



# İstanbul Halit Ulukurt Tünelinde Eşik Parıltı Değeri ve Fren Mesafesine Göre LED Armatür ile Aydınlatma Tasarımı

## Lighting Design with LED Armature in Istanbul Halit Ulukurt Tunnel Based on Luminance Value of the Threshold Zone and Braking Distance

Furkan ÇELEBİ<sup>1</sup>, Canan KARATEKİN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İSBK İstanbul Ulaşım Haberleşme ve Güvenlik Teknolojileri A.Ş

<sup>2</sup>Elektrik Mühendisliği Bölümü

Elektrik-Elektronik Fakültesi

İstanbul Teknik Üniversitesi

<sup>1</sup>fcelebi@isbak.com.tr <sup>2</sup>karatekin@itu.edu.tr

### Özet

Bu çalışmada tünel aydınlatma tasarımının iki önemli parametresi olan fren mesafesi ve eşik bölgesi parıltısına göre aydınlatma tasarımı yapılmıştır. Örnek sistem olarak İstanbul Beykoz Halit Ulukurt tüneli seçilmiştir. Aydınlatma tasarımı için Tunnel v3 programı kullanılmıştır. Program kullanılarak LED armatür ile fren mesafesi ve eşik bölge parıltısına göre aydınlatma tasarımı yapılmış ve LED armatür ile tünel aydınlatılması durumunda Uluslararası CIE-88 Yol Tünelleri ve Alt Geçitler Aydınlatması Kılavuzunda istenen standartların sağlandığı görülmüştür. Ayrıca Halit Ulukurt tünelinde şu an kullanılan sodyum buharlı armatür yerine LED armatür kullanılması halinde %45.5 oranında enerji tasarrufu sağlanacağı görülmüştür.

### Abstract

In this study, the lighting design is done according to braking distance and the luminance of the threshold zone that tunnel lighting design is two important parameters. Example system has been selected as the Istanbul Beykoz Halit Ulukurt tunnel. Tunnel v3 program is used for lighting design. Using program, the lighting design with LED armature is done according to braking distance and luminance of the threshold zone and in case of tunnel illuminated with LED armatures has been shown that the required standards in international CIE-88 Road Tunnel and Underpass Lighting Guide is provided. Also currently used in the Halit Ulukurt tunnel instead of sodium vapor lamp in case of using LED armature is showed that can be 45.5% energy savings.

### 1. Giriş

Tünel aydınlatması, sürücünün tünele girişi, çıkışı ve tünel içinde güvenli ve konforlu bir şekilde seyahat edebilmesi için gerekli minimum aydınlık seviyesini sağlamalıdır. Gündüzleri çok yüksek bir çevre ve yol parıltısına adapte olmuş sürücü gözünde tünel girişi bir karanlık bölge olarak algılanır, tünel girişindeki cisimler görülemez [1]. Elbette geceleri, göz karanlığa adapte olduğundan böyle bir sorun yoktur. Tünel aydınlatması gündüzleri çok önemlidir ve gözün adaptasyonu için tünele yaklaşma bölgesinden başlayarak önlemler alınmalıdır. Yapılan bir çalışmada, sürücünün tünel girişini karanlık bölge gibi görmesini önlemek ve tünel içinde yeterli

görme yeteneğini sağlamak için, tünel eşik bölgesinde (ilk bölgede) dış bölge parıltısının 1/20 si değerinde bir parıltı düzeyinin sağlanmasının yeterli olduğu tespit edilmiştir [2]. Tünelde güvenli ve konforlu geçiş için standartlar Uluslararası Aydınlatma Komisyonu tarafından 88 numaralı yayınında (CIE-88) belirlenmiştir [3]. Tünel aydınlatması yaparken bu standartlara uygunluk esas alınmıştır.

Tünel aydınlatması, tünel aydınlatma tasarım hızında tünelde ilerleyen bir aracın tehlikeli bir cismi fren mesafesi kadar uzaklıkta fark edebilecek ölçüde aydınlatılmasıdır. Tünel tasarımında, tünel bölgelere ayrılmaktadır. Bu bölgeler dış bölge, eşik bölgesi, geçiş bölgesi, iç bölge ve çıkış bölgesidir[1]. Fren mesafesi bu bölgelerin belirlenmesinde temel parametredir. Yine bu bölgelerin aydınlatma tasarımı, tünel aydınlatmasının ilk adımını oluşturan eşik bölgesinin parıltı ( $L_{TH}$ ) değerine göre yapılmaktadır.  $L_{TH}$  değeri tünel girişini merkez alacak şekilde fren mesafesinden çekilen fotoğraf üzerinden yapılmaktadır [4]. Fren mesafesine bağlı olarak bulunan  $L_{TH}$  değeri tünel aydınlatma seviyesini ve maliyetini belirlediği için bütün tasarımı ve maliyeti etkileyen önemli bir parametredir [5].

Bu çalışmada fren mesafesine ve eşik bölgesi parıltı değerine göre İstanbul Beykoz Halit Ulukurt tünelinde aydınlatma tasarımı yapılmıştır. Tünel aydınlatma tasarımında kullanılan bir program olan Tunnel v3 ile tasarım gerçekleştirilmiştir. Güvenli geçişi sağlamak için sürücülerin dış ortamdan iç ortama geçişinde meydana gelebilecek kamaşmayı engelleyecek şekilde otomasyon sisteminden kontrol edilebilecek sistemin tasarlanması hedeflenmiştir. Çalışmanın devamında şu an bu tünelde kullanılan sodyum buharlı armatür yerine LED (ışık yayan diyot) armatür kullanılması halinde enerji tasarrufu karşılaştırılmıştır.

