	0.0323	0.1051	0.3096	1.0161	3.0139	4.5041
MH sıcak-beyaz ~	1.25	0.0118	0.0338	0.1083	0.3158	1.0267	3.0230	4.5068
	1.35	0.0125	0.0353	0.1115	0.322	1.0371	3.0319	4.5095
	1.45	0.0132	0.0367	0.1147	0.328	1.0473	3.0408	4.5122
	1.55	0.0138	0.0381	0.1178	0.3339	1.0575	3.0496	4.5148
	1.65	0.0145	0.0395	0.1208	0.3398	1.0674	3.0582	4.5174
	1.75	0.0151	0.0408	0.1238	0.3455	1.0773	3.0668	4.5200
	1.85	0.0157	0.0421	0.1267	0.3512	1.0870	3.0753	4.5225
	1.95	0.0163	0.0434	0.1295	0.3568	1.0966	3.0836	4.5250
	2.05	0.0169	0.0446	0.1324	0.3623	1.1060	3.0919	4.5275
	2.15	0.0174	0.0459	0.1352	0.3677	1.1154	3.1001	4.5299
MH gün ışığı~	2.25	0.018	0.0471	0.1379	0.3731	1.1246	3.1082	4.5323
	2.35	0.0185	0.0483	0.1406	0.3784	1.1338	3.1162	4.5347
	2.45	0.0191	0.0495	0.1433	0.3836	1.1428	3.1241	4.5371
	2.55	0.0196	0.0506	0.1459	0.3888	1.1517	3.1319	4.5395
	2.65	0.0201	0.0518	0.1485	0.3939	1.1605	3.1396	4.5418
	2.75	0.0207	0.0529	0.1511	0.3989	1.1693	3.1473	4.5441

**Tablo 3.** Işık kaynaklarının S/P-oranlarının aralıkları için, önerilen mezopik fotometriye göre hesaplanan yol yüzeyi parıltı düzeyleri ile fotopik fotometriye göre önerilen parıltılar arasındaki farklar.

	S/P	Fotopik Parıltı [cd/m <sup>2</sup> ]									
		0.01	0.03	0.1	0.3	0.5	1	1.5	2	3	5
LPS ~	<b>0.25</b>	-% 75	-% 52	-% 29	-% 18	-% 14	-% 9	-% 6	-% 5	-% 2	% 0
	<b>0.45</b>	-% 55	-% 34	-% 21	-% 13	-% 10	-% 6	-% 4	-% 3	-% 2	% 0
HPS ~	<b>0.65</b>	-% 31	-% 20	-% 13	-% 8	-% 6	-% 4	-% 3	-% 2	-% 1	% 0
	<b>0.85</b>	-% 12	-% 8	-% 5	-% 3	-% 3	-% 2	-% 1	-% 1	% 0	% 0
MH sıcak beyaz ~	<b>1.05</b>	% 4	% 3	% 2	% 1	% 1	% 1	% 0	% 0	% 0	% 0
	<b>1.25</b>	% 18	% 13	% 8	% 5	% 4	% 3	% 2	% 1	% 1	% 0
	<b>1.45</b>	% 32	% 22	% 15	% 9	% 7	% 5	% 3	% 3	% 1	% 0
	<b>1.65</b>	% 45	% 32	% 21	% 13	% 10	% 7	% 5	% 4	% 2	% 0
LED soğuk-beyaz ~ MH gün ışığı ~	<b>1.85</b>	% 57	% 40	% 27	% 17	% 13	% 9	% 6	% 5	% 3	% 0
	<b>2.05</b>	% 69	% 49	% 32	% 21	% 16	% 11	% 8	% 6	% 3	% 0
	<b>2.25</b>	% 80	% 57	% 38	% 24	% 19	% 12	% 9	% 7	% 4	% 0
	<b>2.45</b>	% 91	% 65	% 43	% 28	% 22	% 14	% 10	% 8	% 4	% 0
	<b>2.65</b>	% 101	% 73	% 49	% 31	% 24	% 16	% 12	% 9	% 5	% 0

