

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ARKA-AYDINLATMALI VE KENAR-AYDINLATMALI LCD ARKAIŞIK
ÜNİTESİ TASARIMI VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

GÜNEY KARADENİZ

FİZİK ANABİLİM DALI

**ANKARA
2021**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ARKA-AYDINLATMALI VE KENAR-AYDINLATMALI LCD ARKAIŞIK ÜNİTESİ TASARIMI VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Güney KARADENİZ

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Şengül KURU

Bu tez çalışmasında, ilk olarak aydınlatma optiği, fotometri ve radyometri ile ilgili temel kavramlar gözden geçirilmiştir. Daha sonra, LCD arka ışık ünitelerinde kullanılan birimler ve LightTools optik tasarım programı anlatılmıştır. Son olarak, LightTools optik tasarım programı kullanılarak aynı ölçülerde arka ve kenar-aydınlatmalı LCD arka ışık üniteleri tasarlanmış ve optik özellikleri karşılaştırılmıştır. Bu tez kapsamında tasarlanan arka ışık üniteleri üretilebilir durumdadır.

Ocak 2021, 66 sayfa

Anahtar Kelimeler: Sıvı kristal ekran (LCD), optik tasarım, arka ışık ünitesi, LightTools

ABSTRACT

MSc. Thesis

DESIGN OF DIRECT-LIT AND EDGE-LIT LCD BACKLIGHT UNIT AND COMPARISON OF OPTICAL PROPERTIES

Güney KARADENİZ

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor : Prof. Dr. Şengül KURU

In this thesis, firstly the basic concepts of lighting optics, photometry and radiometry were reviewed. Then, the units used in LCD backlight units and LightTools optical design program are explained. Finally, using the LightTools optical design program, the same size back and edge-lit LCD backlight units were designed and their optical properties were compared. The backlight units designed within the scope of this thesis can be produced.

January 2021, 66 pages

Key Words : Liquid Crystal Display (LCD), optical design, backlight unit, LightTools

TEŞEKKÜR

Eğitim hayatımda desteği olan bütün öğretmenlerime, çalışma hayatımdaki desteklerinden dolayı yöneticilerim Alper ÜLKÜ ve Esin UÇAR'a, lisans eğitimimden bu zamana kadar ilminden faydalandığım, çalışmalarında desteklerini esirgemeyen ve tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu hoşgöründen dolayı değerli hocam Prof. Dr. Şengül KURU'ya (Ankara Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı) sonsuz teşekkürler.

Beni yetiştiren ve bugünlere gelmemi sağlayan aileme ve hiçbir zaman desteğini esirgemeyen sevgili eşim Zehra KARADENİZ'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Güney KARADENİZ
Ankara, Ocak 2021

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI	
ETİK.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. AYDINLATMA OPTİĞİNİN TEMELLERİ.....	2
2.1 Işık ve Elektromanyetik Radyasyon.....	2
2.2 Aydınlatma Optiğinde Temel Kavramlar.....	3
2.2.1 Yansıma.....	3
2.2.1.1 Yansıtıcı yansıma.....	4
2.2.1.2 Yayılmış yansıma.....	6
2.2.1.3 Dağınık yansıma.....	6
2.2.1.4 Toplam iç yansıma.....	6
2.2.1.5 Spektral yansıma.....	7
2.2.2 İletim.....	8
2.2.2.1 Görüntü korumalı iletim.....	8
2.2.2.2 Yayılmış iletim.....	8
2.2.2.3 Dağınık iletim.....	9
2.2.2.4 Spektral iletim.....	9
2.2.3 Kırılma (Snell yasası).....	10
2.2.3.1 Yansıma ve kırılma indisi.....	12
2.2.4 Soğurma.....	12
2.2.5 Girişim.....	14
2.2.6 Kırınım.....	15
2.2.7 Dağılım (Dispersiyon).....	16
3. RADYOMETRİ VE FOTOMETRİ.....	17
3.1 Fiziksel Fotometrinin Temelleri.....	17
3.2 Temel Fotometrik Birimi - Kandela.....	19
3.3 Fotometri ve Radyometride Nicelikler ve Birimler.....	20
3.3.1 Radyant akısı ve aydınlatma akısı.....	20
3.3.2 Radyant şiddeti ve aydınlatma şiddeti.....	21
3.3.3 Parlaklık ve aydınlık.....	22
3.3.4 Işıma ve parıldama.....	22
3.3.5 Radyant çıkışı ve aydınlatma çıkışı.....	23
3.3.6 Radyant etkisi ve aydınlatma etkisi.....	23
3.3.7 Radyant enerjisi ve aydınlatma enerjisi.....	23
3.3.8 Toplam radyant akısı ve toplam aydınlatma akısı.....	24
3.3.9 SI birimleri ve İngiliz birimleri arasındaki ilişki.....	24
3.4 Fotometri ve Radyometri İlkeleri.....	25
3.4.1 Ters kare yasası.....	25
3.4.2 Lambert kosinüs yasası.....	26
3.4.3 Lambert emisyonu ve yansıması.....	26

3.4.4 Aydınlik ve parıldama arasındaki ilişki.....	27
4. ARKA IŞIK ÜNİTESİ ÇEŞİTLERİ VE BİRİMLERİ.....	29
4.1 Arka Işık Ünitesi Çeşitleri.....	29
4.2 Arka Işık Ünitesi Birimleri.....	31
4.2.1 LED.....	31
4.2.2 Işık kılavuzu plakası	33
4.2.3 Reflektör film.....	35
4.2.4 Difüzör.....	35
4.2.5 BEF ve DBEF (Parlaklık arttırıcı filmler).....	35
4.3 Sıvı Kristal Ekran (LCD).....	37
5. LIGHTTOOLS PROGRAMI VE ARKA IŞIK ÜNİTESİ TASARIMI.....	44
5.1 LightTools.....	44
5.2 Arka Işık Üniteleri Ölçüm Sistemleri.....	48
5.3 Arka Işık Üniteleri Tasarımları.....	52
5.3.1 Arka-aydınlatmalı arka ışık ünitesi.....	52
5.3.2 Kenar-aydınlatmalı arka ışık ünitesi.....	58
5.3.3 Arka ışık ünitelerinin karşılaştırılması.....	61
6. SONUÇ.....	62
KAYNAKLAR.....	64
ÖZGEÇMİŞ.....	66

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

nm	Nanometre
°C	Santigrat
cm	Santimetre
Hz	Hertz
µm	Mikrometre
lm	Lümen
W	Watt
cd	Kandela
sr	Steradyan
lx	Lüks
K	Kelvin
m	Metre
J	Joule
s	Saniye
AlGaAs	Alüminyum Galyum Arsenit
AlInGaP	Alüminyum Galyum İndiyum Fosfit
InGaN	İndiyum galyum nitrür
fc	Footcandle
fL	FootLambert
ft	Foot
mm	Milimetre

Kısaltmalar

AC	Alternatif Akım (<i>Alternative Current</i>)
AMTFT	Aktif Matris İnce Film Transistör (<i>Active Matrix Thin Film Transistor</i>)
BEF	Parlaklık Artırıcı Film (<i>Brightness Enhancement Film</i>)
BRDF	Çift Yönlü Yansıtma Dağılım Fonksiyonu (<i>Bidirectional Reflectance Distribution Function</i>)
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım (<i>Computer Aided Design</i>)
CGPM	Genel Ağırlıklar ve Ölçüler Konferansı (<i>Conférence Générale des Poids et Mesures</i>)
CIE	Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (<i>Commission Internationale de l'Éclairage</i>)
CIPM	Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Komitesi (<i>Comité International des Poids et Mesures</i>)
DBEF	Çift Parlaklık Geliştirme Filmi (<i>Dual Brightness Enhancement Film</i>)
DC	Doğru Akım (<i>Direct Current</i>)
LCD	Sıvı Kristal Ekran (<i>Liquid Crystal Display</i>)
LED	Işık Yayan Diyot (<i>Light Emitting Diode</i>)
LMD	Işık Ölçüm Cihazı (<i>Light Measurement Device</i>)
MIM	Metal-Yalıtkan-Metal (<i>Metal-Insulator-Metal</i>)
PC	Polikarbonat (<i>Polycarbonate</i>)
PET	Polietilen tereftalat (<i>Polyethylene terephthalate</i>)
PMMA	Polimetilmetakrilat (<i>Polymethyl methacrylate</i>)
RGB	Kırmızı Yeşil Mavi (<i>Red Green Blue</i>)

SI	Uluslararası Sistem (<i>Système International</i>)
SVGA	Süper Video Grafik Dizisi (<i>Super Video Graphics Array</i>)
TFT	İnce Film Transistör (<i>Thin Film Transistor</i>)
UV	Ultraviyole



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Elektromanyetik spektrum.....	2
Şekil 2.2 Bir yüzeyden yansıtıcı, yayılmış ve dağınık yansımalar.....	3
Şekil 2.3 Yansıtıcı yansıma.....	4
Şekil 2.4 Fresnel denklemleri için gösterim.....	5
Şekil 2.5 Toplam iç yansıma.....	7
Şekil 2.6 Kırmızı ve mavi kumaşın spektral yansıması.....	7
Şekil 2.7 Görüntü korumalı iletim.....	8
Şekil 2.8 Spektral iletim.....	10
Şekil 2.9 Snell kırılma yasası.....	11
Şekil 2.10 Lambert soğurma yasası.....	13
Şekil 2.11 Beer-Lambert yasası.....	14
Şekil 2.12 Girişim.....	15
Şekil 2.13 Kırınım.....	15
Şekil 2.14 Dağılım.....	16
Şekil 3.1 CIE $V(\lambda)$ fonksiyonu.....	18
Şekil 3.2 Radyant şiddeti ve aydınlatma şiddeti.....	21
Şekil 3.3 Katı açı.....	21
Şekil 3.4 Parlaklık ve aydınlık.....	22
Şekil 3.5 Işıma ve parıldama.....	23
Şekil 3.6 Radyant çıkışı ve aydınlatma çıkışı.....	23
Şekil 3.7 Lambert kosinüs yasası.....	26
Şekil 3.8 Lambertian yüzey.....	27
Şekil 3.9 Aydınlık ve parıldama arasındaki ilişki.....	28
Şekil 4.1 Kenar-aydınlatmalı LED paneli.....	29
Şekil 4.2 Arka-aydınlatmalı LED paneli.....	29
Şekil 4.3 Kenar ve arka-aydınlatmalı arka ışık ünitelerinin yandan görünüşleri.....	30
Şekil 4.4 LED paketleri üretme süreci.....	31
Şekil 4.5 LED çipleri ve fosfor malzemelerinden oluşan çeşitli beyaz LED konfigürasyonları.....	32
Şekil 4.6 (a) mavi çip ve sarı fosfor (düz çizgi), mavi çip ve kırmızı-yeşil fosfor (kesikli çizgi) sistemi (Şekil 4.5 (a)) ve (b) R, G, B LED sistemi (Şekil 4.5 (c)) beyaz LED spektrumları.....	33
Şekil 4.7 Işık kılavuzu plakasının çalışma prensibi.....	34
Şekil 4.8 Işık kılavuzu plakası.....	34
Şekil 4.9 BEF çalışma prensibi.....	36
Şekil 4.10 DBEF çalışma prensibi.....	37
Şekil 4.11 Küçük bir tek renkli LCD.....	37
Şekil 4.12 İki kutuplayıcı ve bir sıvı kristalin kombinasyonu.....	38
Şekil 4.13 Voltaj uygulandığında LCD karanlık görünür.....	39
Şekil 4.14 Pasif matris sisteminin yapısı.....	40
Şekil 4.15 Pasif matris LCD ekran.....	40
Şekil 4.16 TFT LCD yapısı.....	42
Şekil 4.17 TFT LCD ekran.....	42
Şekil 5.1 LightTools ana ekranı.....	45
Şekil 5.2 LightTools sistem kılavuzu.....	45
Şekil 5.3 LightTools iki ve üç boyutlu parça tasarlama, çoğaltma bölümü.....	46

Şekil 5.4 LightTools üç boyutlu parça modeli penceresi.....	46
Şekil 5.5 LightTools simülasyon sonuç bölümü.....	47
Şekil 5.6 LightTools optik özellik tanımlama penceresi.....	47
Şekil 5.7 LightTools LED kütüphanesi.....	48
Şekil 5.8 5-nokta veya 9-nokta ölçüm sistemi.....	49
Şekil 5.9 Işık Ölçüm Cihazı (Light Measurement Device (LMD)) ve ekranın sabitlendiği bir laboratuvar ortamında (karanlık oda), ekrandan 500 mm uzaklıkta tipik 2° alan açılı spotmetre LMD örneği.....	50
Şekil 5.10 LMD ve ekranın güvenli bir şekilde sabitlendiği bir optik ray düzenlenişinde, ekrandan 1 m uzaklıkta tipik 1° açıklıklı LMD örneği.....	50
Şekil 5.11 Optik-fourier dönüşümü LMD örneği. Ölçüm cihazı ekran yüzeyi üzerine kurulmuştur.....	51
Şekil 5.12 LightTools luminance meter ölçüm özellikleri.....	51
Şekil 5.13 7 inç LCD ölçüleri.....	52
Şekil 5.14 Arka-aydınlatmalı arka ışık ünitesi tasarımının üstten görünüşü.....	53
Şekil 5.15 Arka-aydınlatmalı arka ışık tasarımının yandan görünüşü.....	53
Şekil 5.16 Birinci tasarım çalışmasında LED'ler arası mesafe.....	54
Şekil 5.17 Birinci tasarım çalışması parıldama sonuçları.....	54
Şekil 5.18 İkinci tasarım çalışmasında LED'ler arası mesafe.....	55
Şekil 5.19 İkinci tasarım çalışması parıldama sonuçları.....	55
Şekil 5.20 Üçüncü tasarım çalışmasında LED'ler arası mesafe.....	56
Şekil 5.21 Üçüncü tasarım çalışması parıldama sonuçları.....	56
Şekil 5.22 Dördüncü tasarım çalışmasında LED'ler arası mesafe.....	57
Şekil 5.23 Dördüncü tasarım çalışması parıldama sonuçları.....	57
Şekil 5.24 Kenar-aydınlatmalı arka ışık ünitesinin tasarımının ve LED'ler arası mesafelerin ölçüleri.....	59
Şekil 5.25 Tasarım başlangıcında parıldama sonucu.....	59
Şekil 5.26 Tasarımın son halinin parıldama sonucu.....	60

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Bazı yaygın malzemeler için yansımalar.....	5
Çizelge 2.2 Bazı yaygın malzemeler için iletimler.....	9
Çizelge 2.3 Vakum ortamında 589 nm dalga boylu ışık ile ölçüle çeşitli malzemeler için kırılma indisleri.....	11
Çizelge 3.1 Fotometri ve radyometride kullanılan nicelikler ve birimler.....	20
Çizelge 3.2 İngiliz birimleri ve tanımları.....	25
Çizelge 3.3 İngiliz birimleri ve SI birimleri arasında dönüşüm.....	25
Çizelge 4.1 Kenar ve arka-aydınlatmalı LED panellerinin kıyaslanması.....	30
Çizelge 5.1 Dördüncü tasarım çalışmasının beş nokta ölçüm koordinatları ve parıldama sonuçları.....	58
Çizelge 5.2 Tasarımın son halinin beş nokta ölçüm koordinatları ve parıldama sonuçları.....	60
Çizelge 5.3 Arka ışık ünitelerinin karşılaştırılması.....	61

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisinde ekranlar büyük öneme sahiptir. Sıvı kristal ekranlar (*Liquid Crystal Display* (LCD)) televizyonlardan bilgisayar monitörlerine, araba göstergelerinden makine göstergelerine kadar her yerde karşımıza çıkmaktadır. LCD tasarımı ve üretimi için mekanik, elektronik, yazılım, optik gibi pek çok temel bilim ve mühendislik alanlarından yararlanılır. Optik tasarım iki farklı alanda incelenir; görüntüleme optiği ve aydınlatma optiği. Görüntüleme optiği dürbün, teleskop, kamera gibi görüntü-oluşturma sistemlerinin optik tasarımının yapıldığı alandır. Aydınlatma optiği ev, sokak aydınlatması, projektör, arka ışık ünitesi gibi sistemlerin optik tasarımlarının yapıldığı alandır. Bu iki optik tasarım alanında farklı ışın izleme yöntemleri ve farklı programlar kullanılarak optik cihazlar tasarlanır. Görüntüleme optiği için Zemax, Code V gibi optik tasarım yazılımları kullanılırken, aydınlatma optiği için LightTools, Tracepro gibi optik tasarım yazılımları kullanılır.

LCD’lerde görüntü oluşması için arka kısımdan aydınlatılması gerekir. Bu aydınlatma kısmına arka ışık ünitesi (*backlight unit*) adı verilir ve aydınlatma optiği kullanılarak tasarlanır. Kenar aydınlatmalı ve arka aydınlatmalı arka ışık ünitesi olmak üzere iki çeşit arka ışık ünitesi vardır. Günümüzde arka ışık ünitesinde aydınlatma için ışık yayan diyotlar (*Light Emitting Diode* (LED)) kullanılmaktadır. Kenar-aydınlatmalı arka ışık ünitelerinde LED’ler arka ışık ünitesinin kenarlarında dizilerek aydınlatma sağlanmaktadır. Arka aydınlatmalı arka ışık ünitelerinde ise LED’ler arka ışık ünitesinin arkasına dizilerek aydınlatma sağlanmaktadır.

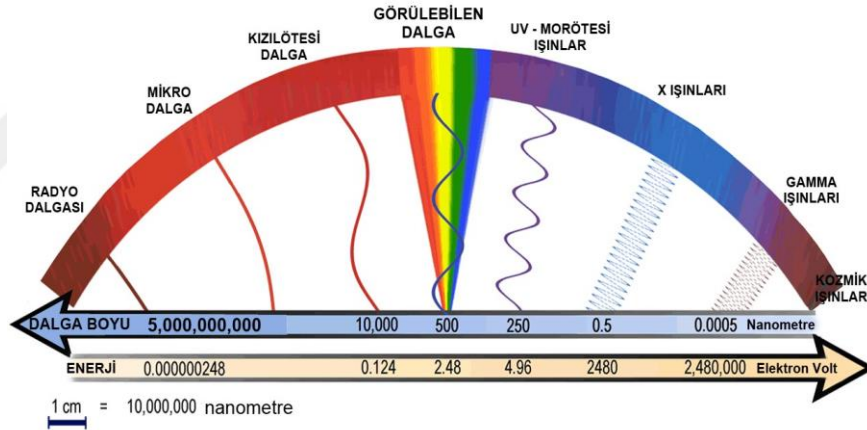
Bu tez çalışmasında, aydınlatma optiği tasarımının anlaşılabilmesi için ikinci bölümde temel optik konuları gözden geçirilmiştir. Üçüncü bölümde aydınlatma optiği için ölçüm sistemleri anlatılmıştır. Dördüncü bölümde arka ışık ünitesi çeşitleri ve bu ünitelerde kullanılan birimler anlatılmıştır. Son bölümde ise LightTools programı anlatılarak aynı ölçülere sahip arka ve kenar aydınlatmalı iki farklı tasarım yapılmış ve optik özellikleri karşılaştırılmıştır.

2. AYDINLATMA OPTİĞİNİN TEMELLERİ

2.1 Işık ve Elektromanyetik Radyasyon

Işık, uzayda hareket eden çeşitli elektromanyetik dalgaların sadece bir kısmıdır. Elektromanyetik spektrum, bir metre veya daha fazla dalga boyuna sahip radyo dalgalarından, bir metrenin milyarda birinden daha az dalga boyuna sahip X-ışınlarına kadar çok geniş bir aralığı kapsar. Optik radyasyon, spektrumdaki radyo dalgaları ile X-ışınları arasında yer alır ve ışın, dalga ve kuantum özelliklerinin benzersiz bir karışımını sergiler. X-ışını ve daha kısa dalga boylarında, elektromanyetik radyasyon davranışı parçacık olma eğilimindeyken, spektrumun uzun dalga boyu ucuna doğru davranış çoğunlukla dalgaya benzer. Görünür kısım, hem dalga hem de parçacık özelliklerini değişen derecelerde sergileyen bir ara konumda bulunur.

ELEKTROMANYETİK SPEKTRUM



Şekil 2.1 Elektromanyetik spektrum (<https://www.borled.com.tr>)

Tüm elektromanyetik dalgalar gibi, ışık dalgaları da üst üste binebilir, yönlü olarak polarize olabilir ve bir kenardan geçerken hafifçe bükülebilir. Bu özellikler, ışığın dalga boyuna göre filtrelenmesine veya lazerde olduğu gibi tutarlı bir şekilde yükseltilmesine izin verir.

Radyometride, ışığın yayılan dalga cephesi, düz bir çizgide hareket eden bir ışın olarak modellenir. Mercekler (lensler) ve aynalar bu ışınları öngörülebilir yollar boyunca yönlendirir. Büyük ölçekli bir optik sistemde dalga etkileri önemsizdir çünkü ışık dalgaları rastgele dağılır ve çok sayıda foton vardır (Ryer 1997).

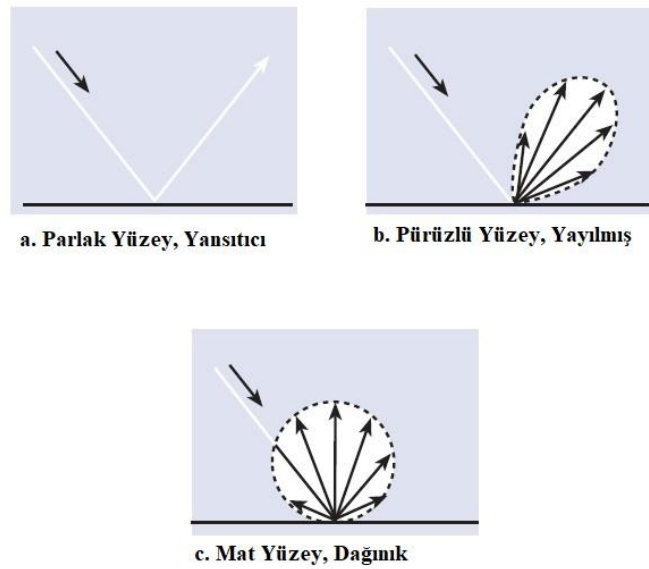
2.2 Aydınlatma Optiğinde Temel Kavramlar

Işık bir yüzeyle karşılaştığında, yüzeyden uzağa yansıyabilir veya yüzeyden geçerken doğrultusunu değiştirebilir yani kırılabilir. Işık malzemeye girdikten sonra, malzeme tarafından iletilebilir, emilebilir veya dağıtılabilir (veya bunların bazı kombinasyonları olabilir). Bu özellikler genellikle hem ışık hem de diğer elektromanyetik radyasyon formları için geçerlidir (Taylor 2000).

Yansıma, iletim, kırılma, girişim, kırınım ve dağılım, aydınlatmada optik radyasyonu kontrol etmek için kullanılan optik olaylardır (Dilaura vd. 2011).

2.2.1 Yansıma

Yansıma, bir malzeme üzerine düşen optik radyasyonun bir kısmının o malzemeyi geliş tarafından terk ettiği süreçtir. Malzemedan çıkan optik radyasyon miktarı, geliş ve çıkış yönlerine ve optik radyasyonun geliş dalga boyuna göre değişir. Çıkan radyasyonun geometrisi (mikardan bağımsız olarak) yansımayı tanımlamak için kullanılır. Genel olarak üç tür yansıma vardır: yansıtıcı, yayılmış veya dağınık. Geliş dalga boyuna bağımlılık, spektral yansıma olarak tanımlanır (Dilaura vd. 2011).

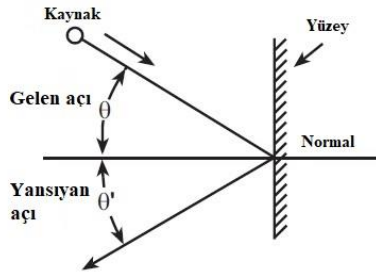


Şekil 2.2 Bir yüzeyden yansıtıcı, yayılmış ve dağınık yansımalar (Taylor 2000)

2.2.1.1 Yansıtıcı yansıma

Bir yüzey, gelen optik radyasyonun dalga boyuna kıyasla küçük olan düzensizliklere sahipse ve bölgesel olarak pürüzsüzse, cilalı olduğu ve yansıtıcı olarak yansıttığı söylenir. Yani, yansıyan ışın ile yüzeyin normali arasındaki açı (θ'), şekil 2.3'te gösterildiği gibi, gelen ışın ile normal arasındaki açıya (θ) eşit olacaktır. Optik olarak pürüzsüz olan elektriksel olmayan iletken malzemeler için, Fresnel denklemi bir yüzey tarafından yansıtılan optik radyasyon miktarını tanımlar. Çizelge 2.1, aydınlatmada kullanılan malzemeler için tipik yansıtıcı yansıma aralıklarını göstermektedir (Dilaura vd. 2011).

Şekil 2.4'te gösterildiği gibi bir yüzey üzerine gelen ışının tamamı yansımaz, bir kısmı geçer. Fresnel denklemlerinde yansıma (R) ve geçirme (T) katsayıları gelen, yansıyan ve geçen ışının genlikleri hakkında bilgi vermektedir.



Şekil 2.3 Yansıtıcı yansıma (Taylor 2000'den değiştirilerek alınmıştır)

Yansıma katsayısı,

$$R = \frac{I_r \cos \theta_r}{I_i \cos \theta_i}$$

ile verilir. Burada,

I_i = Gelen ışığın şiddeti

I_r = Yansıyan ışığın şiddeti

θ_i = Işının geliş açısı (normale göre)

θ_r = Işının yansıma açısı (normale göre)

olarak tanımlıdır.