LED'lerin aydınlatmada kullanımı her geçen gün artmaktadır. Beyaz ışığın LED'lerde kullanımının başlamasıyla birlikte iç mekan aydınlatmasında, yol aydınlatmasında kullanılmaya başlamıştır. İlk yatırım maliyetinin LED'lerde yüksek olmasına rağmen etkinlik faktörlerinin 90-100 Lümen/Watt, ekonomik ömürlerinin 35000-50000 saat gibi diğer lambalara kıyasla çok yüksek olması nedeniyle tercih edilmektedir.

Yapılan bir çalışmada tren yolu tünellerinde flüoresan lamba yerine LED armatür kullanılması enerji tasarrufu, bakım kolaylığı sağladığı tespit edilmiştir [6].

Yine bir başka çalışmada, tünellerde ve denizaltı tünellerinde LED armatür dışında birçok farklı armatür ( flüoresan lamba, sodyum buharlı, metal halojen gibi) farklı tavan yüksekliğinde kullanılması halinde performansları kıyaslanmıştır [7].

## 2. Tasarım İçin Parametrelerin Belirlenmesi

Tünel aydınlatması, CIE- 88 standartlarına uygun hesaplama ve tasarım yapan, rapor veren Schreder tarafından geliştirilen Tunnel v3 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [8]. Bu programda kullanmak için tünel uzunlukları, şerit sayısı, yürüyüş yolu genişliği, emniyet şeridinin genişliği, tünel duvarlarının yola olan uzaklığı, yol yüzey karakteristiği, duvar yansıtma faktörü, hız sınırı, fren mesafesi, eşik parlı değeri ve armatürlerin yerleştirildiği yükseklik bilgileri gerekmektedir. Halit Ulukurt Tüneli iki tüpten oluşmaktadır. 1. tüp 690 metre, 2. tüp 720 metredir [9]. Trafik akışı iki şeritten sağlanmaktadır. Şerit genişliği 3,75 m ve tünel genişliği 10 metredir.

### 2.1. Fren Mesafesi Değerinin Hesaplanması

Tünel aydınlatması tünel aydınlatma tasarım hızında tünelde ilerleyen bir aracın tehlikeli bir cismi fren mesafesi kadar uzaklıkta fark edebilecek ölçüde tünelin aydınlatılmasıdır. Fren mesafesi bir aracın belli bir hızda ilerlerken tehlike anında sürücünün aracı durdurabileceği mesafedir [5]. Buradaki belli bir hız, tasarım hızı olarak hesaplanabilmektedir. Ayrıca şehir içi ya da şehir dışı yollarda tasarım hızından yüksek olmamak kaydıyla ile resmi makamlarca belirlenen hız sınırıdır.

Fren mesafesinin hesabını yaparken iki önemli parametreyi bilmek gerekmektedir. Bu değerler:

- 1-Tünel aydınlatma tasarım hızı (TATH),
- 2-Tünel giriş veya çıkışında tünel tasarım sınırları içinde kalan yolun en yüksek yol eğim değeridir.

Fren mesafesi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. İlk toplam parametresi sürücünün tehlikeli cismi fark edip frene basana kadar tepkime süresinde geçen mesafeyi ve ikinci toplam parametresi frene bastıktan sonra aracın duruncaya kadar gittiği mesafeyi gösterir.

$$F.M = u.t_0 + \frac{u^2}{2.g.(f \pm s)} \quad (1)$$

Burada,

F.M= fren mesafesi

u= tünel aydınlatma tasarım hızı [m/s]

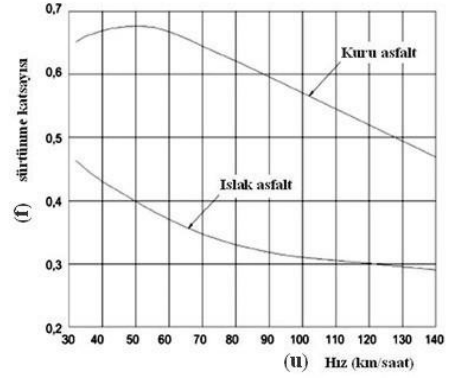
f= sürtünme katsayısı

t<sub>0</sub>= tepkime süresi

s = yol eğimi

g = yer çekimi ivmesi [m/sn<sup>2</sup>]

Sürtünme katsayısının sabit olduğu kabul edilerek Şekil 1'deki diyagramdan bulunur.



Şekil 1: Araç hızı ve sürtünme katsayısı ilişkisi

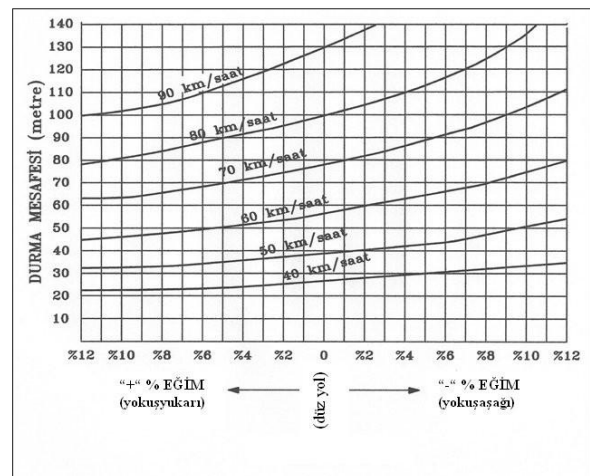
Her insan için farklı olsa da t<sub>0</sub> tepkime süresi genellikle 0,5-1 s arasındadır. Fren mesafesi hesaplanırken en kötü durum düşünülerek hesaplanması gerekmektedir. En kötü durum olarak t<sub>0</sub> =1 s alınır ve fren mesafesi daima ıslak asfalt düşünülerek hesaplanır. Eğim hesaplanırken yokuş aşağı eğimin en fazla olduğu nokta alınır. Ayrıca sürtünme katsayısını sabit alarak bir güvence payı bırakılmış olur [5].