## 5. SONUÇ

CIE 191:2010 görsel performansa dayalı mezopik fotometri raporunda önerilen sisteme göre mezopik bölge, 0.005 cd/m<sup>2</sup> ve 5.0 cd/m<sup>2</sup> parıltı düzeyleri arasında tanımlanmıştır. Bu parıltı aralığının tanımlanmasında, mevcut görsel performansa dayalı sistemler (USP ve MOVE sistemleri) incelenmiş, bu sistemlerde esas alınan deney sonuçları bağımsız deneyler ile tekrar irdelenmiş ve sonuçta yeni bir sistem önerisinde bulunulmuştur. Bu önerilen sisteme göre, metal halojen lambalar, LED'ler gibi spektrumları mavi dalga boyu bölgesinde yoğun olan beyaz ışık kaynaklarının, yol aydınlatma uygulamalarında mezopik görme koşullarında daha iyi görsel performans sağlayabileceği ifade edilmektedir. Tablo 3'deki sonuçlar yorumlandığında, mezopik görme koşulları altında tayflarında kısa dalga boylu radyasyonlar hakim olan, S/P oranı 1'den büyük ışık kaynakları ile yol üzerinde sağlanan parıltı düzeylerinin, uzun dalga boylu radyasyonların yoğun olduğu bir tayfa sahip (S/P-oranı < 1) ışık kaynakları ile yaratılan parıltılardan daha yüksek olarak algılanacağı ortaya çıkmaktadır. Ortamda hakim olan ortalama parıltı düzeyi azaldıkça bu etki daha da artmaktadır. Örneğin yol yüzeyinde ortalama 1 cd/m<sup>2</sup> lik fotopik parıltı düzeyinin sağlanması gereken bir uygulamada S/P oranı 0.65 olan yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalar kullanıldığında nominal parıltıdan %4 oranında düşük bir parıltı algılanacakken, S/P oranı 2.25 olan soğuk beyaz LED kullanılması halinde algılanan parıltı düzeyi %12 oranında daha yüksek olabilecektir.

Enerji verimliliği açısından, tayflarında mavi radyasyonları yoğun olan soğuk beyaz ışık renkli metal halojen ve LED ışık kaynaklarına önemli üstünlük getiren "mezopik görme" fonksiyonları maalesef henüz tam anlamı ile tanımlanamamıştır. Fotopik ve skotopik görme için normal sağlıklı bir gözün spektral duyarlık eğrileri - V(λ) ve V'(λ) tanımlanmış olmasına rağmen, mezopik görme için bu değerler henüz belli değildir. Literatürde mezopik görme sınırlarının 0.001 cd/m<sup>2</sup> ile 3 cd/m<sup>2</sup> arasında mı, yoksa 0.005 cd/m<sup>2</sup> ile 5 cd/m<sup>2</sup> arasında mı olduğu konusunda bile net bir uzlaşma yoktur. Diğer yandan mezopik fotometri için önerilen



sistem renkli görmenin kritik olduğu durumlarda veya hedef çok dar bir spektral güç dağılımına sahip olduğunda, görsel performans ile iyi bir ilişki kuramamaktadır. Benzer şekilde mezopik bölgede parlaklığın görsel değerlendirilmesi de tam olarak yapılamamaktadır. CIE tarafından önerilen sistemde, spektral duyarlık fonksiyonları parlaklık eşleştirmesinden çok tanımlama, algılama, reaksiyon zamanı gibi görsel iş performans kriterleri üzerine yoğunlaştırılmıştır. Diğer yandan, tek bir sistem ile, tüm işler ve aydınlatma koşulları için, görsel performansın tahmin edilmesi de mümkün değildir. Görme çok kompleks bir süreçtir ve gözün spektral duyarlığı görme alanı içerisindeki uyarıcının yeri ve boyutu, ortamın aydınlatma seviyesi ve spektrumu, uyarıcı kontrastı ve spektrumu, gerekli reaksiyon süresi gibi bir çok faktör tarafından etkilenir. Bu faktörlerden herhangi birinin değişimi görsel sistemin verimliliğini değiştirir ve görsel işin yapılabilme yeteneğini etkiler.

Tüm bu belirsizlikler ve zorluklar ortada olmasına rağmen, maalesef yol ve sokak aydınlatmalarında LED ışık kaynaklı armatürlerin kullanılması halinde mezopik görme koşullarında beyaz ışığa karşı duyarlığın arttığı öne sürülerek, sağlanması gerekenden daha düşük seviyeli parıltı düzeylerinde tesisatların gerçekleştirildiği de gözlemlenmektedir. Henüz mezopik görme koşulları için uluslararası alanda kabul edilmiş bir model, yöntem ve/veya mezopik bölgedeki aydınlatma uygulamalarının etkinliğini değerlendirmek için bir standart mevcut değildir. Bu nedenle, LED'li armatürler mevcut sistemler yerine ya da yeni bir tesisatta kullanılırken, ilk dikkat edilmesi gereken kriter, güvenlik koşulları gereği yol sınıflarında fotometrik görme koşullarında sağlanması gereken aydınlatma kalite büyüklüklerinin gerçekleştiriliyor olmasıdır. Mevcut bilgiler ışığında, özellikle soğuk beyaz ışık renkli ışık kaynakları ile önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanabileceği ip uçları elde edilebildiği için, mezopik görme koşullarının tanımlanabilmesi amaçlı araştırmalara ihtiyaç olduğu da açıktır.