İletim (geçirme) katsayısı,

$$T = \frac{I_t \cos \theta_t}{I_i \cos \theta_i}$$

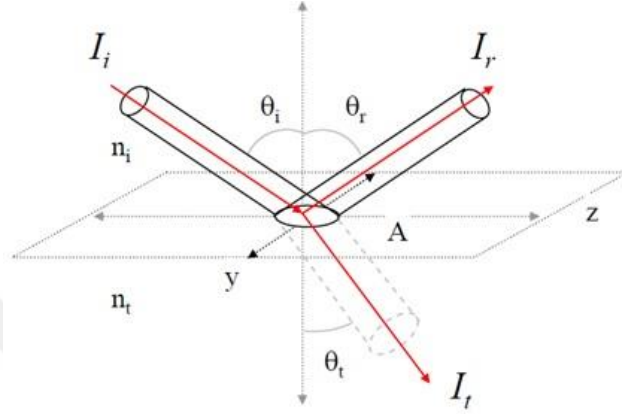
olarak tanımlanır (Sarı 2011) ve burada,

I_t = Geçen ışığın şiddeti

θ_t = Işınının geçiş açısı (normale göre)

ile verilir.

Yansımaya ve iletim katsayıları arasında $R + T = 1$ ilişkisi vardır. Örneğin, yansımaya oranı 0,80 olan bir cam üzerine gelen ışığın %80'inini yansıtır, %20'sini geçirir.



Şekil 2.4 Fresnel denklemleri için gösterim (Sarı 2011'den değiştirilerek alınmıştır)

Çizelge 2.1 Bazı yaygın malzemeler için yansımalar (Dilaura vd. 2011'den değiştirilerek alınmıştır)

Yansımaya Türü	Malzeme	Yansımaya (R)
Yansıtıcı	Aynalı ve optik kaplamalı cam	0,80-0,99
	Metalize ve optik kaplamalı plastik	0,75-0,97
	İşlenmiş anotlanmış ve kaplamalı alüminyum	0,75-0,95
	Krom	0,60-0,70
	Paslanmaz çelik	0,60-0,65
	Siyah yapısal cam	0,05
Yayılmış	İşlenmiş alüminyum	0,70-0,80
	Aşındırılmış alüminyum	0,70-0,85
	Saten krom	0,50-0,55
	Porselen enamel	0,65-0,90
	Beyaz yapısal cam	0,75-0,80
	Fırçalanmış alüminyum	0,55-0,60
	Alüminyum boya	0,60-0,70
Dağınık	Dağınık beyaz sıva	0,90-0,93
	Beyaz boya	0,75-0,90
	Beyaz çömlek	0,65-0,80
	Kireçtaşı	0,35-0,65

2.2.1.2 Yayılmış yansıma

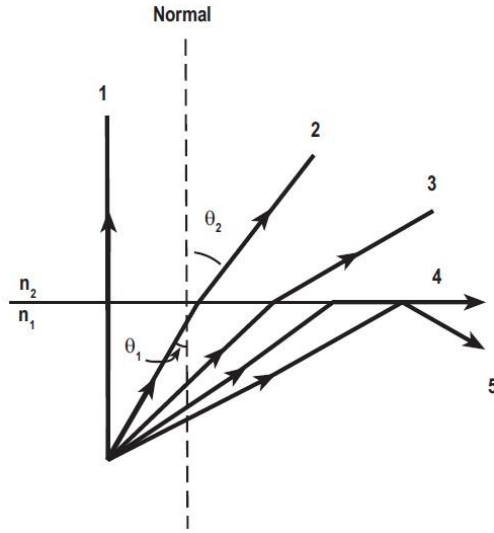
Yansıtıcı yüzey pürüzsüz değilse (yani, pürüzlü, oluklu, aşındırılmış veya dövülmüş), paralel ışınları yansıyan ışıklardan oluşan bir koniye yayar. Ek olarak, cilalı mermer gibi bazı optik olarak pürüzsüz yüzeyler, yüzey altı saçılmasıyla yayılmış olarak ışığı yayar. Yansıma yönü ve yayılma derecesi, yansıtıcı yüzeyin geometrisine bağlıdır. Çizelge 2.1, aydınlatmada kullanılan malzemeler için tipik yayılmış yansıma aralıklarını göstermektedir (Dilaura vd. 2011).

2.2.1.3 Dağınık yansıma

Yerel olarak pürüzsüz olmayan veya küçük pigment parçacıklarından oluşan düzensizliklere sahip bir yüzey, pürüzlü bir yüzeydir ve bu yüzeyden yansıma dağınıktır. Son derece küçük bir parçacığın üzerine düşen her ışın, yansıma yasasına uyar, ancak parçacığın yüzeyleri farklı düzlemlerde olduğundan, optik radyasyonu birçok açıdan yansıtırlar. Bunun bir idealleştirmesi, geliş açısından bağımsız olarak, çıkış açısının kosinüsü ile değişen bir yansıyan radyasyon yoğunluğu üreten kusursuz dağınık yansımadır (Dilaura vd. 2011).

2.2.1.4 Toplam iç yansıma

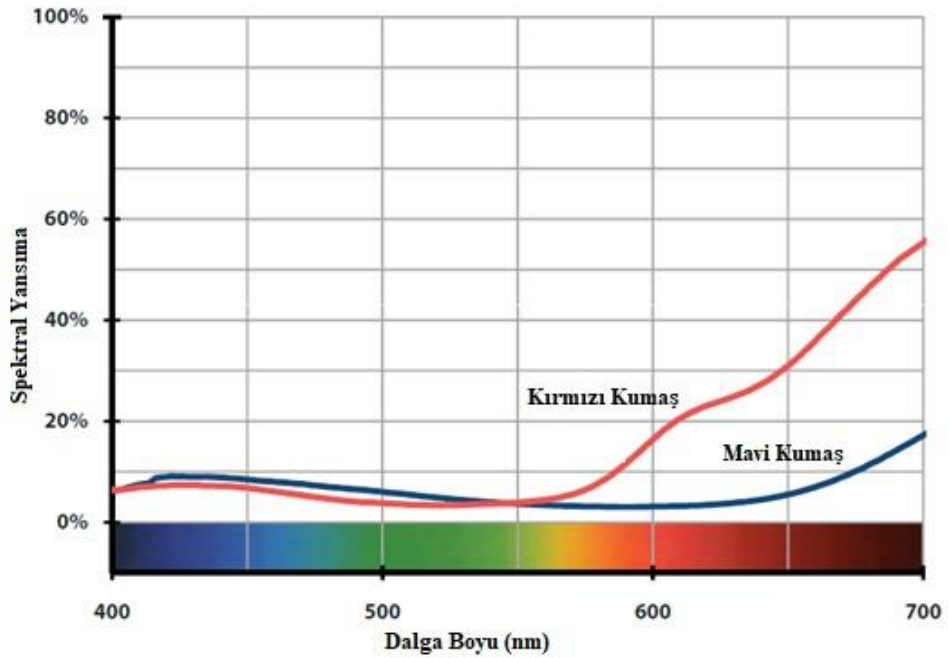
Snell yasasının gösterdiği gibi, ışık daha yüksek kırılma indisine sahip bir malzemedan daha düşük kırılma indisine (bir cam parçasından havaya doğru hareket eden ışık gibi) sahip bir malzemeye geçerken normalden uzaklaşarak kırılır. Bu, toplam iç yansıma adı verilen olaya yol açar. Bir ışık ışınının geliş açısı normalden uzaklaşırken öyle bir değere ulaşır ki (kritik açı, θ_c olarak adlandırılır), ışık sınırdan yansımak ya da kırılmak yerine malzemeler arasındaki sınır boyunca kırılır. Kritik açıdan daha büyük geliş açılarında, tüm ışık ortama geri yansıtılır, bu da fiber optiklerin ışığı uzunlukları boyunca emilme dışında çok az veya hiç kayıp olmadan taşımasına izin verir. Şekil 2.5, farklı geliş açılara sahip birkaç ışık ışınını göstermektedir. Işın 1, 2 ve 3 için geliş açısı θ_c 'den küçüktür; ışın 4'ün geliş açısı tam olarak θ_c 'ye eşittir; ışın 5'in geliş açısı θ_c 'den büyüktür (Taylor 2000).



Şekil 2.5 Toplam iç yansıma (Taylor 2000)

2.2.1.5 Spektral yansıma

Spektral yansıma, bir malzemenin bir dizi dar dalga boyu bandındaki optik radyasyon yansımasını tanımlar. Şekil 2.6, spektral yansıma verisi örneklerini gösterir (Dilaura vd. 2011).



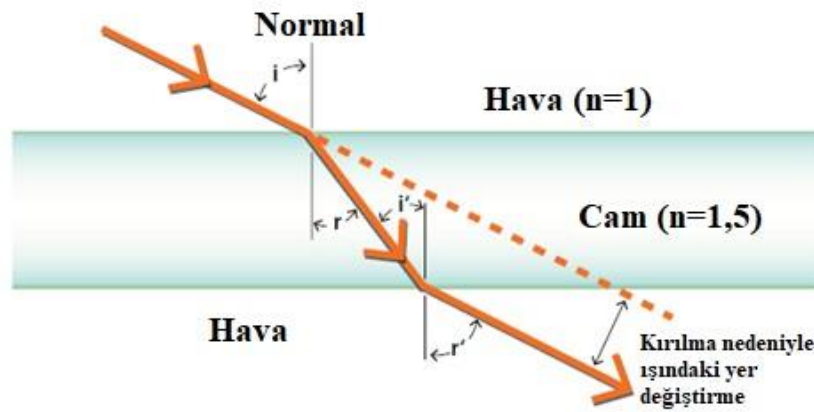
Şekil 2.6 Kırmızı ve mavi kumaşın spektral yansıması (Dilaura vd. 2011'den değiştirilerek alınmıştır)

2.2.2 İletim

İletim ya da geçirgenlik, bir malzemeye düşen optik radyasyonun bir kısmının içinden geçip ondan çıktığı süreçtir. İletim, yüzey yansımalarından ve malzeme içindeki emilimden etkilenir. Çıkış radyasyonunun geometrisi, iletimi şu şekilde tanımlamak için kullanılır: görüntü korumalı, dağınık ve yayılmış. Geliş dalga boyuna bağımlılık, spektral iletim olarak tanımlanır.

2.2.2.1 Görüntü korumalı iletim

İletici malzeme çok az saçılma yaparsa veya hiç saçılmazsa ve malzemenin geliş ve çıkış düzlemleri paralel ise, ışınlar kaymıştır, ancak aynı yöne sahiptir. Bu durumda malzemenin "şeffaf" olduğu söylenir. Yani, böyle bir malzemeden bakılan bir nesnenin görüntüsü değişmemiştir (Dilaura vd. 2011).



Şekil 2.7 Görüntü korumalı iletim (Dilaura vd. 2011'den değiştirilerek alınmıştır)

2.2.2.2 Yayılmış iletim

Yayılmış iletim malzemeleri, gelen radyasyonu nispeten geniş bir dağıtıcı koniye dağıtmak ve kırmak için değişen yüzey geometrisini ve değişen emilimi birleştirir. Bu genellikle yüzey pürüzlülüğü ile üretilir. Çizelge 2.2, aydınlatmada kullanılan malzemeler için tipik iletim aralıklarını göstermektedir (Dilaura vd. 2011).

Çizelge 2.2 Bazı yaygın malzemeler için iletimler (Dilaura vd. 2011’den değiştirilerek alınmıştır)

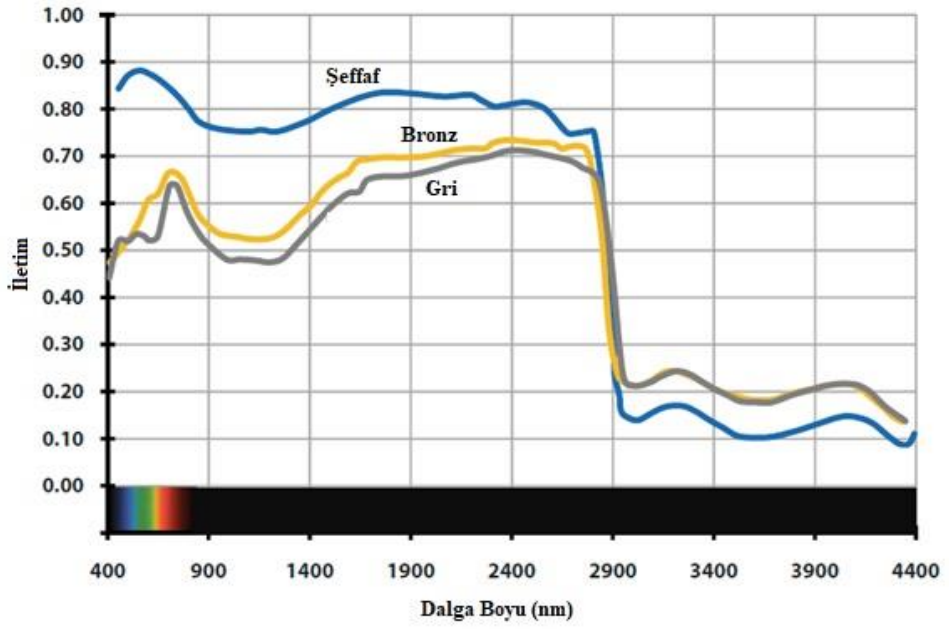
Malzeme	Form ya da İşlem	İletim (T)
Cam	Şeffaf ve optik kaplamalı	0,80-0,99
	Yapılandırılmış, kazınmış, taşlanmış veya kumlanmış	0,75-0,85
	Rengarenk ışıyan ve kaymaktaşı	0,55-0,80
	Parlatılmış opal	0,30-0,50
	Katı opal	0,15-0,40
Plastik	Şeffaf prizmatik lens	0,70-0,95
	Beyaz yapısal cam	0,30-0,70
	Renkli	0,05-0,30
	Mermer	0,05-0,30

2.2.2.3 Dağınık iletim

Dağınık iletim yapan malzemeler, optik radyasyonu aşağı yukarı tüm ileri yönlerde saçar. Mükemmel dağınık iletim, iletilen radyasyonun, geliş açısından bağımsız olarak çıkış açısının kosinüsü ile değişen bir yoğunluğa sahip olduğu bir idealleştirmedir. Bu idealleştirilmiş malzeme, hesaplama işini radikal bir şekilde basitleştirebildiği ve aynı zamanda dağınık olarak ileten yüzeylerin iyi bir temsilini sağlayabildiği için aydınlatma hesaplamalarında sıklıkla kullanılır (Dilaura vd. 2011).

2.2.2.4 Spektral iletim

Spektral iletim, bir malzemenin optik radyasyonu için bir dizi dar dalga boyu bandında iletimini tanımlar. Şekil 2.9, üç tip pencere camı için spektral iletim verileri örneklerini göstermektedir. Pencere camı sistemlerinde kullanılan üç cam türünün görünür bölgeden uzak kızılötesine spektral geçirgenliğini göstermektedir (Dilaura vd. 2011).



Şekil 2.8 Spektral iletim (Dilaura vd. 2011’den değiştirilerek alınmıştır)

2.2.3 Kırılma (Snell yasası)

Işık bir malzemeden diğerine (örneğin; havadan cama) geçerken, doğrultu değiştirir yani kırılır ve sürati değişir. Kırılma iki faktöre bağlıdır: geliş açısı (θ) ve malzemenin kırılma indisi (n).

Belirli bir malzeme için kırılma indisi, ışığın boşluktaki süratinin ($c = 3 \cdot 10^8 m/s$) malzemedeki süratine oranıdır:

$$n = \frac{\text{ışığın boşluktaki sürati}}{\text{ışığın malzemedeki sürati}} = \frac{c}{v}$$

Işığın havadaki sürati, boşluktaki ışığın sürati ile hemen hemen aynıdır, bu nedenle hava için kırılma indisi 1 ($n_{hava} = 1,000293$) olarak kabul edilir. Hemen hemen tüm diğer maddeler için kırılma indisi 1’den fazladır, çünkü ışık maddeden geçtiğinde sürati azalır.

Şekil 2.10’da gösterildiği gibi, Snell’in kırılma yasası, gelme ve kırılma açıları ile kırılma indisleri arasındaki ilişkiyi gösterir:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Burada,

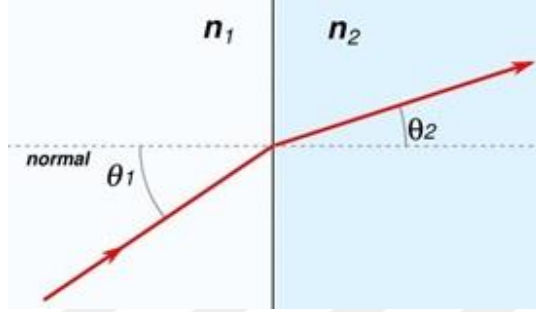
n_1 = 1. ortamın kırılma indisi

n_2 = 2. ortamın kırılma indisi

θ_1 = ışık ışınının geliş açısı (normale göre)

θ_2 = kırılma açısı (normale göre)

olarak tanımlıdır.



Şekil 2.9 Snell kırılma yasası (<https://evrimagaci.org>)

Snell yasasından, yüzeyin normali ile aynı doğrultuda gelen ışığın ($\sin 0^\circ = 0$) sınırdaki doğrultu değiştirmeyeceği açıkça görülür. Snell yasası ayrıca kırılma indisi düşük olan bir ortamdan, kırılma indisi yüksek olan bir ortama ($n_1 < n_2$) geçen ışığın normale doğru eğildiğini gösterirken, yüksek kırılma indisli bir ortamdan düşük kırılma indisli bir ortama ($n_2 < n_1$) geçen ışığın normalden uzağa doğru eğildiğini gösterir. Çizelge 2.3'te çeşitli malzemeler için kırılma indisleri listelenmiştir.

Çizelge 2.3 Vakum ortamında 589 nm dalga boylu ışık ile ölçülen çeşitli malzemeler için kırılma indisleri (Taylor 2000'den değiştirilerek alınmıştır)

Malzeme	Kırılma İndisi	Malzeme	Kırılma İndisi
20 °C'de Katılar		20 °C'de Sıvılar	
Elmas	2,419	Benzen	1,501
Kalsiyum Florür	1,434	Karbondisülfid	1,628
Kuarz Camı	1,458	Karbon Tetraklorit	1,461
Cam, Taç (Crown)	1,520	Etil Alkol	1,361
Cam, Çakmaktaşı (Flint)	1,660	Gliserin	1,473
Buz	1,309	Su	1,333
Polistiren (Polystyrene)	1,490	0 °C'de Gazlar, 1 Atmosfer	
Sodyum Klorit (Tuz)	1,544	Hava	1,000293
Zirkon	1,923	Karbondioksit	1,000450

Örneğin, 45° 'lik bir geliş açısı ile havadan ($n_{hava} = 1,00$), taç cam parçasına ($n_{cam} = 1,52$ form çizelge 2.3) giren bir ışık ışını 28° 'lik bir kırılma açısıyla bükülür (Taylor 2000).

$$\begin{aligned}n_1 \sin \theta_1 &= n_2 \sin \theta_2 \\1,00. \sin 45^\circ &= 1,52. \sin \theta_2 \\ \theta_2 &= 28^\circ\end{aligned}$$

2.2.3.1 Yansıma ve kırılma indisi

Şeffaf bir madde neredeyse tüm ışığı iletir, ancak iki yüzeyinin her birinden biraz ışık yansıtır. Bu yansıma, ışığın farklı kırılma indisli ortamlardan geçmesi nedeniyle ortaya çıkar. Normal ile aynı doğrultuda gelişte (geliş açısı 0° olduğunda) Fresnel'in yansıma yasası etki miktarlarını (yansıma kaybını) belirler:

$$r_\lambda = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2}$$

Burada,

r_λ = yansıma kaybı

n_1 = 1. ortamın kırılma indisi

n_2 = 2. ortamın kırılma indisi

olarak tanımlıdır.

Örneğin, normal geliş açısında ($\theta = 0^\circ$) gelen ışık, kırılma indisi 1,5 (cam gibi) olan bir malzemeye çarptığında, hava ile olan iki sınırın her biri ışığın yaklaşık %4'ünü yansıtır. Geliş açısı arttıkça, yansıyan ışığın miktarı da artar (Taylor 2000).

2.2.4 Soğurma

Bir nesne ışığı tamamen iletmek yerine, gelen ışığın bir kısmını veya tamamını, genellikle onu ısıya dönüştürerek soğurabilir. Birçok malzeme bazı dalga boylarını soğururken diğerlerini iletir ve buna seçici soğurma adı verilir.

Lambert'in soğurma yasası, belirli bir homojen malzemenin eşit kalınlıklarının aynı oranda ışık soğurduğunu belirtir. Aynı malzemeden yapılmış iki tane 1'er cm'lik blok düşünelim; 1 cm'lik bir blok ışığın yarısını soğurursa (Şekil 2.10'da gösterildiği gibi),

diğer 1 cm'lik blok da birinciden geçenin yarısını soğurur, yani bu iki ardışık blok orijinal ışığın sadece $0,5 \times 0,5$ veya 0,25'ini iletir. Sonuçta tek bir 2 cm'lik blok da ışığın 0,25'ini iletir. Bu üstel ilişki şu formül ile verilir:

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

Burada,

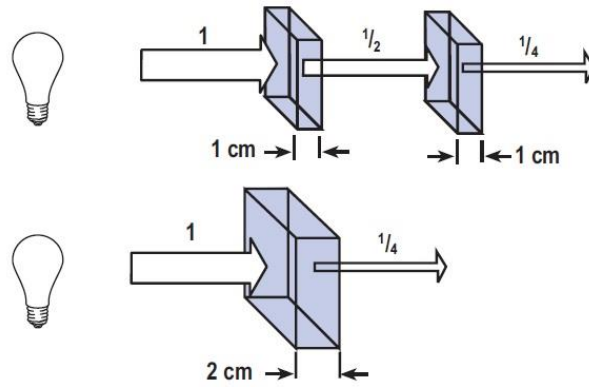
I = iletilen ışığın yoğunluğu

I_0 = malzemeye giren ışığın yoğunluğu (yüzey yansımaları hariç)

α = ters uzunluk birimlerinde soğurma katsayısı

x = numunenin kalınlığı (α ile aynı birimde ölçülür)

olarak tanımlıdır. Tam doğruluk için, her dalga boyu ayrı olarak düşünülmelidir.



Şekil 2.10 Lambert soğurma yasası (Taylor 2000)

Beer yasası, soğurma katsayısı α 'yı iki değişkene ayırır: β birim yoğunluk (konsantrasyon) katsayısı başına soğurma ve c malzemenin yoğunluğu. Beer yasası, eşit miktarda soğurucu malzemenin (sıvı içindeki bir boya gibi) eşit oranda ışık soğurduğunu belirtir. Örneğin, şekil 2.11, aynı hacimdeki malzeme üzerindeki iki kat daha fazla boyanın iki kat daha fazla ışık soğurduğunu gösterir. Lambert'in soğurma yasasında olduğu gibi, her bir dalga boyu için Beer yasası ayrı ayrı ele alınmalıdır.

Bu iki yasa, malzemenin hem kalınlığını hem de yoğunluğunu içeren tek bir denklemde birleştirilebilir. Bu yasaya Beer-Lambert yasası denir ve

$$I = I_0 e^{-\beta cx}$$

olarak verilir (Taylor 2000). Burada,

I = iletilen ışığın yoğunluğu

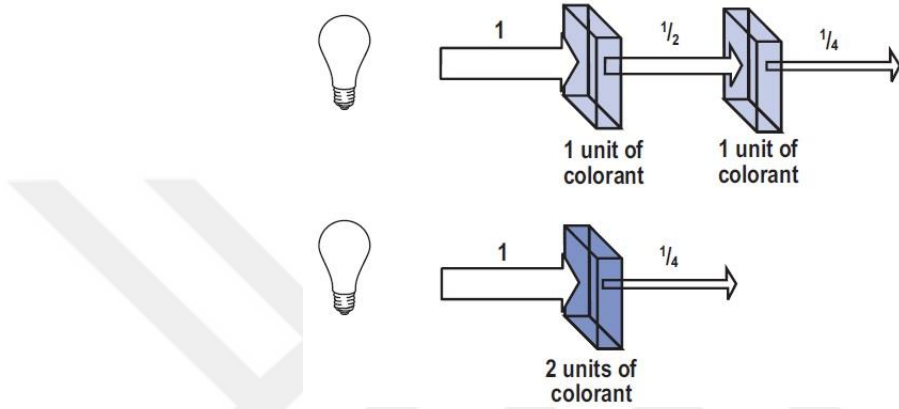
I_0 = malzemeye giren ışığın yoğunluğu (yüzey yansımaları hariç)

β = yoğunluk katsayısı başına soğurma (ters gram başına ters uzunluk veya litre başına mol)

c = soğurucu malzemenin yoğunluğu

x = yol uzunluğu (uzunluk)

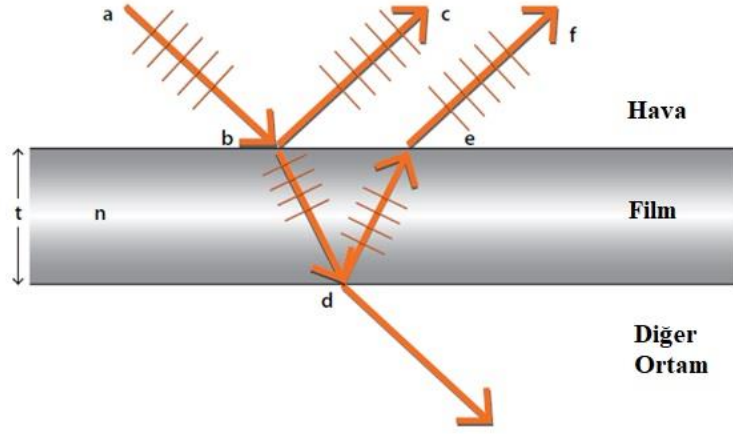
şeklinde tanımlıdır.