Halit Ulukurt tüneli fren mesafesi hesabı için en kötü yol eğimi s = %0,5 ve tünel aydınlatma tasarım hızı u =70 km/h tir. Şekil 1 deki diyagramı kullanarak f = 0,35 bulunur. Tepkime süresi t<sub>0</sub> =1 s olarak alınır. Fren mesafesi hesabında hız [m/s] olduğu için 70 km/h birim dönüşümüyle u=19,44 m/s olarak hesaplanır. Fren mesafesi,

$$F.M = 19,44.1 + \frac{19,44^2}{2.9,81.(0,35-0,005)} = 75,27 \text{ m} \quad (2)$$

olarak bulunur.

Fren mesafesi tasarımcının sorumluluk almak istediği değer çerçevesinde 75-80 metre arasında bir değer seçilebilir. Şekil 2 deki diyagramı kullanarak her seferinde farklı eğim ve hız değerleri için hesap yapmak zorunda kalmadan fren mesafesi bulunabilir.



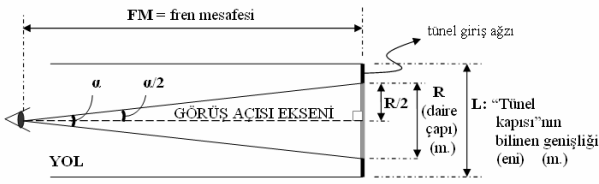
Şekil 2: Eğim ve hıza göre fren mesafesi belirleme

Yukarıdaki diyagramdan fren mesafesi 75 metre bulunmaktadır. Diyagramda fren hesabı en kötü koşullara göre hesaplanmaktadır.

## 2.2. Eşik Bölgesi Parıltı Değerinin Hesaplanması

Tünel aydınlatma tasarımında yapılacak bütün hesaplamalarda belirleyici parametre eşik bölgesi parıltı ( $L_{TH}$ ) değeridir.  $L_{TH}$  değeri CIE-88 standartlarında tavsiye edildiği üzere algılanan kontrast yöntemiyle ( $L_{seq}$ ) hesaplanmaktadır. Tünel girişinden fren mesafesi kadar uzaktan çekilmiş fotoğraf üzerine eş merkezli 10 adet daire çizmek gerekmektedir [10].

Daireler, sırasıyla  $\alpha$  açısı Şekil 3 deki gibi  $2^\circ, 3^\circ, 4^\circ, 5.8^\circ, 8^\circ, 11.6^\circ, 16.6^\circ, 24^\circ, 36^\circ, 56.8^\circ$  lık açılarla çizilerek grafiksel metotla elde edilmiştir. Çizelge 1’de tünel giriş ağzının genişliğine ve fotoğraftaki karşılık değerine göre çizilecek olan dairelerin uzay açılarına göre çapları hesaplanmıştır.

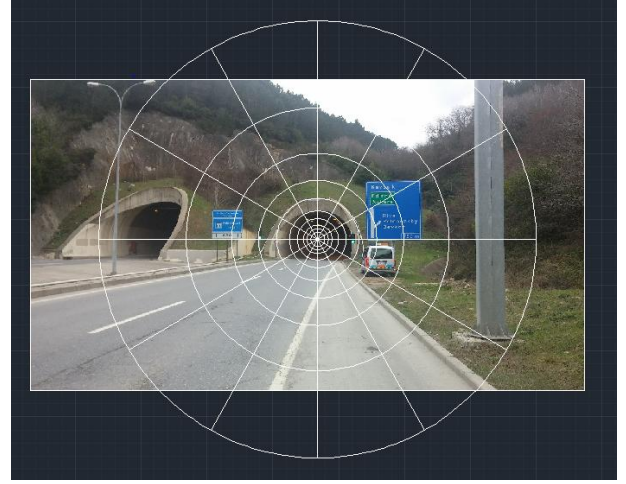


Şekil 3: Açı-çap-tünel giriş genişliğinin üstten görünümü

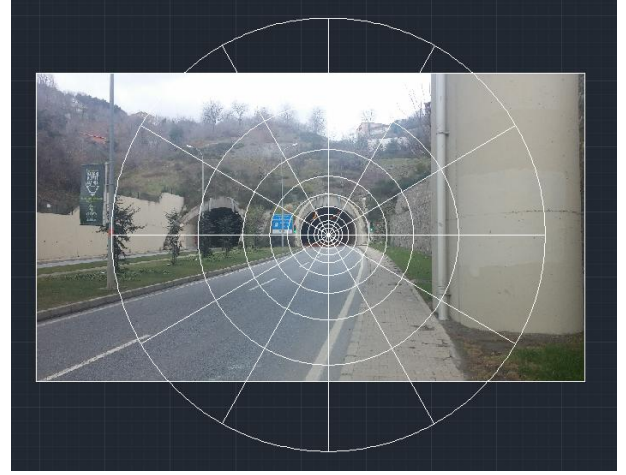
Çizelge 1: Dairelerin çapları

a Açısı	FM	R	Çizilecek R Değeri
2	75	2,62	13,09
3	75	3,93	19,64
4	75	5,24	26,19
5,8	75	7,60	37,99
8	75	10,49	52,45
11,6	75	15,24	76,18
16,6	75	21,88	109,41
24	75	31,88	159,42
36	75	48,74	243,69
56,8	75	81,10	405,52