#### **KAYNAKÇA**

1. CIE Commission Internationale de l'Eclairage, CIE 191:2010, "Recommended System for Mesopic Fotometry Based on Visual Performance", 2010
2. Raynham P, An Examination of the Fundamentals of Road Lighting for Pedestrians and Drivers, Lighting Res. Technol. 36, 307-316, 2004.
3. Akashi Y, Rea MS, Bullough JD, Driver Decision Making in Response to Peripheral Moving Targets under Mesopic Light Levels, Lighting Res. Technol. 39, 53-67, 2007.
4. Charman WN, Vision and Driving – a Literature review and commentary, Opthal. Physiol. Opt. 17, 371-391, 1997.
5. Bullough JD, Rea MS, Simulated Driving Performance and Peripheral Detection at Mesopic and Low Photopic Light Levels, Lighting Res. Technol. 32, 194-198, 2000.
6. CIE Commission Internationale de l'Eclairage, CIE 100:1992, Fundamentals of the Visual Task of Night Driving, 1992.
7. Eloholma M, Viikari M, Halonen L, Walkey H, Goodman T, Alfrendick J, Freiding A, Bodrogi P, Varady G, Mesopic Models – from Brightness Matching to Visual Performance in Night-Time Driving: a Review, Lighting Res. Technol. 37, 155-175, 2005.
8. IESNA Illuminating Engineering Society of North America, Spectral Effects of Lighting on Visual Performance at Mesopic Light Levels, IESNA TM-12-06, Newyork: IESNA, 2006.
9. Freiding A, Eloholma M, Ketomaki J, Halonen L, Walkey H, Goodman T, Alfrendick J, Varady G, Bodrogi P, Mesopic Visual Efficiency I: Detection Threshold Measurements, Lighting Res. Technol. 39, 319-334, 2007.
10. Adrian W, Fundamentals of Roadway Lighting, Lighting & Engineering 12, 57-71, 2004.

11. Adrian W, Visibility of Targets: Model for Calculation, Lighting Res. Technol. 21, 181-188, 1989.
12. McGowan T, Rea M, Visibility and Spectral Composition, another look in the mesopic, Proceedings of the CIE Symposium on Advances in Photometry, 107-119, Vienna, Austria: Commission Internationale de l'Eclairage, 1994.
13. He Y, Bierman A, Rea M, A System of Mesopic Photometry, Lighting Res. Technol. 30, 175-81, 1998.
14. Plainis S, Murray IJ, Reaction Times as an Index of Visual Conspicuity When Driving at Night, Optom. & Phys. Optics 22, 409-415, 2002.
15. Rea MS, Bullough JD, Freyssinier-Nova JP, Bierman A, A Proposed Unified System of Photometry, Lighting Res. Technol. 36, 85-111, 2004.
16. Goodman T, Forbes A, Walkey H, Eloholma M, Halonen L, Alferdink J, Freiding A, Bodrogi P, Varady G, Szalmas A, Mesopic Visual Efficiency IV: A Model with relevance to Night-Time Driving and other applications, Lighting Res. Technol. 39, 365-392, 2007
17. Plainis S, Chauhan IJ, Murray WN, Retinal Adaptation under Night-Time Driving Conditions, Proc Vision in Vehicles VII, Marseilles, France, 1997.
18. LeGrand Y, Spectral Luminosity, Handbook of Sensory Physiology, Vol. VII/4 Visual Psychophysics, Berlin: Springer-Verlag, 413-33, 1972.
19. Kokoschka S, Das  $V(\lambda)$ -Dilemma in der Photometrie. Proc 3. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuch, TU Ilmenau, Ilmenau, 1997.
20. CIE Commission Internationale de l'Eclairage, CIE 41-1978, Light as a True Visual Quantity: Principles of Measurement, 1978.
21. IESNA Illuminating Engineering Society of North America, IESNA Lighting Handbook: Reference and Application, 9<sup>th</sup> ed. New York: IESNA, 2000.
22. Ekrias A, Eloholma M, Halonen L, Analysis of Road Lighting Quantity and Quality in Varying Weather Conditions, LEUKOS 4, 89-98, 2007.
23. Castillo AF, Intelligent Management of Road Lighting Control Systems using Fuzzy Controllers, MSc Thesis, Espoo, Lighting Laboratory, Helsinki University of Technology, 2007.

<p>Yük. Müh. Niyazi Gündüz İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, Ayazağa Yerleşkesi, 34469, Maslak, İstanbul Tel: 0 212 285 60 51 Faks: 0 212 285 38 84 E-posta: niyazigunduz@gmail.com</p>	<p>Prof. Dr. Sermin Onaygil İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, Ayazağa Yerleşkesi, 34469, Maslak, İstanbul Tel: 0 212 285 39 46 Faks: 0 212 285 38 84 E-posta: onaygil@itu.edu.tr</p>	<p>Dr. Emre Erkin İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, Ayazağa Yerleşkesi, 34469, Maslak, İstanbul Tel: 0 212 285 38 79 Faks: 0 212 285 38 84 E-posta: erkinem@itu.edu.tr</p>
--	---	---