Şekil 2.11 Beer-Lambert yasası (Taylor 2000)

2.2.5 Girişim

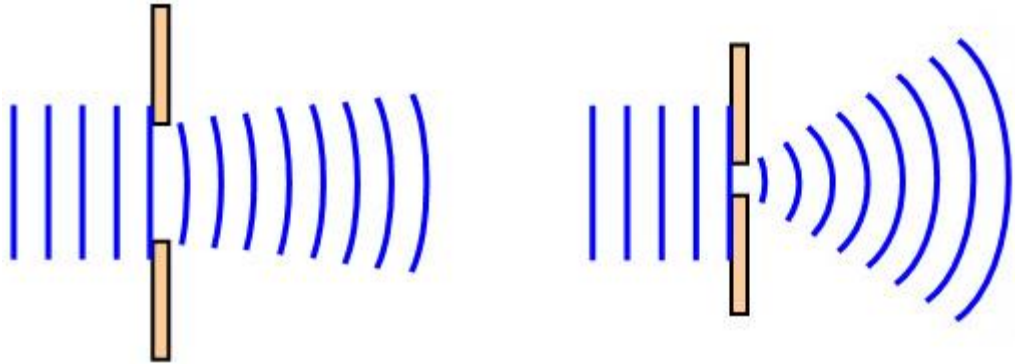
Aynı dalga boyuna sahip iki optik radyasyon dalgası, titreşimlerinin farklı aşamalarında bir araya geldiğinde, tek bir dalga oluşturmak için birleşebilirler. Dalgaların fazları zıt ise çıkarılır ve ortaya çıkan genlik, iki genliğin farkı, muhtemelen sıfırdır. Fazlar aynıysa dalgalar eklenir ve ortaya çıkan genlik iki genliğin toplamıdır. Şekil 2.12, optik radyasyon kırıldığında ve ince filmde yansıdığı anda ortaya çıkan etkileşimi göstermektedir. Gelen optik radyasyon $|ab|$ 'nin bir kısmı $|bc|$ olarak yansıtılır. Geriye kalan parça $|bd|$ olarak kırılır, bu da yine $|de|$ olarak yansıtılır ve sonunda $|ef|$ olarak ortaya çıkar. $|bc|$ ve $|ef|$ dalgaları kayda değer genişlikte dalga cephelerine sahipse, bunlar üst üste binecek ve girişim yapacaklardır (Dilaura vd. 2011).



Şekil 2.12 Girişim (Dilaura vd. 2011’den değiştirilerek alınmıştır)

2.2.6 Kırınım

Optik radyasyon, dalga doğası nedeniyle opak bir kenardan veya küçük bir yarıktan geçerken yeniden yönlendirilir. Dalga cephesi bir engelin yanından geçerken genişler ve kenarın keskin yerine belirsiz bir gölgesini oluşturur. Gölgenin yoğunluğu ve uzaysal genişliği, kenarın geometrik özelliklerine, kaynağın fiziksel kapsamına (boyut ve şekil) ve optik radyasyonun spektral özelliklerine bağlıdır. Küçük bir yarıktan geçen optik radyasyon, yarığın iki kenarı tarafından oluşturulan dalga cepheleri birbirini etkilediğinden, peş peşe aydınlık ve karanlık bölgeler üretecektir (Dilaura vd. 2011).

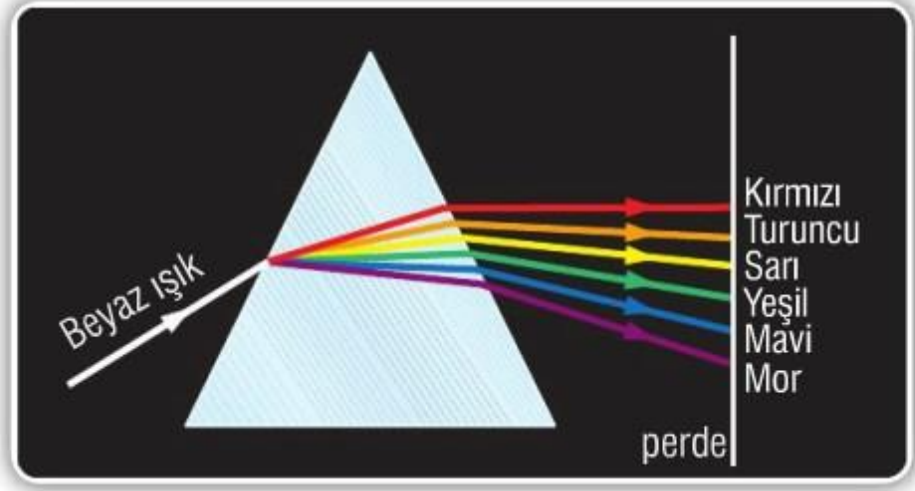


Şekil 2.13 Kırınım (<http://www.alternativephysics.org>)

2.2.7 Dağılım (Dispersiyon)

Işığın hızı, ilgili ortamın kırılma indislerinin ve aynı zamanda dalga boyunun bir fonksiyonu olduğundan, şekil 2.14'te gösterildiği gibi bir kırılma elemanından çıkış yolu, gelen optik radyasyonun her dalga boyu ve her bir geliş açısı için farklı olacaktır. Gelen optik radyasyonun bileşen dalga boyu spektrumuna ayrılmasına dispersiyon denir.

Optik radyasyonun bileşen dalga boylarına ayrılması, imalat sırasında metal yüzeyler üzerindeki ince, düzenli dalgalı veya kabartmalı yapı ile de üretilebilir. Renklerin yansıma yoluyla ortaya çıkmasına yanardönerlik (*iridescence*) denir (Dilaura vd. 2011).



Şekil 2.14 Dağılım

3. RADYOMETRİ VE FOTOMETRİ

Radyometri, $3 \times 10^{11} \text{ Hz}$ ile $3 \times 10^{16} \text{ Hz}$ frekans aralığındaki optik radyasyonun ölçümüdür. Bu aralık, 10 nm ile $1000 \mu\text{m}$ arasındaki dalga boylarına karşılık gelir ve genellikle ultraviyole, görünür ve kızılötesi olarak adlandırılan bölgeleri içerir. Tipik radyometrik birimler arasında watt (ışınma akısı), steradyan başına watt (ışınma yoğunluğu), metrekare başına watt (ışınma) ve steradyan çarpı metrekare başına watt (ışınma) bulunur.

Fotometri, insan gözü tarafından algılanabilen (spektrumun görünür bölgesi, 360 nm – 830 nm dalga boyu aralığı) elektromanyetik radyasyonun ölçümü ile ilgilidir. Fotometri, gözün spektral tepkisini taklit etmek için yapılandırılmış optik radyasyon detektörlerini veya gözün spektral tepkisine benzetmek için uygun hesaplamalarla birleştirilmiş spektrometri kullanır. Tipik fotometrik birimler arasında lümen (ışık akısı), kandela (ışık yoğunluğu), lüks (aydınlatma) ve metrekare başına kandela (parlaklık) bulunur.

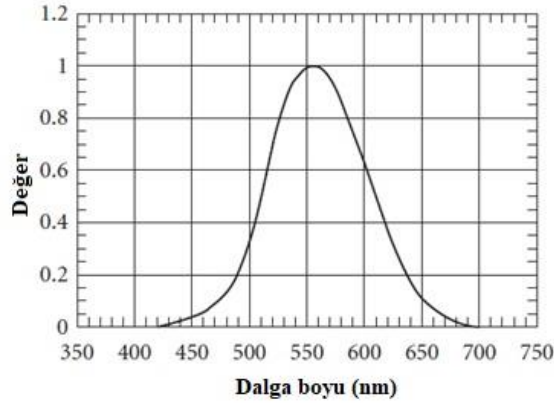
Radyometri ve fotometri arasındaki fark, radyometrinin tüm optik radyasyon spektrumunu içermesi (ve genellikle spektral olarak çözümlenmiş ölçümleri içermesi), fotometrinin ise gözün tepkisine benzer yapıda görünür spektrumla ilgilenmesidir (Bass vd. 2010).

3.1 Fiziksel Fotometrinin Temelleri

Fotometrinin temel amacı, görünür optik radyasyonu (ışığı), o radyasyona maruz kalan normal bir gözlemcinin (insan) görsel duyumuyla ilişkili olacak şekilde ölçmektir. Yaklaşık 1940 yılına kadar, görsel karşılaştırmalı ölçüm teknikleri fotometride kullanılmıştır.

Modern fotometrik uygulamada, ölçümler fotodetektörlerle yapılır. Buna fiziksel fotometri denir. Fotometrinin amacına ulaşmak için insan görüşünün özelliklerini hesaba katmak gerekir. İnsan gözünün göreceli spektral duyarlılığı ilk olarak 1924'de CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage* (Uluslararası Aydınlatma Komisyonu)) tarafından ve 1931'de kolorimetrik standart gözlemcilerin bir parçası olarak yeniden tanımlandı. Fotopik görüş için spektral ışık verimliliği (*spectral luminous efficiency for photopic vision*) olarak adlandırılan $V(\lambda)$, 360 nm 'den 830 nm 'ye kadar alanda

tanımlanır ve tepe noktası olan 555 nm 'de normalize edilir (Şekil 3.1). Bu model geniş kabul görmüş ve değerler CIE tarafından 1983'te ve CIPM (*Comité International des Poids et Mesures* (Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Komitesi)) tarafından 1979'daki kandela tanımını desteklemek üzere 1982'de yayınlanmıştır. Çoğu durumda, 380 nm ve 780 nm arasındaki bölge, $V(\lambda)$ fonksiyonunun değerini ihmal edilebilir hatalarla hesaplama için yeterlidir, bu bölgenin dışında 10^{-4} 'ün altına düşer. Böylece, $V(\lambda)$ fonksiyonu ile eşleşen bir spektral duyarlılığa sahip bir fotodetektör, insan gözünün fotometrideki karşılığıdır.



Şekil 3.1 CIE $V(\lambda)$ fonksiyonu (Bass vd. 2010'den değiştirilerek alınmıştır)

Radyometri, optik radyasyonun optik güç açısından ve çoğu durumda dalga boyunun bir fonksiyonu olarak fiziksel ölçümü ile ilgilidir. Kandela tanımında 1979'da CGPM (*Conférence Générale des Poids et Mesures* (Genel Ağırlıklar ve Ölçüler Konferansı)) tarafından ve 1982'de CIPM tarafından belirtildiği gibi, fotometrik bir X_v miktarı radyometrik $X_{e,\lambda}$ miktarı ile ilişkili olarak aşağıdaki denklemle tanımlanır:

$$X_v = K_m \int_{360 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} X_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda$$

Fotometrik miktarları ve radyometrik büyüklükleri ilişkilendiren K_m sabitine, fotopik görüş için maksimum spektral ışık etkinliği (*maximum spectral luminous efficacy*) adı verilir. K_m değeri, $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ frekansında (standart havada $555,016 \text{ nm}$ dalga boyunda) ışığın spektral ışık etkinliğini $683 \text{ lm} / \text{W}$ olarak tanımlayan 1979 kandela tanımı ile verilmektedir. K_m değeri $683 \times V(555,000 \text{ nm}) / V(555,016 \text{ nm}) = 683,002 \text{ lm} / \text{W}$ olarak hesaplanır. K_m normalde ihmal edilebilir hatalarla $683 \text{ lm} / \text{W}$ 'ye yuvarlanır.

$V(\lambda)$, göreceli olarak yüksek parıldama (*luminance*) seviyelerinde (yaklaşık 1 cd/m^2 'den yüksek) duyarlılığı ve 2° görüş alanını varsayan fotopik görüşte CIE standart fotometrik gözlemcisi için tanımlanır. Bu seviyedeki insan görüşüne fotopik görüş denir. İnsan görüşünün spektral tepkisi, çok düşük parlaklık seviyelerinde (yaklaşık 10^{-3} cd/m^2 'den az) önemli ölçüde sapma gösterir. Bu tür görmeye skotopik görme denir. 507 nm 'de pik yapan skotopik görüşün spektral duyarlılığı, 1951'de CIE tarafından tanımlanan, 1976'da CIPM tarafından tanınan ve 1982'de CIPM tarafından yeniden yayınlanan $V'(\lambda)$ ile belirtilmiştir. Fotopik görüş ile skotopik görüş arasındaki bölgede insan görüşüne mezopik görüş denir. Bu alanda aktif araştırmalar yapılırken, mezopik bölge için henüz uluslararası kabul görmüş spektral ışık verimliliği fonksiyonu (*spectral luminous efficiency function*) bulunmamaktadır. Mevcut uygulamada, neredeyse tüm fotometrik büyüklükler, düşük ışık seviyelerinde bile fotopik görüş açısından verilmektedir. Skotopik görüşteki nicelikler, araştırma amaçlı özel hesaplamalar dışında nadiren kullanılır (Bass vd. 2010).

3.2 Temel Fotometrik Birimi – Kandela

Fotometrik standartların geçmişi, ışık kaynaklarının yoğunluğunun standart bir mumla karşılaştırmalı olarak görsel çubuk fotometreler kullanılarak ölçülmesi on dokuzuncu yüzyılın başlarına kadar uzanmaktadır. 1948'de, CGPM tarafından ışık (aydınlatma) şiddeti birimi kandela (*candela*) olarak kabul edildi.

Kandela, platinin donma sıcaklığında, metrekare başına 101325 Newton basınç altında bir siyah cismin (tam radyatör) $1/600000 \text{ m}^2$ 'lik bir yüzeyinin dikey yöndeki ışık şiddetidir.

1950'lerin ortalarından başlayarak, kandelayı optik güç birimi *watt* ile ilişkili olarak tanımlamak için önerilerde bulunuldu, böylece karmaşık kaynak standartları gerekli olmayacaktı. Son olarak, 1979'da CGPM tarafından kandelanın yeni bir tanımı şu şekilde kabul edildi: Kandela, $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ frekansında tek renkli radyasyon yayan ve bu yönde $(1/683) \text{ watt / steradian}$ bir radyant şiddetine sahip bir kaynağın belirli bir yöndeki ışık şiddetidir. Kandelanın 1979'da yeniden tanımlanması, fotometrik birimlerin çeşitli teknikler kullanılarak radyometrik birimlerden türetilmesini sağladı (Bass vd. 2010).

3.3 Fotometri ve Radyometride Nicelikler ve Birimler

1960 yılında SI (*Système International*) kuruldu ve kandela yedi SI temel biriminden biri oldu. Fotometri ve radyometride farklı geometrilerde tanımlanan çeşitli büyüklükler ve birimler kullanılır. Kandela SI temel birimi olsa da, aydınlatma (ışık) akısı (lümen) belki de en temel fotometrik niceliktir, çünkü diğer fotometrik büyüklükler lümen cinsinden uygun bir geometrik faktörle tanımlanır. Çizelge 3.1’de radyometrik ve fotometrik nicelikler birimleriyle birlikte listelenmiştir (Bass vd. 2010).

Çizelge 3.1 Fotometri ve radyometride kullanılan nicelikler ve birimler (Bass vd.2010’dan değiştirilerek alınmıştır)

Fotometrik Nicelik	Birim	Lümen Bağıntısı	Radyometrik Nicelik	Birim
Aydınlatma Akısı (Luminous Flux)	lm (lumen /lümen)		Radyant Akısı (Radiant Flux)	W (Watt)
Aydınlatma Şiddeti (Luminous Intensity)	cd (kandela /candela)	$lm\ sr^{-1}$	Radyant Şiddeti (Radiant Intensity)	$W\ sr^{-1}$
Aydınlık (Illuminance)	lx (lüks/lux)	$lm\ m^{-2}$	Parlaklık (Irradiance)	$W\ m^{-2}$
Parıldama (Luminance)	$cd\ m^{-2}$	$lm\ sr^{-1}m^{-2}$	Işıma (Radiance)	$W\ sr^{-1}m^{-2}$
Aydınlatma Çıkışı (Luminous Exitance)	$lm\ m^{-2}$		Radyant Çıkışı (Radiant Çıkışı)	$W\ m^{-2}$
Aydınlatma Etkisi (Luminous Exposure)	$lx\ s$		Radyant Etkisi (Radiant Exposure)	$W\ m^{-2}\ s$
Aydınlatma Enerjisi (Luminous Energy)	$lm\ s$		Radyant Enerjisi (Radiant Energy)	J (Joule)
Toplam Aydınlatma Akısı (Total Luminous Flux)	lm		Toplam Radyant Akısı (Total Radiant Flux)	W (Watt)
Renk Sıcaklığı (Color Temperature)	K (Kelvin)		Işıma Sıcaklığı (Radiance Temperature)	K (Kelvin)

3.3.1 Radyant akısı ve aydınlatma akısı

Radyant (ışıma) akısı (optik güç veya ışıma gücü olarak da adlandırılır), birim zaman başına bir kaynak tarafından yayılan enerjidir (Q , birimi *Joule*):

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}$$

Radyant akısı birimi watt'tır ($W = J / s$).

Aydınlatma akısının birimi lümendir (lm). Şu formül ile tanımlanır:

$$\Phi_v = K_m \int_{\lambda} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda$$

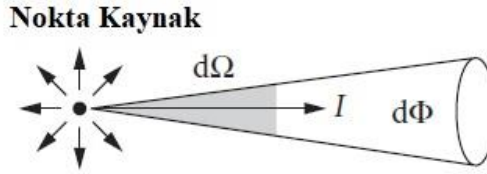
Burada, $(\Phi_{e,\lambda})$ λ dalga boyunun bir fonksiyonu olarak radyant akısının spektral toplamıdır. Aydınlatma akısı terimi, genellikle fotometride toplam aydınlatma akısı anlamında kullanılır (Bass vd. 2010).

3.3.2 Radyant şiddeti ve aydınlatma şiddeti

Radyant şiddeti (I_e) veya aydınlatma şiddeti (I_v), bir nokta ışık kaynağından belirli bir yönde birim katı açı başına yayılan radyant akısıdır (ya da aydınlatma akısı):

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

Burada, $d\Phi$ kaynaktan çıkan ve verilen yönü içeren katı açılı $d\Omega$ elemanından yayılan radyant akıdır (aydınlatma akısıdır). Radyant şiddetinin birimi W/sr 'dir ve aydınlatma şiddetinin birimi kandela'dır ($cd = lm / sr$).

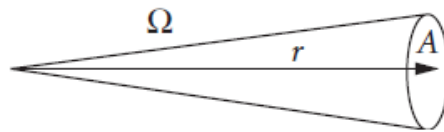


Şekil 3.2 Radyant şiddeti ve aydınlatma şiddeti (Bass vd. 2010)

Bir koninin katı açısı (Ω), küresel bir yüzeyde (bu koninin tepesindeki merkezi) kesilen alanın (A), kürenin yarıçapının (r) karesine oranı olarak tanımlanır:

$$\Omega = \frac{A}{r^2}$$

Şekil 3.3'de gösterildiği gibi katı açı birimi, boyutsuz bir birim olan steradyan (sr) 'dır (Bass vd. 2010).



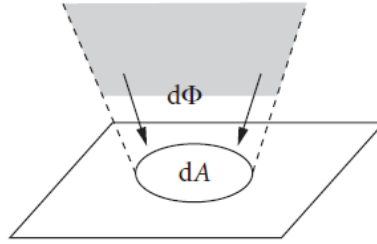
Şekil 3.3 Katı açı (Bass vd. 2010)

3.3.3 Parlaklık ve aydınlık

Parlaklık (E_e) veya aydınlık (E_v), bir yüzey üzerindeki bir noktaya gelen radyant akısının veya aydınlatma akısının yoğunluğudur ve birim alan başına radyant akısı (aydınlatma akısı) olarak tanımlanır:

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

Burada, $d\Phi$ noktayı içeren yüzeyin bir dA ögesi üzerinde meydana gelen radyant akısıdır (aydınlatma akısı). Parlaklık birimi W/m^2 ve aydınlık birimi lükstür ($lx = lm/m^2$) (Bass vd. 2010).



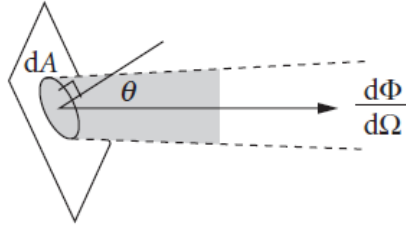
Şekil 3.4 Parlaklık ve aydınlık (Bass vd. 2010)

3.3.4 Işıma ve parıldama

Işıma (L_e) veya parıldama (L_v), belirli bir yönde bir yüzey elemanından yayılan birim katı açı başına ve yöne dik yüzey elemanının birim alanı başına düşen radyant akıdır (aydınlatma akısıdır):

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA \cos\theta}$$

Işıma birimi $W sr^{-1} m^{-2}$ 'dir ve parıldama birimi ise cd/m^2 'dir. Burada, $d\Phi$ yüzey elemanından (yansıtılan veya iletilen) ve verilen yönü içeren katı açı $d\Omega$ içinde yayılan radyant akısıdır (aydınlatma akısı). dA , yüzey elemanının alanıdır ve θ , yüzey elemanının normali ile ışının yönü arasındaki açıdır. $dA \cos\theta$ terimi, ölçüm yönüne dik olarak yüzey elemanının öngörülen alanını verir (Bass vd. 2010).



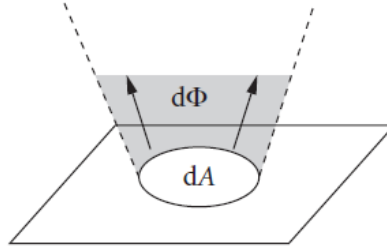
Şekil 3.5 Işıma ve parıldama (Bass vd. 2010)

3.3.5 Radyant çıkışı ve aydınlatma çıkışı

Radyant çıkışı (M_e) veya aydınlatma çıkışı (M_v), bir noktadaki bir yüzeyden çıkan radyant akısının (aydınlatma akısı) yoğunluğu olarak tanımlanır. Radyant çıkışı birimi W/m^2 'dir ve aydınlatma çıkışı birimi lm/m^2 'dir (ancak lüks değildir).

$$M = \frac{d\Phi}{dA}$$

Burada, $d\Phi$ yüzey elemanından (dA) çıkan radyant akısıdır (aydınlatma akısı). Genel fotometri pratiğinde aydınlatma çıkışı nadiren kullanılır (Bass vd. 2010).



Şekil 3.6 Radyant çıkışı ve aydınlatma çıkışı (Bass vd. 2010)

3.3.6 Radyant etkisi ve aydınlatma etkisi

Radyant etkisi (H_e) veya aydınlatma etkisi (H_v), belirli bir Δt süresi boyunca parlaklık $E_e(t)$ veya aydınlık $E_v(t)$ zaman integralidir:

$$H = \int_{\Delta t} E(t) dt$$

Radyant etkisi birimi $J m^{-2}$ ve aydınlatma etkisi birimi *lüks saniye* ($lx s$)'dir (Bass vd. 2010).

3.3.7 Radyant enerjisi ve aydınlatma enerjisi

Radyant enerjisi (Q_e) veya aydınlatma enerjisi (Q_v), belirli bir Δt süresi boyunca radyant akısının veya aydınlatma akısının (Φ) zaman integralidir:

$$Q = \int_{\Delta t} \Phi(t) dt$$

Radyant enerjisinin birimi *joule* (J) ve aydınlatma enerjisinin birimi *lumen saniye* ($lm s$)'dir (Bass vd. 2010).

3.3.8 Toplam radyant akısı ve toplam aydınlatma akısı

Toplam radyant akısı veya toplam aydınlatma akısı (Φ_v), bir ışık kaynağının geometrik olarak toplam radyant (aydınlatma) akısıdır:

$$\Phi = \int_{\Omega} I d\Omega$$

ya da

$$\Phi = \int_A E dA$$

Burada, I ışık kaynağının radyant (aydınlık) yoğunluk dağılımı ve E , ışık kaynağını çevreleyen belirli bir kapalı yüzey üzerindeki parlaklık (aydınlık) dağılımıdır. Radyant (aydınlatma) yoğunluk dağılımı veya parlaklık (aydınlatma) dağılımı kutupsal koordinatlarda (θ, φ) verilirse, kaynağın toplam ışıma (ışık) akısı Φ şu formül ile verilir:

$$\Phi = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} I(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi$$

ya da

$$\Phi = r^2 \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} E(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi$$

Örneğin, 1 cd ışık yoğunluğuna sahip izotropik bir noktasal kaynağın toplam ışık akısı $4\pi lm$ olacaktır (Bass vd. 2010).

3.3.9 SI birimleri ve İngiliz birimleri arasındaki ilişki

İngiliz birimlerinin tanımları dönüştürme amacıyla çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 İngiliz birimleri ve tanımları (Bass vd. 2010'dan değiştirilerek alınmıştır)

Birim	Nicelik	Tanım
<i>Footcandle (fc)</i>	Aydınlık	<i>Foot kare başına lümen ($lm\ ft^{-2}$)</i>
<i>FootLambert (fL)</i>	Parıldama	<i>$1/\pi$ foot kare başına kandela ($\pi^{-1}\ cd\ ft^{-2}$)</i>

FootLambert'in tanımı, mükemmel bir difüzörün parlaklığının 1 *fc*'de aydınlatıldığında 1 *fL* olacağı şeklindedir. SI biriminde, mükemmel bir difüzörün parıldaması 1 *lx*'te aydınlatıldığında $1/\pi$ (cd/m^2) olacaktır. İngiliz birimlerinden SI birimlerine geçiş kolaylığı için, dönüştürme faktörleri çizelge 3.3'te listelenmiştir. Örneğin, $1000,0\ lx = 92,9\ fc$ ve $1000,0\ cd/m^2 = 291,9\ fL$ 'dir (Bass vd. 2010).

Çizelge 3.3 İngiliz birimleri ve SI birimleri arasında dönüşüm (Bass vd. 2010'dan değiştirilerek alınmıştır)

Değer Geçişi	Çarpılacak Birim	Katsayı
<i>fc</i> 'den <i>lx</i> 'e	<i>fc</i>	10,76400
<i>lx</i> 'den <i>fc</i> 'ye	<i>lx</i>	0,92900
<i>fL</i> 'den cd/m^2 'ye	<i>fL</i>	3,42630
cd/m^2 'den <i>fL</i> 'ye	cd/m^2	0,29186
<i>feet</i> 'ten <i>metre</i> 'ye	<i>feet</i>	0,30480
<i>inç</i> 'ten <i>mm</i> 'ye	<i>inç</i>	25,40000

3.4 Fotometri ve Radyometri İlkeleri

Bu bölümde pratik fotometri ve radyometri ile ilgili birkaç önemli teori tanıtılacaktır.