Yapılan hesaplamalara göre çekilen fotoğraf üzerine yerleştirilen daireler Şekil 4’te görülmektedir. Merkezden  $30^\circ$  derecelik açıyla 12 doğru çizilerek alanlara bölünmüştür. Bu alanlara karşılık gelen algılanan parıltı değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 2’deki değerlere göre parıltı değeri hesabı yapılmıştır. Şemanın merkez kısmında ( $2^\circ$  çemberi)  $L_{seq}$  tespitinde hariç tutulmalıdır. Ancak bu foveola uyarlaması üzerinde etkilidir [5]. Halkalar içten dışa doğru sırasıyla 1’den 9’a kadar numaralandırılmıştır. Her dış halkadaki 12 eşit parçaya bölünmüş alanda saat 12 yönünden başlayarak 1-12 ‘ye kadar numaralandırılmıştır. Hesaplar bu numaralandırmalara göre yapılmıştır. En yüksek ve en düşük “parıltı” değerlerine sahip “9-1”, “9-6”, “9-7”, “9-12” nolu dört özel alan, “ $L_{seq}$ ” parıltı hesabına dahil edilmemektedir [5].



Şekil 4: Beykoz girişi yerleştirilmiş daireler



Şekil 5: Kavacık girişi yerleştirilmiş daireler

$L_{seq}$  (toplam eşdeğer peçeleme ışıklık düzeyi,  $cd/m^2$ ) değeri, bu 10 eş dairenin  $30^\circ$  açılarla çizilen doğruların böldüğü alanlardan en büyük iki parça ve en küçük iki parça görme alanı dışında kabul edildiğinden bunun dışındaki alanların parıltılarının toplamının fonksiyonudur.

$$L_{seq} = 5,1 \cdot 10^{-4} \sum L_{ije} \quad (3)$$

$$L_{ije} = \tau_{\delta c} \cdot L_{ij} + L_{\delta c} \quad (4)$$

$$L_{th} = \frac{L_M}{c_m \left( \frac{\rho}{\pi \cdot q_c} - 1 \right) - 1} \quad (5)$$

$$L_m = \frac{(\tau_{\delta c} \cdot L_{atm} + L_{\delta c} + L_{seq})}{(\tau_{\delta c} \cdot \tau_{atm})} \quad (6)$$

Burada,

$L_{seq}$  = toplam eşdeğer peçeleme ışıklık düzeyi [ $cd/m^2$ ]  
 $L_{ije}$  = araç içinde gözün önünde her bir bölümün ışıklık düzeyi [ $cd/m^2$ ]  
 $L_{ij}$  = araç dışında, ön camın önünde ölçülmüş olarak her bölümün ortalama ışıklık düzeyi [ $cd/m^2$ ]  
 $L_{oc}$  = araç ön camındaki “örtü parlantısı” [ $cd/m^2$ ]  
 $L_m$  = göz önündeki toplam ışıklık düzeyi [ $cd/m^2$ ]  
 $\tau_{oc}$  = araç ön camının % geçirme faktörü  
 $\rho$  = yansıtma faktörü  
 $q_c$  = kontrast faktörü  
 $C_m$  = algılanan kontrast değeridir.

Tasarım yapılan yer için ölçüm yapılamadıysa CIE-88 standartınca belirtilen değerler kabul edilmektedir. Bu değerlerden atmosferin geçirgenliği  $\tau_{atm} = 1$ , ön camın geçirgenliği  $\tau_{atm} = 0,8$  ve tehlikeli cismin yansıtma faktörü 0,2 alınmaktadır. “Kontrast faktörü” (L/Ev) olarak ise, zıt-yönlü sistemde “en az 0,6”, simetrik sistemde ise “en çok 0,2” olabilir. Çevreye ait parlantı değerleri için Çizelge 2’deki değerler kullanılmıştır. Algılanan kontrast değeri  $C_m$  nin minimum değeri %28 önerilmektedir ve negatiftir [5].

Çizelge 2: Tünel girişindeki ortalama parlantı değerleri

Araç yönü (kuzey yarıkürede)	$L_g$ (gök) $cd/m^2$	$L_y$ (yol) $cd/m^2$	$L_c$ (çevre) $cd/m^2$			
			kayalık	binalı	karlı	çimen
Kuzey *	8	3	3	8	15 (d) 15 (y)	2
Doğu-Batı	12	4	2	6	10 (d) 15 (y)	2
Güney *	16	5	1	4	5 (d) 15 (y)	2

Halkasal bölgelerdeki yüzdelik oranlarına göre parlantı değerleri hesap edilmiştir. Çizelge 3’de Beykoz girişi, alan 8-1 deki parlantı değerinin örnek hesabı görülmektedir. "8-1" halkasal bölgenin yaklaşık %10’u gök ve %90’ı çimendir. Gök ve çimenin %100 parlantı değerini yüzdelik oranlarla çarparak toplam  $\sum L_{ij}$  değeri bulunmuştur.