3.4.1 Ters kare yasası

Aydınlatma şiddeti I (cd) olan bir nokta kaynağından d (m) mesafesindeki aydınlık E (lx) şu formül ile verilir:

$$E = \frac{I}{d^2}$$

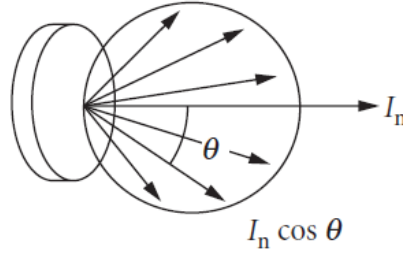
Örneğin, bir lambanın belirli bir yöndeki aydınlatma şiddeti $1000\ cd$ ise, bu yöndeki lambadan $2\ m$ mesafedeki aydınlık $250\ lx$ 'tür. Ters kare yasasının yalnızca ışık kaynağı bir nokta kaynağı olarak kabul edildiğinde geçerli olduğuna dikkat edin. Bu ilişkiyi varsaymak için kaynağın boyutuna göre yeterli mesafelere ihtiyaç vardır (Taylor 2000).

3.4.2 Lambert kosinüs yasası

Bir Lambert yüzey elemanının aydınlatma şiddeti şu şekilde verilir:

$$I(\theta) = I_n \cos \theta$$

Lambert yüzeyi, bir yüzeyin üzerindeki yarım kürenin tüm yönlerinde parıldaması aynı olan yüzeydir.



Şekil 3.7 Lambert kosinüs yasası (Taylor 2000)

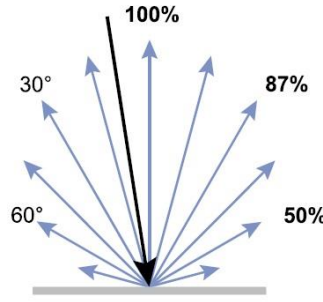
Mükemmel (yansıtıcı/geçirgen) difüzör, yansıtma (geçirgenlik) katsayısı 1'e eşit olan Lambert difüzördür (Taylor 2000).

3.4.3 Lambert emisyonu ve yansımaları

Lambert bir yüzey her yönde eşit (izotropik) akıyı yansıtır veya yayar. Örneğin, kağıt parçası gibi eşit olarak aydınlatılmış dağınık (*diffuse*) düz bir yüzey yaklaşık olarak lambertian olur, çünkü yansıyan ışık kağıdın yüzeyini görebileceğiniz her yönde aynıdır. Bununla birlikte, izotropik yoğunluğu yoktur, çünkü yoğunluk kosinüs yasasına göre değişir.

Şekil 3.8, bir yüzeyden lambertian yansımanın nasıl olduğunu göstermektedir. Yansımanın kosinüs yasasına uygun olduğuna dikkat edin: belirli bir yöndeki (yoğunluk) yansıyan enerji miktarı yansıyan açının kosinüsü ile orantılıdır.

Parıldama birim alan başına yoğunluktur. Hem yoğunluk hem de görünen alan kosinüs yasasına uyduğundan, görüş açısı değiştiğinde birbirleriyle orantılı kalırlar. Bu nedenle, aydınlatma şiddeti değişmezken parıldama sabit kalır.



Şekil 3.8 Lambertian yüzey (Taylor 2000)

Lambertian bir yüzeydeki aydınlık ve parıldamayı karşılaştırmak için aşağıdaki örneği göz önünde bulunduralım: $1 \text{ lm/m}^2/\text{sr}$ parıldamaya sahip bir yüzey, bir yarımküre (2π steradyan) toplam πA lümenini yayar. Burada, A yüzeyin alanıdır. Yüzeyin aydınlığı, toplam ışık akısının toplam alana bölünmesidir: $\pi \text{ lux/m}^2$. Diğer bir deyişle, $3,1416 \text{ lm/m}^2$ ile mükemmel dağınık bir yansıtıcı yüzeyi aydınlatacak olursak, parıldaması $1 \text{ lm/m}^2/\text{sr}$ olacaktır (Taylor 2000).

3.4.4 Aydınlık ve parıldama arasındaki ilişki

$E \text{ (lx)}$ ile aydınlatılmış, ρ yansıtma oranına sahip bir Lambert yüzeyinin parıldaması $L \text{ (cd/m}^2\text{)}$ şu formül ile verilir:

$$L = \frac{\rho E}{\pi}$$

Yansıtma ρ , belirli bir durumda yansıyan akının geliş akısına oranıdır. ρ 'nin değeri 0 ile 1 arasında olabilir.

Gerçek dünyada, ne mükemmel bir difüzör ne de mükemmel bir Lambert yüzeyi vardır, bu yüzden yukarıdaki denklem geçerli değildir. Gerçek nesne yüzeyleri için aşağıdaki koşullar geçerlidir.

Parıldama faktörü (β), belirli aydınlatma koşulları altında, bir yüzey elemanının belirli bir yöndeki parıldamasının, mükemmel bir yansıtıcı veya ileten difüzörinkine oranıdır. β 'nın değeri 1'den büyük olabilir. Bir Lambert yüzeyi için yansıtma, parıldama faktörüne eşittir. Gerçek nesne için yukarıdaki denklem, β kullanılarak yeniden şu şekilde ifade edilir:

$$L = \frac{\beta E}{\pi}$$

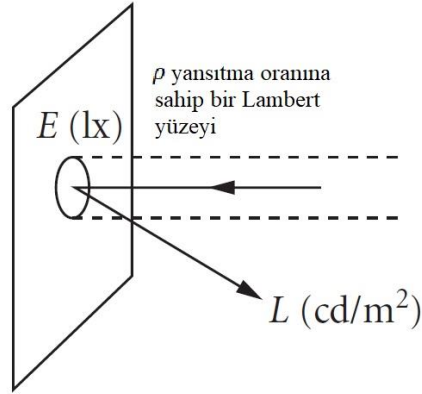
Parıldama katsayısı (q), bir yüzey elemanın belirli bir yöndeki parıldamasının, belirli aydınlatma koşullarında yüzey elemanı üzerindeki aydınlığa oranıdır:

$$q = \frac{L}{E}$$

q kullanılarak parıldama ve aydınlık arasındaki ilişki şu formül ile verilir:

$$L = q E$$

Parıldama faktörü, ışıma faktörüne karşılık gelir ve parıldama katsayısı, radyometride ışıma katsayısına karşılık gelir. BRDF (*bidirectional reflectance distribution function* (çift yönlü yansıma dağılımı fonksiyonu)), aynı zamanda, ışıma katsayısı ile aynı kavram için kullanılır (Bass vd. 2010).



Şekil 3.9 Aydınlık ve parıldama arasındaki ilişki (Bass vd. 2010'dan değiştirilerek alınmıştır)

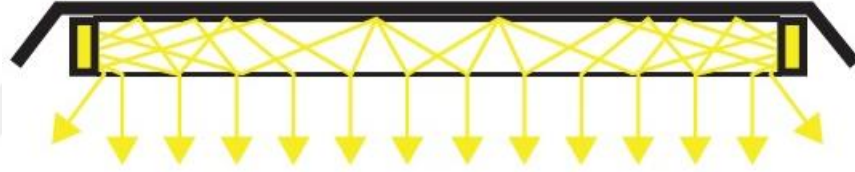
4. ARKA IŞIK ÜNİTESİ ÇEŞİTLERİ VE BİRİMLERİ

4.1 Arka Işık Ünitesi Çeşitleri

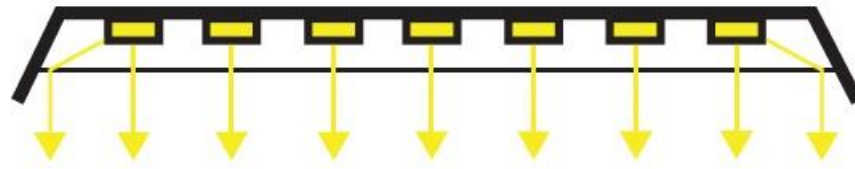
Prensip olarak, LED bileşenlerinin düzenlenebileceği iki farklı yol vardır:

- i) "Işık-kılavuzu düzenlemesi (*Light-guide arrangement*)" veya "kenar-aydınlatmalı (*edge-lit*)" (Şekil 4.1).
- ii) "Doğrudan arka ışık düzenlemesi (*direct backlight arrangement*)" veya "arka-aydınlatmalı (*back-lit*)" (Şekil 4.2).

Kenar aydınlatması ile çok ince (5 – 15 mm) ve düzgün arka ışık birimleri üretilir. Arka aydınlatması ise düşük güç tüketimi, iyi termal tasarım ve 15 mm ile 30 mm arasındaki kalınlıkta mükemmel ölçeklenebilirlik sunar. Günümüz teknolojisinde, kenar-aydınlatma sistemleri, yaklaşık maksimum 65 inç köşegen ölçülerinde arka ışık ünitelerine iyi optik verim ile yerleştirilebilirken, arka-aydınlatmalı sistemler köşegen olarak sınırsızdır. Her iki teknoloji de farklı özelliklere ve gereksinimlere uyarlanabilir.



Şekil 4.1 Kenar-aydınlatmalı LED paneli (<https://sarinenenergy.com>)



Şekil 4.2 Arka-aydınlatmalı LED paneli (<https://sarinenenergy.com>)

Kenar-aydınlatmalı panellerin iç çerçevesi boyunca içe doğru bakan bir sıra LED vardır. Işığı difüzörden eşit olarak dağıtan bir PMMA plastik ışık kılavuzu plakası (*light guide plate*) boyunca panelin ortasına doğru ışık yayar.

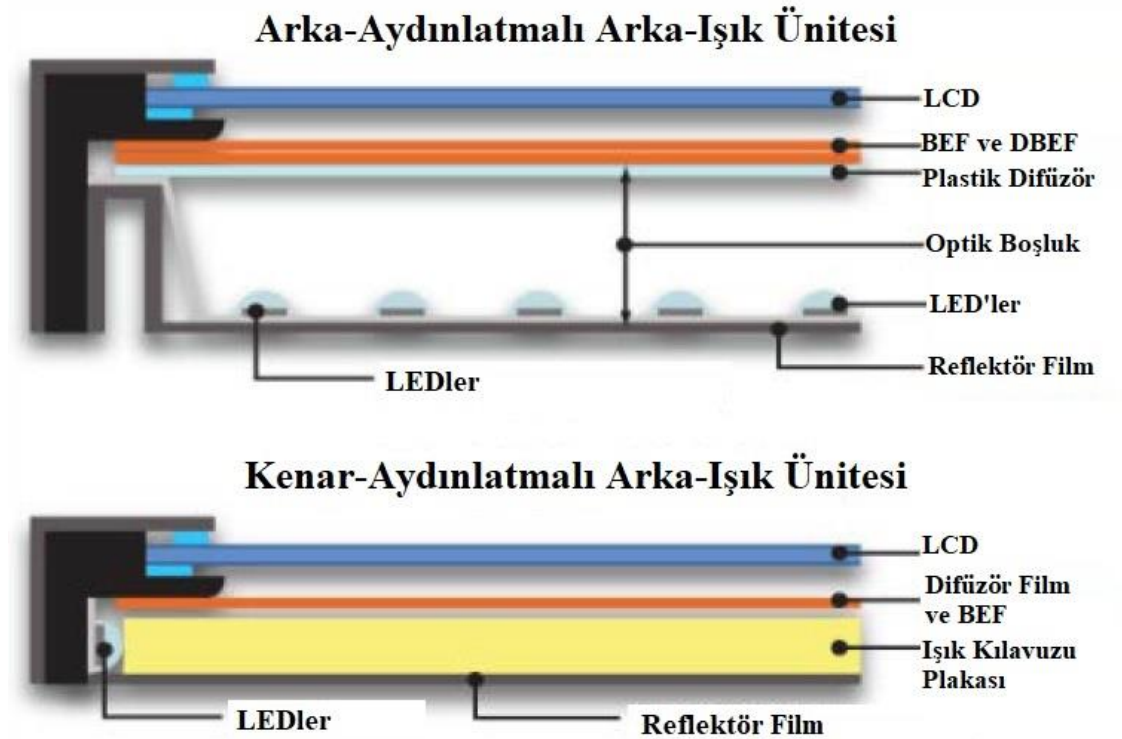
Arka-aydınlatmalı paneller daha az karmaşık bir tasarımlardır. Panelin arkasında, basit bir difüzörden aşağı doğru parlayan birkaç sıra LED vardır (Kobayashi vd. 2009).

Aşağıdaki çizelgede kenar-aydınlatmalı ve arka-aydınlatmalı arka ışık ünitelerinin avantaj ve dezavantajları anlatılmıştır.

Çizelge 4.1 Kenar ve arka-aydınlatmalı LED panellerinin kıyaslanması

Kenar-aydınlatmalı LED paneli	Arka-aydınlatmalı LED paneli
Avantajlar	Avantajlar
Aşırı ince yapı	LED tavan aydınlatmalarına (<i>troffer</i>) kıyasla ince
Çok yönlü montaj uygulamaları	Daha yüksek enerji verimliliği
Eşit ve "gölgesiz (eşit ışık dağılımı)" aydınlatma	Üretimi daha ucuz
Parlama-önleyici özellikler	Daha yönlü ışık
Kurulumu kolay	Tutarlı ve güçlü parlaklık
Dezavantajlar	Dezavantajlar
Üretimi daha pahalı	Daha az montaj uygulaması ile daha kalın
Biraz daha yüksek enerji tüketimi	Işık küçük gölgelerle eşit değil (düşük ışık dağılımı)

Her iki arka ışık ünitesinde LED, reflektör filmi, difüzör, parlaklık artırıcı filmler (*brightness enhancement films*) birimleri kullanılır. Kenar-aydınlatmalı ünitelerde bunlara ek olarak ışık kılavuzu plakası vardır. İki arka ışık ünitesinin yandan görünüşleri şekil 4.3'te verilmiştir.



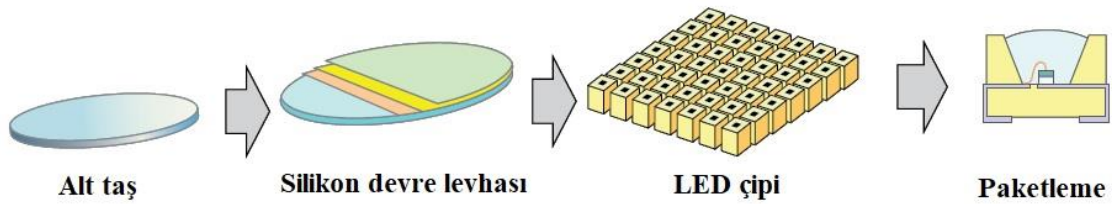
Şekil 4.3 Kenar ve arka-aydınlatmalı arka ışık ünitelerinin yandan görünüşleri (<http://irkentot.blogspot.com>'dan değiştirilerek alınmıştır)

4.2 Arka Işık Ünitesi Birimleri

Arka ışık ünitelerinde aydınlatma için çoğunlukla LED kullanılır. LED'lerden gelen ışığın soğurulmasını azaltmak ve LCD'ye maksimum ışığı taşıyabilmek için reflektör filmi, ışığı homojen dağıtmak için difüzör ve parlaklığı arttırmak için BEF ve DBEF kullanılır. Bu birimlerin tamamı hem kenar hem de arka-aydınlatmalı arka ışık ünitelerinde kullanılır. Kenar-aydınlatmalı arka ışık ünitesinde bu birimlerden farklı olarak ışık kılavuzu plakası vardır. Bu birimlerin sayısı ve malzeme seçimini tasarımcı belirler.

4.2.1 LED

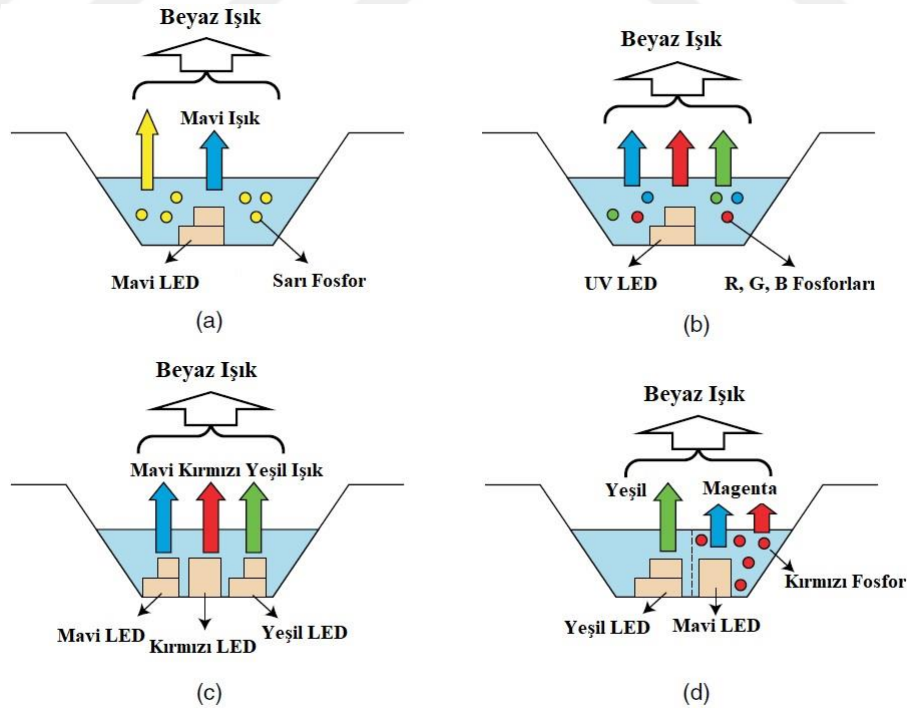
LED, bir ileri gerilim uygulandığında yarı-monokromatik bir p-n eklemli ışık-yayan diyottur. İleri gerilim altında, n-tipi bölgede iletim bandındaki elektronlar ve p-tipi bölgedeki değerlik bandındaki boşluklar birbirlerine akar ve p-n birleşiminde yeniden birleşirler. Rekombinasyon (serbest elektronların boşluklarla birleşmesi) enerjisi, iletim ve değerlik bandı arasındaki enerji boşluğuna eşit olan foton olarak salınır. Bu ışık üretme mekanizmasına elektroluminesans denir. Bu LED'leri bir LCD arka ışık ünitesinde ışık kaynağı olarak kullanmak için, LED paketleri dikkatlice kontrol edilen süreçlere göre üretilmelidir: kimyasal buhar biriktirme ile bir alt tabaka üzerinde epitaksiyel büyütme, çip yapma, paketlenme, esnek baskılı devre kartı üzerinde yüzey montaj teknolojisi süreçleri. Bu proseslerin şematik bir dizisi şekil 4.4'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4 LED paketleri üretme süreci (Souk vd. 2018'den değiştirilerek alınmıştır)

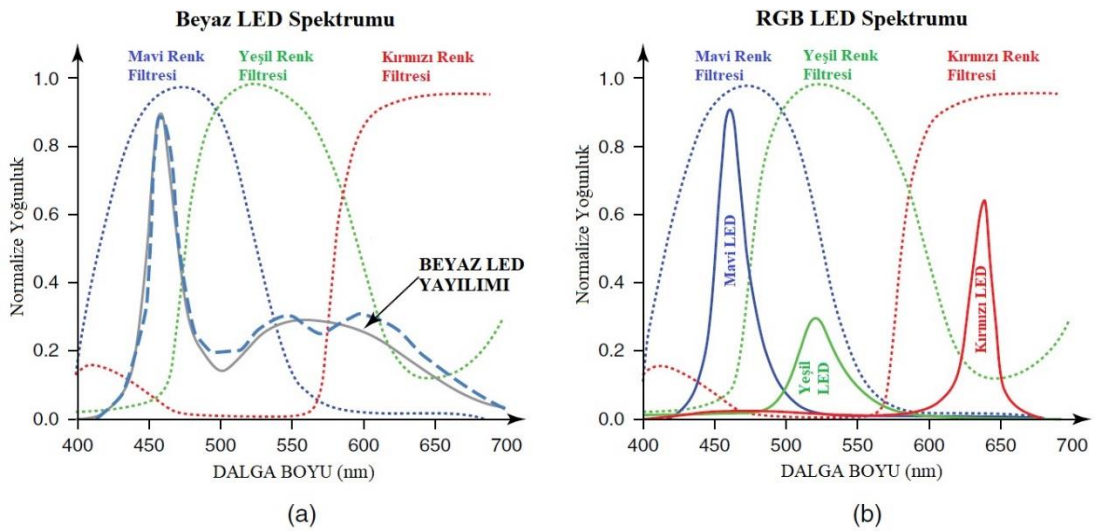
LCD, uygun renk dengesine sahip beyaz ışık kaynağına ihtiyaç duyar. Bu da kırmızı, yeşil ve mavi renklerin (ana renklerin) ayrı ayrı iyi dengelenmesini gerektirir. Beyaz LED'leri yapmanın birkaç yöntemi vardır. En basit olanı mavi LED çiplerine sarı fosfor uygulamaktır. Bu durumda, fosfor parçacıkları, LED çiplerinden gelen mavi fotonlar tarafından uyarılır ve yeşil ve kırmızıyı kapsayan geniş bir spektrum ile karakterize edilen sarı ışık yayar. Şekil 4.5 (a), bu beyaz LED'in şematik bir enine kesitini gösterirken ve şekil 4.6 (a) LCD paneldeki renk filtrelerinin tipik geçirgenlik eğrileri ile bu LED'in

spektrumunu gösterir. Bu tip beyaz LED, diğer renklere göre sarı ışık parıldamasına daha fazla katkıda bulunduğundan, diğer türlere göre en yüksek parlaklık verimini sergiler. Ancak 600 nm 'nin üzerindeki kırmızı bileşen yetersizdir ve yeşil bileşen geniş bir uzunluğa sahiptir. Bu nedenle, LCD panelde saf kırmızı ve yeşil renklerin sağlanmasında sınırlamalar vardır. Bu tür beyaz LED kullanılan LCD'lerin düşük renk aralığında (*gamut*) bulunmasının ana nedeni bu sınırlamalardır. Renk aralığını iyileştirmek için sarı fosfor malzemesi yerine kırmızı ve yeşil fosfor karışımı kullanılır (Şekil 4.6 (a) 'da kesikli çizgi). Bununla birlikte, LED çipler ve fosfor malzemeleri arasında farklı yayma özellikleri vardır. Bu nedenle, beyaz renk, sıcaklık, sürücü akımı veya sürücü süresi değiştikçe dengeli olandan sapma eğilimindedir. Alternatif yöntemler, UV-LED'ler üzerine kaplanmış fosforlardan yayılan R (Kırmızı), G (Yeşil), B (Mavi) birincil ışıklarını birleştirmek (Şekil 4.5 (b)) veya üç renkli LED çipleri yapmaktır (Şekil 4.5 (c)). Şekil 4.6 (b), LED'in R, G, B çipli ışık spektrumunu göstermektedir. Üç renkli LED çipleri çok geniş bir renk yelpazesi verebilir. Ancak, mavi ve yeşil ışıklar InGaN tabanlı çiplerden üretilirken kırmızı ışık AlGaAs veya AlInGaP tabanlı çiplerden gelir. Bazı malzemelerdeki farklılık nedeniyle, bu üç LED çipinin yayma özelliklerinin sıcaklık ve akım yoğunluğuna bağlılıkları büyük ölçüde birbirinden farklıdır.



Şekil 4.5 LED çipleri ve fosfor malzemelerinden oluşan çeşitli beyaz LED konfigürasyonları (Souk vd. 2018'den değiştirilerek alınmıştır)

Şekil 4.5 (d), mavi LED çipinin etrafına kırmızı fosfor kaplanırken, yeşil LED çipinin etrafında fosfor materyalinin olmadığı bir örneği göstermektedir. Bu tasarımın bazı avantajları olabilir, çünkü yeşil çipin parlaklık verimi, mavi çipinkinden çok daha düşüktür ve buna yeşil boşluk problemi adı verilir. Ayrıca, bu LED yalnızca InGaN tabanlı çipler kullanır, bu nedenle yayma özelliklerinin sürücü süresi ve sıcaklığa göre değişimi R, G, B çiplerinden oluşan LED'inkinden daha küçüktür. Şekil 4.5 (d)'de gösterilen beyaz LED'in sağ tarafı, mavi ve kırmızı renklerin karışımı olan ve sol taraftan yayılan yeşil ışığın tamamlayıcı rengi olan magenta rengi yayar. Genel olarak, şekil 4.5 (a) 'da gösterilen mavi LED çipleri ve fosfor parçacıklarından (sarı veya yeşil / kırmızı karışım) oluşan beyaz LED, yüksek verimliliği ve düşük maliyeti nedeniyle piyasada ağırlıklı olarak kullanılmaktadır (Souk vd. 2018).



Şekil 4.6 (a) Mavi çip ve sarı fosfor (düz çizgi), mavi çip ve kırmızı-yeşil fosfor (kesikli çizgi) sistemi (Şekil 4.5 (a)) ve (b) R, G, B LED sistemi (Şekil 4.5 (c)) beyaz LED spektrumları. (LCD renk filtrelerin tipik iletim eğrileri de çizilmiştir) (Souk vd. 2018'den değiştirilerek alınmıştır)

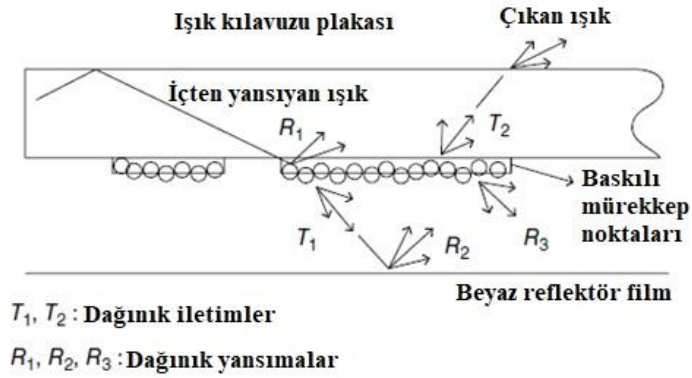
4.2.2 Işık kılavuzu plakası

Bir ışık kılavuzu plakası LED'lerden gelen ışığı arka ışık ünitesinin ön yüzeyine homojen olarak yönlendirmek için, geleneksel olarak, üstte veya daha sık olarak alt kısımda oyulmuş (damga basma (*imprinting*)), kabartmalı (baskı) veya kazınmış (lazer baskı) noktalara sahip kalın (1,5-4,0 mm arasında) bir akrilik plastik levhadır.

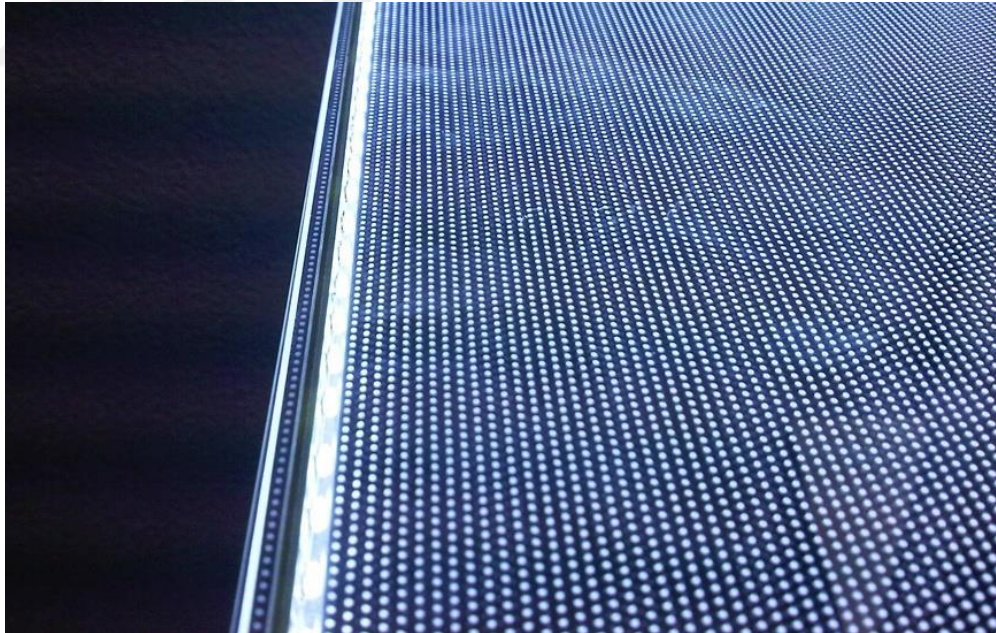
Işık kılavuzu plakasının alt yüzeyindeki optik desenler (oyulmuş, kabartmalı veya kazınmış nokta deseni) genellikle şekil 4.7'de gösterildiği gibi dağıtıcı elementlerden

oluşur. Bu şekil, optik desene çarpan ışığın dağınık yansıma veya dağınık iletimden geçebileceğini göstermektedir. Kısaca LED’lerden gelen homojen olmayan ışık, bu yolla LCD’ye homojen olarak yansıtılır (Souk vd. 2018).

Şekil 4.8’de kazınmış optik desene sahip bir ışık kılavuzu plakası gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi kenardaki LED’lerden gelen ışık desenler sayesinde homojen olarak aydınlatma sağlamıştır.



Şekil 4.7 Işık kılavuzu plakasının çalışma prensibi (Souk vd. 2018’den değiştirilerek alınmıştır)



Şekil 4.8 Işık kılavuzu plakası (<https://www.pyrasied.nl>)

4.2.3 Reflektör film

Reflektör filmler arka ışık ünitesinin bir başka temel unsurudur. Bir arka ışık ünitesi tipik olarak en az bir reflektör gerektirir. Reflektör filmin işlevi, kenar-aydınlatmalı arka ışık ünitesi için, ışığı ışık kılavuz plakasının yanından ve arkasından yansıtmak ve geri dönüştürmektir. Arka-aydınlatmalı arka ışık ünitesinde ise difüzör, BEF ve DBEF'den geri yansıyan ışığı geri dönüştürmek için kullanılır. Reflektör filminin hammaddesi PET'dir (*Polyethylene Terephthalate*) (Jurichich 2015).

4.2.4 Difüzör (Diffuser)

İki çeşit difüzör vardır; difüzör film ve plastik difüzör. Difüzör filmler PET veya PC (polikarbonat) bazlıdır. Çok ince yapıdadır (0,1 – 0,5 mm). Hacimsel difüzörler akrilik veya PC bazlıdır. Daha kalın yapıdadır (1 – 4 mm).

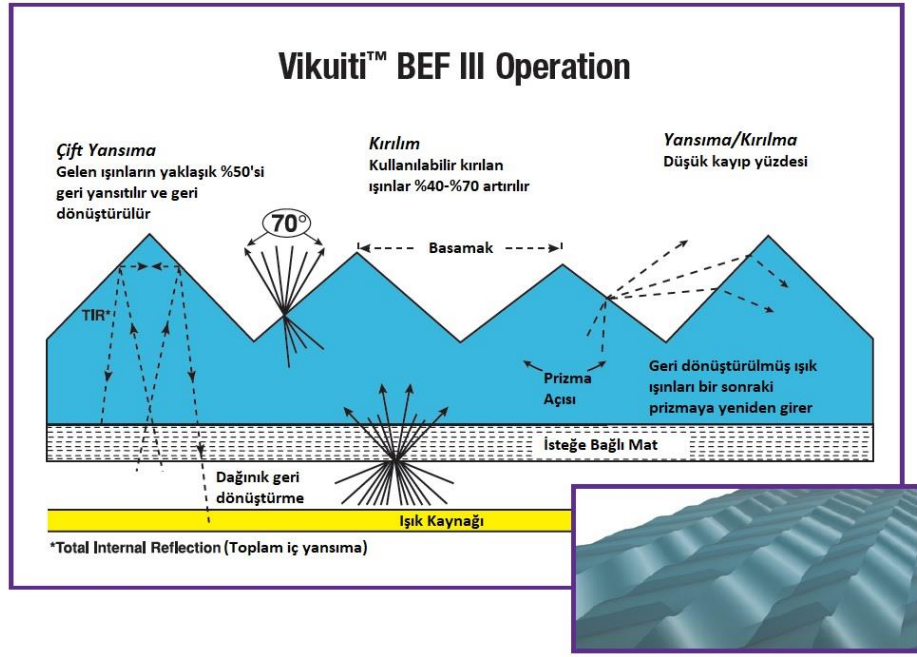
Difüzör filmler genellikle kenar-aydınlatmalı arka ışık ünitelerinde kullanılır. Difüzör film dağınık iletim yapabilmesi için mat bir yapıdadır ve ışık kılavuzu plakasından gelen homojenliği az olan ışık dağılımının homojenliğini artırmak için kullanılır.

Hacimsel difüzörler genellikle arka-aydınlatmalı arka ışık ünitelerinde kullanılır. Bu difüzörlerin dağınık iletim yapabilmesi için ön yüzeyine kimyasal bir işlem uygulanır ve matlaştırılır. Arka-aydınlatmalı arka ışık ünitelerinde çok sayıda LED'den gelen homojen olmayan ışığı, kalın plastik yapısı ile homojenleştirir (Jurichich 2015).

4.2.5 BEF ve DBEF (Parlaklık arttırıcı filmler)

Parlaklık arttırıcı film (*Brightness Enhancement Film* (BEF)), %59'a kadar parlaklık kazanımı sağlamak için benzersiz bir rastgele prizmatik yapı kullanan, ikinci nesil mikro kopyalanmış bir arttırıcı filmidir. BEF, dağınık ışığı arka ışık birimine geri gönderir ve oradan ışık LCD'ye doğrudan yönlendirir, böylece eksen üzerinde görüntüleyiciye daha fazla parlaklık sağlar. Tek bir film %59'a kadar parlaklık artışı sağlar ve 90°'de çapraz koyulan iki film %111'e kadar parlaklık artışı sağlayabilir. Bu artan parlaklık güç tasarrufuna çevrilebilir.

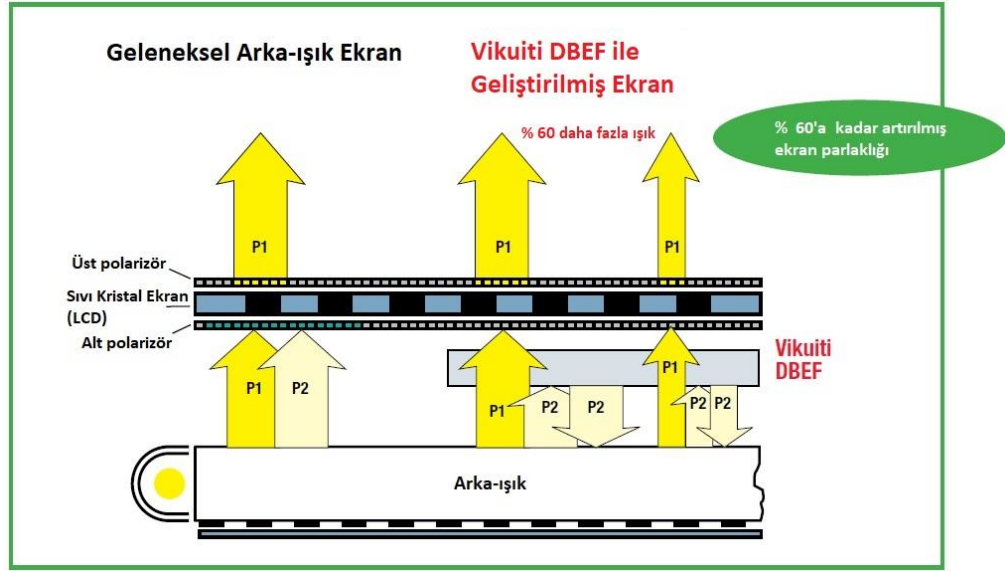
BEF, arka ışık ünitesinin verimliliğini artırmak için kırılma ve yansımayı kullanır. BEF, görüntüleme konisi içindeki ışığı izleyiciye doğru kırar. Bu açının dışındaki ışık geriye doğru yansıtılır ve uygun açıda çıkana kadar geri dönüştürülür (Vikuiti Brightness Enhancement Film (BEF) III 2002).



Rastgele Prizma Deseni

Şekil 4.9 BEF çalışma prensibi (Vikuiti Brightness Enhancement Film (BEF) III 2002'den değiştirilerek alınmıştır)

DBEF (*Dual Brightness Enhancement Film* (Çift Parlaklık Arttırıcı Film)) kutuplanma geri dönüşümü ile çalışır. Şekil 4.10'un sol kısmı geleneksel arkadan aydınlatmalı, DBEF kullanılmayan bir sistemi göstermektedir. Tipik bir kutuplayıcı P2'yi emer, ancak DBEF P2'yi arka ışığa geri yansıtır. Burada P2, P1 ışığına geri dönüştürülür. DBEF ile LCD üzerinden daha fazla P1 ışığı iletilebilir, bu da bir arka ışık için eksen üzerinde aydınlatmayı %60'a ve bir ışık kılavuzu plakası için %97'ye kadar artırır. DBEF, mevcut ışığı izleyiciye yeniden yönlendirerek bir arka ışık ekranında ek eksen üzerinde aydınlatma performansı sağlar (3M Dual Brightness Enhancement Films 2017).

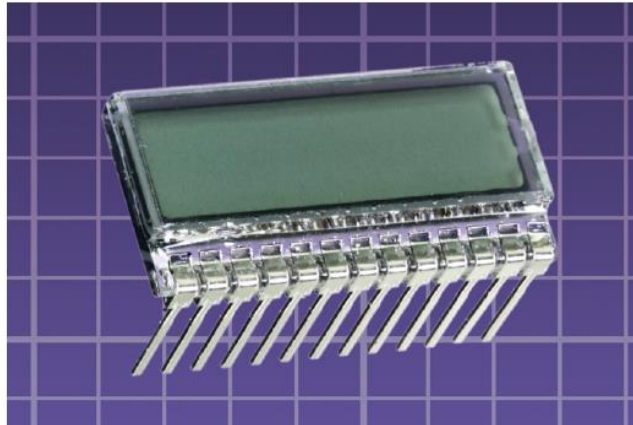


Şekil 4.10 DBEF çalışma prensibi (3M Dual Brightness Enhancement Films 2017'den alınmıştır)

BEF'in tek filmi, monitörlerde ve televizyonlarda LCD panellerle kullanım için idealdir. BEF'in iki adet kullanılan çapraz filmleri ise dizüstü bilgisayarlardaki LCD panellerle kullanım için idealdir. BEF, DBEF gibi bir polarize film ile birlikte kullanıldığında parlaklıkta daha da büyük artışlar elde edilebilir.

4.3 Sıvı Kristal Ekran (LCD)

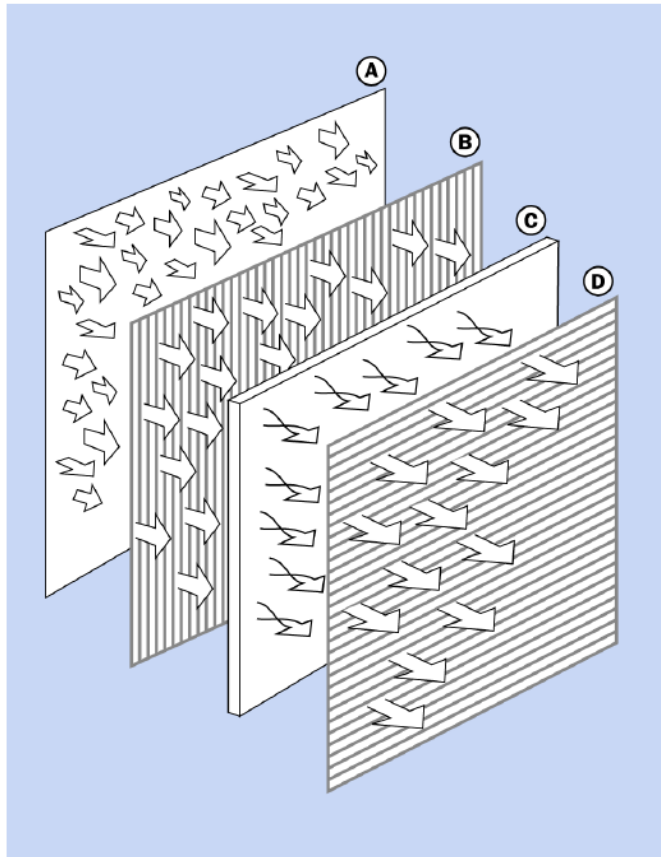
Bir LCD, bir AC voltajına yanıt olarak görünümünü değiştiren bir veya daha fazla bölüm kullanarak, küçük bir ekran paneli veya ekranda bilgi sunar. Ekran, bir bitmapte alfasayısal (*alphanumeric*) karakterler ve/veya semboller, simgeler, noktalar veya pikseller içerebilir. Çok düşük güç tüketimi nedeniyle, dijital saatler ve hesap makineleri gibi pille çalışan cihazlarda rakamları görüntülemek için genellikle basit bir tek renkli LCD kullanılır. Bu tipte küçük bir likit kristal ekran şekil 4.11'de gösterilmektedir.



Şekil 4.11 Küçük bir tek renkli LCD (Platt ve Jansson 2015)

Çok renkli arka-aydınlatmalı ve kenar-aydınlatmalı LCD'ler artık cep telefonları, bilgisayar monitörleri, oyun oynama cihazları, televizyon ekranları ve uçak kokpiti ekranları olmak üzere neredeyse tüm video görüntü biçimlerinde sıklıkla kullanılmaktadır.

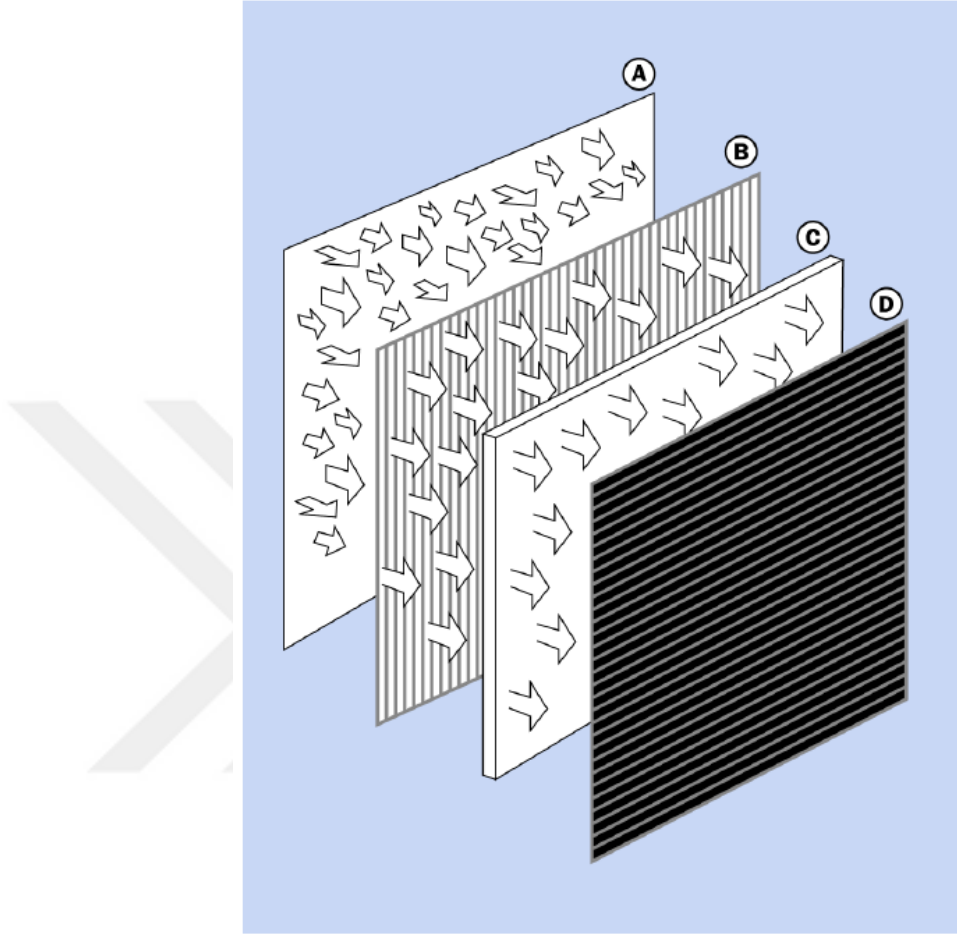
Şekil 4.12, arka ışık kullanan bir LCD'nin basitleştirilmiş bir görünümünü göstermektedir. Tutarsız ışık, arka ışık panelinden (A) çıkar ve elektrik alan vektörünü sınırlayan dikey bir kutuplayıcı filtreye (B) girer. Kutuplanmış ışık daha sonra, herhangi bir voltaj uygulanmadığında kutuplanmayı 90° döndüren normal bir sarmal yapıda organize edilmiş moleküllerden oluşan bir sıvı kristale (C) girer. Işık şimdi yatay bir kutuplayıcı filtresinden (D) geçer ve kullanıcı tarafından görülebilir.



Şekil 4.12 İki kutuplayıcı ve bir sıvı kristalin kombinasyonu (Platt ve Jansson 2015)

Şekil 4.13, sıvı kristale şeffaf elektrotlar aracılığıyla voltaj uygulandığında ne olduğunu gösterir. Moleküller, elektrik potansiyeline yanıt olarak kendilerini yeniden düzenler ve ışığın kutbunu değiştirmeden geçmesine izin verir. Sonuç olarak, dikey kutuplu ışık artık ön, yatay kutuplu filtre tarafından engellenir ve ekran kararır.

Sıvı kristaller iyonik bileşikler içerir. Sıvı kristale uzun bir süre boyunca bir DC voltajı uygulandığında elektrotlara çekilecek iyonik bileşikler ekranı kalıcı olarak bozabilir. Bu nedenle AC voltajı kullanılmalıdır. 50 Hz – 100 Hz arasında bir AC frekansı yaygındır.



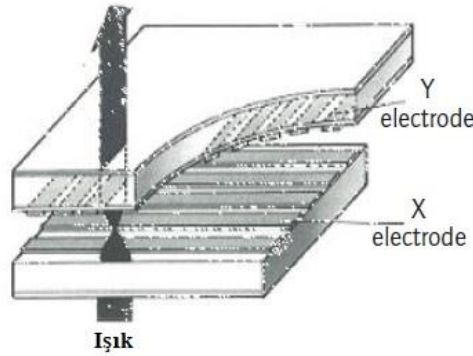
Şekil 4.13 Voltaj uygulandığında LCD karanlık görünür (Platt ve Jansson 2015)

Geçirgen bir LCD, bir arka ışığın görünür olmasını gerektirir ve şekil 4.12’de gösterilen tiptir. En basit şekliyle, tek renkli bir cihazdır, ancak genellikle kırmızı, yeşil ve mavi filtreler eklenerek tam renkli görüntülenecek şekilde geliştirilmiştir. Alternatif olarak, beyaz bir arka ışık yerine, bir dizi piksel boyutlu kırmızı, yeşil ve mavi LED kullanılabilir, bu durumda filtreler gereksizdir.

Arkadan aydınlatmalı renkli LCD’ler, neredeyse tüm video monitörlerinde ve televizyonlarda varsayılan sistem olan LED’e sahiptir. LCD’ler sadece daha ucuz olmakla kalmaz, aynı zamanda daha büyük boyutlarda imal edilebilir.

LCD ekranlar için iki temel çeşit mevcuttur: pasif ve aktif matris. Pasif veya basit matris hesap makinelerinde ve diğer hareketsiz görüntü uygulamalarında kullanılır ve iki teknolojidenden daha ucuz olanıdır. Aktif matris veya ince film transistör (*Thin Film Transistor* (TFT)), üstün anahtarlama performansı sundukları için dizüstü bilgisayarlarda, televizyonlarda ve diğer hareketli resim uygulamalarında kullanılır (Platt ve Jansson 2015).

Bir pasif matris sisteminde, ekranın her satırı veya sütunu tek bir elektrik devresine sahiptir. Pikseller, satır ve sütun olarak birer birer gönderilir. X elektrotları, sıvı kristal hücrenin altındaki alt taş üzerine yerleştirilir ve Y elektrotları, üstteki alt taş üzerine yerleştirilir. Hedef pikselleri seçmek için uygun zamanlamayla X ve Y iletkenlerine elektrik sinyalleri uygulanır. Anahtarlama cihazı yoktur ve sıvı kristale uygulanan voltaj ile kontrol edilir. Aynı zamanda bulanık görüntüler üretir ve izleme açısı sınırlıdır. Dahası, pasif matris TN (*Twisted Nematic*) ekranlar tek renklidir, düşük maliyetli ekranlarda ve cihazlarda kullanılan gri-gümüş arka plan üzerine siyahla tipikleştirilmiş ekranlardır. Şekil 4.14’te bir pasif matris sisteminin yapısı gösterilmiştir. Şekil 4.15’te ise pasif matris bir ekran gösterilmiştir.



Şekil 4.14 Pasif matris sisteminin yapısı (Ross ve Rao 2006)



Şekil 4.15 Pasif matris LCD ekran

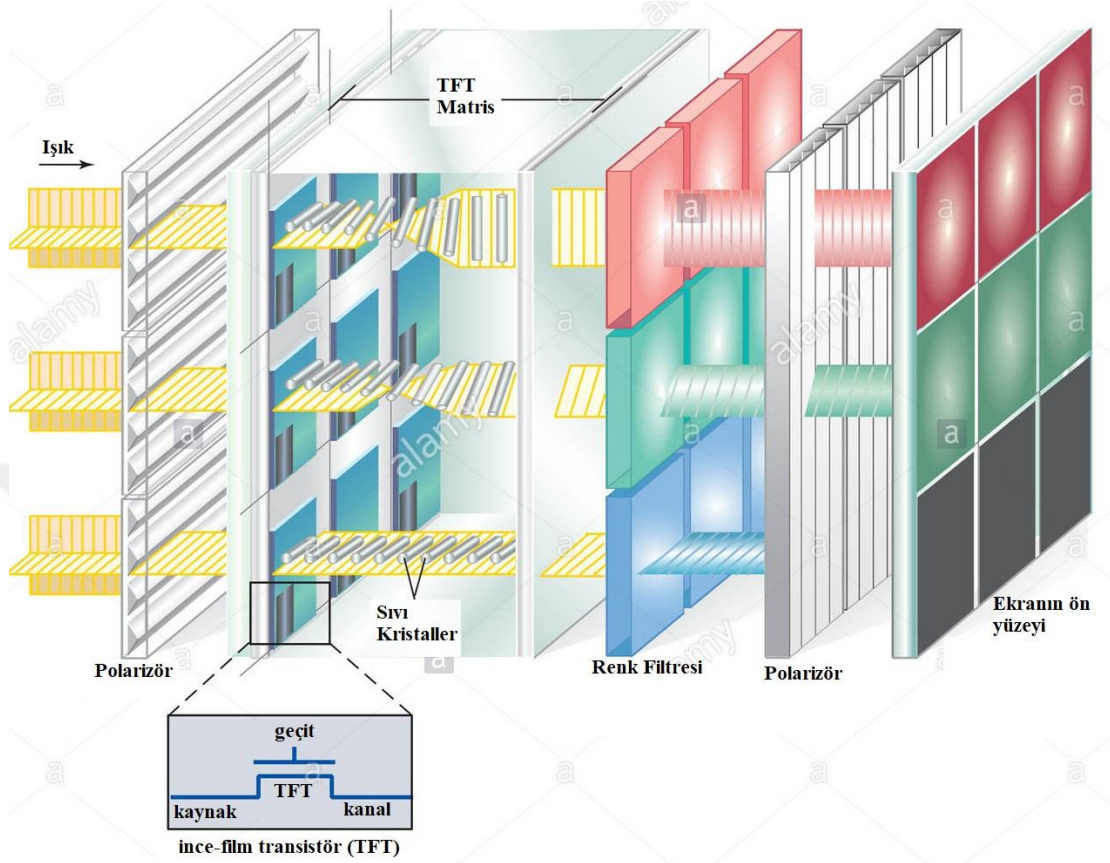
Aktif matris ekranlar da TN (90° bükülme) yapısını temel alır, ancak sinyal çoğaltma sınırlamasını ortadan kaldıran aktif bir anahtarlama elemanı içerirler. Her elektroda bir anahtarlama cihazı ve bir depolama kapasitörü entegre edilmiştir. Sonuç olarak, aktif matris LCD'lerin tarama satırlarının sayısı üzerinde herhangi bir sınırı yoktur, bu da anahtarlama oranını neredeyse bir dereceye kadar büyük ölçüde artırır. Aktif matris sistemlerinde iki tip aktif eleman kullanılabilir: metal-yalıtkan-metal (*metal-insulator-metal* (MIM)) ve ince-film transistör.