Çizelge 3: Beykoz girişi alan 8-1 parlantı hesabı

Beykoz Girişi Alan No:"8-1"			
	"Kuzey yarıküre" ve "doğu-batı" seçeneği için parlantı değerleri ( $cd/m^2$ )	Yaklaşık belirlenen % değerler	Lij değerleri ( $cd/m^2$ )
Gök	12	10%	1,2
Yol	4	yok	0
Kaya	2	yok	0
Bina	6	yok	0
Kar	15	yok	0
Çimen	2	90%	1,8
Tünel	0	yok	0
"8-1" alanına ait $\sum L_{ij}$ değeri :			3
"8-1" alanına ait $\sum L_{ije}$ değeri= $0,8 \sum L_{ij} + 0,1 =$			2,5

$L_{seq}$  hesabı yapılabilmesi için  $L_{ije}$  gözün önünde her bir bölümün ışıklık düzeyinin ( $cd/m^2$ ) hesaplanması gerekmektedir.  $L_{ije} = \tau_{oc} \cdot L_{ij} + L_{oc}$  formülü ile hesaplanmaktadır. Bu hesaplarda  $\tau_{oc} = 0,8$  ve “örtü parlantı değerleri ortalama değer olarak  $L_{oc} = 70 cd/m^2$  ve  $L_{atm} = 140 cd/m^2$  olarak kabul edilmektedir. Diğer 104 alan içinde aynı

işlem yapılarak araç içinden sürücünün algıladığı parlantı değeri hesaplanmaktadır. Bütün bölgelerin hesabı Ek A gösterilmiştir.

$$L_{ije} = \tau_{oc} \cdot L_{ij} + L_{oc} \quad (7)$$

$$L_{ije} = 146,58 cd/m^2 \quad (8)$$

$$L_{seq} = 5,1 * 10^{-4} * 146,58 \quad (9)$$

$$L_{seq} = 74,756 cd/m^2 \quad (10)$$

$L_{seq}$  hesaplandıktan sonra  $L_{TH}$  hesabı yapılmaktadır.

$$L_m = \frac{(\tau_{oc} \cdot L_{atm} + L_{oc} + L_{seq})}{(\tau_{oc} \cdot \tau_{atm})} \quad (11)$$

$$L_m = \frac{(0,8 \cdot 140 + 70 + 74,756)}{(0,8 \cdot 1)} \quad (12)$$

$$L_m = 320,94 cd/m^2 \quad (13)$$

$$L_{TH} = \frac{L_m}{\frac{1}{C_m} \left( \frac{\rho}{\pi \cdot q_c} - 1 \right) - 1} \quad (14)$$

$$L_{TH} = \frac{320,94}{\frac{1}{-0,28} \left( \frac{0,2}{\pi \cdot 0,6} - 1 \right) - 1} \quad (15)$$

$$L_{TH} = 146,4 cd/m^2 \quad (16)$$

Burada,

$L_{seq}$  = toplam eşdeğer peçeleme ışıklık düzeyi [ $cd/m^2$ ]  
 $L_{ije}$  = araç içinde gözün önünde her bir bölümün ışıklık düzeyi [ $cd/m^2$ ]  
 $L_{ij}$  = araç dışında, ön camın önünde ölçülmüş olarak her bölümün ortalama ışıklık düzeyi [ $cd/m^2$ ]  
 $L_{oc}$  = araç ön camındaki “örtü parlantısı” [ $cd/m^2$ ]  
 $L_m$  = göz önündeki toplam ışıklık düzeyi [ $cd/m^2$ ]  
 $\tau_{oc}$  = araç ön camının % geçirme faktörü  
 $\rho$  = yansıtma faktörü  
 $q_c$  = kontrast faktörü  
 $C_m$  = algılanan kontrast değeri

Beykoz girişi  $L_{TH}$  değeri yapılan hesaplar neticesinde 146,4  $cd/m^2$  bulunmuştur. Hesaplarda kolaylık olması için  $L_{TH} \cong 146 cd/m^2$  olarak alınmıştır. Aynı şekilde Kavacık girişi için yapılan hesapta  $L_{TH} \cong 133 cd/m^2$  olarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalara göre değerler aşağıda görülmektedir.

$L_{th}$ : 146  $cd/m^2$  Beykoz giriş (1. tüp)

$L_{th}$ : 133  $cd/m^2$  Kavacık giriş (2. tüp)

$L_{içbölge}$ : 3.45  $cd/m^2$  ( İç Bölge Aydınlatması Parlantı Değeri)

$L_{gece}$ : 1.74  $cd/m^2$  ( Gece Aydınlatması Parlantı Değeri)

### 2.3. Lambaların Özellikleri

Çizelge 4’te aydınlatmada kullanılan lambaların en temel özelliklerinin karşılaştırılması görülmektedir. Çizelge 4 incelendiğinde LED’lerin birçok bakımdan üstün oldukları görülür. LED’lerin en önemli eksikliği ise ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Fakat ekonomik ömürlerinin yüksek olması, etkinlik faktörlerinin yüksek olması nedeniyle birkaç yılda bu maliyeti amorti etmek mümkündür. Halit

Ulukurt tüneline kullanılan sodyum buharlı lamba bir deşarj lambasıdır ve Çizelge 4'e göre LED'lere kıyasla hem etkinlik faktörü hem de ekonomik ömrü daha düşüktür. Bu da LED yerine sodyum buharlı lamba kullanılmasının enerji tüketimi açısından daha maliyetli olacağını gösterir.