MIM yapısal olarak basit matris sistemiyle aynıdır, ancak iki terminal arasına sıkıştırılmış metalik-yalıtlı metal yapıya sahip bir diyota sahiptir. Diyot, anahtarlama işlevini gerçekleştirir.

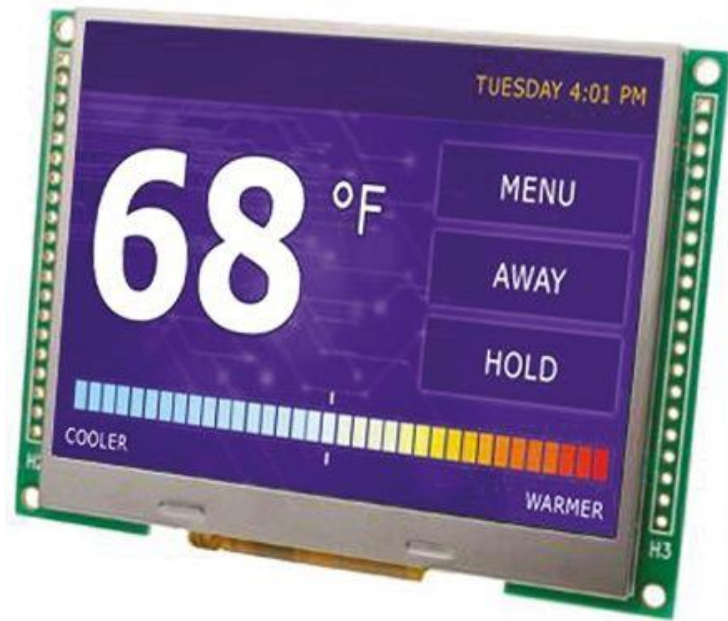
İnce film transistör konfigürasyonunda, her birini açmak (ışık) veya kapatmak (karanlık) için her piksele (her pikselin her rengi için bir transistör) anahtarlama transistörleri veya diyotlar eklenir. Dolayısıyla $800 \times 600 \times 3$ veya 1.440.000 birim piksele sahip bir SVGA renkli TFT LCD panel aynı sayıda transistöre sahip olacaktır. Pasif matris sistemlerinde olduğu gibi, her pikselin likit kristal elementleri, herhangi bir voltaj uygulanmadığında ışığın ekrandan geçmesine izin verecek şekilde düzenlenmiştir. Voltaj eklendiğinde kristaller voltajla orantılı olarak 90° 'ye kadar bükülerek ışığın polarizasyonunu değiştirir ve bloke eder. Transistörler, bükülme derecesini ve dolayısıyla kırmızı, yeşil ve mavi elementlerin yoğunluğunu kontrol eder. TFT sisteminde, X ve Y elektrotları, TFT dizileriyle aynı alt tabaka üzerinde oluşturulur. Anahtarlama sinyalleri X elektrotlarına ve video sinyalleri Y elektrotlarına uygulanır. TFT'ler, ekranda bir matris içinde düzenlenmiş ve aktif matris TFT (AMTFT) ismine götüren aktif öğelerdir. TFT'nin yapısı, MIM'e kıyasla üstün anahtarlama performansı sunar. TFT'ler, geleneksel katot ışınlı tüpü ekranlar kadar keskin renkli görüntüler üretir. TFT'lerde 25 ms ekran yanıt süreleri ve 200:1 ila 400:1 kontrast oranları elde edilir.

TFT LCD teknolojisi, üstün renk performansı ve daha hızlı yanıt süreleri nedeniyle ekran üreticileri tarafından yaygın olarak benimsenmiştir. TFT'ler, dizüstü bilgisayarlar ve monitörler gibi birçok uygulama için standart haline geldi, öyle ki, aktif matris ve TFT

terimleri genellikle birbirlerinin yerine kullanılır. Şekil 4.16'da bir TFT LCD yapısı gösterilmiştir. Şekil 4.17'de ise TFT LCD ekran gösterilmiştir (Ross ve Rao 2006).



Şekil 4.16 TFT LCD yapısı (<https://www.alamy.com> 2020'den değiştirilerek alınmıştır)



Şekil 4.17 TFT LCD ekran (<https://turkish.alibaba.com>)

Tam renkli TFT LCD'ler için, orijinal olarak flüoresan ışıklar kullanıldı. Uzun ömürlüdürler, az ısı üretirler ve düşük güç tüketimine sahiptirler. Ancak, nispeten yüksek voltaj gerektirirler ve düşük sıcaklıklarda iyi çalışmazlar. Dizüstü bilgisayarlar ve masaüstü monitörler için yakın zamanda düz ekranlarda soğuk katot floresan paneller kullanıldı.

Daha sonra, beyaz LED'ler, kabul edilebilir olduğu düşünülen bir dizi frekans ürettikleri noktaya kadar geliştirildi. LED'lerden gelen ışık, tüm ekranda makul ölçüde homojen aydınlatma sağlamak için bir difüzörden geçer. LED'ler, floresan panellerden daha ucuzdur ve daha ince bir ekrana izin verir.

Üst düzey video monitörleri, beyaz arka ışık yerine ayrı ayrı kırmızı, yeşil ve mavi LED'ler kullanır. Bu, renkli filtre ihtiyacını ortadan kaldırır ve daha geniş bir renk aralığı üretir. RGB LCD monitörler olarak adlandırılan monitörler daha pahalıdır ancak doğru renk üretiminin gerekli olduğu video ve baskı medyasındaki profesyonel uygulamalar için tercih edilir (Platt ve Jansson 2015).

5. LIGHTTOOLS PROGRAMI VE ARKA IŞIK ÜNİTESİ TASARIMI

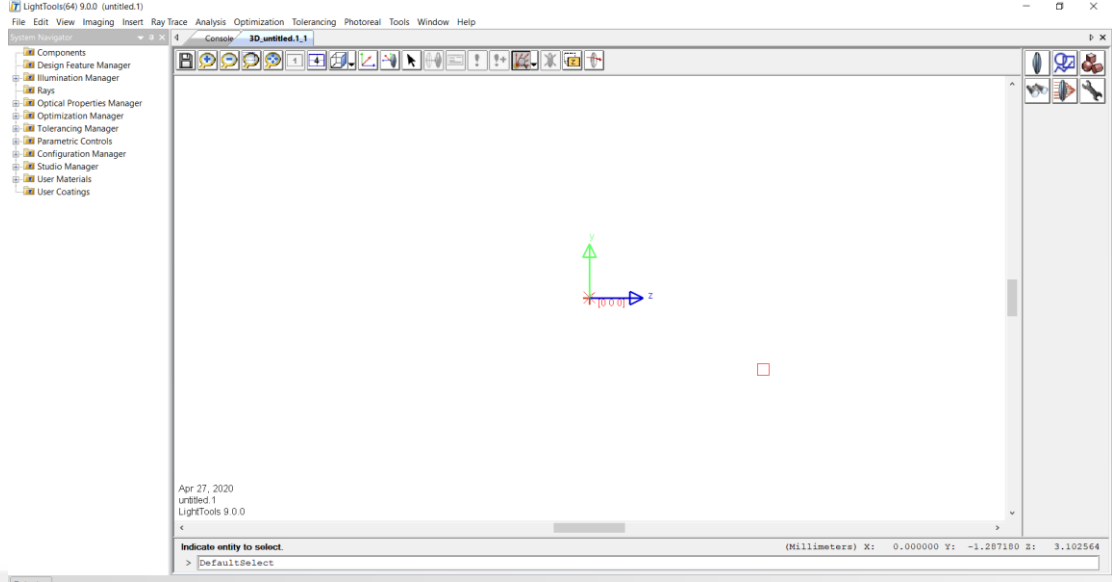
5.1 LightTools

LightTools, etkileşimli üç boyutlu katı modellemeye dayanan güçlü bir aydınlatma tasarım programıdır. Güçlü optik ve aydınlatma analizi özelliklerini, modern mekanik CAD paketlerine benzer, öğrenmesi kolay, tamamen etkileşimli bir grafik arabirimi ile birleştirir. Kullanıcıların birçok uygulama için ışık kaynaklarını, mekanik parçaları ve optik bileşenleri modellemesine ve ayrıca tüm ışık yollarını (ayırıcılar, saçılma ve çok-sıralı kırınım) hesaplamasına olanak tanır. LightTools, Microsoft Excel ve Visual Basic gibi Windows tabanlı diğer araçlarla bütünleşme sağlayan bir arabirim kullanılarak genişletilebilir.

Aydınlatma veya ışıklandırma sistemleri bir veya daha fazla kaynaktan ışık alır ve bir alan veya sabit açı üzerinde istenen ışık dağılımını üretmek için bir şekilde dönüştürür. LightTools, farklı ışık kaynaklarının ve dönüştürücü elemanların geometrik ve optik özelliklerini modeller ve son ışık dağılımını hesaplamak için model boyunca optik ışın izlemeyi kullanarak ışığın yollarını değerlendirir.

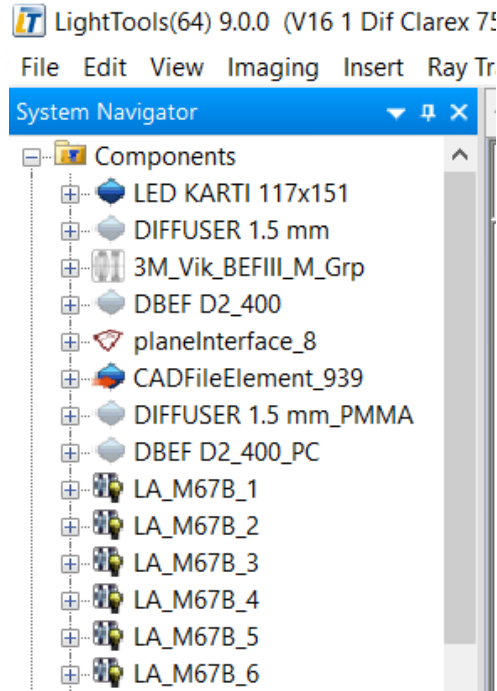
Işık dağılımları, istenen alanlar ve/veya açılar üzerindeki aydınlık, parıldama veya aydınlatma şiddeti hesaplamak için Monte Carlo simülasyonları kullanılarak hesaplanır. Işıklar, kaynak(lar)dan rastgele konumlardan ve yönlerden başlatılır, optik sistem üzerinden izlenir ve alıcılarda toplanır. Aydınlık, yüzey alıcılarında toplanan ışınlar ve uzak alan alıcılarda toplanan ışınların yoğunluğu için hesaplanabilir. Yüzey alıcıları için bir parıldama ölçer (*luminance meter*) tanımlayarak, bu yüzeyden uzaysal veya açısal parıldama değişimi hesaplanabilir (David 2017).

Şekil 5.1’de LightTools ana ekranı gösterilmiştir. Tüm çalışma ortamlarına, menülere, üç boyutlu tasarım yapılan bölüme ana ekrandan ulaşılır.



Şekil 5.1 LightTools ana ekranı

LightTools ana ekranının sol kısmında yer alan sistem kılavuzu şekil 5.2’de gösterilmiştir. Bu bölümde tasarlanan tüm birimler bulunur. Bu şekilde bir kenar-aydınlatmalı arka ışık ünitesinin tüm birimleri vardır: difüzör, BEF, DBEF ve LED’ler.

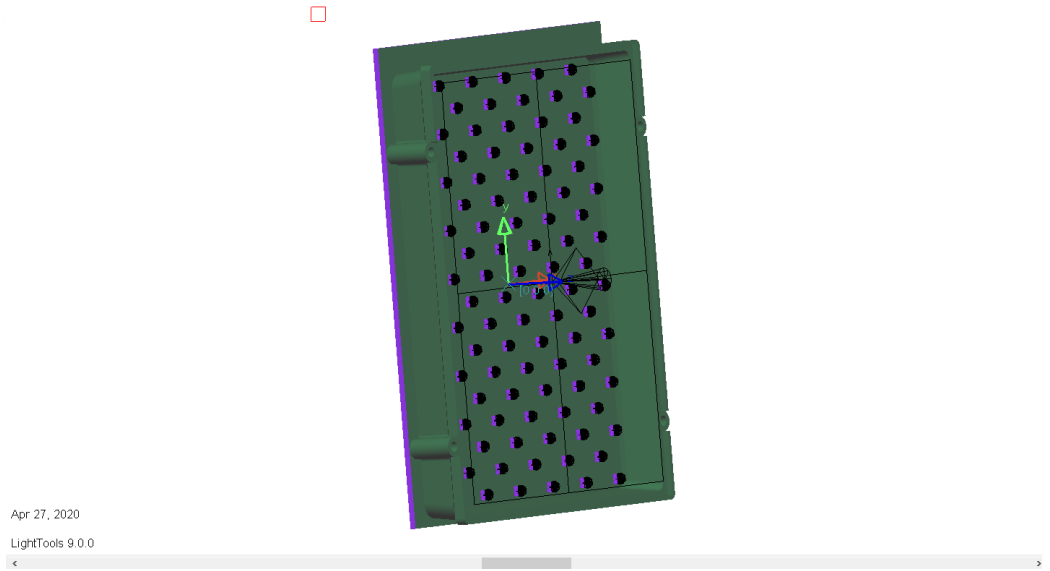


Şekil 5.2 LightTools sistem kılavuzu

Ana ekranın sağ tarafında iki ve üç boyutlu modellerin tasarlanmasının sağlandığı ve bu modellerin çoğaltılabilmesinin sağlandığı bölüm bulunur. Bu bölüm şekil 5.3'te gösterilmiştir. Bu bölümde difüzör, reflektör, mercek tasarımı yapılabilir. Bu tasarımların ana ekranda görüldüğü bölüm ise şekil 5.4'te gösterilmiştir.

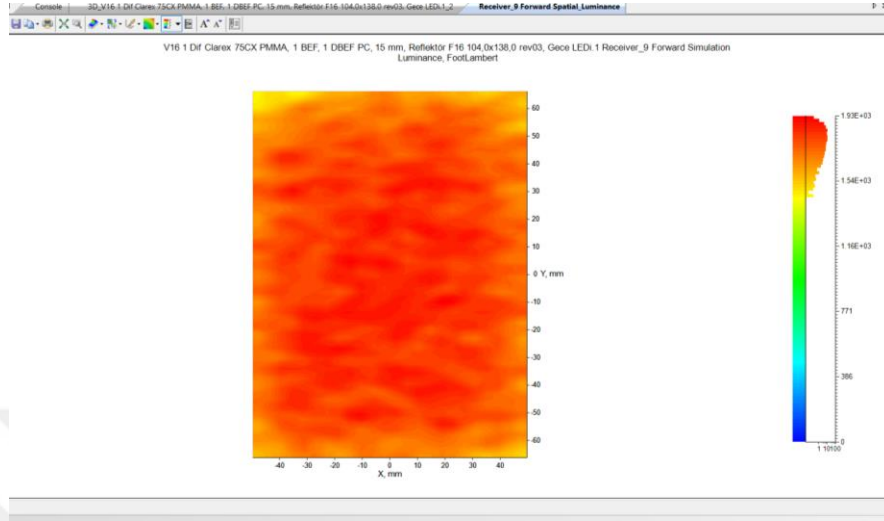


Şekil 5.3 LightTools iki ve üç boyutlu parça tasarlama, çoğaltma bölümü



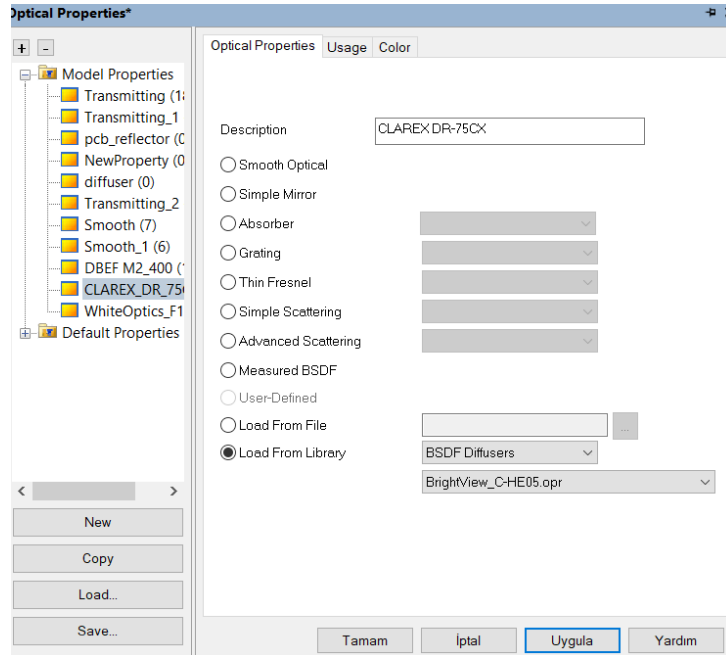
Şekil 5.4 LightTools üç boyutlu parça modeli penceresi

LightTools programında radyometrik ve fotometrik sonuçların çıktısının alındığı simülasyon bölümü bulunmaktadır. Bunun için ayrı pencereler açılır. Şekil 5.5'te bir arka ışık ünitesinin parıldama sonucunun bir örneği gösterilmiştir.



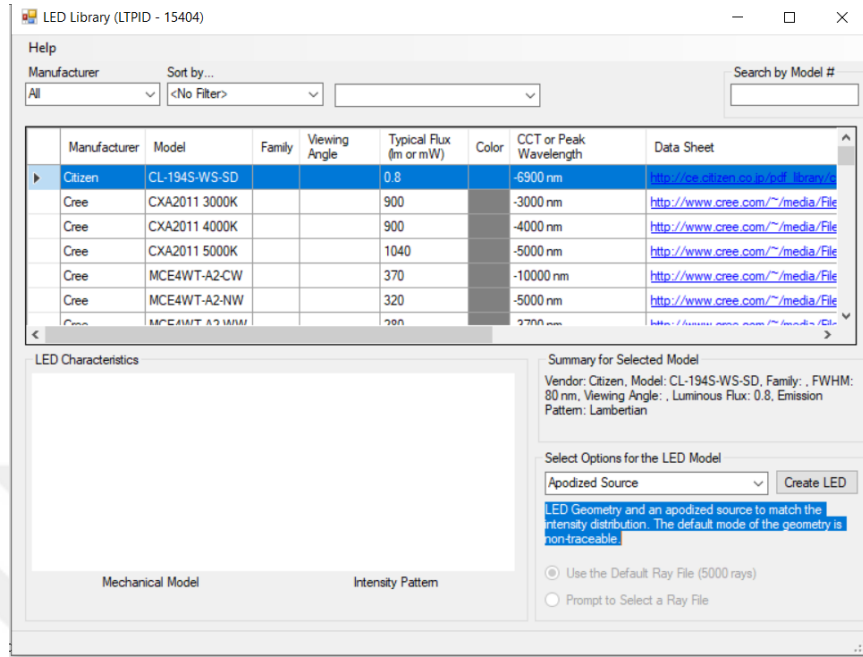
Şekil 5.5 LightTools simülasyon sonuç bölümü

LightTools'ta tasarlanan birimlerin optik özellikleri seçilebilir. Bu birimlerin geçirgen, yansıtıcı gibi pek çok optik özellikleri tanımlanabilir. Arka ışık ünitesinde kullanılan difüzör, reflektör gibi malzemelerin optik özellikleri de önceden tanımlanmıştır. Şekil 5.6'da optik özelliklerin tanımlandığı bölüm gösterilmiştir. Örneğin, bir difüzör tasarlandığında bu difüzörün hangi yüzeyinin istenilen optik özellikte olacağı bu bölümden seçilebilir.



Şekil 5.6 LightTools optik özellik tanımlama penceresi

Son olarak şekil 5.7’de LED kütüphanesi gösterilmiştir. LightTools programının menü bölümünden bu kütüphaneye ulaşılır ve piyasada kullanılan çoğu LED burada bulunur.



Şekil 5.7 LightTools LED kütüphanesi

5.2 Arka Işık Ünitesi Optik Ölçüm Sistemleri

Bir arka ışık ünitesinin optik ölçüm sistemine, parıldama düzensizliği ölçümü denir. Homojenlik (*uniformity*), bir ekranın yüzeyi üzerindeki parıldama veya renkteki değişiklikleri karakterize eden bir metriği belirtir. Ancak, önemli olan tek şey sadece farklılıklar değildir. Ekrandaki parıldama kaymasının gradyanı da önemlidir. Tüm yüzeyinde parıldaması %20’ye kadar yavaş değişen bir ekranda, parıldama farklılığı göz ile kolayca fark edilmeyecektir.

Parıldama homojenliği (*luminance uniformity*) (ya da düzensizlik (*nonuniformity*)) ekran yüzeyi üzerinde parıldama değerlerinin ne kadar sabit kaldığının (veya değiştiğinin) bir ölçümüdür. %100 homojenlik, parlaklığın ekran alanı boyunca mükemmel bir şekilde eşit olduğunu gösterir. %90 homojenlik (%10 düzensizlik) ekranın neredeyse mükemmel olduğu anlamına gelir. Bununla birlikte, istenen ölçüm genellikle düzensizliktir. Parıldamanın ekranın çeşitli noktalarında ölçüldüğünü ve bu örnek için minimum (L_{min}) ve maksimum (L_{max}) parıldamanın belirlenebildiğini varsayalım. Bu durumda, homojenlik ve düzensizlik şu şekilde tanımlanır:

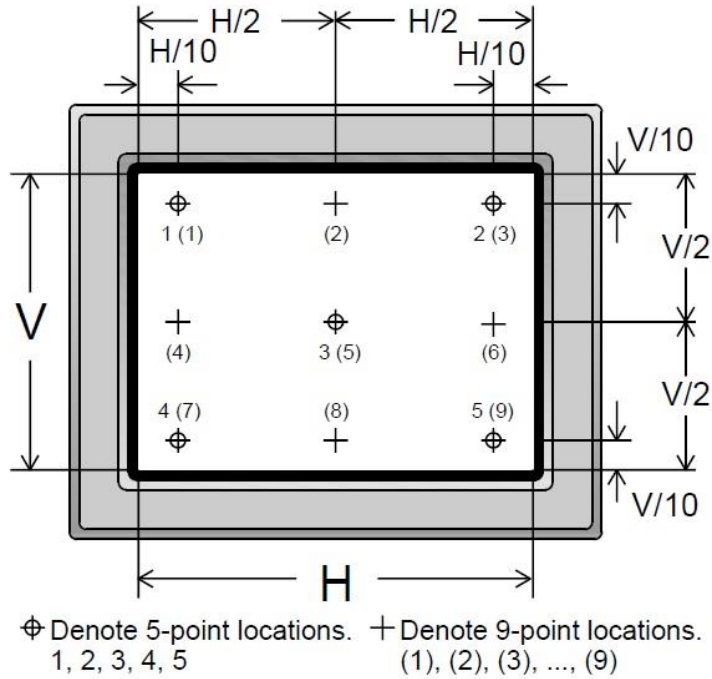
$$\text{homojenlik} = \%100 \frac{L_{min}}{L_{max}}$$

ve

$$\text{düzensizlik} = \%100 \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max}} = \%100 \left(1 - \frac{L_{min}}{L_{max}} \right)$$

Tam ekran beyazın parıldamasını bulmak için, ekranda belirtilen beş (veya dokuz) noktada ölçüm yapılır. Maksimum beyaz parıldamadan, maksimum sapma yüzdesindeki parıldama düzensizliği bulunur.

Beyaz bir tam ekran test deseni görüntülenir ve parıldama ölçer beş (veya dokuz) farklı konumda ölçüm yapacak şekilde ayarlanır (Şekil 5.8). Noktalar soldan sağa ve yukarıdan aşağıya doğru numaralandırılmıştır. Kenar noktaları (dört veya sekiz tanesi) ekran yüksekliğinin 1/10 'u ve görüntü yüzeyinin kenarından ekran genişliğinin 1/10 'u kadardır.

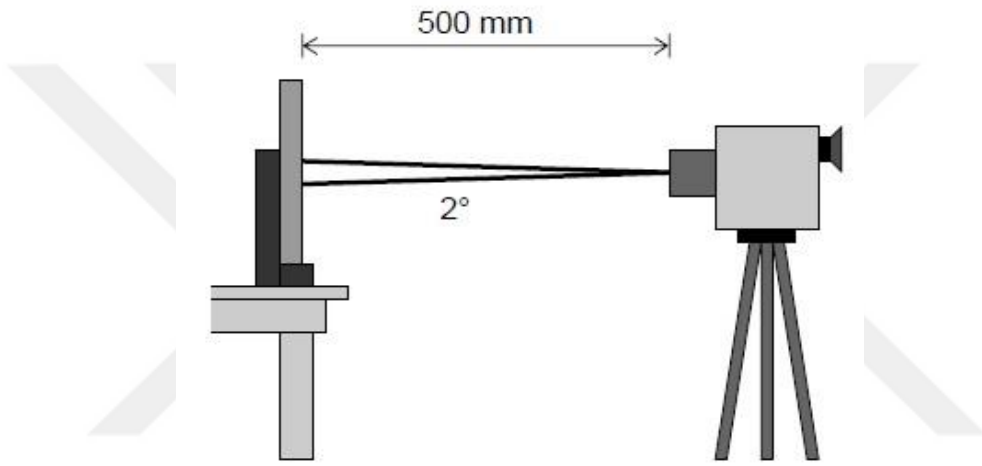


Şekil 5.8 5-nokta veya 9-nokta ölçüm sistemi

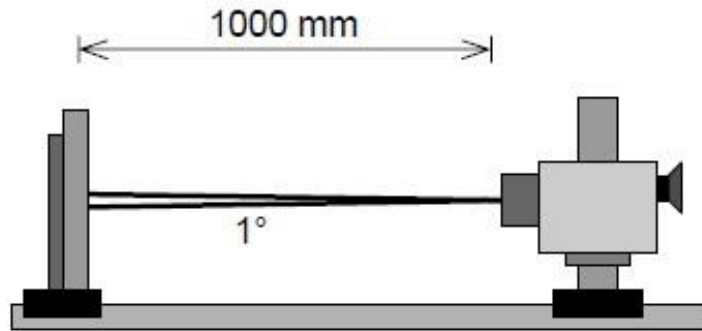
Parıldama L_i ($i = 5$ veya 9), şekil 5.8'de gösterilen beş (veya dokuz) konumdan ölçülür. Karşılaştırma amacıyla beş nokta önerilir. Ölçülen parıldama değerleri kümesinden L_i ($i = 5$ veya 9) minimum parıldama (L_{min}) ve maksimum parıldama (L_{max}) belirlenir ve buradan ortalama parıldama (L_{ort}) değeri hesaplanır. Düzensizlik değeri yukarıda verilen formülden hesaplanır. Daha önce belirtildiği gibi %10 değerine kadar olan düzensizlik

değeri ekran parıldamasının mükemmel oranda olduğunu ve ekranın kullanılabilirliğini verir.

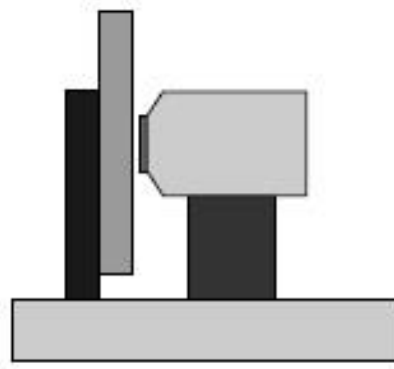
Şimdi, bir ekranın parıldama değişiminin beş veya dokuz nokta ölçüm sistemi ile belirlenen noktalardan nasıl ölçüldüğünü görelim. Bu ölçümler için bir ışık ölçüm cihazı olmalıdır. Işık ölçüm cihazı olarak ekran birimleri için parıldama ölçer kullanılır ve daha önce anlatılan fotometrik ilkelere uygun sonuçlar alınması sağlanır. Parıldama ölçer, ekran üzerindeki tek bir noktada parıldama değerini verir. Şekil 5.9, 5.10 ve 5.11’de üç farklı optik ölçüm sistemi gösterilmiştir. Bu ölçümlerin, karanlık oda denilen laboratuvar ortamında alınması ve ortamda ekran ışığı dışında ışığın olmaması gerekir.



Şekil 5.9 Işık Ölçüm Cihazı (*Light Measurement Device (LMD)*) ve ekranın sabitlendiği bir laboratuvar ortamında (karanlık oda), ekrandan 500 mm uzaklıkta tipik 2° alan açılı spotmetre LMD örneği

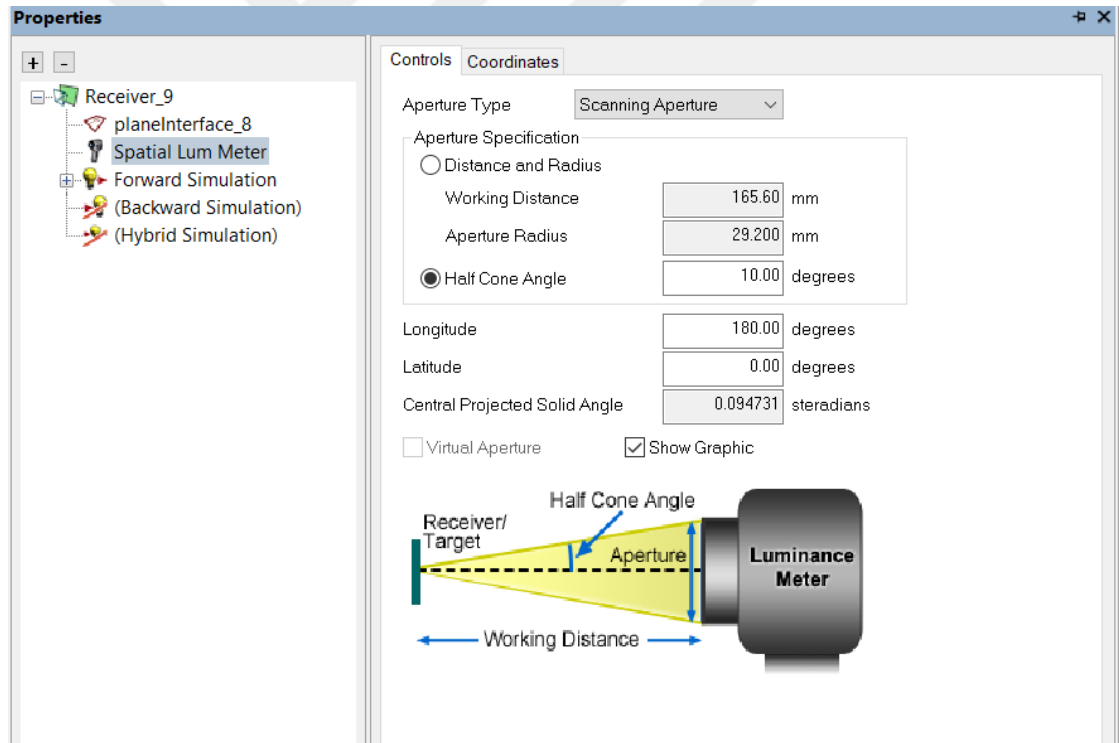


Şekil 5.10 LMD ve ekranın güvenli bir şekilde sabitlendiği bir optik ray düzenlenişinde, ekrandan 1 m uzaklıkta tipik 1° açıklıklı LMD örneği



Şekil 5.11 Optik-Fourier dönüşümü LMD örneği. Ölçüm cihazı ekran yüzeyi üzerine kurulmuştur

LightTools programında istenilen tüm optik ölçüm sistemini kullanabiliriz. Şekil 5.12’de bu bölüm gösterilmiştir. Luminance meter denilen kısım ölçüm cihazıdır ve parıldama değeri almamızı sağlar. Bu ölçüm cihazını istediğimiz mesafede ve istediğimiz açıda kurabiliriz.



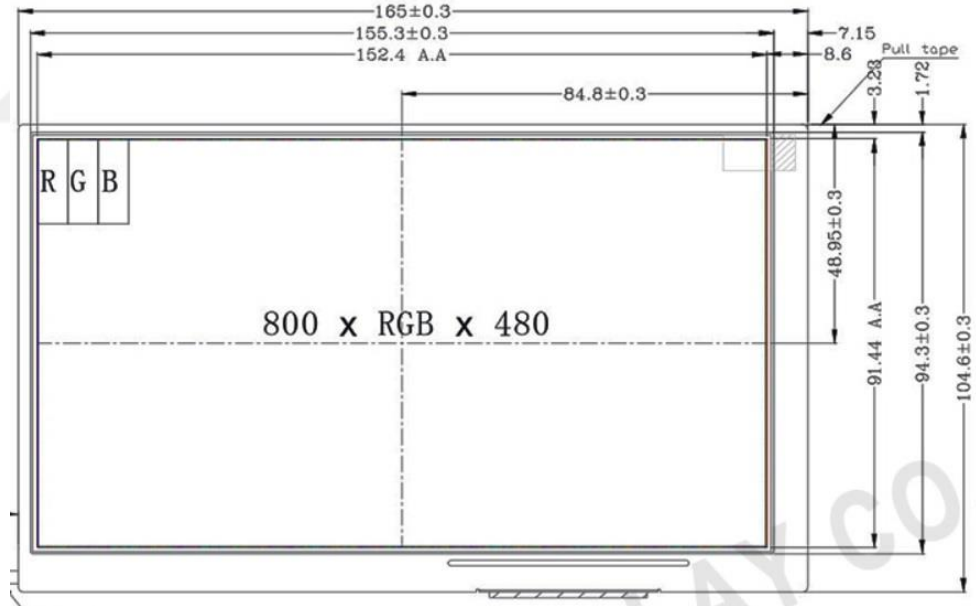
Şekil 5.12 LightTools luminance meter ölçüm özellikleri

5.3 Arka Işık Ünitesi Tasarımları

Burada tasarımı yapılacak arka ışık ünitelerinde kullanılacak 7 inç arka ve kenar-aydınlatmalı iki farklı arka ışık ünitesi tasarlanacaktır. İki arka ışık ünitesinin de optik tasarım aşamaları anlatılacak ve üretimi yapılabilecek şekilde tamamlanacaktır. Son olarak iki tasarımın optik ve mekanik özellikleri karşılaştırılacaktır.

Arka ışık ünitelerinde iki önemli özellik vardır. Birincisi parıldama değeri, ikincisi beş nokta ölçüm sistemine uygun şekilde parıldama düzensizliğinin %20 değerinin altında olmasıdır. Yapılan tasarımlarda düzensizliğin düşük istenir. Parıldama birimi olarak fL kullanılmıştır.

İki arka ışık ünitesinde kullanılacak 7 inç LCD ölçüleriyle beraber şekil 5.13'te gösterilmiştir. LCD'nin dış ölçüleri $165,0\text{ mm} \times 104,6\text{ mm}$ 'dir. LCD'den görüntü alınan yer olan aktif alan ölçüleri ise $152,40\text{ mm} \times 91,44\text{ mm}$ 'dir.



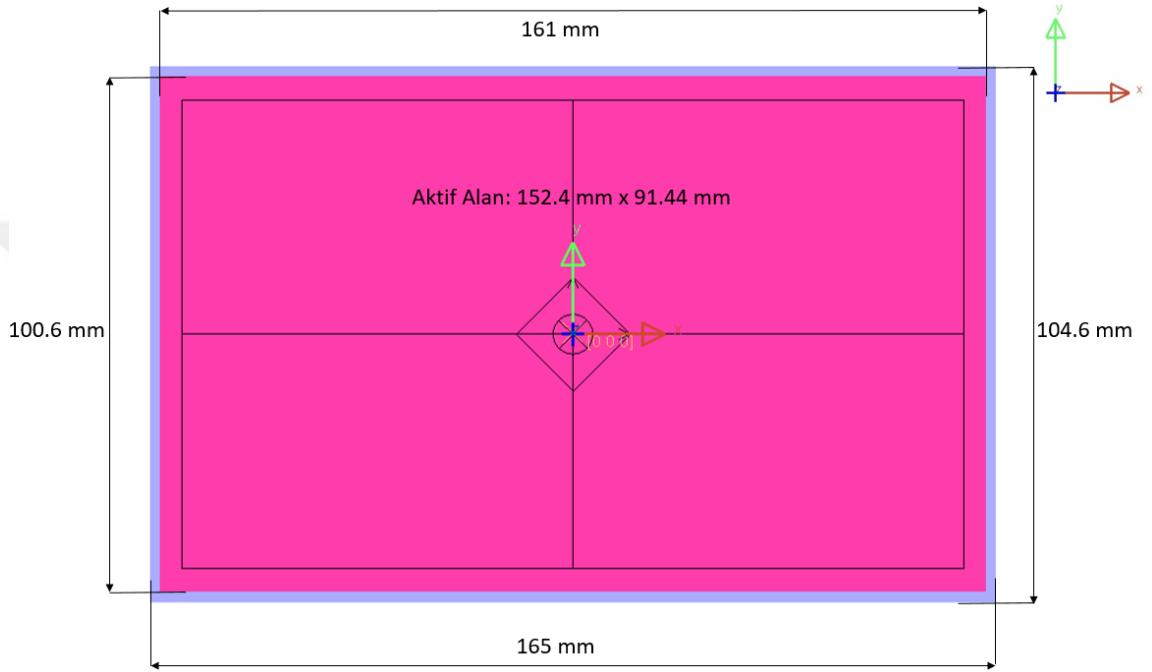
Şekil 5.13 7 inç LCD ölçüleri

5.3.1 Arka-aydınlatmalı arka ışık ünitesi tasarımı

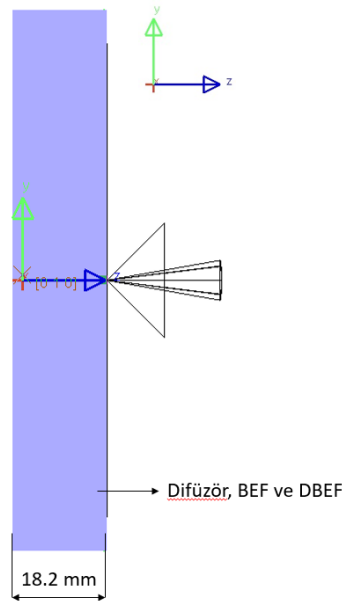
Bu kesime LCD dış ölçüleri ile aynı ölçülerde bir arka-aydınlatmalı arka ışık ünitesi ile başlanmıştır. Genel olarak arka-aydınlatmalı arka ışık ünitelerinde birer adet plastik akrilik difüzör, BEF, DBEF ve reflektör film kullanılır. Tasarım sonuçlarına göre bir adet difüzör film ve/veya bir adet BEF daha eklenebilir. Başlangıç olarak $1,5\text{ mm}$ kalınlığında

plastik akrilik difüzör, bir BEF ve bir DBEF kullanılmıştır. İhtiyaç halinde difüzör film ve/veya BEF ekleyebiliriz. Tasarımlarda LED olarak RGB LED'ler kullanılmıştır.

Şekil 5.14'te arka ışık ünitesinin üstten görünüşünün, şekil 5.15'te ise yandan görünüşünün ölçüleri gösterilmiştir. LCD'nin konulacağı bölüme kadar olan toplam ünite kalınlığı 18,2 mm'dir.

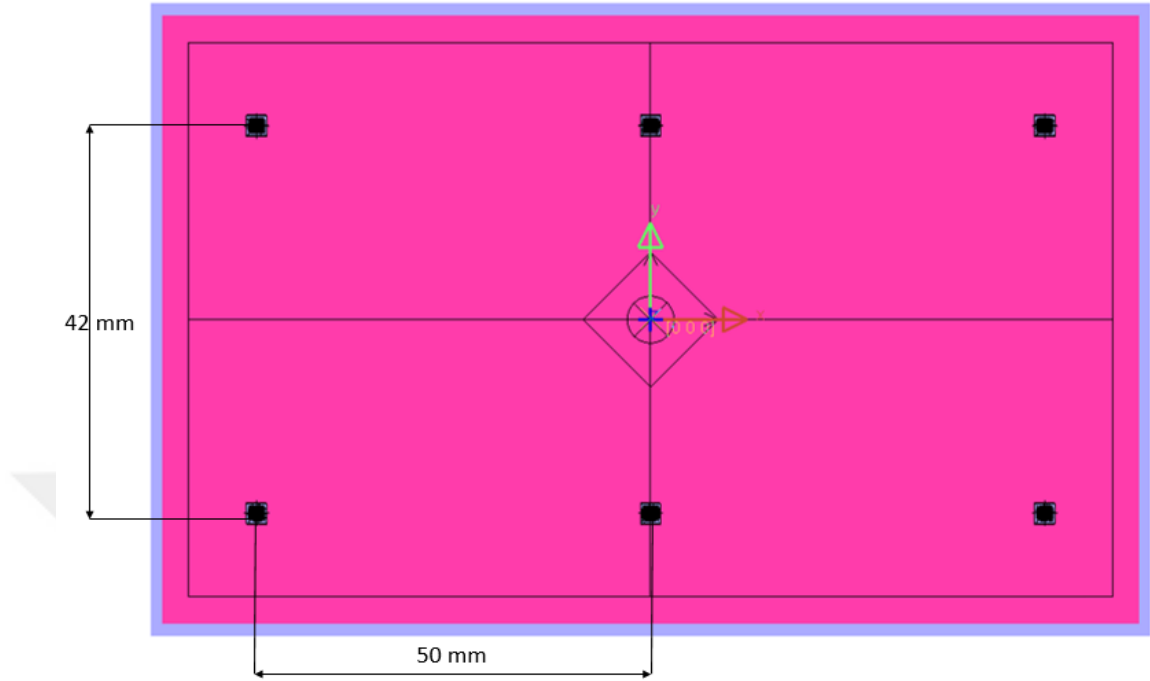


Şekil 5.14 Arka-aydınlatmalı arka ışık ünitesi tasarımının üstten görünüşü



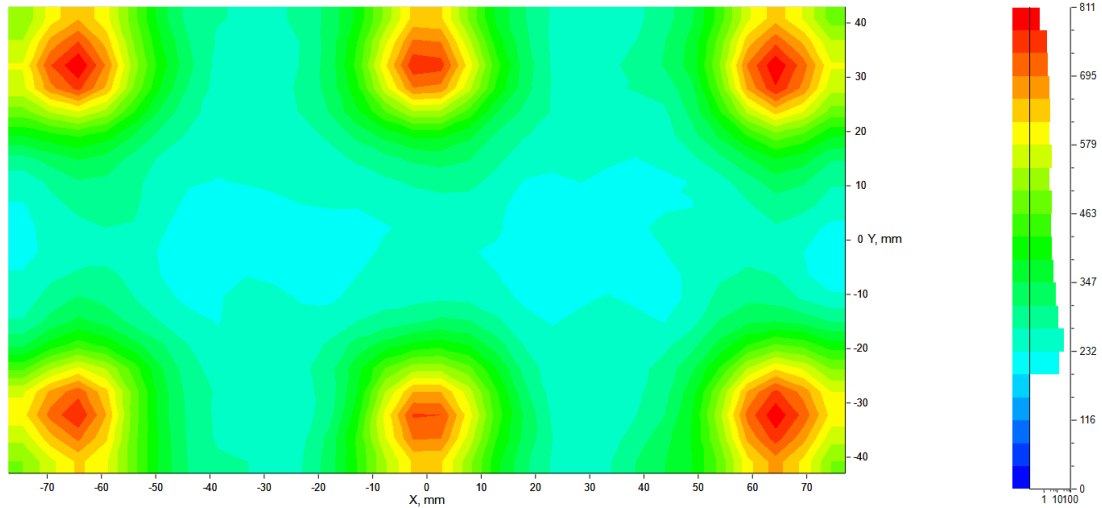
Şekil 5.15 Arka-aydınlatmalı arka ışık tasarımının yandan görünüşü

Birinci tasarım çalışmasında $3 \times 2 = 6$ adet LED kullanılmıştır. Şekil 5.16’da LED’ler arası mesafeler gösterilmiştir.



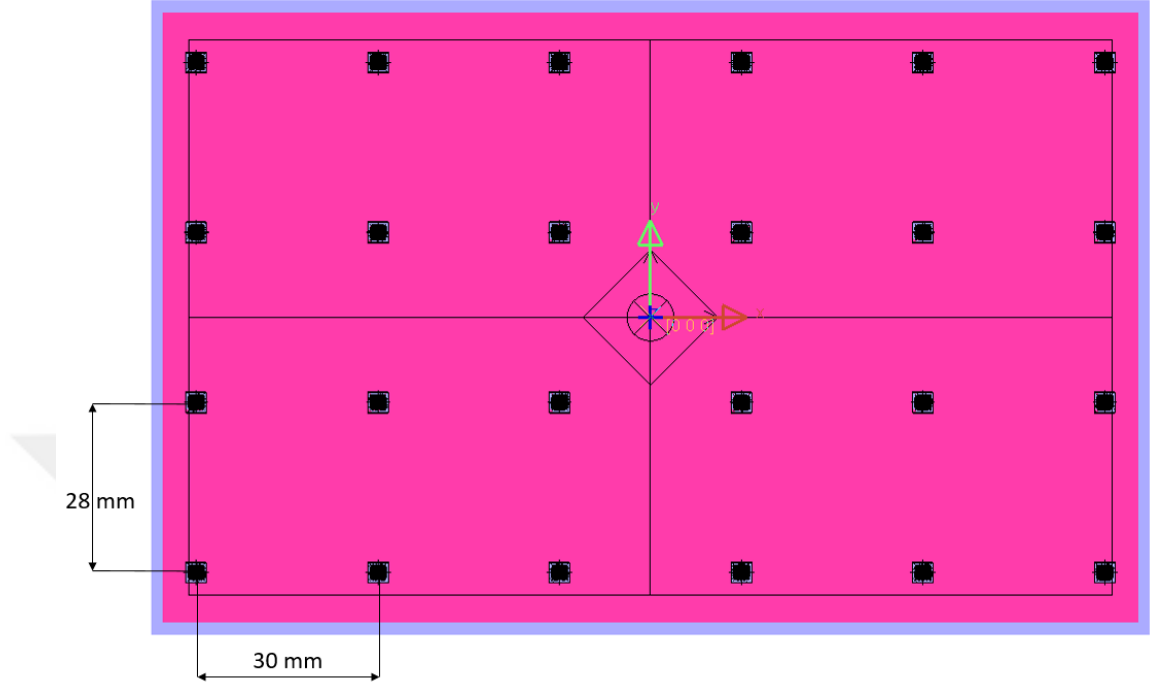
Şekil 5.16 Birinci tasarım çalışmasında LED’ler arası mesafe

Bu tasarımın parıldama sonuçları şekil 5.17’de gösterilmiştir. Tüm LED’ler görülmektedir ve homojenlik sağlanamamıştır.



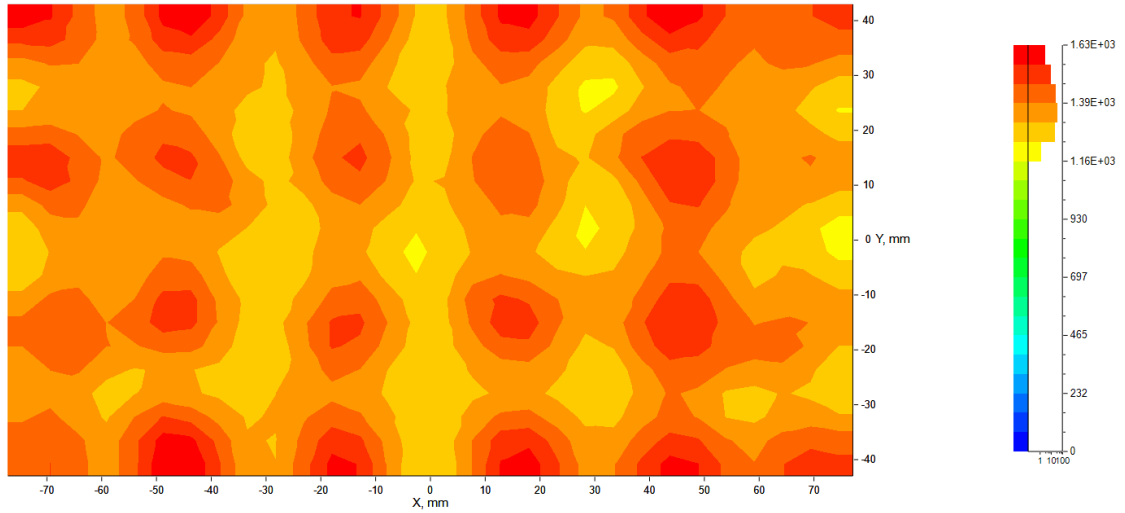
Şekil 5.17 Birinci tasarım çalışması parıldama sonuçları

İkinci tasarım çalışmasında LED sayısı artırılmış ve $6 \times 4 = 24$ adet LED kullanılmıştır. Şekil 5.18’de LED’ler arası mesafe gösterilmiştir.



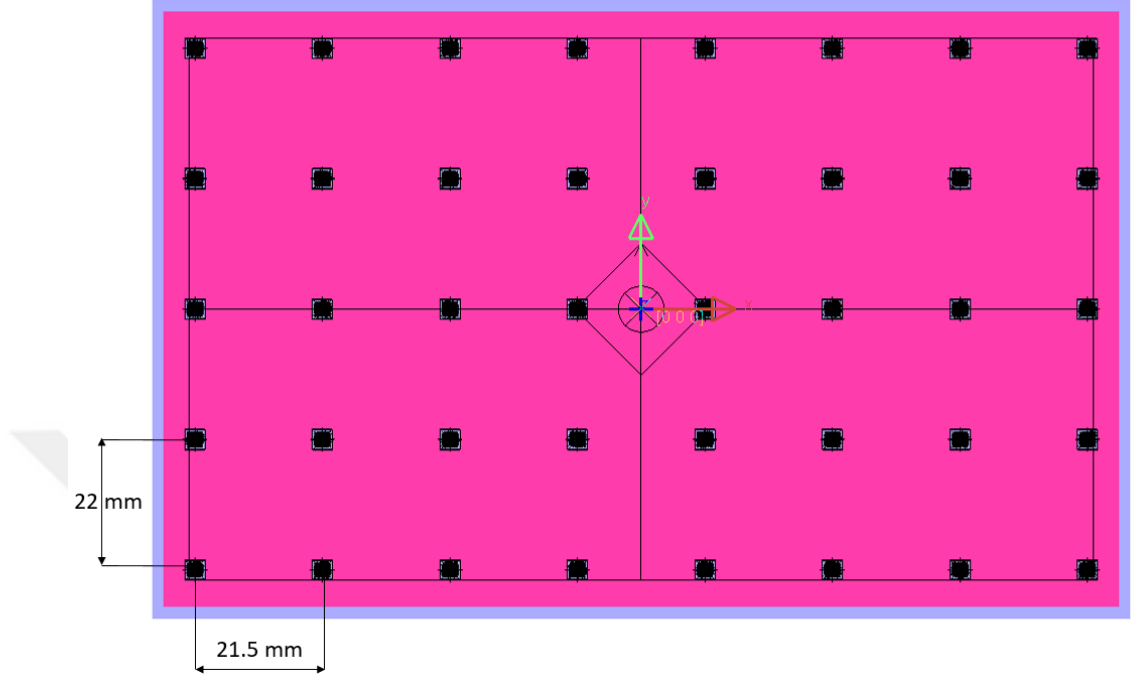
Şekil 5.18 İkinci tasarım çalışmasında LED’ler arası mesafe

Bu tasarımın parıldama sonuçları şekil 5.19’da gösterilmiştir. Tüm LED’ler görülmektedir.