Çizelge 4. Lambaların özelliklerinin kıyaslandırılması [7]

Lamba Özelliği	Enkandesan lamba	Flüoresan lambalar	Deşarj lambaları	Beyaz LED
Etkinlik faktörü [Lümen/Watt]	Düşük 15-25	Yüksek 75-90	Yüksek 60-90	En Yüksek 90-100
Renksel geriverim	100	85	50-70	80
Ekonomik Ömür[saat]	Çok düşük 2000	Orta 20000	Orta 10000	Yüksek 35000-50000
Lamba malzemesi	Toksik içermez	Toksik içerir	Toksik içerir	Toksik içermez

Örnek sistem tüneline şu anda armatürlerde 400W ve 150W sodyum buharlı lambalar kullanılmaktadır. 400W lamba kullanılan armatürlerin birim enerji tüketimi balast ve ateşleyici ile birlikte 434,5 Wh ve tünelde 64 adet kullanılmaktadır. 150W lamba kullanılan armatürlerin birim enerji tüketimi balast ve ateşleyici ile birlikte 170,6 Wh ve tünelde 44 adet kullanılmaktadır [9].

Tünel aydınlatması LED armatür ile yapıldığında 96 adet LED'li 700mA akım çeken ve 48 adet LED'li 500mA akım çeken armatürler kullanılmıştır. 96 LED lamba kullanılan armatürlerin birim enerji tüketimi 213Wh ve 48 LED lamba kullanılan armatürlerin birim enerji tüketimi 75Wh'tır.

## 2.4. Aydınlatma Kademelerinin Parıltı Değerleri

Tünel aydınlatma tasarımında değişken parıltı değeri sağlanması için kademeli sistem tasarlanmıştır. Aynı zamanda düşük parıltı seviyesinde en düşük kademede armatürler kullanılarak enerji tasarrufu ve istenen parıltı değeri sağlanmaktadır.

CIE-88 standartlarına göre tasarım 6 kademe olarak yapılmaktadır. Bu kademeler %100, %75, %50, %25, gündüz ve gece kademesidir. Halit Ulukurt tüneli 1.tüp için kademe değerleri hesaplanmıştır.

- 1.Kademe  $L_{%100}$  : 146 cd/m<sup>2</sup>
- 2.Kademe  $L_{%75}$  :109,5 cd/m<sup>2</sup>
- 3.Kademe  $L_{%50}$  :73 cd/m<sup>2</sup>
- 4.Kademe  $L_{%25}$  :36,5 cd/m<sup>2</sup>
- 5.Kademe  $L_{Gündüz}$  :3,45 cd/m<sup>2</sup>
- 6.Kademe  $L_{Gece}$  :1,74 cd/m<sup>2</sup>

## 3. CIE-88 Göre LED Aydınlatma Tasarımı

Hesaplanan parametrelere göre LED armatür için aydınlatma tasarımı Tunnel v3 bilgisayar programı ile yapılmıştır. Tasarım için gerekli parametreler tünelin geometrik yapısı, duvarların yüzey cinsi ve yapılan hesaplamalar sonunda elde edilen parametreler kullanılmıştır.

Programla yapılan tünel aydınlatma sonucunda CIE-88 Yol Tünelleri ve Alt Geçitler Aydınlatması Kılavuzdaki şartları sağlaması için 96LED 700mA ampulden tüp 1 için 140 adet,

tüp 2 için 128 adet ve 48LED 500mA ampulden tüp 1 için 102 adet ve tüp 2 için 128 adet ampul gerektiği görülmüştür.

Standartlara göre  $L_{Gündüz}$  5. kademe değeri 3,48 cd/m<sup>2</sup> olarak çizelge 5'te görülmektedir. Örnek tünelde 5.kademe parıltı değeri 3,45 cd/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. 3,48 cd/m<sup>2</sup> > 3,45 cd/m<sup>2</sup> olduğu için standarda uygun olarak gündüz kademesi için seçilebilir.

Çizelge 5. Beşinci kademe ortalama parıltı değeri.

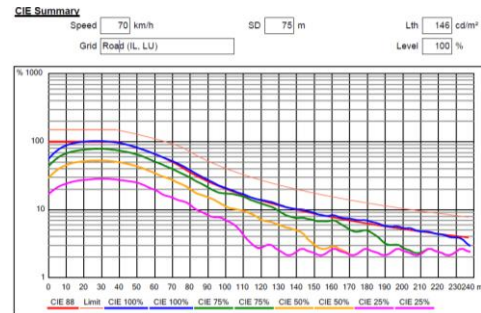
Parlaklık	Ortalama (A) (cd/m <sup>2</sup> )	Min/Ort (%)	Mak/Ort (%)	Min (cd/m <sup>2</sup> )	Mak (cd/m <sup>2</sup> )
Varsayılan Gözlemci-1 (-60.00; 1.88; 1.50)	3,48	69,06	50,78	2,4	4,73
Varsayılan Gözlemci-2 (-60.00; 5.63; 1.50)	3,48	69,06	50,78	2,4	4,73

Yapılan hesaplamalara göre  $L_{Gece}$  6. kademe değeri 1,74 cd/m<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. 1,74 cd/m<sup>2</sup> = 1,74 cd/m<sup>2</sup> olduğu için standarda uygun olarak gece kademesi için hesap yapılmıştır.

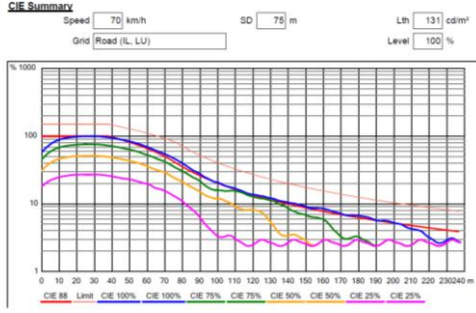
Çizelge 6. Altıncı kademe ortalama parıltı değeri.

Parlaklık	Ortalama (A) (cd/m <sup>2</sup> )	Min/Ort (%)	Mak/Ort (%)	Min (cd/m <sup>2</sup> )	Mak (cd/m <sup>2</sup> )
Varsayılan Gözlemci-1 (-60.00; 1.88; 1.50)	1,74	69,06	50,78	1,2	2,37
Varsayılan Gözlemci-2 (-60.00; 5.63; 1.50)	1,74	69,06	50,78	1,2	2,37

Bütün kademelerin CIE-88 standardına uygunluğu CIE eğrisine göre test edilmiştir. Grafikte CIE-88 eğrisi kırmızı renkli gösterilmekte ve ideal tasarımın tünel boyunca olması gereken parıltı seviyesini göstermektedir. Limit eğrisi tasarım sonucunda bütün kademelerde parıltı seviyesinin geçmemesi gereken parıltı seviyesidir ve turuncu renk ile gösterilmektedir. Kademelerdeki tünel boyunca parıltı seviyelerini de CIE-88 eğrisine uygunluğunu denetleyebilmek için aynı grafikte 100% kademesi mavi, 75% kademesi yeşil, 50% kademesi sarı ve 25% kademesi pembe renkte gösterilmektedir. Aşağıda LED armatürlerle tasarım sonucunda oluşan eğriler 1.tüp ve 2.tüp için gösterilmiştir. Her iki grafikte de %100 kademesinde CIE-88 eğrisinin birebir parıltı değerlerine ulaşılmaktadır. Her iki tüp için yapılan aydınlatma tasarımı ve armatür adetleri standartlara uygundur.



Şekil 6: 1. tüp CIE-88 eğrisi.



Şekil 7: 2. tüp CIE-88 eğrisi.

#### 4. LED ve Sodyum Buharlı Armatür Enerji Tüketim Karşılaştırması

LED aydınlatma tasarımında kullanılan armatürlerle ve mevcut örnek tünelde kullanılan sodyum buharlı lambaların yıllık tüketim üzerinden enerji tüketimi karşılaştırılması Çizelge 7 de gösterilmiştir. Örnek tünel sodyum buharlı lamba enerji tüketim değerleri İstanbul tünel yönetim ve işletme şefliğinden (İSBAK) alınmıştır.

Yıllık çalışma saatine göre sodyum buharlı lamba kullanılması halinde enerji tüketimi 207563 kWh iken LED lamba kullanılması halinde enerji tüketimi 113096 kWh tir. LED armatür %45.5 oranında bir enerji tasarrufu sağlamaktadır.

Çizelge 7: Kademelere göre enerji tüketimi [9].

Kademe	Yıllık Çalışma Saati	Sodyum Buharlı Ampul		LED Ampul	
		Güç (W)	Tüketim (kWh)	Güç (W)	Tüketim (kWh)
Gece	8760 H	399	82335	2925	25623
Gündüz	4400 H	9399	41356	2925	12870
25%	3500 H	8829	30902	7668	26838
50%	2800 H	8828	24718	7542	21118
75%	2000 H	8829	17658	8694	17388
100%	1200 H	8828	10594	7716	9259
<b>Toplam</b>			<b>207563</b>		<b>113096</b>

#### 5. Sonuçlar

Bu çalışmada İstanbul Beykoz'da bulunan Halit Ulukurt Tüneli için Uluslararası CIE-88 Yol Tünelleri ve Alt Geçitler Aydınlatma Kılavuzuna uygun aydınlatma tasarımı yapılmıştır. LED armatür tasarımında tünel aydınlatmasında kullanılan bir yazılım olan Tunnel v3 programı kullanılmıştır. Tünel aydınlatma tasarımı için gerekli olan fren mesafesi ve eşik bölgesi parlıtsı hesaplanmıştır. Fren mesafesi 75,27 m olarak hesaplanmıştır. Ayrıca eşik parlıtsı değerleri 146 cd/m<sup>2</sup> Beykoz giriş (1. tüp) için, 133 cd/m<sup>2</sup> Kavacık giriş (2. tüp) için, 3.45 cd/m<sup>2</sup> iç bölge aydınlatması parlıtsı değeri, 1.74 cd/m<sup>2</sup> gece aydınlatması parlıtsı değeri olarak hesaplanmıştır.

LED armatürlerin kullanılması CIE-88 standartlarına göre eşik parlıtsı değeri ve tünel içi bölgelerdeki minimum olması gereken parlıtsı değerlerini sağlamaktadır. CIE-88 Yol Tünelleri ve Alt Geçitler Aydınlatması Kılavuzunda bahsedilen CIE eğrisi ile tasarım sonunda oluşan aydınlık seviyesi kesişmektedir.

Çalışmanın devamında Halit Ulukurt tüneline şu an kullanılan sodyum buharlı armatürler yerine LED armatürler olması halinde yıllık enerji tüketiminin %45.5 oranında azalacağı görülmüştür. Bu rakam oldukça yüksektir. LED armatürlerin tünellerde kullanılmasıyla önemli bir verimlilik sağlanacağı görülmüştür. LED'lerin etkinlik faktörlerinin, ekonomik ömürlerinin, renksel geriverimlerinin diğer lambalara kıyasla yüksek olması nedeniyle rahatlıkla tünel aydınlatmasında kullanılabilir.