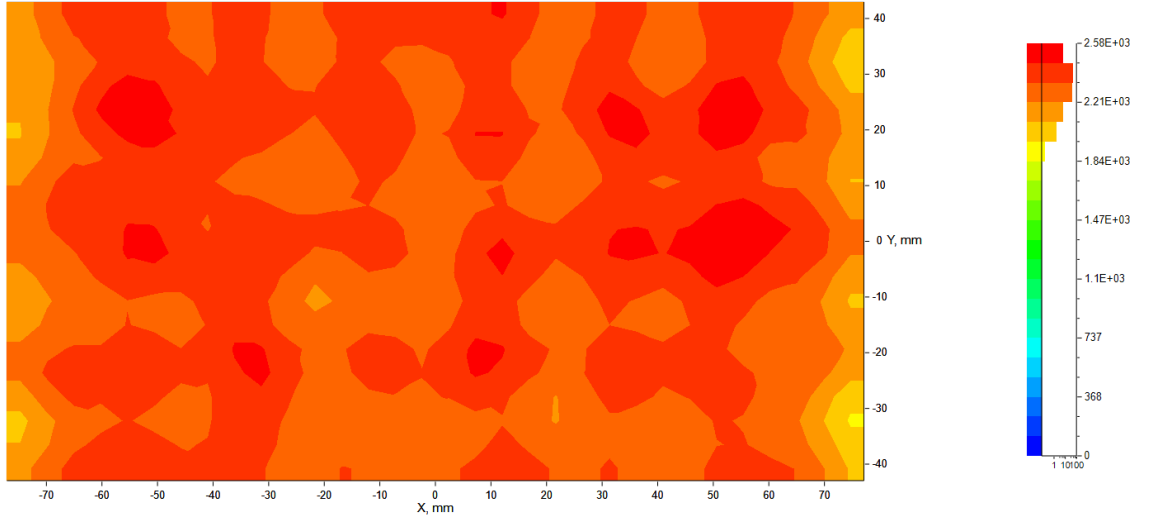
Şekil 5.19 İkinci tasarım çalışması parıldama sonuçları

Üçüncü tasarım çalışmasında $8 \times 5 = 40$ adet LED kullanılmıştır. Şekil 5.20’de LED’ler arası mesafe gösterilmiştir.



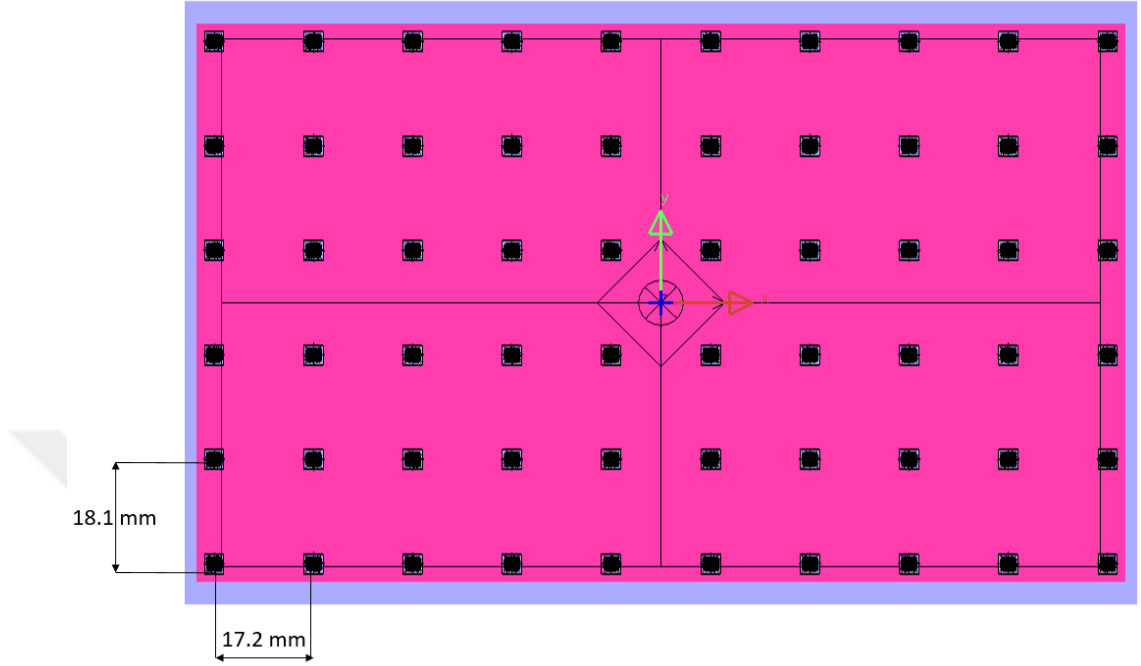
Şekil 5.20 Üçüncü tasarım çalışmasında LED’ler arası mesafe

Bu tasarımın parıldama sonuçları şekil 5.21’de gösterilmiştir. Homojenlik artmasına rağmen LED’ler hala görülmektedir.



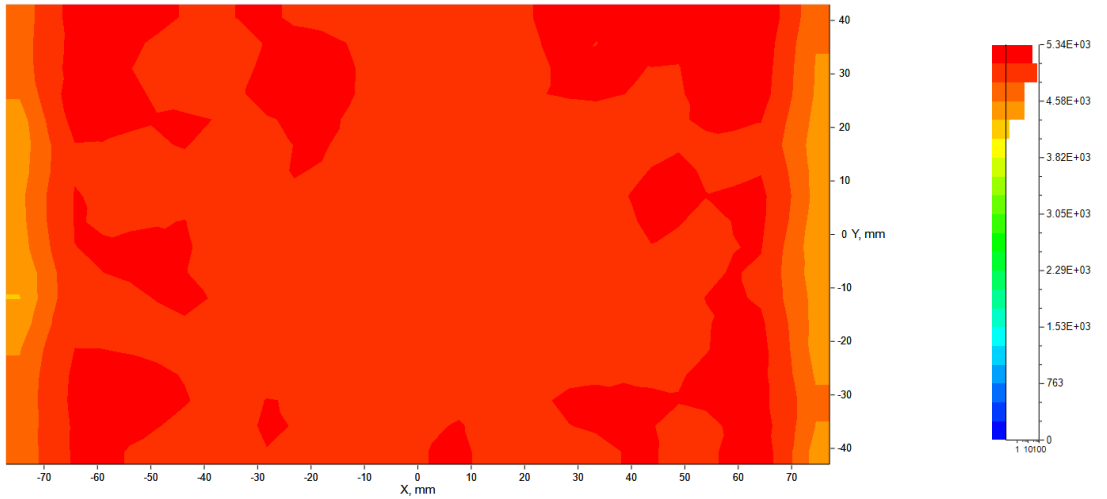
Şekil 5.21 Üçüncü tasarım çalışması parıldama sonuçları

Dördüncü tasarım çalışmasında $10 \times 6 = 60$ adet LED kullanılmıştır. Şekil 5.22’de LED’ler arası mesafe gösterilmiştir.



Şekil 5.22 Dördüncü tasarım çalışmasında LED’ler arası mesafe

Bu tasarımın parıldama sonuçları şekil 5.23’te gösterilmiştir. Homojenlik artmış ve artık LED’ler görülmemektedir. Kenarlarda parıldama değeri düşük bölümler olmasına rağmen göz ile ayırt edilemeyecek seviyededir. Arka ışık ünitesini daha ince yaptığımızda LED’ler görülmeye başlamıştır. Bu yüzden arka ışık ünitesi kalınlığı değiştirilmemiştir.



Şekil 5.23 Dördüncü tasarım çalışması parıldama sonuçları

Dördüncü tasarım çalışması LCD’de kullanılabilecek bir arka ışık ünitesi tasarımıdır. Bölüm 5.2’de anlatılan ve şekil 5.8’de gösterilen beş nokta ölçüm sistemine uygun şekilde parıldama değerlerinin alınacağı koordinatlar ve parıldama sonuçları çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 Dördüncü tasarım çalışmasının beş nokta ölçüm koordinatları ve parıldama sonuçları

Nokta	x-koordinatı (mm)	y-koordinatı (mm)	Parıldama (fL)
1	-60,96	36,58	3516,29
2	60,96	36,58	3455,67
3	00,00	00,00	3671,70
4	-60,96	-36,58	3556,20
5	60,96	-36,58	3533,22

Beş nokta ölçüm sistemine göre %20’ye kadar olan düzensizlik göz ile fark edilemez ve %10 ’dan daha düşük olması ise mükemmel olarak kabul edilir. Dördüncü tasarım çalışması için simülasyon sonucundan elde edilen parıldama sonuçlarına göre minimum parıldama $L_{min} = 3455,67 fL$, maksimum parıldama ise $L_{max} = 3671,70 fL$ ’tir. Düzensizlik formülü,

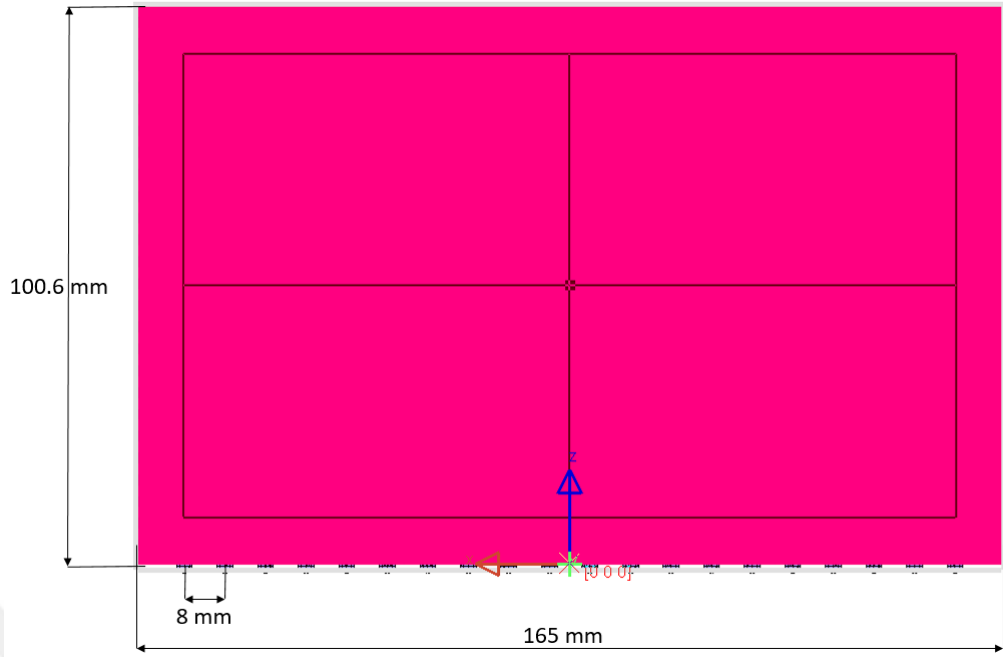
$$\text{düzensizlik} = \%100 \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max}} = \%100 \left(1 - \frac{L_{min}}{L_{max}} \right)$$

ile verilir. Bu formüle göre hesaplama yaparsak dördüncü tasarım çalışmasının düzensizliği %5,90 ve homojenlik $\%100,00 - \%5,90 = \%94,10$ olarak bulunur. Bu sonuca göre düzensizlik ve homojenlik mükemmel seviyededir.

5.3.2 Kenar-aydınlatmalı arka ışık ünitesi tasarımı

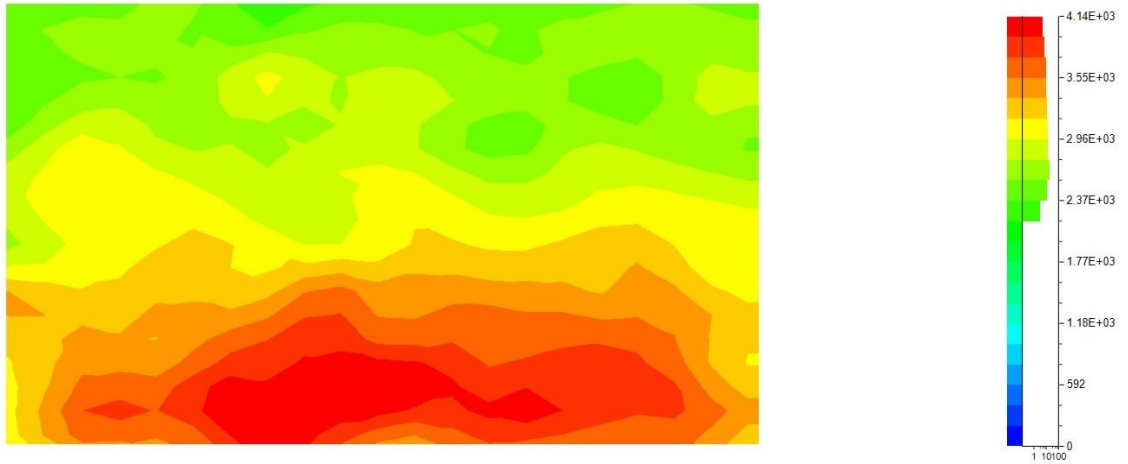
Kenar-aydınlatmalı arka ışık ünitelerinde homojenlik ışık kılavuzu plakası ile sağlanır. LightTools programında ışık kılavuzu plakasının altında bulunan optik desenlerin dizilimi homojenlik sağlanana kadar arka ışık deseni optimizasyonu (*backlight pattern optimization*) bölümü aracılığıyla düzenlenir.

Tasarımda alt kenarda yan yana dizilmiş yirmi adet LED, bir difüzör film ve bir BEF kullanılmıştır. Arka ışık ünitesinin toplam kalınlığı 5 mm’dir. Şekil 5.24’te arka ışık ünitesinin ölçüleri ve LED’ler arası mesafe gösterilmiştir. Aktif alan arka-aydınlatmalı ünite ile aynıdır.



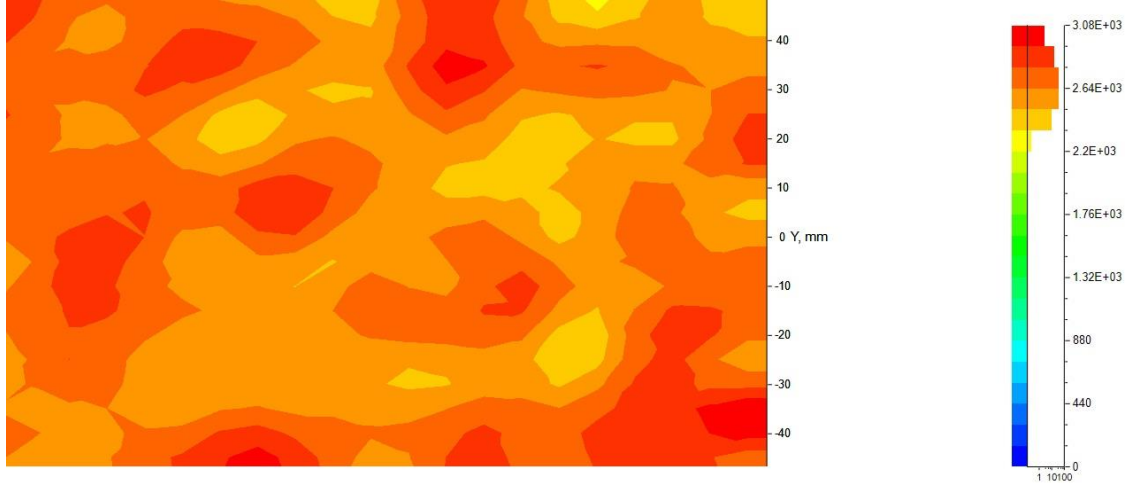
Şekil 5.24 Arka ışık ünitesi tasarımının ve LED'ler arası mesafelerin ölçüleri

LightTools programında optik desenleri eşit aralıklarda dizilmiş ışık kılavuzu plakası ile tasarıma başlanır. Başlangıçta ışık LED'lerin olduğu alt kısımda toplanmış ve şekil 5.25'te parıldama sonucu gösterilmiştir.



Şekil 5.25 Tasarım başlangıcında parıldama sonucu

Arka ışık optimizasyonu bölümü ile ışık kılavuzu plakasında optik desenlerin boyutları ve düzenleri değiştirilerek homojenlik sağlanmıştır. Şekil 5.26'da ışık kılavuzu plakasının optik desenlerinin düzenlendikten sonra elde edilen parıldama sonucu gösterilmiştir. İstenilen homojenlik elde edilmiştir.



Şekil 5.26 Tasarımın son halinin parıldama sonucu

Beş nokta ölçüm sistemine uygun şekilde parıldama değerlerinin alınacağı koordinatlar ve parıldama sonuçları çizelge 5.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 Tasarımın son halinin beş nokta ölçüm koordinatları ve parıldama sonuçları

Nokta	x-koordinatı (mm)	y-koordinatı (mm)	Parıldama (fL)
1	-60,96	36,58	816,19
2	60,96	36,58	813,60
3	00,00	00,00	803,75
4	-60,96	-36,58	802,34
5	60,96	-36,58	799,88

Simülasyon sonucundan elde edilen parıldama sonuçlarına göre minimum parıldama 799,88 fL , maksimum parıldama ise 816,19 fL ’tir. Düzensizlik formülüne göre hesaplama yaparsak düzensizlik %1,99 ve homojenlik %100,00 – %1,99 = %98,01 olarak bulunur. Bu sonuca göre düzensizlik ve homojenlik mükemmel seviyededir.

5.3.3 Arka ışık ünitelerinin karşılaştırılması

Her iki arka ışık ünitesinde de parıldama sonuçları LED’lerden alınabilecek maksimum fotometrik akı değeri ile hesaplanmıştır. İki arka ışık ünitesinin tüm sonuçları çizelge 5.3’te verilmiştir.

Çizelge 5.3 Arka ışık ünitelerinin karşılaştırılması

	Arka-Aydınlatmalı	Kenar-Aydınlatmalı
LED Sayısı	60	20
LED akısı (lm)	10,55	7,00
Genişlik (mm)	161,00	161,00
Yükseklik (mm)	104,60	104,60
Toplam Kalınlık (mm)	18,20	4,00
Minimum Parıldama (fL)	3455,67	799,88
Maksimum Parıldama (fL)	3671,70	816,19
Düzensizlik	%5,90	%1,99
Homojenlik	%93,62	%98,01

6. SONUÇ

Bu tez çalışması ekran birimlerinin arka ışık üniteleri üzerinedir. İkinci bölümde arka ışık ünitelerinin optik tasarımları için bilinmesi gereken aydınlatma optiği kavramları gözden geçirilmiş, üçüncü bölümde aydınlatma optiği için temel radyometrik ve fotometrik ölçümler anlatılmıştır. Dördüncü bölümde ise arka ışık ünitelerinde kullanılan birimler tanıtılmıştır. Beşinci bölümde bir aydınlatma optik tasarım programı olan LightTools hakkında bilgi verilmiş ve arka ve kenar-aydınlatmalı arka ışık ünitesi tasarımları yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında, aynı ölçülerde arka ve kenar-aydınlatmalı LCD arka ışık üniteleri tasarlanmış ve optik özellikleri karşılaştırılmıştır. Kenar-aydınlatmalı arka ışık ünitelerinde kullanılan ışık kılavuzu plakasından dolayı düzensizlik daima çok daha iyidir. Bu da beklenen bir sonuçtur. Her ne kadar kenar-aydınlatmalı arka ışık ünitesinin düzensizliği daha iyi olsa da her iki arka ışık ünitesinin düzensizliği %20'nin altındadır.

Arka-aydınlatmalı arka ışık ünitelerinde düzensizliğin düşük olabilmesi için çok sayıda LED kullanılmak zorundadır ve bu ünitelerde kullanılan LED türlerinin parıldaması çok yüksektir. Kenar-aydınlatmalı arka ışık ünitelerinde ise çok az sayıda LED kullanılarak düzensizliğin düşük olması sağlanabilir ve bu ünitelerde kullanılan LED türlerinin parıldaması daha düşüktür. Burada yapılan tasarımlar için alınan parıldama sonuçları karşılaştırıldığında bu sonuçlar doğrulanır. Arka-aydınlatmalı arka ışık ünitesinde maksimum parıldama $3671,70 fL$ iken kenar-aydınlatmalı arka ışık ünitesinde $816,19 fL$ olarak bulunmuştur. Bu parıldama sonuçları maksimum elektrik akımı olduğu durumda elde edilir. Kullanacağımız 7 inç LCD için düşük voltaj ve elektrik akımı olacağından parıldama seviyesi çok daha düşük olacaktır. Sonuçlardan görüldüğü gibi kenar-aydınlatmalı arka ışık ünitesine sahip ekranlarda parıldama seviyesi sınırlı iken, arka-aydınlatmalı arka ışık ünitesine sahip ekranlarda parıldama seviyesi çok daha yüksek yapılabilmektedir. Örneğin, LCD televizyonlarda parıldama $300 - 600 fL$ aralığındadır. Bu değerlere her iki arka ışık ünitesi ile de ulaşılabilir. İstenilen parıldama değerine ulaşabilmek için kenar-aydınlatmalı arka ışık ünitesi daha fazla enerji tüketimi yapmasına rağmen ekran boyutu büyüdükçe arka-aydınlatmalı arka ışık ünitelerinde LED sayısının çok fazla olması ve düzensizliğin artması kenar-aydınlatmalı arka ışık

 nitelerinin daha fazla tercih edilmesini sağlamaktadır. Eğer çok yüksek parılda ma değerlerinde bir arka ışık  nitesi istenirse arka-aydı nlatmalı arka ışık  nitesi tercih edilir.

Tasarlanan kenar-aydı nlatmalı arka ışık ünitesinin toplam kalı nlığı 5,0 *mm* iken, arka-aydı nlatmalı arka ışık ünitesinin 18,2 *mm*'dir. Kenar-aydı nlatmalı arka ışık ünitelerinin çok daha ince yapı da olması kullanım kolaylığı sağladığı için daha fazla tercih edilmektedir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması çerçevesinde tasarlanan arka ışık üniteleri  retilabilir durumdadır. Kalı nlığın önemsiz olduğu durumda eğer yüksek parılda ma seviyesi istenirse arka-aydı nlatmalı arka ışık  nitesi, parılda ma seviyesinin önemsiz olduğu durumda eğer ince yapı da bir arka ışık  nitesi istenirse kenar-aydı nlatmalı arka ışık  nitesi kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- 3M Dual Brightness Enhancement Films. 2017. 3M Electronic Display Lighting Optical Systems Divisions, 4, United States.
- Anonymous. 2001. VIDEO ELECTRONICS STANDARDS ASSOCIATION DISPLAY METROLOGY COMMITTEE, FLAT PANEL DISPLAY MEASUREMENTS STANDARD Version 2.0. Video Electronics Standards Association, 340, United States.
- Anonim. 2016. Web Sitesi: <https://evrimagaci.org/snell-yasasi-isigin-farkli-ortamlardaki-hareketleri-ve-matematiksel-ispati-434>, Erişim Tarihi: 08.09.2020.
- Anonymous. 2012. Web Sitesi: <http://irkentot.blogspot.com/2012/05/lcd-led-plasma-i-just-need-to-watch-tv.html>, Erişim Tarihi: 01.10.2020.
- Anonymous. 2017. Web Sitesi: <https://turkish.alibaba.com/product-detail/2017-vehicle-industrial-passive-matrix-stn-monochrome-character-lcd-display-modules-60654299955.html>, Erişim Tarihi: 08.09.2020.
- Anonymous. 2018. Web Sitesi: <http://www.alternativephysics.org/book/Diffraction.htm>, Erişim Tarihi: 05.10.2020.
- Anonymous. 2020. Web Sitesi: <https://www.alamy.com/stock-photo-an-active-matrix-thin-film-transistor-tft-liquid-crystal-display-a-24069092.html>, Erişim Tarihi: 15.11.2020.
- Anonymous. 2020. Web Sitesi: <https://sarinenenergy.com/guide-edge-lit-vs-direct-lit-panels/>, Erişim Tarihi: 15.09.2020.
- Anonymous. 2020. Web Sitesi: <https://www.pyrasied.nl/en/product/light-guide-plate-lightplex/>, Erişim Tarihi: 01.11.2020.
- Bass, M., Mahajan, N. V., Strayland, V. E. 2010. Handbook of Optics Volume II Design, Fabrication, and Testing; Sources and Detectors; Radiometry and Photometry, 1271, United States.
- David, S. 2017. LightTools, Choosing the Right Illumination Design Software, SYNOPSIS, 6, United States.
- Dilaura, L. D., Houser, W. K., Mistrick, G. R., Steffy, R. G. 2011. The Lighting Handbook Tenth Edition: Reference and Application. Illuminating Engineering Society of North America, 1329, New York.
- Jurichich, S. 2015. Summary of the TFT LCD Materials Report. DisplaySearch, 10, United States.

- Kobayashi, S., Mikoshiba, S. ve Lim, S. 2009. LCD Backlights. John Wiley & Sons Ltd, 268, United Kingdom.
- Platt, C., Jansson, F. 2015. Encyclopedia of Electronic Components Volume 2 Signal Processing LEDs, LCDs, Audio, Thyristors, Digital Logic, Amplification. Maker Media, Inc., 285, United States.
- Ross, F., Rao, M. 2006. Developments in LCDs. Pira International Ltd., 66, United Kingdom.
- Ryer, A. 1997. The Light Measurement Handbook. International Light, 64, Newburyport.
- Sarı, H. 2011. Optoelektronik Ders Notları, TÜBA Açık Arşiv, Ankara.
- Souk, J., Morozumi, S., Luo, C. F. Ve Bitá, I. 2018. Flat Panel Display Manufacturing. John Wiley & Sons Ltd., 464, United Kingdom.
- Taylor, E. F. 2000. Illumination Fundamentals. Rensselaer Polytechnic Institute, 48, United States.
- Vikuiti Brightness Enhancement Film (BEF) III. 2002. 3M Electronic Display Lighting Optical Systems Divisions, 2, United States.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Güney KARADENİZ

Doğum Yeri : Çankaya

Doğum Tarihi : 27.09.1990

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Mustafa Kemal Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi (2004-2008)

Lisans : Ankara Üniversitesi Fizik Bölümü (2009-2015)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı
(Şubat 2019-Ocak 2021)

Çalıştığı Kurumlar ve Yıl

Plaskab Plastik Kalıp ve Enjeksiyon (2015-2016)

Emge Kollektif Şirketi (2017-2018)

Süreç Savunma Sanayi (2018-2019)

Enginsoft Turkey (2019-Devam ediyor)