Son yıllarda şehir içi trafiğine bir çözüm olarak sunulan tünellerin aydınlatmasının ne derece doğru yapıldığının araştırılması bu çalışmayı yapmak için motive edici bir etken olmuştur ve bazı uygulamaların yanlış yapıldığı görülmüştür. Fren mesafesi hesabında ve eşdeğer parlıtsı hesabında yapılan hatalar kullanılan armatür sayısını ve kullanılan lambaların gücünü artırmıştır. Kademelendirme sisteminin doğru çalışmaması sürekli sabit kademelerin çalıştırılması gibi çokça karşılaşılan hatalar gereksiz enerji tüketimine sebep olmuştur. Bazı uygulamalarda tünel içi aydınlatmasının gerekenden çok fazla armatür kullanılarak yapıldığı görülürken bazı uygulamalarda da armatürlerin LED'lerle değiştirilmesinin enerji tasarrufu açısından uygun olacağı görülmüştür.

#### 6. Kaynaklar

- [1] Özkaya, M., Tüfekçi T., 'Aydınlatma Tekniği', Birsen Yayınevi, 2011.
- [2] Onaygil, S., 'Tünel aydınlatmasında eşik bölgesi parlıtsısının tayini', İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 1990.
- [3] CIE Technical Report-88-2004. Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses, 2004.
- [4] İzbek, K.K., 'Tünel Aydınlatma Tekniği', İstanbul, 2006.
- [5] İzbek, K.K., "Yüksek Tünel Aydınlatma Tasarımında "Fren Mesafesi" ve Ülkemizdeki Bazı Yanlış Uygulamalar", İstanbul, (2009).
- [6] Cengiz, M.S., Rüstemli S., 'The relationship between height and efficiency and solution offerings in tunnel and sub-sea tunnels', Light & Engineering, vol 22, No.2, pp. 76-83, 2014.
- [7] Leung, H.M.S., 'LED Lighting Application in Long Railway Tunnels', The Hong Kong Institution of Engineers Transactions, vol.19, No.4, pp 42-46, 2012
- [8] <http://www.schreder.com/eg/en-egs/LearningCentre/Dossiers/Pages/Optimum-safety-for-LED-tunnel-lighting-solutions.aspx>
- [9] İSBAK-İstanbul Tünel Yönetim ve İşletme Şefliği <http://tunnel.isbak.com.tr/>
- [10] İzbek, K.K., 'C.I.E.88- 1990/Tünel Aydınlatma Kılavuzu, İstanbul, 2009'

**EK – A**

Şekil A 1: Halkasal bölgelerin parıtlı hesapları

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	Gök	12												
	Yol	4												
	Kaya	2												
	Bina	6												
	Çimen	2												
	Tünel	0	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Lije= 0,8.Lij+0,1		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1,2
2	Gök	12												
	Yol	4												
	Kaya	2												
	Bina	6												
	Çimen	2												
	Tünel	0	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Lije= 0,8.Lij+0,1		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1,2
3	Gök	12												
	Yol	4												
	Kaya	2												
	Bina	6												
	Çimen	2												
	Tünel	0	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Lije= 0,8.Lij+0,1		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1,2
4	Gök	12												
	Yol	4				50,00%	100,00%	100,00%						
	Kaya	2												
	Bina	6												
	Çimen	2												
	Tünel	0	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%				100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Lije= 0,8.Lij+0,1		0,1	0,1	0,1	0,1	1,7	3,3	3,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	9,2
5	Gök	12												
	Yol	4				75,00%	100,00%	100,00%	100,00%					
	Kaya	2												
	Bina	6	100,00%	90,00%	50,00%	50,00%						90,00%	100,00%	
	Çimen	2			5,00%	25,00%								
	Tünel	0		10,00%	45,00%	50,00%					100,00%	100,00%	10,00%	
Lije= 0,8.Lij+0,1		4,9	4,42	2,58	2,5	2,9	3,3	3,3	3,3	0,1	0,1	4,42	4,9	36,72
6	Gök	12												
	Yol	4				50,00%	100,00%	100,00%	100,00%	20,00%				
	Kaya	2												
	Bina	6								40,00%	20,00%			
	Çimen	2	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	50,00%			40,00%	80,00%	100,00%	100,00%	
	Tünel	0												
Lije= 0,8.Lij+0,1		1,7	1,7	1,7	1,7	2,5	3,3	3,3	3,3	3,3	2,34	1,7	1,7	28,24
7	Gök	12												
	Yol	4				50,00%	100,00%	100,00%	100,00%	20,00%				
	Kaya	2	50,00%											
	Bina	6								40,00%	20,00%			
	Çimen	2	50,00%	100,00%	100,00%	100,00%	50,00%			40,00%	80,00%	100,00%	100,00%	
	Tünel	0												
Lije= 0,8.Lij+0,1		1,7	1,7	1,7	1,7	2,5	3,3	3,3	3,3	3,3	2,34	1,7	1,7	28,24
8	Gök	12	10,00%	20,00%										
	Yol	4				50,00%	100,00%	100,00%	100,00%	50,00%				
	Kaya	2											80,00%	
	Bina	6		40,00%	30,00%					25,00%	10,00%			
	Çimen	2	90,00%	40,00%						25,00%	90,00%	100,00%	20,00%	
	Tünel	0			70,00%	50,00%								
Lije= 0,8.Lij+0,1		2,5	4,58	1,54	1,7	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	2,02	1,7	1,7	32,24
9	Gök	12		50,00%								10,00%		
	Yol	4				80,00%			70,00%					
	Kaya	2								30,00%	40,00%			
	Bina	6								10,00%	10,00%			
	Çimen	2		50,00%	100,00%	100,00%	20,00%			10,00%	30,00%	40,00%	30,00%	
	Tünel	0								10%	30%			
Lije= 0,8.Lij+0,1		0,1	5,7	1,7	1,7	2,98	0,1	0,1	2,98	1,54	1,38	1,54	0,1	19,92